

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPACTO DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO SOBRE A VIDA ÚTIL  
DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS**

**JÉSSICA SIQUEIRA DE SOUZA**

**ORIENTADOR: ELTON BAUER**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO – 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**IMPACTO DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO SOBRE A VIDA ÚTIL  
DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS**

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

Prof. Elton Bauer, Dr. (ENC-UnB)  
Orientador

---

Profa. Valdirene Maria Silva Capuzzo, Dr. (ENC-UnB)  
Examinador interno

---

Prof. Ângelo Just da Costa e Silva, Dr. (UPE)  
Examinador externo

---

Profa. Vanessa Silveira Silva, Dr. (DCTM-UFBA)  
Examinador externo

**BRASÍLIA/DF, 18 de dezembro 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, JÉSSICA SIQUEIRA

Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios. [Distrito Federal] 2019.

xvi, 139p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Estruturas e Construção Civil, 2019).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| 1. Durabilidade | 2. Degradação      |
| 3. Fachadas     | 4. Vida útil       |
| I. ENC/FT/UnB   | II. Título (série) |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, J. S. (2019). Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DT-15A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jéssica Siqueira de Souza

TÍTULO: Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios.

GRAU: Doutorado ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Jéssica Siqueira de Souza

SHA 04, Conjunto 04, Chácara 26 – Arnieiras, DF-Brasil

E-mail: jss.siqueira@gmail.com

*Dedico esta tese aos meus pais, Ariovaldo e Márcia,  
e ao meu noivo, Thalles.*

***“Tudo posso naquele que me fortalece.”***  
(Filipenses 4:13)

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me dar a vida e sempre me guiar pelo melhor caminho.

Aos meus familiares que estiveram sempre presentes e em oração por mim. Aos meus pais, Ariovaldo e Márcia, pelo apoio incondicional, carinho e confiança. Ao meu noivo, Thalles, pelo incentivo e paciência. Às minhas irmãs, Andressa e Rayanne, e ao meu cunhado, Bruno, por me apoiarem e estarem sempre dispostos a me ajudar. Aos meus avós, Clarice e Dioratan, pela torcida e pelas preces. À minha prima Fernanda por acreditar e me motivar em meus estudos.

Ao meu orientador, Elton Bauer, pelo tempo dedicado e pelo conhecimento compartilhado ao longo de toda essa jornada. Reconheço a excelente orientação prestada por meios de críticas, elogios e disposição em todos os momentos.

Aos meus professores da Universidade de Lisboa, Jorge de Brito e Ana Silva, que me auxiliaram, incentivaram e não hesitaram em compartilhar conhecimentos e esclarecimentos de aspectos relacionados ao tema durante minha estadia em Portugal.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, em especial Carlos Araújo, Iago Freitas, Jéssica Borges, Carla Piazzarollo, Érica Nóbrega, Yuri Fraga e Larissa Mota, companheiros que se tornaram amigos.

Aos colegas da cidade de Lisboa que foram fundamentais para que meus dias se tornassem mais agradáveis durante a mobilidade de doutorado no Instituto Superior Técnico de Lisboa. Em especial Natalia Melo, Rui Silva, Lismara e Sandra Contente.

À Universidade de Brasília por ter me concedido a oportunidade de realizar o doutorado. Ao Instituto Superior Técnico de Lisboa por permitir a mobilidade de doutoramento, que foi fundamental para agregar conhecimento e para o desenvolvimento da tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro durante a elaboração da tese de doutorado.

À todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com a realização da tese.

## **RESUMO**

### **IMPACTO DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO SOBRE A VIDA ÚTIL DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS**

Autora: Jéssica Siqueira de Souza

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, dezembro de 2019

Uma das principais questões da construção de edifícios está relacionado a durabilidade em virtude da consciência ambiental e desenvolvimento sustentável. Os sistemas de envoltória do edifício, especificamente as fachadas, têm uma contribuição significativa no desempenho e durabilidade do edifício. Os diversos fatores que afetam a durabilidade dos sistemas constituintes dos edifícios permitem realizar a estimativa de vida útil. Esta pesquisa tem como objetivo propor modelos de estimativa de vida útil capazes de ponderar sobre a influência dos fatores condicionantes de degradação de revestimentos cerâmicos de fachadas. Os modelos de previsão de vida útil são obtidos por meio da aplicação do Método de Mensuração de Degradação e da definição do limite máximo aceitável de degradação. Os fatores de degradação são inicialmente analisados de forma qualitativa e posteriormente para aplicação dos modelos, esses são quantificados. Os modelos apontam as variáveis mais relevantes as variáveis referentes a idade dos edifícios, grau de proteção e orientação da fachada e pela dimensão das cerâmicas. Os modelos apresentaram significância, sendo o modelo de regressão múltipla não linear o mais adequado e coerente para a previsão de vida útil de revestimentos de fachadas.

Palavras-Chave: Durabilidade; Degradação; Vida útil; Fachada.

## **ABSTRACT**

### **IMPACT OF DEGRADATION FACTORS ON SERVICE LIFE OF BUILDINGS' FACADES**

Author: Jéssica Siqueira de Souza

Supervisor: Elton Bauer

Postgraduate program in Structural Engineering and Construction

Brasília, December of 2019

One of the main issues of building construction is related to durability due to environmental awareness and sustainable development. Building envelope systems, specifically facades, make a significant contribution to building performance and durability. The various factors that affect the durability of building constituent systems make it possible to estimate service life. The objective of this research is to propose service life estimation models capable of pondering the influence of the degradation conditioning factors of ceramic wall cladding. Service life prediction models are obtained by applying the Degradation Measurement Method and defining the maximum acceptable degradation limit. The degradation factors are initially analysed qualitatively and later for application of the models, these are quantified. The models indicate the most relevant variables the variables related to the age of the buildings, degree of protection and facade orientation and the size of the ceramics. The models presented significance, being the non-linear multiple regression model the most appropriate and coherent for the prediction of façade cladding life.

Key words: Durability; Degradation; Service Life; Facade.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 – ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS DA PESQUISA. ....	5
FIGURA 2. 1 – MATRIZ DA NORMA DE DESEMPENHO .....	10
FIGURA 2. 2 – SOLICITAÇÕES EM SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL (KAZMIERCZAK <i>ET AL.</i> , 2016) .....	11
FIGURA 2. 3 – CLASSES DE FATORES DE DEGRADAÇÃO (ADAPTADO DA ISO 15686-7, 2006) .....	12
FIGURA 2. 4 – FATORES QUE INFLUENCIAM NA DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DOS EDIFÍCIOS E SEUS COMPONENTES (ADAPTADO DE SOUZA <i>ET AL.</i> , 2018).....	15
FIGURA 2. 5 – EXPOSIÇÃO AMBIENTAL EM DIFERENTES ESCALAS GEOGRÁFICAS (ADAPTADO DE HAAGENRUD, 2004). ....	19
FIGURA 2. 6 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO. ....	21
FIGURA 2. 7 – FALHA NAS JUNTAS EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO (SILVA, 2014).....	22
FIGURA 2. 8 – EFLORESCÊNCIA EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO (SILVA, 2014). ....	23
FIGURA 2. 9 – FISSURAS EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO (SILVA, 2014).....	23
FIGURA 2. 10 – DESCOLAMENTO CERÂMICO EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO (SILVA, 2014). ....	24
FIGURA 2. 11 – DELIMITAÇÃO DAS ZONAS CONSTITUINTES DA FACHADA (ADAPTADO DE PINHEIRO, 2017). ....	25
FIGURA 2. 12 – ENSAIOS REALIZADOS IN LOCO NA INSPEÇÃO (SOUZA <i>ET AL.</i> , 2018). ....	28
FIGURA 2. 13 – EXEMPLO DE ORIENTAÇÃO A SER CONSIDERADA, EM FUNÇÃO DO AZIMUTE.....	28
FIGURA 2. 14 – DEFINIÇÃO DE AMOSTRAS DE FACHADA (PIAZZAROLLO, 2019). ....	29
FIGURA 2. 15 – PROCEDIMENTOS PARA MAPEAMENTO DE DANOS.....	30
FIGURA 2. 16 – ABORDAGENS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL. ....	34
FIGURA 3. 1 – ESTRUTURA DA METODOLOGIA.....	36
FIGURA 3. 2 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO DISTRITO FEDERAL.....	41
FIGURA 3. 3 – ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO BRASIL (ADAPTADO DE NBR 15220-3, 2005 E JOAQUIM <i>ET AL.</i> , 2015).....	42
FIGURA 3. 4 – DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DAS AMOSTRAS DE FACHADAS.....	43
FIGURA 3. 5 – EVOLUÇÃO DA DEGRADAÇÃO AO LONGO DO TEMPO DOS EDIFÍCIOS NO DISTRITO FEDERAL. ....	43
FIGURA 3. 6 – DISTRIBUIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	44
FIGURA 3. 7 – FATORES DE DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA FACHADA. ....	45
FIGURA 3. 8 – CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE PROTEÇÃO (ADAPTADO DE DTU 20.1, 1994). ....	48

FIGURA 3. 9 – AÇÃO DOS AGENTES CLIMÁTICOS E VARIÁVEL DE RESPOSTA NO SISTEMA.....	49
FIGURA 3. 10 – AÇÃO DA CHUVA DIRIGIDA SOBRE AS FACHADAS DE EDIFÍCIOS (ADAPTADO DE STRAUBE, 1998 E POYASTRO, 2011).....	50
FIGURA 3. 11 – ETAPAS DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	50
FIGURA 3. 12 – CAMADAS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE VEDAÇÃO PARA SIMULAÇÃO.....	51
FIGURA 3. 13 – CURVAS HIGROSCÓPICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE VEDAÇÃO. .....	52
FIGURA 3. 13 – QUADRANTES CONSIDERADOS PARA AS ORIENTAÇÕES.....	53
FIGURA 3. 15 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DE ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL PARA UM CASO.....	57
FIGURA 3. 16 – CLASSES DE FATORES E SUBFATORES DO MÉTODO FATORIAL.....	62
FIGURA 4. 1 – EXEMPLOS DE MAPEAMENTOS DE DESCOLAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS.....	67
FIGURA 4. 2 – PORCENTAGEM DE ÁREA DEGRADADA.....	70
FIGURA 4. 3 – PORCENTAGEM DE AMOSTRAS PARA CADA NÍVEL DE CONDIÇÃO DAS ANOMALIAS.....	71
FIGURA 4. 4 – COMPORTAMENTO DA DEGRADAÇÃO AO LONGO DO TEMPO DE EDIFÍCIOS LOCALIZADOS NO DISTRITO FEDERAL.....	72
FIGURA 4. 5 – FAIXAS DE CONDIÇÃO DE DEGRADAÇÃO.....	72
FIGURA 4. 6 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS AO LONGO DO TEMPO EM FUNÇÃO DA CLARIDADE DAS CERÂMICAS.....	75
FIGURA 4. 7 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A LONGO DO TEMPO EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DAS CERÂMICAS.....	76
FIGURA 4. 8 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A LONGO DO TEMPO EM FUNÇÃO DO ELEMENTO CONSTRUTIVO.....	76
FIGURA 4. 9 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS EM FUNÇÃO DA PRESENÇA DE JUNTAS.....	78
FIGURA 4. 10 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS EM FUNÇÃO DA ALTURA DO EDIFÍCIO.....	78
FIGURA 4. 11 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS EM FUNÇÃO DA ÁREA DA FACHADA.....	79
FIGURA 4. 12 – TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO.....	79
FIGURA 4. 13 – OCORRÊNCIA DE ANOMALIAS NAS ZONAS CONSTITUINTES DA FACHADA.....	80
FIGURA 4. 14 – VALORES MÉDIOS DE FD PARA AS ZONAS.....	81
FIGURA 4. 15 – VALORES MÉDIOS DE FDW PARA AS ZONAS.....	82

FIGURA 4. 16 –TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DE DEGRADAÇÃO DE FACHADAS AO LONGO DO TEMPO EM FUNÇÃO DO GRAU DE PROTEÇÃO DA FACHADA.....	83
FIGURA 4. 17 – RADIAÇÃO DIÁRIA ACUMULADA AO LONGO DO ANO PARA DIFERENTES ORIENTAÇÕES. ....	85
FIGURA 4. 18 – AMPLITUDE TÉRMICA DIÁRIA AO LONGO DO ANO PARA AS DIFERENTES ORIENTAÇÕES E ABSORTÂNCIA. ....	86
FIGURA 4. 19 – RELAÇÃO ENTRE A DEGRADAÇÃO E A INTENSIDADE DA AÇÃO TÉRMICA. ....	87
FIGURA 4. 20 – VOLUME DE CHUVA DIRIGIDA ACUMULADA E EPISÓDIOS DE CHUVA AO LONGO DO ANO EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO.....	89
FIGURA 4. 21 – VOLUME E QUANTIDADE DE EPISÓDIOS DE CHUVA MENSAL. ....	91
FIGURA 4. 22 – TEOR DE UMIDADE E O VOLUME DE CHUVA AO LONGO DO DIA. ....	92
FIGURA 4. 23 – COMPORTAMENTO DA DEGRADAÇÃO AO LONGO DO TEMPO OBTIDO PELA REGRESSÃO SIMPLES. ....	93
FIGURA 4. 24 – VIDA ÚTIL ESTIMADA POR MEIO DO MÉTODO GRÁFICO. ....	95
FIGURA 4. 25 – DISTRIBUIÇÃO DA VUE PARA IDADE DE CADA CASO PELO MÉTODO DE TRANSPOSIÇÃO DE PONTOS. ....	96
FIGURA 4. 26 – VIDA ÚTIL ESTIMADA POR MEIO DO MÉTODO DE TRANSPOSIÇÃO DE PONTOS. ....	97
FIGURA 4. 27 – IMPORTÂNCIA RELATIVA DAS VARIÁVEIS OBTIDO PELA PADRONIZAÇÃO DOS COEFICIENTES E PELA VARIAÇÃO DE $R^2$ . ....	100
FIGURA 4. 28 – HISTOGRAMA E DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE NORMAL PARA OS RESÍDUOS.....	100
FIGURA 4. 32 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS. ....	101
FIGURA 4. 30 – VIDA ÚTIL ESTIMADA POR MEIO DO MÉTODO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR. ...	102
FIGURA 4. 31 – DISTRIBUIÇÃO DA VUE PARA IDADE DE CADA CASO PELA REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR. ....	103
FIGURA 4. 32 – VIDA ÚTIL ESTIMADA OBTIDA PELO MODELO POLINOMIAL DA REGRESSÃO MULTIPLA NÃO LINEAR.....	105
FIGURA 4. 33 – DISTRIBUIÇÃO DA VUE PARA IDADE DE CADA CASO PELA REGRESSÃO MÚLTIPLA NÃO LINEAR. ....	105
FIGURA 4. 34 – CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO INICIAL DO $N_{FATOR}$ PARA OBTENÇÃO DA VIDA ÚTIL DE REFERÊNCIA. ....	106
FIGURA 4. 35 – VIDA ÚTIL DE REFERÊNCIA OBTIDA POR ANÁLISES DISTINTAS. ....	107
FIGURA 4. 36 – DISTRIBUIÇÃO DA VUE PARA IDADE DE CADA CASO PELO MÉTODO FATORIAL DETERMINÍSTICO.....	108

FIGURA 4. 37 – VIDA ÚTIL ESTIMADA OBTIDA PELO MÉTODO FATORIAL DETERMINÍSTICO PARA A COMBINAÇÃO DAS VARIÁVEIS OBTIDAS NA RML. ....	109
FIGURA 5. 1 – RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA (FD DAS ZONAS) E A INTENSIDADE DE DEGRADAÇÃO (FDW).....	113
FIGURA 5. 2 – ÍNDICE DE GRAVIDADE RELATIVA PARA CADA ZONA.....	114
FIGURA 5. 3 – RELAÇÃO ENTRE A DEGRADAÇÃO E A AÇÃO TÉRMICA SOBRE A FACHADA. ....	114

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 – DESCRIÇÃO DO CONJUNTO DE NORMAS DA ISO 15686 (SILVA, 2015; SOUZA, 2016).....	9
TABELA 2. 2 – ORIGEM E NATUREZA DOS AGENTES DE DEGRADAÇÃO (ADAPTADO DE ISO 15686-1: 2011).....	13
TABELA 2. 3 – CAUSA DAS ANOMALIAS (FLORES-COLEN, 2010) .....	22
TABELA 2. 4 – CRITÉRIO DE NÍVEIS DE CONDIÇÃO (SOUZA, 2016). .....	32
TABELA 2. 5 – CONSTANTES DE PONDERAÇÃO DA IMPORTÂNCIA RELATIVA DAS ANOMALIAS (SILVA, 2014).....	32
TABELA 3. 1 – VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES DE ESTUDO.....	37
TABELA 3. 2 – DESCRIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONDIÇÃO. ....	40
TABELA 3. 3 – COEFICIENTES REFERENTE AO NÍVEL DE CONDIÇÃO DAS ANOMALIAS.....	40
TABELA 3. 4 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE VEDAÇÃO. ....	52
TABELA 3. 5 – ABSORTÂNCIA ADOTADA PARA A REALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO. ....	54
TABELA 3. 6 – EQUAÇÕES GENÉRICAS PARA A REGRESSÃO SIMPLES. ....	57
TABELA 3. 7 – EQUAÇÕES GENÉRICAS PARA A REGRESSÃO MÚLTIPLA. ....	59
TABELA 3. 8 – QUANTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA RML E RMNL.....	60
TABELA 3. 9 – DESCRIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO.....	63
TABELA 3. 10 – RESTRIÇÃO DAS CATEGORIAS DOS FATORES DE DURABILIDADE. ....	63
TABELA 4. 1 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS ANOMALIAS E AS POSSÍVEIS CAUSAS.....	64
TABELA 4. 2 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS ANOMALIAS E OS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO.....	65
TABELA 4. 3 – COEFICIENTE REFERENTE A IMPORTÂNCIA RELATIVA DAS ANOMALIAS.....	65
TABELA 4. 4 – VALORES LIMITES DOS INDICADORES PARA CADA CONDIÇÃO DE DEGRADAÇÃO. ....	73
TABELA 4. 5 – VALORES DE IIT E A OCORRÊNCIA DE CHOQUE TÉRMICO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO. ....	88
TABELA 4. 6 – VALORES DE FIC PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO. ....	90
TABELA 4. 7 – EQUAÇÕES DOS POLINÔMIOS DA REGRESSÃO SIMPLES NÃO LINEAR.....	94
TABELA 4. 8 – SUMÁRIO DO MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR. ....	98
TABELA 4. 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR. ....	99
TABELA 4. 10 – COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO.....	99
TABELA 4. 11 – MODELOS OBTIDOS PELA REGRESSÃO MÚLTIPLA NÃO LINEAR. ....	104
TABELA 4. 12 – QUANTIFICAÇÃO INICIAL DOS VALORES DE $N_{FATOR}$ PARA OBTENÇÃO DA VUR.....	106
TABELA 4. 13 – ANÁLISES PARA A OBTENÇÃO DA VUR.....	107
TABELA 4. 14 – QUANTIFICAÇÃO DOS VALORES DE $N_{FATOR}$ PARA OBTENÇÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTIMADA PELO METODO FATORIAL DETERMINÍSTICO.....	108

TABELA 5. 1 – DISTRIBUIÇÃO QUANTITATIVA DE AMOSTRAS PARA CADA NÍVEL DE CONDIÇÃO. ....	110
TABELA 5. 2 – QUANTIDADE DE AMOSTRAS PARA CADA VARIÁVEL E CADA NÍVEL DE CONDIÇÃO.....	111
TABELA 5. 3 – VUE PARA OS MÉTODOS DE ANÁLISES SINGULARES DAS VARIÁVEIS. ....	116
TABELA 5. 4 –VUE PARA OS MÉTODOS DE ANÁLISES CONJUNTAS DAS VARIÁVEIS. ....	117

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\Delta T$	Amplitude térmica diária
AB	Aberturas
AIJ	<i>Architectural Institute of Japan</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSI	<i>British Standard Institution</i>
CE	Cantos e extremidades
CIB	<i>Conseil International du Bâtiment</i>
DC	Descolamento cerâmico
DIN	<i>German Institute for Standardization</i>
EF	Eflorescência
EOTA	<i>European Organisation for Technical Assessment</i>
EPU	Expansão por umidade
FD	Fator de danos
FDw	Fator de danos ponderado
FDz	Fator de danos da zona
FGD	Fator geral de degradação
FI	Fissuração
FIC	Fator de impacto da chuva
FR	Falha nas juntas
FTD	Método fatorial determinístico
IGR	Índice de gravidade relativa
lit	Índice de intensidade da temperatura
lit	Índice de intensidade de temperatura
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
$K_{(n)}$	Constante de ponderação do nível de condição das anomalias
$K_{c(n)}$	Constante de ponderação da importância relativa das anomalias
LEM	Laboratório de ensaios de materiais
MF	Método fatorial
MG	Método gráfico
MMD	Método de mensuração da degradação
MTP	Método de transposição de pontos
NBR	Norma brasileira
PC	Paredes contínuas
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
RML	Regressão múltipla linear
RMNL	Regressão múltipla não linear
SC	Sacadas
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
TO	Topo
TP	Transição entre pavimentos
UnB	Universidade de Brasília
VU	Vida útil
VUE	Vida útil estimada
VUP	Vida útil de projeto
VUR	Vida útil de referência
WUFI	<i>Wärme Und Feuchte Instationär</i>
$\alpha$	Absortância



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	1
1.2	ENQUADRAMENTO DA PESQUISA.....	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.4	ORIGINALIDADE DO ESTUDO.....	4
1.5	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1	DURABILIDADE DOS EDIFÍCIOS.....	7
2.2	DEGRADAÇÃO DE FACHADAS.....	10
2.3	FATORES DE DEGRADAÇÃO.....	14
2.4	ANOMALIAS COMUNS EM REVESTIMENTO DE FACHADAS.....	20
2.5	MENSURAÇÃO DA DEGRADAÇÃO.....	27
2.6	MÉTODOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL.....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1	MENSURAÇÃO DA DEGRADAÇÃO.....	37
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE ESTUDO.....	40
3.3	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO.....	45
3.4	MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL.....	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
4.1	ADEQUAÇÃO DOS COEFICIENTES.....	64
4.2	DEGRADAÇÃO DE FACHADA.....	70
4.3	COMPORTAMENTO DA DEGRADAÇÃO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO.....	74
4.4	ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL.....	92
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>118</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	118
6.2	PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS.....	120
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>121</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A presente tese de doutorado discorre a respeito do impacto dos agentes de degradação sobre a vida útil de revestimentos de fachadas por meio da aplicação de diversos métodos de previsão de vida útil. A análise do efeito dos agentes de degradação é auxiliada pela caracterização e modelação do fenômeno de degradação de sistemas de revestimentos de fachadas de edifícios residenciais situados no Distrito Federal, Brasil.

## 1.1 Contextualização do tema

Uma das principais questões da construção de edifícios está relacionada a durabilidade, em virtude da consciência ambiental e desenvolvimento sustentável. Os sistemas de envoltória do edifício, especificamente as fachadas, têm contribuição significativa no desempenho e durabilidade do edifício. As fachadas têm como principais funções a proteção do edifício contra as intempéries e garantir segurança e conforto dos usuários. Os diversos agentes atuantes sobre o edifício, denominados como agentes de degradação, compreendem todos aqueles ligados ao clima, fatores biológicos, esforços mecânicos e incompatibilidades de utilização.

A norma de desempenho NBR 15575 (2013), em revisão, apresenta requisitos e critérios de desempenho e pondera sobre a vida útil. Essas informações se apresentam como limites de fácil compreensão e balizam a avaliação de degradação tanto de edifícios já existentes como de definições de comportamentos de edifícios novos. O nível de degradação apresentado pelas fachadas tem sido superior ao esperado, principalmente devido às mudanças na utilização e nas exigências dos usuários. Além disso, o aumento da poluição nos centros urbanos interfere nas condições ambientais e eleva o nível de degradação. Portanto, fachadas submetidas às condições desfavoráveis possivelmente apresentam qualidade e durabilidade comprometidas. A qualidade e a durabilidade das construções habitacionais melhoram quando há controle rigoroso do projeto e execução das edificações e há regularidade na ação de manutenção dos sistemas.

O efeito dos diversos fatores de degradação sobre a durabilidade dos sistemas constituintes dos edifícios é uma das principais dificuldades encontradas na estimativa de vida útil. Os modelos matemáticos que permitem a previsão de vida útil são ferramentas que servem para

avaliar o nível de degradação e o desempenho das edificações. A estimativa de vida útil está relacionada à aspectos econômicos e ambientais das construções impactando diretamente na durabilidade. A adaptação dos modelos de previsão de vida útil à realidade em que se encontra o objeto de estudo é de extrema importância, devido a variação dos fatores que afetam a durabilidade, tais como condições climáticas, cultura local, tipologia construtiva, tipo de materiais, entre outros.

Diferentes modelos de previsão de vida útil são apresentados nesse estudo cumprindo as diretrizes gerais descritas pela ISO 15686-2 (2012). Os modelos de previsão de vida útil são calibrados pelo banco de dados de edifícios residenciais do Distrito Federal. O banco de dados compreende 307 casos de fachadas resultando em uma extensão de área inspecionada de aproximadamente 80.000 m<sup>2</sup>. A busca do melhor modelo de previsão de vida útil e o efeito dos fatores que interferem no desempenho das fachadas deve ser representativo para o fenômeno estudado, isto é, o modelo apresenta sentido físico. Além disso, o modelo de previsão deve considerar resultados que sejam precisos, passíveis de comparação e de simples aplicação.

Com intuito de elucidar as dificuldades sobre o tema, no presente estudo é apresentado uma discussão perspicaz sobre o comportamento da degradação em função da configuração das fachadas e das condições climáticas. A estimativa de vida útil de fachadas é obtida a partir da adaptação dos modelos à realidade das amostras analisadas. Desta forma, a complexidade e a sensibilidade do modelo a uma elevada variação dos fatores são reduzidas. Essa abordagem permite uma avaliação mais realista dos efeitos dos agentes de degradação sobre vários métodos de previsão de vida útil de revestimentos de fachadas, contribuindo significativamente no estudo da durabilidade das construções. Além disso, essa serve como ferramenta para planejamento de tempo e custo relacionados a execução e a operações de manutenção.

## 1.2 Enquadramento da pesquisa

Neste sentido, a elaboração da presente tese de doutorado insere-se no contexto nacional quanto a durabilidade em sistemas de vedações verticais e no contexto internacional quanto ao planejamento de vida útil. O tema de durabilidade de edifícios abordado nesta pesquisa tem o enfoque em aspectos relacionados aos efeitos dos agentes de degradação na vida útil de sistemas de revestimento de fachadas de edifícios localizados na cidade de Brasília, Brasil. O

aumento nos últimos anos do desenvolvimento de pesquisas relativas ao tema de durabilidade das edificações reflete a importância desse tema. No âmbito da linha de investigação sobre Desempenho, Vida Útil, Degradação e Patologia no Ambiente Construído do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) com ênfase na Construção Civil da Universidade de Brasília, as pesquisas desenvolvidas são:

- Antunes, G. R. (2010) Estudo de manifestações patológicas em revestimentos de fachada em Brasília - Sistematização da incidência de casos;
- Silva, M. N. B. (2014) Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF;
- Costa, M. S. (2014) Identificação de danos em fachadas de edificações por meio de imagens panorâmicas geradas por plataforma robótica fotográfica;
- Zanoni, V. A. G. (2015) Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília;
- Souza, J. S. de (2016) Evolução da degradação de fachadas - Efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes;
- Nascimento, M. L. M. (2016) Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios;
- Pinheiro, P. I. S. (2016) Aplicação do método de mensuração da degradação (MMD) ao estudo das fachadas de edifícios de Brasília;
- Henrique, E. S. (2017) Sensibilidade à degradação das fachadas – Estudo dos aspectos construtivos;
- Santos, D. G. (2018) Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios;
- Piazzarollo, C. B. (2019) Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada;

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral consiste em propor modelos de estimativa de vida útil capazes de ponderar sobre a influência dos fatores condicionantes de degradação de revestimentos cerâmicos de fachadas.

O objetivo geral proposto é alcançado em simultâneo com os seguintes objetivos específicos:

- Adequar a quantificação da degradação por meio do aumento de dados que preencham as lacunas existentes e adequação dos coeficientes do indicador de degradação.
- Identificar a relevância dos fatores condicionantes de degradação no processo de degradação, de forma a quantificar e esclarecer a influência desses fatores.
- Definir o limite de degradação aceitável para fachada em revestimento cerâmico baseado na observação de condições reais e na literatura existente.
- Definir a vida útil a partir de modelos representativos que indiquem as variáveis que condicionam a degradação, considerem a realidade do fenômeno estudado e sejam de fácil manipulação e entendimento por profissionais na área de engenharia civil.

#### 1.4 Originalidade do estudo

A originalidade da tese consiste na proposição e quantificação da vida útil por modelos estatísticos e determinísticos aplicados a edifícios situados em Brasília. Embora os modelos apresentem condições particulares, esses são representativos e podem ser replicados em outras regiões brasileiras com climas similares situadas na zona bioclimática 4, em qual se insere a amostra de estudo.

#### 1.5 Organização da tese

Essa tese de doutorado tem interesse em estabelecer um modelo preditivo do estado de degradação e, por conseguinte, a vida útil de fachadas de edifícios residenciais localizados na cidade de Brasília. O estado de degradação é expresso por indicador de degradação e considera como variáveis independentes aspectos relacionados ao material, projeto e condições de exposição da fachada. Para tanto, a tese é estruturada em cinco capítulos conforme apresentado na Figura 1.1.

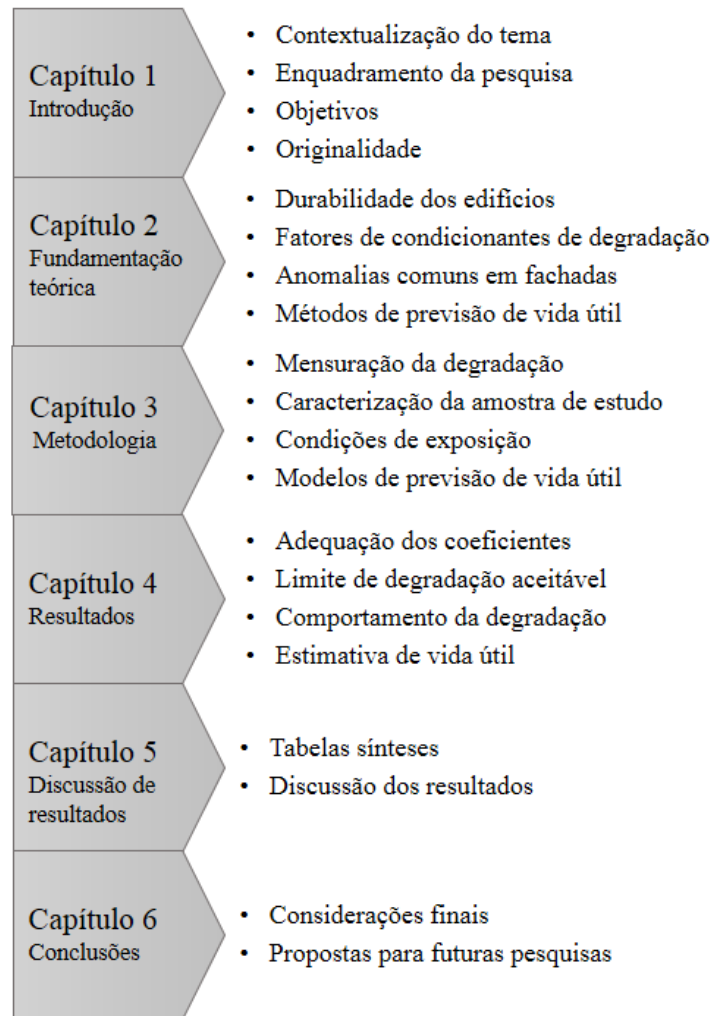


Figura 1. 1 – Organização dos capítulos da pesquisa.

O capítulo 1 destina-se a contextualização do assunto abordado, bem como designar os objetivos propostos e a organização do trabalho. A relevância do estudo da durabilidade das construções está contida na motivação e a justificativa do tema apresentado nesse capítulo.

No capítulo 2 é discorrido sobre o estudo da durabilidade sob uma perspectiva da norma internacional ISO 15686-1 (2011) e da norma brasileira NBR 15575-1 (2013). Em seguida, o aspecto da durabilidade é justaposto ao sistema de revestimento de fachada promovendo a explanação sobre os fatores que interferem no surgimento de anomalias e no processo de degradação. Por fim, os métodos de previsão de vida útil são explorados.

O capítulo 3 expõe a metodologia aplicada a fim de cumprir o objetivo proposto. O procedimento se inicia com descrição dos coeficientes do indicador de degradação Fator Geral de Degradação. Em seguida, a caracterização da amostra e as condições de exposição dos

edifícios estudados são apresentadas. Por fim, a descrição dos modelos de previsão de vida útil é apresentada.

O capítulo 4 explora os resultados obtidos. Inicialmente é apresentado os valores dos coeficientes do indicador de degradação ajustado. Em seguida, as condições de exposição das fachadas por meio da análise de características de cada edifício são exploradas. A vida útil é estimada e analisada conjuntamente com as influências das características particulares de cada edifício. Por fim, os principais resultados obtidos são comentados assim contribuindo na superação de algumas das limitações existentes no estudo da durabilidade das edificações.

No capítulo 5 são apresentadas tabelas sínteses, em que revelam a interface de cada fase da tese apresentada na metodologia. Há uma dependência da sequência das fases, pois a realização de cada fase depende do resultado da anterior. No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões da pesquisa e os objetivos alcançados. Ainda neste capítulo é apresentado s principais contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado assuntos que permitam fundamentar o conteúdo discorrido na tese. A temática sobre durabilidade tem sido fortemente discutida nos últimos anos. Inicialmente nesta pesquisa o tema de durabilidade dos edifícios é retratado com o enfoque no revestimento de fachadas. A durabilidade pode ser afetada pela degradação dos sistemas do edifício. Em seguida os fatores de degradação e a anomalias comuns em sistemas de fachadas são abordados. Ao final do capítulo, os métodos de estimativa de vida útil serão apresentados.

### 2.1 Durabilidade dos edifícios

A fachada é um dos sistemas construtivos mais solicitados pelos diversos agentes atuantes sobre o edifício, tais como a chuva, vento, radiação solar, entre outros (Rudbeck, 1999; Freitas *et al.*, 2013; Pérez-Bella *et al.*, 2017a). Quando a fachada não atende o desempenho requerido, essa compromete a durabilidade do edifício como um todo. Aliado ao conforto e a estética do edifício, a durabilidade é uma exigência presente na construção de edifícios (John *et al.*, 2002; Amorim *et al.*, 2014). A mudança na exigência dos usuários ou da utilização dos sistemas pode interferir na vida útil requerida do sistema e, conseqüentemente, na durabilidade.

A consciência ambiental e desenvolvimento sustentável incentivam maior durabilidade dos sistemas, uma das principais questões da construção de edifícios. Ações que promovem a sustentabilidade ambiental e envolvem o uso racional dos recursos naturais sem agredir o meio ambiente buscam indiretamente sistemas mais duráveis (John *et al.*, 2001; Freitas *et al.*, 2013). Desta forma a relação entre a sustentabilidade e a durabilidade dos sistemas constituintes dos edifícios torna-se perceptível.

A durabilidade é a capacidade do edifício ou seus componentes apresentar o melhor desempenho quando submetido a condições adversas de exposição ambiental, sem necessidade de reparação ou substituição de seus elementos (ISO 15686-2, 2012). Por outro lado, a degradação é uma consequência do processo de envelhecimento natural, associado à exposição a condições ambientais adversas (ISO 15686-2, 2012; Madureira *et al.*, 2017).



Atualmente existem diversos documentos publicados que propõem soluções relevantes sobre o tema de durabilidade. Um dos primeiros documentos que se referiu a questão de durabilidade e vida útil, em 1989, foi o *Guide for Service Life Planning of Buildings* proposto pelo *Architectural Institute of Japan*. O guia japonês apresenta uma metodologia, denominada *Factor Method*, para previsão de vida útil do edifício como um todo ou de seus componentes. A avaliação do fim da vida útil é baseada na deterioração física e por obsolescência do edifício ou componente avaliado (Frohsdorff *et al.*, 1999; Rudbeck, 1999; Silva *et al.*, 2012).

Posteriormente, a norma britânica *British Guide to Durability of Building Elements, Products and Components* foi publicada em 1992 recomendando que o fim de vida útil seja determinado a partir de conhecimentos obtidos de construções similares com base científica em uma avaliação do estado limite de degradação ou resultados de testes acelerados (BSI 7543, 1992; Bordalo *et al.*, 2011). O estado limite de degradação se refere ao momento em que o sistema não cumpre suas funções e podem afetar a segurança dos usuários. O guia adverte ainda que seja realizado mais de uma forma de estimação de vida útil e haja comparação entre eles, devido a possível imprecisão de alguns métodos (Rudbeck, 1999; Madrigal *et al.*, 2015).

Em 1995, o documento canadense *Guideline on Durability in Buildings* foi publicado. Este documento fortaleceu o conhecimento sobre durabilidade baseado nas informações dos guias britânico e japonês. O documento canadense inclui também edifícios renovados e indicações de quais e quando usar os métodos (Rudbeck, 2002; Jernberg *et al.*, 2004).

A elaboração do esboço da norma ISO 15686-1 (2011) foi iniciada em 1997 (Davies e Wyatt, 2005). Atualmente o conjunto de normas ISO 15686 – *International Standards Organization* é um dos documentos mais relevantes no que diz respeito à durabilidade de edifícios. Esta reúne informações de diversas organizações internacionais, tais como CIB (*Conseil International du Bâtiment*), RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*), EOTA (*European Organisation for Technical Assessment*) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*). A norma ISO 15686 é constituída por 11 partes (Tabela 2.1), em que são descritos os princípios gerais, enquadramento e procedimentos da metodologia de previsão de vida útil.

Embora a renomada norma ISO 15686 seja uma das principais no tema de durabilidade, o método de previsão de vida útil sugerido pela norma apresenta algumas limitações, tais como desconsiderar o comportamento não linear do processo de degradação e apresentar elevada

variação do resultado perante a pequena alteração nos fatores de degradação (Hovde, 1998; Davies e Wyatt, 2005; Silva *et al.* 2014). Devido ao fenômeno de degradação ser suscetível a diversas variáveis e incidir diretamente sobre a vida útil, a estimativa de vida útil apresenta variabilidade (Rudbeck, 1999; Silva *et al.*, 2016).

Tabela 2. 1 – Descrição do conjunto de normas da ISO 15686 (Silva, 2015; Souza, 2016).

	Título	Descrição
ISO 15686 – 1 (2011)	<i>General principles and framework</i>	Identifica e estabelece os princípios e procedimentos que se aplicam ao projeto e ao planejamento da vida útil das edificações novas e já construídas;
ISO 15686 – 2 (2012)	<i>Service life prediction procedures</i>	Descrevem os procedimentos, baseados no desempenho técnico e funcional, que facilitam a previsão da vida útil dos componentes do edifício, além de fornecer uma estrutura de princípios e requisitos;
ISO 15686 – 3 (2002)	<i>Performance audits and reviews</i>	Descreve uma abordagem e os procedimentos a aplicar nas diversas fases da vida útil de uma obra, para garantir uma efetiva gestão da vida útil;
ISO 15686 – 4 (2014)	<i>Data requirements /data formats</i>	Descreve os dados necessários para o planejamento de vida útil considerando as diferentes condições ambientais.
ISO 15686 – 5 (2008)	<i>Life-cycle costing</i>	Guia pra obtenção dos custos globais associados à vida útil das construções;
ISO 15686 – 6 (2004)	<i>Procedures for considering environmental impacts</i>	Apresenta indicações para a determinação do impacto ambiental de diferentes soluções de projeto e a elaboração da relação entre avaliação do impacto ambiental e o planejamento da vida útil;
ISO 15686 – 7 (2006)	<i>Performance evaluation for feedback of service life data from practice</i>	Guia para obtenção de informações relativas ao desempenho durante a vida útil de edifícios construídos;
ISO 15686 – 8 (2008)	<i>Reference service life and service-life estimation</i>	Descreve a metodologia de estimativa da vida útil, aplicando o método fatorial;
ISO 15686 – 9 (2008)	<i>Guidance on assessment of service-life data</i>	Fornecer indicações relativas à harmonização de produtos da construção;
ISO 15686 – 10 (2010)	<i>When to assess functional performance</i>	Especifica requisitos para verificar o desempenho funcional dos edifícios e instalações relacionadas durante a vida útil;
ISO 15686 – 11 (2014)	<i>Terminology</i>	Descreve as terminologias.

No Brasil, a preocupação com a eficiência dos edifícios e seus constituintes exigidos pelos usuários incidem diretamente na abordagem de temas relacionados ao desempenho, sustentabilidade, durabilidade e vida útil. Em 2013, a norma brasileira NBR 15575-1 (2013):

Edificações Habitacionais - Desempenho foi elaborada para atender as exigências dos usuários e aumentar a qualidade dos edifícios com foco no comportamento dos elementos e sistemas do edifício. A norma de desempenho foi organizada a partir dos elementos do edifício levando em consideração os requisitos, características qualitativas, e critérios, grandezas quantitativas, elaborada para atender as exigências dos usuários e a forma de avaliação dos sistemas dos edifícios. Dentro do contexto da norma de desempenho (NBR 15757, 2013), a vida útil de fachadas insere-se como requisito de durabilidade de sistemas de vedação vertical na parte 4 e faz interface com o requisito de segurança, conforme ilustrado na Figura 2.1.

		Requisito dos Usuários												
		Segurança			Habitabilidade						Sustentabilidade			
		Segurança Estrutural	Segurança contra Incêndio	Segurança no Uso e Operação	Desempenho Acústico	Desempenho Térmico	Desempenho Lumínico	Estanqueidade	Saúde, Higiene e Qualidade do ar	Acessibilidade	Conforto Antropodimâmico e Tátil	Durabilidade	Manutenibilidade	Impacto Ambiental
Partes da Norma	Parte 1: Requisitos gerais													
	Parte 2: Sistemas estruturais													
	Parte 3: Sistemas de pisos													
	Parte 4: Sistemas de vedações verticais			●								●		
	Parte 5: Sistemas de coberturas													
	Parte 6: Sistemas hidrossanitários													

Figura 2. 1 – Matriz da norma de desempenho

A durabilidade é um dos requisitos qualitativos determinados pela NBR 15575-1 (2013) e vida útil é um dos critérios quantitativos do requisito de durabilidade. A vida útil é o período de tempo do edifício ou de suas partes em que o desempenho requerido é atendido, conforme definido pela NBR 15575-1 (2013) e ISO 15686-1 (2011).

## 2.2 Degradação de fachadas

Qualquer ação que cause deterioração de uma ou mais propriedades do componente do edifício, prejudicando o desempenho desse, é considerada degradação (ISO 15686-2, 2012;

NBR 15575-1, 2013). A degradação resulta de fenômenos naturais que causam mudanças químicas, físicas e mecânicas dos sistemas e do uso do edifício.

Os edifícios são construídos com a finalidade de abrigar atividades humanas, sendo diferenciada pelo seu uso, tais como habitacional, industrial e comercial. A consideração dos requisitos de desempenho exigidos pelos usuários é primordial no planejamento e construção de edifícios. As condições de exposição dos sistemas de envoltória do edifício devem também ser analisadas inicialmente, para que somente após esta análise seja projetado e construído o edifício (Lascasse, 2003; Freitas *et al.*, 2013; Kazmierczak *et al.*, 2016).

Dentre os diversos sistemas constituintes das construções, o sistema de envoltória é o mais suscetível ao processo de degradação devido a esse estar exposto a condições adversas e ser de difícil manutenção (Madureira *et al.*, 2017). Os revestimentos de fachadas estão sujeitos a uma série de solicitações que influenciam na sua durabilidade (Figura 2.2), tais como a ação do vento, chuva dirigida, radiação solar, cargas, condições de uso, clima interno, entre outros (Freitas *et al.*, 2013; Francinete *et al.*, 2015; Kazmierczak *et al.*, 2016).



Figura 2. 2 – Solicitações em sistema de vedação vertical (Kazmierczak *et al.*, 2016)

As solicitações impostas ao sistema de envoltória podem ser representadas pelos agentes de degradação. A ação dos agentes que condicionam o comportamento da degradação pode ser de origem exterior ou interior à construção e pode ser dividida pela natureza dos agentes (Tabela 2.2). O conhecimento dos agentes de degradação, os quais as fachadas são impostas,



Tabela 2. 2 – Origem e natureza dos agentes de degradação (adaptado de ISO 15686-1: 2011).

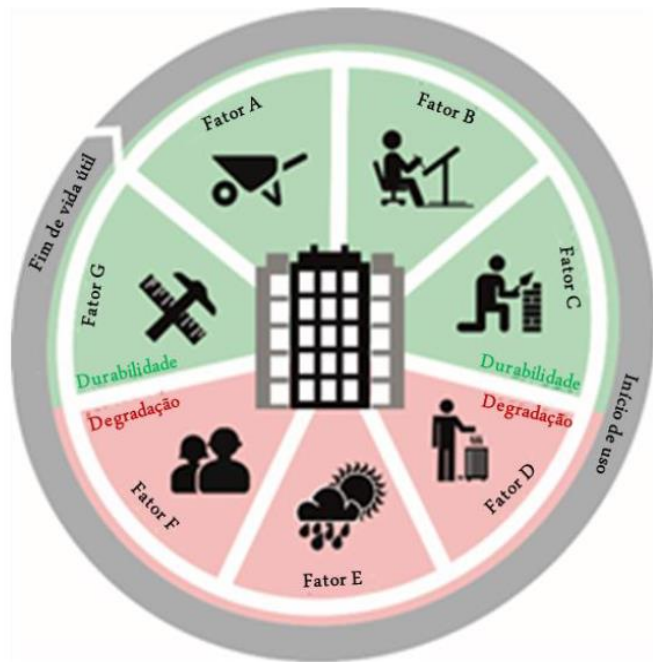
Natureza	Origem externa à construção		Origem interna à construção	
	Atmosférica	Solo	Ocupação	Consequência do projeto
<b>1. Agentes mecânicos</b>				
1.1 Gravidade	Neve, chuva	Pressão das terras	Sobrecargas	Cargas permanentes
1.2 Ações e deformações impostas	Dilatações térmicas e higroscópicas	Assentamentos, escorregamentos	Esforços de manobra	Fluência, forças e deformações impostas
1.3 Energia cinética	Vento, choques	-	Choques, atritos	-
1.4 Vibrações e ruídos	Ruídos	Sismos vibrações	Ruídos, vibrações	Ruídos, vibrações
<b>2. Agentes eletromagnéticos</b>				
2.1 Radiação	Radiação solar	-	Lâmpadas, radiações	Radiações
2.2 Eletricidade	-	Correntes aleatórias	-	Correntes
2.3 Magnetismo	-	-	Campos magnéticos	Campos magnéticos
<b>3. Agentes térmicos</b>				
	Calor, gelo, choque térmico	Calor, gelo	Calor emitido	Aquecimento, fogo
<b>4. Agentes químicos</b>				
4.1 Água e solventes	Umidade do ar, condensação, precipitações	Água da superfície, água subterrânea	Projeção de água, condensação, detergentes, álcool	Distribuição de água. Águas residuais, infiltrações
4.2 Oxidantes	Oxigênio, ozônio, óxidos de azoto	-	Água oxigenada	Potenciais eletroquímicos positivos
4.3 Redutores	-	Sulfuretos	Agentes de combustíveis de amônio	Agentes combustíveis, potenciais eletroquímicos negativos
4.4 Ácidos	Ácidos carbônico, excrementos de pássaros, ácido sulfúrico	Ácidos carbônico, ácidos húmicos	Vinagre, ácido cítrico, ácido carbônico	Ácido sulfúrico, ácido carbônico
4.5 Bases	-	Cal	Soda caustica, potassa caustica, hidróxido de amônio	Soda caustica, cimentos
4.6 Sais	Nevoeiros salinos	Nitratos, fosfatos, cloretos e sulfatos	Cloreto de sódio	Cloreto de cálcio, sulfatos, gesso
4.7 Materiais inertes	Poeiras, fuligem	Calcário, sílica	Gorduras, óleos, tintas, poeiras	Gorduras, óleo, poeiras, fuligem
<b>5. Vegetais em microrganismos</b>				
5.1 Vegetais e microrganismos	Bactérias	Bactérias, raízes	Bactérias, plantas	-
5.2 Animais	Insetos	Roedores, vermes	Animais domésticos	-

### 2.3 Fatores de degradação

A degradação existente em fachadas é decorrente de múltiplos fatores, devido à ação conjunta dos agentes de degradação. Os diversos fatores de degradação, condicionantes para o processo de degradação, que atuam sobre o sistema de revestimento de fachada e interferem na durabilidade desse deve ser considerado em projeto. A partir do momento em que a durabilidade é afetada, a vida útil do sistema fica comprometida (Madureira *et al.*, 2017). A avaliação da durabilidade deve contemplar o máximo de informações possíveis dos fatores de degradação, como determinado por diversas normas (AIJ, 1989; BSI 7543, 1992; BSI 8000, 1989; ISO 15686-7, 2006), para que o modelo de degradação seja eficaz (Kazmierczak *et al.*, 2016).

As causas e o comportamento da degradação não são completamente conhecidos devido a ações simultâneas e sinérgicas de vários fatores que influenciam os mecanismos de degradação (Rudbeck, 1999). O comportamento de degradação depende do que ocorreu antes do estágio de uso, das condições climáticas e atmosféricas adversas, do uso intensivo e da falta de manutenção (Medeiros e Sabatini, 1999; Shohet *et al.*, 1999; Hovde, 2004). A fase que antecede o uso se refere a fase de projeto que envolve qualidade de projeto, de materiais e de execução. As condições climáticas e atmosféricas adversas envolvem a ação da radiação solar, vento, chuva dirigida, poluição, distância do mar, entre outros.

Embora existam diversos fatores de degradação, o tempo é inquestionavelmente o principal fator de degradação, pois mesmo que um sistema de revestimento apresente as melhores condições possíveis, o envelhecimento deste sistema é de ordem natural (Shohet e Paciuk, 2004; Silva *et al.*, 2016). Para além do tempo, os vários fatores que afetam a durabilidade de edifícios e componentes podem ser subdivididos em duas categorias: a primeira relacionada com a durabilidade do sistema; e o segundo com a degradação e a agressividade do meio ambiente (Duling *et al.*, 2008). Considerando os sete fatores de durabilidade, quatro estão relacionados com a durabilidade dos revestimentos, em verde, e os três restantes com sua degradação, em vermelho, conforme mostrado na Figura 2.4.



Fator	Designação
A	Qualidade dos componentes
B	Nível de projeto
C	Nível de execução
D	Ambiente interno
E	Ambiente externo
F	Condições de uso
G	Frequência de manutenção

Figura 2. 4 – Fatores que influenciam na durabilidade e degradação dos edifícios e seus componentes (adaptado de Souza *et al.*, 2018).

Antes do início do uso do edifício todos os fatores atuam de forma positiva sobre a vida útil, pois essas estão relacionadas à durabilidade e permitem que a vida útil do edifício e seus sistemas atinjam a vida útil projetada. Os fatores considerados após o início do uso do edifício atuam negativamente sobre a vida útil dos sistemas, com exceção da frequência de manutenção. Estes fatores que atuam de forma negativa se relacionam a degradação pois reduzem a vida útil projetada.

### 2.3.1 Qualidade dos componentes (Fator A)

A especificação de materiais e projeto do sistema de vedação é fundamental para que o desempenho esperado seja alcançado. Várias anomalias surgem no sistema de vedação devido especificação incorreta dos materiais, desde o substrato até o revestimento cerâmico (Lamberts *et al.*, 2004; Silvestre e de Brito, 2011; Nascimento, 2016). O Fator A se refere a qualidade dos componentes e reflete às características físicas dos materiais constituintes do sistema em análise. De acordo com vários estudos (Brifett, 1991; Vu e Stewart, 2002; Yiu *et al.*, 2007), a escolha inadequada de materiais pode acelerar o processo de degradação e, conseqüentemente, diminuir a durabilidade de todo o sistema. Além disso, Shohet e Laufer (1996) enfatizam que o processo de degradação está diretamente relacionado com a qualidade dos materiais.



Em relação às características dos materiais, os revestimentos cerâmicos apresentam uma enorme variedade de acabamento, os quais variam desde cores, tamanhos e até mesmo texturas. A seleção apropriada dos materiais para o sistema de revestimento cerâmico é essencial para o bom desempenho desse. Os materiais devem ser mecanicamente e quimicamente resistente à ação dos agentes ambientais aos quais esse será exposto (Lourenço *et al.*, 2017; Pezzato *et al.*, 2010; Amaro *et al.*, 2014; Kanniyapan *et al.*, 2015). Em uma fachada, os materiais devem apresentar estabilidade dimensional adequada e resistência à água e desempenhar suas funções ao longo do ciclo de vida dos edifícios. O surgimento de anomalias pode estar relacionado a escolha inadequada de materiais. Em sistemas de fachadas devem ser consideradas as características da cerâmica, o material aplicado ao enchimento das juntas, a argamassa de assentamento, o emprego de cimentos mais finos, entre outras (Amaro *et al.*, 2013; Madureira *et al.*, 2017).

Conforme Mansur *et al.* (2006) e Wetzal *et al.* (2010), os revestimentos cerâmicos apresentam elevada incidência de anomalias muitas vezes devido a seleção equivocada dos materiais. Os elementos de fachada sofrem alterações dimensionais por vários motivos, incluindo expansão e contração induzidas termicamente, alterações no teor de umidade, envelhecimento, carga estrutural e movimento da estrutura do edifício (Persily, 1993).

### 2.3.2 Nível de projeto (Fator B)

O Fator B se refere ao nível de projeto e menciona sobre a análise detalhada de como o projeto influencia na degradação do edifício e seus constituintes. O estudo e desenvolvimento do projeto de fachada arquitetônico e/ou executivo adequados evitam o surgimento de anomalias e consequentemente aumentam a durabilidade. Conforme John *et al.* (2002), a durabilidade é resultado do projeto e não propriedade do material. Chew *et al.* (2006) afirmam que as fachadas com vida útil prolongada podem ser obtidas quando os projetistas consideram os diversos fatores de degradação atuantes.

A norma ABNT NBR 13755 (2017) estabelece que o sistema de revestimento deve ser compatível com a base, as condições de exposição e o desempenho previsto em projeto. Considerações nos detalhes de projeto que proporcionem maior proteção ao componente contra os fatores de degradação podem aumentar a sua vida útil significativamente (White *et al.*, 2015; Possan *et al.*, 2017). A norma ISO 15686-1 (2011) refere que o impacto das mudanças de projeto sobre a vida útil pode ser notado através do planejamento da vida

útil, o qual permite comparar diferentes soluções de projeto. Como por exemplo fachadas com significativa exposição à água devem apresentar elementos que impeçam o percurso da água ao longo da fachada ou o ingresso da água para o interior do sistema.

O desempenho do edifício depende de escolhas adequadas desde o início de sua concepção, como a análise das características do entorno natural e construído, bem como sua localização e orientação com relação ao sol (Qu *et al.*, 2010; Morrissey *et al.*, 2011; Dutta *et al.*, 2017). Alguns fatores determinantes no surgimento de anomalias estão relacionados a ausência de projetos ou detalhamento no projeto de fachadas, tais como posicionamento das juntas, elementos que descolem da fachada a água proveniente da chuva e elementos de proteção solar (Blocken e Carmeliet, 2006; Sousa *et al.*, 2016).

No Distrito Federal, Braga e Amorim (2004) e Amorim *et al.* (2014) afirmam que muitas vezes os usuários descaracterizam as fachadas devido a problemas de conforto térmico. Esta descaracterização muitas vezes implica no desempenho das fachadas, pois a implantação incorreta de elementos de proteção solar, tais como toldos e caixas de ar condicionado, pode permitir o ingresso de umidade no sistema de revestimento. Desta forma fica evidenciado a importância do projeto de fachada, que deve considerar o clima a influência do clima sobre a durabilidade da fachada.

### 2.3.3 Nível de execução (Fator C)

O Fator C se refere ao nível de execução e contempla a adequação dos procedimentos aplicados na construção do edifício, tais como a conformidade do estabelecido em projeto e a qualidade de acabamento. Conforme Gaspar e de Brito (2008), as anomalias que aparecem nas primeiras idades dos revestimentos geralmente são causadas por condições inapropriadas de execução. A execução inadequada do sistema de revestimento também resulta no surgimento de anomalias, tais como elevada espessura dos revestimentos externos, grandes extensões de painéis sem juntas no revestimento, maior velocidade imposta à execução dos revestimentos, inexistência de cura e falta de controle de qualidade das etapas (Brifett, 1991; Haapio e Viitaniemi, 2008; Alencastro *et al.*, 2018).

As condições para o início de cada etapa e o tempo de execução entre elas devem ser respeitados, pois cada etapa exige determinadas características para que possa ser realizado a etapa seguinte (Yazigi, 1999). O não atendimento dos tempos mínimos e máximos necessários

para execução de cada etapa do sistema de revestimento cerâmico predis põem o surgimento de anomalias. Além do tempo de execução, a execução correta dos procedimentos também pode prejudicar o desempenho do sistema de revestimento. A norma brasileira NBR 15825 (2010) especifica a qualificação dos profissionais para executar revestimento de cerâmicas e a norma brasileira NBR 13755 (2017) estabelece as condições para projeto, execução, inspeção e aceitação de revestimentos cerâmicos.

#### 2.3.4 Exposição ao ambiente (Fator D e E)

De acordo com Haagenrud (2004), os fatores de degradação e seus efeitos no processo de degradação podem estar relacionados à caracterização e a localização dos edifícios, devido a diferença de clima e coordenadas geográficas. O Fator D reflete sobre o ambiente interno da edificação. O Fator E se refere a exposição ao ambiente externo e considera o desgaste do sistema diante à exposição ao meio ambiente. Convencionalmente, a fachada é o elemento de interface do edifício com o meio ambiente exterior. O comportamento do sistema de envoltória depende da complexa interação entre os materiais e os muitos fatores do ambiente que incluem características de construção, morfologia urbana, locais geográficos, clima local, entre outros (Yang *et al.*, 2015; Alchapar e Correa, 2016; Zhou *et al.*, 2017).

Naturalmente, os edifícios situados em locais distintos apresentam condições climáticas diferentes, a qual varia conforme o efeito combinado da ação do vento e da chuva, a radiação solar, a distância do mar e a exposição à poluição do ar (Sousa *et al.*, 2007; Bauer *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2016). Por isso, os valores do fator de exposição ao meio ambiente devem ser ajustados conforme a localidade em que esses estão situados. Muitas vezes, os agentes de degradação ambiental atuam de forma sinérgica e simultânea, especialmente os agentes climáticos, acelerando assim o processo de degradação dos componentes dos edifícios (Flores-Colen *et al.*, 2010; Bauer *et al.*, 2015).

A caracterização dos agentes climáticos pode ser realizada em função da escala de clima em macro, meso ou micro. A escala macro se refere a condições meteorológicas brutas como polar e subtropical. A meso ou local se refere a regiões com dimensões até 100 km nas redondezas do prédio. A micro se refere a proximidade absoluta da superfície do material. A Figura 2.5 ilustra as escalas de acordo com o Haagenrud (2004).

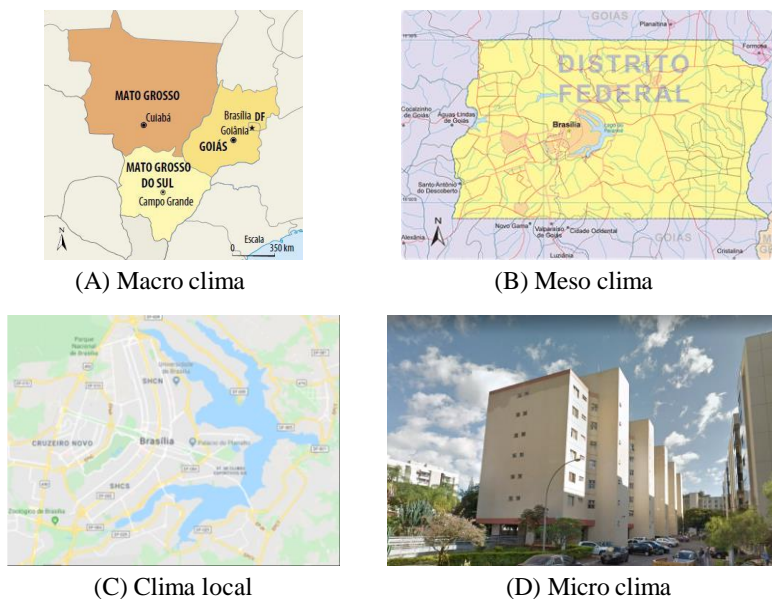


Figura 2. 5 – Exposição ambiental em diferentes escalas geográficas (adaptado de Haagenrud, 2004).

Embora a presença de umidade e variação térmica do sistema de revestimento sejam uma das principais causas das anomalias em fachadas, alguns pesquisadores defendem que existem outros fatores que também influenciam na origem das anomalias, tais como exposição a poluição, ação do vento e nebulosidade (Corbella e Castanheira, 2001; Leissner *et al.*, 2015; Pérez-Bella *et al.*, 2017b). Dentre os diversos fatores que estão relacionados à exposição ao ambiente externo, cita-se como os principais fatores a variação de temperatura e chuva dirigida (Blocken e Carmeliet, 2006; White *et al.*, 2015).

As características relacionadas às condições climáticas podem ser utilizadas como indicadores de comportamento (Corbella e Castanheira, 2001; Maciel *et al.*, 2006). Entretanto, estas características devem ser determinadas levando em consideração as especificidades das condições de exposição ambiental de cada elemento associadas à sua localidade (Duling *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2016). Para caracterizar e distinguir o tipo e a forma correta dos fatores climáticos, esses devem estar relacionados ao mecanismo de degradação e às funções dose-resposta.

### 2.3.5 Condições de uso e frequência de manutenção (Fator F e G)

O Fator F se refere às condições de uso e compreende principalmente o tipo de construção e as condições de desgaste geral (Hovde, 1998). O Fator G se refere à frequência de manutenção e considera a existência e procedimentos de ações de manutenção. As ações de manutenção,

quando executadas adequadamente, permitem prolongamento do fim da vida útil (Meira e Padaratz, 2002; Lowry, 2002).

O desempenho do sistema de revestimento também é reflexo das ações do usuário. A norma brasileira NBR 5674 (2012) sobre manutenção estabelece procedimentos de preservação das características originais do edifício e a prevenção da perda de desempenho decorrente do processo de degradação. A inserção de elementos não previstos no sistema de fachada deve ser realizado de forma criteriosa e com a supervisão de algum profissional da área. Muitas vezes são inseridos elementos, tais como ar condicionado, telas ou grades de proteção, de forma a causar alteração nos esforços atuantes no sistema. A falta de cuidado ao realizar a impermeabilização do sistema nos furos de instalação facilita o ingresso de água e propiciam ambientes para o surgimento de anomalias.

Os procedimentos de limpeza da fachada devem ser realizados periodicamente para a remoção de eflorescências e manchas que favorecem o desenvolvimento de microrganismos. Quando as atividades de manutenção são realizadas de forma errônea, as anomalias tendem a reaparecer mais rapidamente e até mesmo com maior gravidade que anteriormente. A norma NBR 5674 (2012) sugere que a cada três anos seja realizado lavagem da fachada e seja verificado a integridade do sistema de revestimento.

#### 2.4 Anomalias comuns em revestimento de fachadas

As anomalias comuns em fachadas são características à cada sistema de revestimento de fachada, devido ao comportamento diferenciado do sistema. Existem diversos sistemas de revestimento de fachadas, os quais são compostos por diferentes materiais que influenciam de forma significativa na durabilidade, manutenibilidade, custo, conforto térmico e acústico. No Distrito Federal o sistema de vedação vertical comumente empregado é composto por alvenaria com revestimento cerâmico ou em argamassa, com ou sem acabamento em tinta (Amorim e Flores, 2005; Braga e Amorim, 2004). O uso de cerâmicas como revestimento de acabamento final ocorre devido a este material trazer benefícios quanto a facilidade de limpeza, durabilidade, diversidade de opções estéticas e a facilidade de aplicação. Entretanto, quando especificado ou executado de forma errônea pode prejudicar o desempenho do sistema de vedação (Davies e Wyatt, 2004; Duling *et al.*, 2008; Bordalo *et al.*, 2011).

O sistema de revestimento cerâmico de fachadas é composto pelo conjunto monolítico de camadas, que formam corpo rígido, aderidas à base da fachada, cuja a camada final refere-se às cerâmicas rejuntadas, conforme ilustrado na Figura 2.6. O sistema de fachada é um sistema descontínuo e heterogêneo, em que as propriedades físicas variam com a direção. Devido à baixa resistência a tração e capacidade de aderência irregular entre os materiais constituintes do sistema, esse apresenta comportamento mecânico não linear frágil (Sousa *et al.*, 2016).

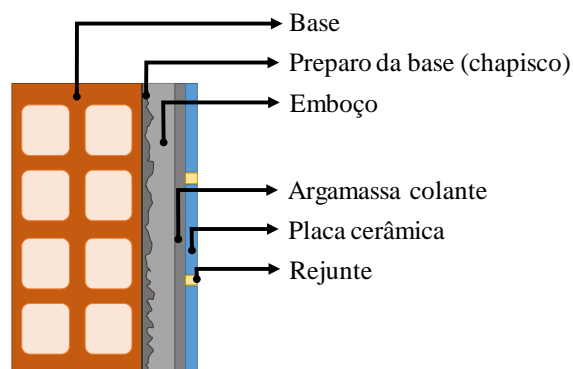


Figura 2. 6 – Esquema ilustrativo do sistema de revestimento cerâmico.

Devido ao comportamento mecânico do sistema ser frágil, muitas vezes o uso de elementos de reforços, por exemplo verga, contra vergas e telas metálicas, são necessários para aumentar a capacidade de deformação e resistência evitando a falha do sistema. As anomalias são causadas principalmente devido a aspectos relacionados a especificação de materiais, qualidade de projeto e execução (Sousa *et al.*, 2016; Nadoushani *et al.*, 2017). Entretanto, outros pesquisadores (Lacasse, 2003; Bauer *et al.*, 2015) afirmam que a ação dos agentes de degradação relacionados a exposição do sistema de envoltória é uma das principais causas do surgimento de anomalias.

Muitas vezes o surgimento das anomalias não é causado por apenas uma causa, e sim pela combinação de fatores. A patologia do sistema de revestimento consiste no estudo dos sintomas, mecanismos, origem e causa das anomalias (Sousa *et al.*, 2016). A origem da maioria das patologias ocorre nas etapas de projeto e execução da construção do edifício (Verçosa, 1991). A causa das anomalias pode ser agrupada em congênitas, construtivas, adquiridas e acidentais, conforme descrito na Tabela 2.3.

O desempenho da fachada é reflexo de todos os procedimentos e detalhamentos de cada camada do sistema de vedação. Quando a especificação ou a execução é realizada de forma errônea o desempenho pode ser afetado. Pequenas aberturas no sistema de vedação permite o ingresso de água no sistema de revestimento de forma a comprometer a função de proteção

contra agentes deletérios e facilitar a incidência de anomalias (Chai *et al.*, 2015; Galbusera *et al.*, 2015). As anomalias que ocorrem nos sistemas de revestimento cerâmico podem afetar não só o desempenho funcional do sistema, mas também o conforto do usuário. O ingresso de água, quando atinge ambientes internos, prejudica a salubridade dos usuários. O impacto visual do excesso de anomalias na fachada pode gerar insegurança e transtornos psicológicos aos usuários.

Tabela 2. 3 – Causa das anomalias (Flores-Colen, 2010).

Causa das anomalias	Descrição
(i) Congênitas	Originadas nas etapas que precede a execução, isto é, etapa de projeto e definição dos materiais;
(ii) Construtivas	Resultantes da fase de execução, isto é, qualidade de mão-de-obra e ausência de fiscalização de controle de qualidade;
(iii) Adquiridas	Decorrentes da ação humana, isto é, uso incorreto do sistema de revestimentos ou manutenção inadequada ou inexistente, ou da ação da natureza, tais como chuva, radiação solar e vento;
(iv) Acidentais	Relacionadas a ocorrência de algum fenômeno atípico, tais como, terremoto, recalques e incêndios, isto é, esforços imprevisíveis da natureza.

Dentre as diversas anomalias comuns em sistemas de revestimento cerâmico, destaca-se a falha nas juntas, eflorescência, fissuração e descolamento cerâmico (Bauer *et al.*, 2014). A falha nas juntas é caracterizada por lacunas no rejunte entre as cerâmicas (Figura 2.7). Essas ocorrem devido a incapacidade do rejunte não estar apto a absorver deformações, assim provocando aberturas que permitem o ingresso de umidade no sistema de revestimento e conseqüentemente não cumprir sua função de estanqueidade.



Figura 2. 7 – Falha nas juntas em sistema de revestimento cerâmico (Bauer, 2010).

As eflorescências consistem em alterações da superfície do revestimento resultantes da migração de sais minerais solúveis em água (Pel *et al.*, 2004; Aberle *et al.*, 2007). Geralmente, as eflorescências são caracterizadas por manchas esbranquiçadas sobre a superfície revestida

(Figura 2.8). Estas anomalias afetam a aparência da superfície e os cristais formados no interior dos poros pode gerar esforços no sistema e provocar falha no sistema, desencadeando outras anomalias devido ao aumento do volume de sais, tais como fissuras ou descolamento cerâmico (Gonçalves, 2007; Bordalo *et al.*, 2011).

O surgimento de eflorescência ocorre quando há a coexistência de três condições: presença de umidade, presença sais solúveis nos materiais e condições ambientais que permitem o fluxo de água (Joffily e Oliveira, 2013; Flores-Colen *et al.*, 2004). Existe uma grande dificuldade na eliminação das condições relacionadas aos sais presentes nos materiais e a condições ambientais que permitem o fluxo de água. Portanto, a melhor forma de evitar o surgimento de eflorescência é evitar o ingresso de umidade no sistema (Gonçalves, 2007).



Figura 2. 8 – Eflorescência em sistema de revestimento cerâmico (Bauer, 2010).

A fissuração geralmente ocorre devido a deformações induzidas, diretamente ou indiretamente, por esforços de tração (Fiorito, 2010; Uchôa, 2015). Essas são caracterizadas por pequenas descontinuidades no sistema de revestimento (Figura 2.9). Muitas vezes as fissuras são causadas pela variação dimensional do sistema de revestimento quando esses são submetidos aos agentes climáticos (Cincotto, 1985; Bordalo *et al.*, 2010). O surgimento de fissuras no revestimento permite o ingresso de umidade no sistema podendo acarretar em outras anomalias, tais como manchas, eflorescências, falha nas juntas e até mesmo descolamento cerâmico (Chagas, 2009). A ocorrência de fissuras no sistema de revestimento pode comprometer o desempenho quanto a estanqueidade (Santos, 2017).



Figura 2. 9 – Fissuras em sistema de revestimento cerâmico (Bauer, 2010).



Outra causa das fissuras está associada aos esforços originados pelas deformações da base e recalques estruturais (Chagas, 2009; Uchôa, 2015). A ausência de elementos estruturais na alvenaria, tais como vergas e contra-vergas, faz com que o alívio de tensões seja absorvido pelo sistema de vedação, constituído pela alvenaria e revestimento (Santos, 2017). Este sistema geralmente não tem resistência suficiente devido a esse ser projetado de forma equivocada.

As anomalias classificadas como descolamento cerâmico consiste na falha de aderência do revestimento ao substrato. A perda de aderência do revestimento ao substrato pode ocorrer em diferentes interfaces das camadas do sistema de vedação. Geralmente nas inspeções visuais de fachadas, o descolamento cerâmico é identificado através de empolamentos do revestimento (Figura 2.10) ou até mesmo pela ausência de cerâmicas. O descolamento cerâmico, caracterizado pelas falhas ou rupturas na interface, geralmente ocorrem devido a incompatibilidade das propriedades de resistência dos materiais constituintes do sistema de revestimento, isto é, esforços que excedem a capacidade de aderência entre as camadas (Bordalo *et al.*, 2010; Gaspar e de Brito, 2008). Outras causas que permitem o desenvolvimento do descolamento cerâmico estão relacionadas à movimentação excessiva do edifício, à expansão das cerâmicas, devido à expansão por umidade e/ou dilatação térmica, ao erro na especificação e execução de argamassa colante e até mesmo pela falta de manutenção (Chagas, 2009; Flores-Colen *et al.*, 2010).



Figura 2. 10 – Descolamento cerâmico em sistema de revestimento cerâmico (Bauer, 2010). Os descolamentos cerâmicos podem ocorrer de forma pontual ou generalizada. Conforme Santos (2017), quando essa ocorre de forma pontual tem como sua principal causa a presença de fissuras, umidade, vegetação e microrganismos. Porém, quando essa ocorre de forma generalizada, a sua causa está relacionada a materiais inadequados e/ou execução incorreta, tais como a presença de materiais pulverulentos na superfície de contato, falha no preenchimento de argamassa colante, onde há lacunas ou espessura inadequada, e a fixação das peças cerâmicas após o vencimento do tempo de abertura da argamassa colante. Quando

a termografia é utilizada, o descolamento cerâmico é identificado pela diferença de temperatura na superfície do sistema de revestimento. Nas inspeções que realizam o ensaio a percussão, o descolamento cerâmico é identificado pelo som cavo.

Embora as diversas anomalias apresentem diferentes causas, há uma ocorrência preferencial de anomalias em áreas específicas da fachada. As anomalias peculiares as zonas motivam estudo mais detalhado. Alguns pesquisadores (Freitas *et al.*, 2003; Gaspar e de Brito, 2005; Bauer *et al.* 2015; Souza *et al.*, 2015) afirmam que a partir de uma análise da origem e causas das anomalias torna-se possível identificar quais áreas em que o surgimento de determinada anomalia é mais frequente. Os fatores críticos para o surgimento de anomalias podem ser atribuídos à cada zona da fachada. Com o objetivo de identificar em quais áreas da fachada ocorrem mais anomalias e qual a preferência de áreas em que essas ocorrem, Souza (2016) dividiu a fachadas em seis zonas comuns a todas as fachadas (Figura 2.11). As zonas constituintes da fachada consideradas são justificadas pela tipologia dos edifícios localizados no Distrito Federal.

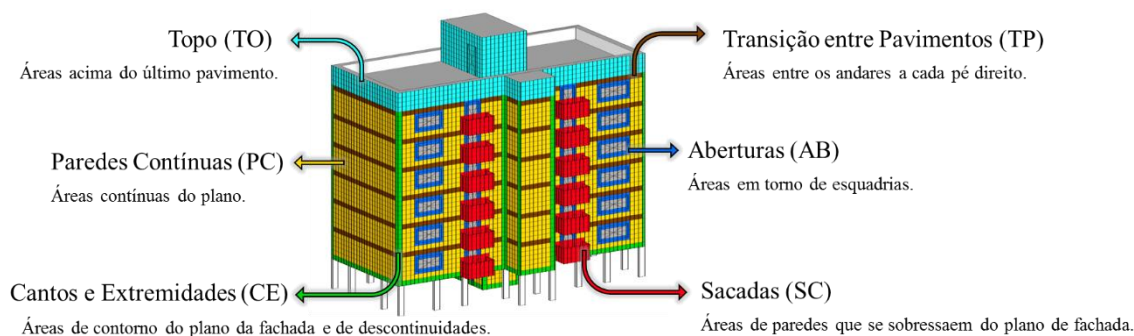


Figura 2. 11 – Delimitação das zonas constituintes da fachada (adaptado de Pinheiro, 2017).

As Paredes Contínuas (PC) são planos contínuos de revestimentos sem discontinuidades, isto é, os panos fechados sem aberturas para janelas ou varandas. Nas PC a presença de grandes áreas de extensão com restrições em seu contorno dificulta a dissipação ou acomodação das deformações. Conseqüentemente, o fator crítico para o surgimento de anomalias nesta zona é a solicitação por cargas cíclicas superiores a capacidade resistente do sistema. A baixa resistência do sistema ocorre principalmente devido a execução incorreta, tais como assentamento das peças cerâmicas sobre superfície pulverulenta ou contaminada, espessura e rigidez da argamassa inadequadas e a ausência ou deterioração das juntas (Cirne *et al.*, 2006).

As Aberturas (AB) referem-se às áreas em torno das esquadrias. As zonas de AB são consideradas frágeis, pois nessa zona há elevada concentração de esforços. Comumente as

anomalias, fissuras principalmente, surgem no perímetro dos vãos de janelas e portas devido à ausência de vergas e contra vergas, as quais tem como objetivo distribuir adequadamente o acúmulo de esforços concentrados (Braga e Amorim, 2004). As fissuras surgem nos cantos inferiores das aberturas, em que os esforços tendem a serem maiores, possibilitando infiltração e acarretando no surgimento de manchas e descolamento cerâmico (Torres e Silva, 2015).

As Sacadas (SC) referem-se a áreas de paredes de guarda corpo e parapeitos que se sobressaem do plano de fachada. O fator crítico dessa zona é representado pela característica particular do balanço do elemento do edifício, a qual concentra elevadas tensões, deformações e movimentação diferencial. O surgimento de anomalias como fissuras e descolamentos derivam dos esforços mecânicos, térmica e fadiga, causadas pelas solicitações de cargas impostas. As zonas de sacadas apresentam condições de exposição menos favorável, devido ao ressaltado do alinhamento da parede dos edifícios, permitindo uma ação de chuva e radiação mais intensa que nas demais zonas e conseqüentemente o surgimento de eflorescências (Sousa *et al.*, 2016).

Os Cantos e Extremidades (CE) são áreas de contorno do plano de fachada e de discontinuidades. Nessas zonas frequentemente ocorre elevada concentração de esforços resultantes dos movimentos de dilatação ou retração, decorrente das variações térmicas ou condições de umidade (Souza *et al.*, 2015; Sousa *et al.*, 2016). As principais causas de surgimento de anomalias nos cantos e extremidades são ausência de detalhes construtivos, tal como junta de dessolidarização, e instabilidade do suporte devido a acomodação do edifício como todo. A ocorrência de anomalias na interface entre alvenaria e pilar, contemplada na zona de CE, tendem ser maior devido a ligação desses tipos de materiais não resistir as solicitações de tensões.

A Transição de Pavimentos (TP) são áreas entre os andares, isto é, zona que indica mudança de pavimento. Na zona de TP, a causa de anomalias é frequentemente associada a baixa resistência mecânica do material para suprir os esforços causados pela movimentação na interface entre alvenaria e viga. Basicamente, o dimensionamento inadequado ou falta de juntas de movimentação impede a absorção adequada de deformações ao longo da vida útil do revestimento e, conseqüentemente, permitindo o surgimento de anomalias (Silvestre e de Brito, 2010).

O Topo (TO) referem-se a áreas acima do último pavimento, isto é, platibandas, paredes ou outro tipo de proteção, que se ergam acima da cobertura ou terraço do edifício. A principal causa de surgimento de anomalias no TO é a incompatibilidade de deformação entre os constituintes do sistema de fachada que facilitam o surgimento de anomalias devido à variação dimensional, seja esta causada pela presença de umidade ou pela dilatação térmica (Yang *et al.*, 2015; Sousa *et al.*, 2016).

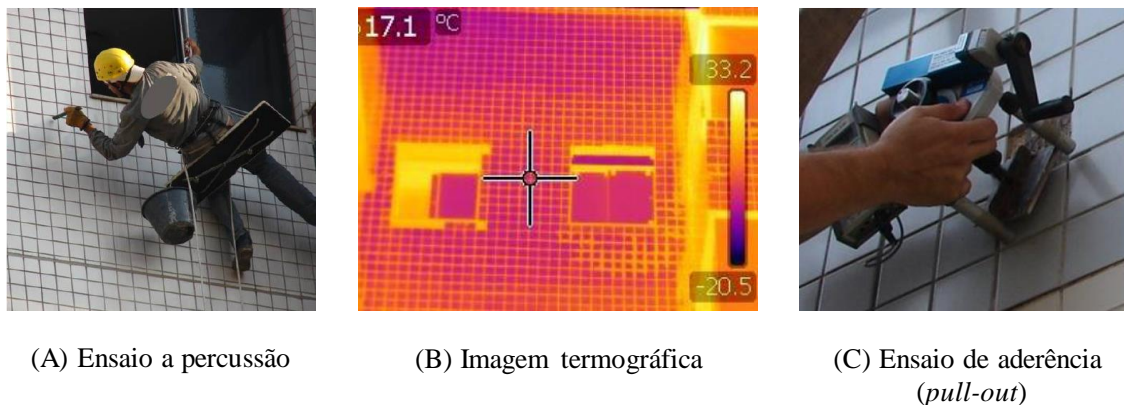
O estudo das zonas das fachadas permite estabelecer os padrões de degradação ao longo da fachada, o qual é influenciado também pela orientação e elemento construtivo (fachada, empena ou caixa de escada). A importância do estudo das regiões está diretamente relacionada à durabilidade, pois a identificação e correção das possíveis falhas contribuem para o aumento da vida útil dos revestimentos (Possan *et al.*, 2017).

## 2.5 Mensuração da degradação

A mensuração da degradação de sistemas de revestimento de fachadas permite avaliar o comportamento da degradação ao longo do tempo e, até mesmo, subsidia informações para a previsão da vida útil de sistemas. O MMD é uma metodologia que traduz a degradação existente em indicadores de degradação quantitativos. Essa metodologia foi desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília orientados pelo Professor Bauer e colaboradores (Antunes, 2010; Silva, 2014; Souza, 2016; Pinheiro, 2017; Piazzarollo, 2019). O MMD tem como objetivo mensurar a degradação de fachadas de edifícios. Esta metodologia é uma ferramenta que uniformiza as diferentes etapas da inspeção e quantificação da degradação. A avaliação da degradação em fachadas de edifícios é facilitada devido ao processo organizado, lógico e sistemático (Souza, 2016). O MMD é composto por procedimentos que envolvem inspeção de fachada, mapeamento e quantificação de degradação (Silva, 2014).

A compreensão do comportamento de degradação do edifício torna-se mais confiável quando há uma grande quantidade e qualidade das informações obtidas. A inspeção de fachadas consiste na observação da fachada, onde são identificadas as anomalias presentes nas fachadas. Na inspeção são usados equipamentos que permitam registrar maior nível de detalhamento, tais como máquinas fotográficas com alta resolução, trenas a laser e câmeras termográficas. Durante a inspeção a utilização de técnicas não destrutivas é priorizada, a fim de manter a integridade do sistema de vedação. A utilização de câmeras termográficas enriquece o MMD, pois possibilitam identificar anomalias que não são notadas na inspeção

visual e fotográfica. Algumas características comportamentais e propriedades do revestimento que auxiliem no entendimento do mecanismo de surgimento das anomalias podem ser obtidas pela realização de ensaios. A Figura 2.12 ilustra alguns ensaios que podem ser realizados in loco na inspeção visual.



(A) Ensaio a percussão

(B) Imagem termográfica

(C) Ensaio de aderência  
(pull-out)

Figura 2. 12 – Ensaios realizados in loco na inspeção (Souza et al., 2018).

Ainda na inspeção, deve ser determinado para qual orientação a fachada inspecionada está voltada. Em geral, os edifícios residenciais do Distrito Federal são construídos isoladamente um do outro, isto é, não são edifícios adjacentes. A orientação é determinada em função do azimute e classificada em uma das quatro principais: Norte, Sul, Leste e Oeste, conforme proposto por Garrido *et al.* (2012) e Silva (2014). A Figura 2.13 ilustra um exemplo e os critérios de definição de orientação para fachadas do edifício.

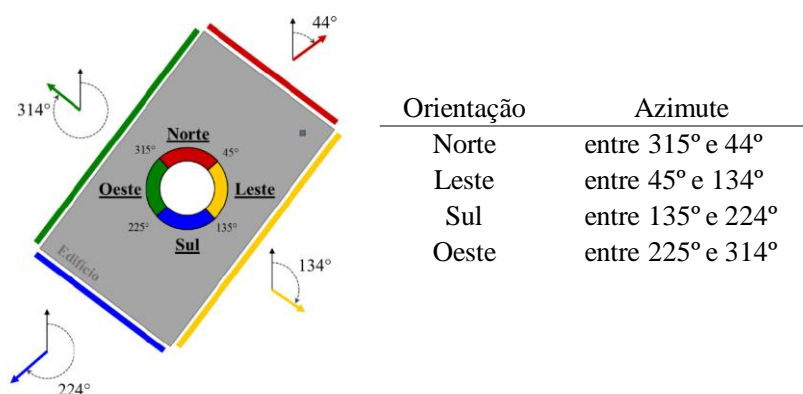


Figura 2. 13 – Exemplo de orientação a ser considerada, em função do azimute.

O mapeamento de danos consiste na elaboração de desenhos esquemáticos, onde são registradas as anomalias identificadas na inspeção. Inicialmente na etapa de mapeamento de danos, são definidas as amostras de fachadas. As amostras de fachada são trechos ou prumadas inspecionados, como ilustrado na Figura 2.14. A definição das amostras de fachadas deve atender ao critério de limitação da amostra, isto é, limita-se a amostra quando há juntas de movimentação vertical, quando há descontinuidades do plano de fachada

representadas pelas reentrâncias ou avanços, ou quando as áreas são muito pequenas ou muito extensas, sendo indicado considerar áreas máximas equivalente a 500 m<sup>2</sup> e áreas mínimas de 50 m<sup>2</sup>.

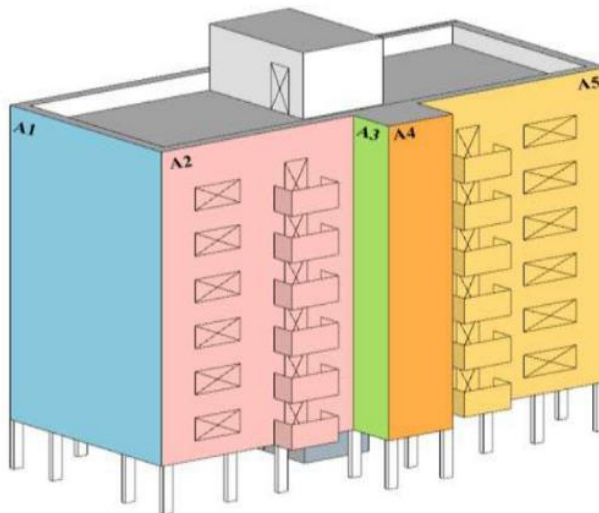


Figura 2. 14 – Definição de amostras de fachada (Piazzarollo, 2019).

O exemplo ilustrado na Figura 2.14 divide o edifício em cinco amostras. A empena do edifício é considerada como uma única amostra (A1), pois não apresenta juntas de movimentação vertical nem descontinuidades do plano. A fachada é dividida em amostras (A2, A3, A4 e A5) devido a caixa de escada apresentar mudança de plano e orientação. Caso a fachada não apresentasse essas características é sugerido limitar a amostra a áreas de até 500 m<sup>2</sup>, pois conforme Souza (2016) quanto maior a área de fachada, maior a área de anomalias refletindo diretamente nos resultados dos indicadores de degradação.

A quantificação da degradação tem o propósito de obter indicadores de degradação. Para isto, é sobreposto ao mapeamento da fachada uma malha que possui dimensão de 0,50 m x 0,50 m, com área igual a 0,25 m<sup>2</sup>, denominados como unidades de malha. Após a sobreposição da malha são definidos os andares. Em seguida são definidas as zonas constituintes da fachada, sendo aberturas, sacadas, cantos e extremidades, transição entre pavimentos, paredes contínuas, e por fim, topo. A Figura 2.15 ilustra um exemplo de mapeamento de danos baseado em análises visuais e fotográficas. Em sistema de revestimento cerâmico, as anomalias identificadas são descolamento cerâmico, fissuração, falha nas juntas e eflorescência (Bauer *et al.*, 2014; Silva, 2014).

Atendido os requisitos de sobreposição da malha e definição das unidades de malha, procede-se com a contagem das unidades de malha e obtenção dos indicadores de degradação. O

comportamento dos sistemas de revestimento de fachadas, quando submetidos a diferentes condições de exposição, são verificados por meio de indicadores de degradação. Ao final da aplicação do MMD é tido como resultado a quantificação da degradação por meio dos indicadores de degradação. Após a aplicação desta metodologia, é possível estabelecer hipóteses capazes de descrever os mecanismos específicos responsáveis pela origem e desenvolvimento das anomalias nas fachadas, bem como diagnosticar a condição de degradação existente em fachadas (Piazzarollo, 2019).

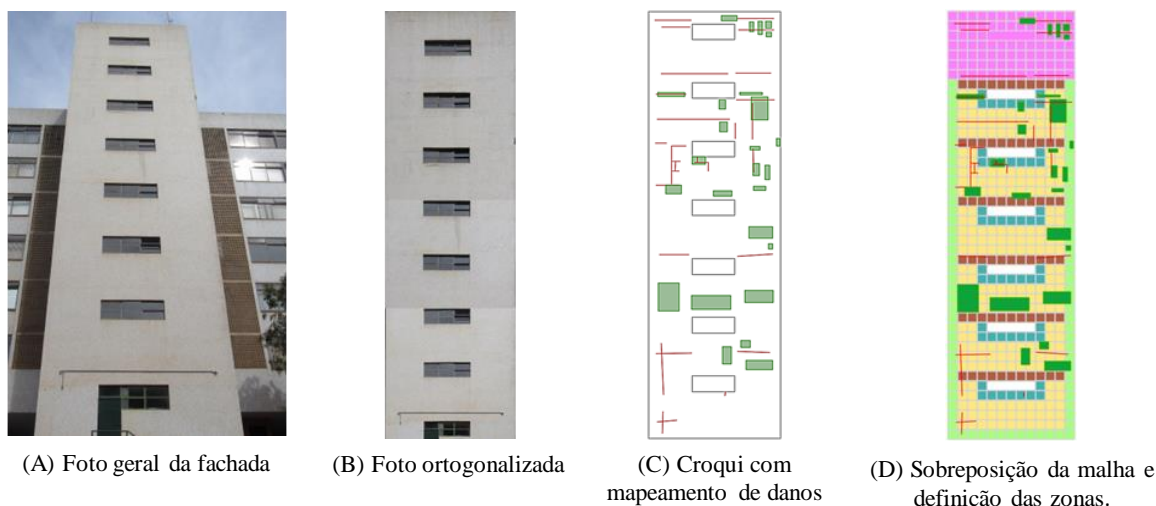


Figura 2. 15 – Procedimentos para mapeamento de danos.

A degradação de fachada é quantificada pelos indicadores de degradação e posteriormente subsidia informações para avaliação da degradação. De acordo com a ISO 15686-2 (2012), o indicador de degradação quantifica fisicamente uma propriedade crítica, assim medindo a deficiência do desempenho frente a exigências e requisitos dos usuários. Dentre os diversos indicadores de degradação que podem ser obtidos pela aplicação do MMD, nessa pesquisa são adotados Fator de Danos (seção 2.5.1) e Fator Geral de Degradação (2.5.2). Para análise das zonas de fachada são considerados os indicadores Fator de Danos ponderado (2.5.3) e Índice de Gravidade Relativa (2.5.4).

### 2.5.1 Fator de Danos (FD)

O FD é um parâmetro inicial do estudo do fenômeno de degradação. Esse indicador de degradação é uma medida básica da degradação que permite delinear a degradação para análises mais complexas, assim sendo importante para o entendimento do fenômeno estudado (Souza, 2016). O FD representa extensão de área degradada da fachada e é obtido pela equação 2.1. O FD permite realizar diversas análises, tais como a distribuição das anomalias,

bem como as zonas mais degradadas, os elementos construtivos mais susceptíveis a degradação, a orientação com maior tendência a degradar-se, entre outras.

$$FD = \frac{\sum A_{d(n)}}{A_t} \quad (2.1)$$

Em que o  $FD$  é o Fator de Danos,  $A_{d(n)}$  é a área de determinada anomalia ( $n$ ) em  $m^2$  e  $A_t$  é a área total da amostra de fachada em  $m^2$ .

### 2.5.2 Fator Geral de Degradação (FGD)

Embora as análises do FD permitam identificar alguma tendência de comportamento da degradação, este não considera a influência e a importância de cada tipo de anomalia presente no fenômeno de degradação. Para tanto, o uso do indicador de degradação FGD é indicado.

O FGD é indicador de degradação aplicado à realidade das condições de construção, exposição e uso de edifícios do Distrito Federal. A partir do FGD, a evolução dos processos de degradação das fachadas em função do tempo pode ser verificada. Geralmente, essa evolução, expressa graficamente por uma curva, retrata o comportamento da degradação. O FGD é obtido por meio da razão entre a área degradada ponderada por pesos referentes aos diferentes tipos de anomalias e a área de referência (equação 2.2).

$$FGD = \frac{\sum (A_{d(n)} \cdot k_{(n)} \cdot k_{c(n)})}{A \cdot \sum k_{m\acute{a}x}} \quad (2.2)$$

Em que o  $FGD$  é o Fator Geral de Degradação,  $A_{d(n)}$  é a área de fachada afetada por  $n$  tipos de anomalias em  $m^2$ ,  $k_{(n)}$  é o coeficiente denominado nível de condição das anomalias contido no intervalo de 1 a 4,  $k_{m\acute{a}x}$  é a constante equivalente ao nível da pior condição ( $k_{m\acute{a}x} = 14 = 4 + 4 + 3 + 3$ );  $k_{c(n)}$  é o coeficiente denominado importância relativa das anomalias observadas,  $A$  é a área da amostra de fachada em  $m^2$  e  $n$  é a referência do tipo de anomalia ( $n=1$  descolamento cerâmico,  $n=2$  fissuras e  $n=3$  falha nas juntas,  $n=4$  eflorescência).

Os coeficientes de ponderação  $k_{(n)}$ ,  $k_{c(n)}$  e  $k_{m\acute{a}x}$  propostos por Silva (2014) e Souza (2016) estão apresentados na Tabela 2.4 e Tabela 2.5.



Tabela 2. 4 – Constantes de ponderação da importância relativa das anomalias (Silva, 2014).

Anomalias	$k_{c(n)}$
Falha de Rejunte (FR)	0,06
Eflorescência (EF)	0,12
Falha de Vedação (FV)	0,08
Fissuração (FI)	1,00
Desc. Cerâmico (DC)	0,82

Tabela 2. 5 – Critério dos níveis de condição das anomalias (Souza, 2016).

Nível de condição	Nível de ponderação ( $k_{(n)}$ )	Anomalia	Área degradada (%)
Nível 0 (Melhor condição)	-	Degradação não detectável visualmente	-
Nível 1 (Boa condição)	1	Falha de Rejunte (FR)	< 4,3 %
		Eflorescência (EF)	< 1,2 %
		Falha de Vedação (FV)	< 5,7 %
Nível 2 (Degradação leve)	2	Falha de Rejunte (FR)	< 4,0%
		Eflorescência (EF)	< 37,1%
		Falha de Vedação (FV)	4,3 % < x < 9,0 %
		Fissuração (FI)	1,2 % < x < 1,5 %
		Desc. Cerâmico (DC)	5,7 % < x < 8,1 %
Nível 3 (Degradação moderada)	3	Falha de Rejunte (FR)	> 9,0 %
		Eflorescência (EF)	> 1,5 %
		Falha de Vedação (FV)	> 8,1 %
		Fissuração (FI)	4,0 % < x < 6, 1%
		Desc. Cerâmico (DC)	37,1 % < x < 49,1 %
Nível 4 (Degradação generalizada)	4	Fissuração (FI)	> 6,1 %
		Desc. Cerâmico (DC)	> 49,1 %

### 2.5.3 Fator de Danos ponderado (FD<sub>w</sub>)

Para avaliar a intensidade da degradação nas zonas, torna-se necessário empregar o indicador de degradação denominado por Fator de Danos Ponderado ( $FD_w$ ). Esse indicador é a razão da área afetada da zona pela área total da zona (equação 2.3), em cada amostra do conjunto de dados.

$$FD_w = \frac{A_{dz}}{A_z} \quad (2.3)$$

Em que o  $FD_w$  é o Fator de Danos Ponderado,  $A_{dz}$  é a área danificada da zona analisada na amostra em m<sup>2</sup> e  $A_z$  é a área total da zona na amostra em m<sup>2</sup> ( $z = PC, AB, SC, CE, TP, TO$ ).

Esse indicador é obtido para cada amostra do conjunto de dados e avaliado em termos da média dos valores obtidos e podem variar de 0, quando toda a área da zona não apresenta nenhum tipo de anomalia, a 4, quando toda a área da zona é afetada por todas as anomalias simultaneamente.

#### 2.5.4 Índice de gravidade relativa (IGR)

O IGR é um indicador aplicado as zonas das fachadas que permite verificar a gravidade da degradação. A gravidade da presença de anomalias pontuais ou generalizados pode ser averiguada pela análise comparativa de uma amostra com grande intensidade e baixa frequência de anomalias frente a uma amostra com baixa intensidade e elevada frequência de anomalias. O IGR consiste no produto da média de  $FD_w$  pela frequência de ocorrência das anomalias na zona (Equação 2.4). A observação do efeito do IGR é investigada em maior detalhe no capítulo 4.

$$IGR = \overline{FD_w}(x) \cdot f_x \quad (2.4)$$

Em que o  $IGR$  é o Índice de Gravidade Relativa,  $x$  é a classe da degradação variando de 1 a 4,  $\overline{FD_w}(x)$  é a média do indicador de degradação na classe  $x$  e  $f_x$  é frequência de ocorrência de  $FD$  na classe variando de 0 a 1.

#### 2.6 Métodos de previsão de vida útil

Há mais de duas décadas pesquisas relacionadas a estimativa de vida útil e avaliação da durabilidade de produtos da construção civil têm sido realizadas. Embora existem diversos modelos de previsão de vida útil, nenhum modelo de previsão apresentam uma elevada precisão devido aos diversos fatores que atuam em conjunto sobre o sistema de fachada (Madrigal *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2012; Kazmierczak *et al.*, 2016). A dificuldade de obter acurácia nos modelos de previsão de vida útil ocorre muitas vezes devido à falta de informações quanto aos fatores de degradação listados pela ISO 15686-7 (2006). Há uma lacuna de informações de dados que não são coletados, tais como dados relacionados a condições ambientais específicas e do período de construção (Andrade *et al.*, 2017). As metodologias para estimava da vida útil propostas na ISO 15686-2 são ferramentas importantes para integrar o conceito de durabilidade ainda na fase de projeto dos edifícios.

Os modelos de previsão de vida útil buscam exprimir o processo de degradação para que o desempenho de sistemas construtivos sejam previstos. Alguns pesquisadores (Silva *et al.*, 2016, Souza *et al.*, 2016) propõem e averigam diversos modelos previsão da vida útil, os quais incluem vários fatores que podem influenciar a evolução da degradação. Os principais métodos utilizados para a estimativa da vida útil (Figura 2.16) podem ser distinguidos em três abordagens diferentes: métodos determinísticos, métodos probabilísticos (ou estocásticos) e métodos de engenharia (Hovde, 2004; Jernberg *et al.*, 2004).



Figura 2. 16 – Abordagens dos principais métodos utilizados para a estimativa da vida útil.

Embora sejam distintas estas abordagens, existe dependência dos métodos probabilísticos e de engenharia em relação ao determinístico. Os métodos probabilísticos e de engenharia são baseados em informações prévias dos métodos determinísticos, o qual depende unicamente do conhecimento e experiência do profissional que utiliza a ferramenta. Portanto, a previsão de vida útil inicialmente é avaliada pelos métodos determinísticos, a qual fornece e permite a aplicação dos demais métodos.

Em geral, os métodos determinísticos são mais simples, de fácil compreensão e aplicação, além de consumir menos tempo. Os métodos determinísticos são fundamentados pelos fatores de degradação e seus mecanismos e resultam em uma função que permite estimar a vida útil. Exemplos de métodos determinísticos são método regressão simples e múltipla, linear e não linear e método fatorial determinístico.

Já os outros métodos são mais complexos, consomem mais tempo e geralmente depende de uma grande quantidade de informações além de *softwares*. Entretanto, esses apresentam como grande vantagem a precisão e eficácia dos resultados. Os métodos probabilísticos, também

conhecidos como métodos estocásticos, são baseados em informações da probabilidade de deterioração do sistema. Diferentemente dos modelos determinísticos, esses não resultam em único valor como estimativa e sim em possíveis intervalos de vida útil (de Brito *et al.*, 2012). A eficácia deste método emerge devido a este lidar com a incerteza de um fenômeno tão complexo quanto ao processo de degradação. Exemplos de métodos probabilísticos são regressão logística, método fatorial probabilístico e cadeias de Markov.

Os métodos de engenharia contemplam combinação dos métodos determinísticos e probabilísticos, assim conservando a simplicidade dos métodos determinísticos e eficácia dos métodos probabilísticos e reduzindo a quantidade de informação necessária para a aplicação do método. Exemplos de métodos de engenharia são redes neurais artificiais e lógica difusa.

Embora existam vantagens e desvantagens em cada um dos métodos, nenhum deles são totalmente precisos. A norma ISO 15686-1 (2011) recomenda ainda que seja realizado mais de uma forma de estimação de vida útil e haja comparação entre eles, devido a possível imprecisão de alguns métodos (Rudbeck, 1999; Silva, 2015). Outra questão que deve ser considerada é a possibilidade de calcular a vida útil de sistema de fachada baseado em banco de dados que apresentam tendência de comportamento representativa para o sistema em análise (Rudbeck, 1999).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrito os procedimentos metodológicos adotados. A metodologia é dividida em três fases (Figura 3.1). Inicialmente na primeira fase é descrito a mensuração da degradação de sistemas de revestimento de fachadas. Na segunda fase é abordado sobre as condições de exposição das fachadas. Por fim, na terceira fase é apresentado os modelos de previsão de vida útil utilizados.

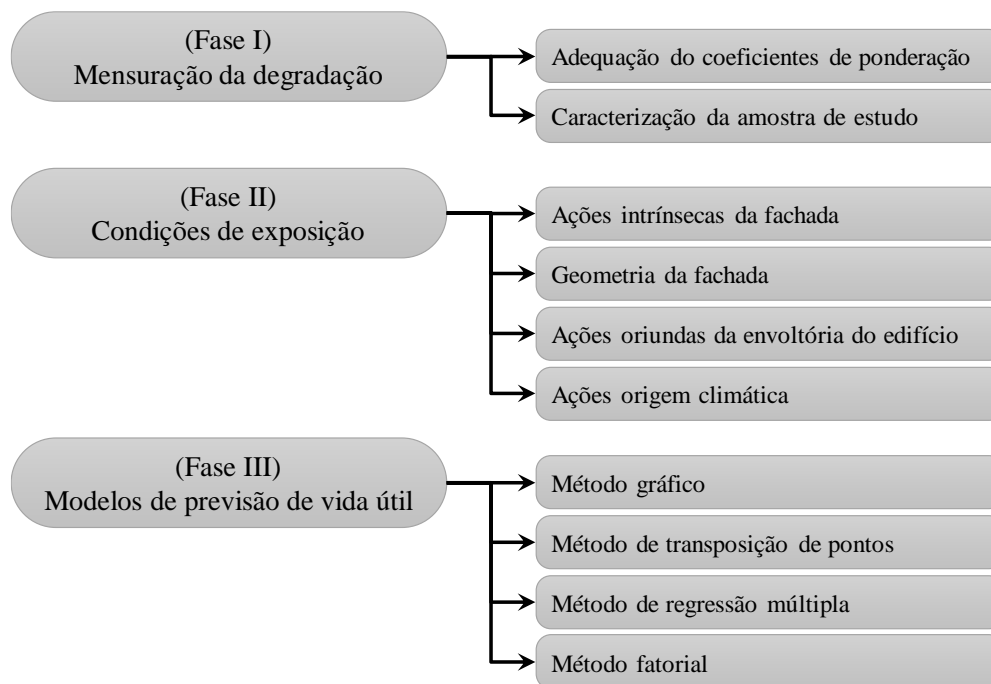


Figura 3. 1 – Estrutura da metodologia.

Na fase I, a adequação dos coeficientes do indicador de degradação Fator Geral de Degradação (FGD) é descrita inicialmente (seção 3.1). A caracterização da amostra de estudo é apresentada na seção 3.2, sendo contemplado o aumento do banco de dados e apresentado uma análise de espúrios.

Com relação a condição de exposição da fachada abordado na fase II, nesta pesquisa se limita as ações intrínsecas da fachada representado pelos aspectos construtivos relacionados à projeto (seção 3.3.1), da geometria de fachada (seção 3.3.2), das ações oriundas do ambiente no qual o edifício está inserido (seção 3.3.3), das ações origem climática (seção 3.3.4).

Na fase III, a forma de aplicação de alguns modelos de degradação é descrita. Inicialmente, o método gráfico explora análises singulares por meio da regressão simples (seção 3.4.1). Esse método subsidia informações para a aplicação dos demais métodos. O método de transposição de pontos trata-se do ajuste da curva de degradação média para cada caso do banco de dados

(seção 3.4.2). O método de regressão múltipla é fundamentado por ferramentas estatísticas e é capaz de estimar a vida útil considerando diversas variáveis (seção 3.4.3). Os modelos matemáticos obtidos por esse modelo referem-se a modelos lineares e não lineares. O método fatorial refere-se ao modelo proposto pela norma britânica ISO 15686-7 (2012), em que são consideradas influencia positivas e negativas dos fatores de degradação sobre a vida útil de referência (seção 3.4.4).

As variáveis consideradas neste estudo são distintas para cada fase. As variáveis dependentes e as variáveis independentes para cada fase estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Variáveis dependentes e independentes de estudo.

Fase de estudo	Variáveis independentes (entrada)	Variáveis dependentes (saída)
Fase I	Anomalias: Descolamento Cerâmico, Fissuração, Falha nas juntas e Eflorescência.	Indicadores de degradação (FGD)
Fase II	Características: Idade, Claridade da cerâmica, Dimensão da cerâmica, Altura do edifício, Elemento construtivo, Existência de juntas, Extensão da fachada, Orientação, Zonas da fachada e Grau de proteção.	Indicadores de degradação (FD, FGD, FDw e IGR)
Fase III	Quantificação das características	Vida útil estimada para cada modelo.

### 3.1 Mensuração da degradação

A aplicação do MMD resulta em indicadores de degradação que permitem diversas formas de análises do comportamento da degradação, desde as mais específicas as mais gerais. Além disso viabilizam a reprodução de modelos matemáticos de degradação, os quais permitem realizar a estimativa de vida útil das fachadas.

A adequação dos coeficientes de ponderação ( $k_{c(n)}$  e  $k_{(n)}$ ) do indicador de degradação FGD é uma das propostas desta pesquisa. Os coeficientes de ponderação  $k_{c(n)}$ ,  $k_{(n)}$  e  $k_{máx}$  expressam o peso associado a importância para cada tipo de anomalia. O  $k_{c(n)}$ , que representa a importância relativa da anomalia, é o coeficiente obtido pela matriz de correlação das anomalias e as possíveis causas (seção 3.1.1). O  $k_{(n)}$  é o nível de condição de degradação, que estabelece uma escala de degradação, de forma hierárquica, das anomalias conforme sua extensão de ocorrência (seção 3.1.2). O  $k_{máx}$  equivale ao coeficiente de pior nível de condição para cada tipo de anomalia. O somatório dos coeficientes de  $k_{(n)}$  para cada anomalia

permite a representação da totalidade da fachada degradada com o maior nível de gravidade possível.

### 3.1.1 Coeficiente de importância relativa ( $k_{c(n)}$ )

Diferentemente do coeficiente de importância relativa proposto por Silva (2014), esta pesquisa propõe adequação ao coeficiente  $k_{c(n)}$  considerando as causas das anomalias e o desempenho dos sistemas. A deficiência do conhecimento técnico e a carência de ferramentas sistemáticas e práticas prejudicam a realização das etapas do ciclo de vida do edifício e o desempenho dos sistemas. Nesse sentido, a análise da relação entre as anomalias, suas causas e as consequências no desempenho do sistema se torna fundamental para avaliar a influência das etapas de produção sobre o surgimento de anomalias e no desempenho dos sistemas.

A importância relativa das anomalias comuns em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas pode ser traduzida em coeficientes,  $k_{c(n)}$ , obtidos através de matrizes de correlação (Silvestre, 2005). Desta forma para a obtenção dos coeficientes de importância relativa da anomalia, é analisado a relação entre as anomalias e as suas causas e a relação entre a anomalia e como essa afeta o grau de desempenho por meio de matrizes de correlações. As matrizes são pontuadas com valores de 0 (não há relação), 1 (há uma baixa relação) ou 2 (há uma forte relação).

A matriz de causas das anomalias resulta no indicador de causas das anomalias ( $I_c$ ), obtido pela equação 3.1, e sintetiza a relevância das causas no surgimento de cada anomalia (Santos, 2018). A ordem de relevância destas causas no estudo da degradação é diretamente proporcional ao valor de  $I_c$ .

$$I_c = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{cj}}{\sum \mu_c} \quad (3.1)$$

Em que o  $I_c$  é o indicador de causas da anomalia  $j$ ,  $N$  é a quantidade de etapas analisadas (projeto, execução, uso e manutenção),  $\mu_{cj}$  é a média dos índices das causas da anomalia  $j$  em cada etapa analisada e  $\mu_c$  é a média dos valores de  $\mu_{cj}$  para todas as anomalias (DC, FI, FR e EF).

Da mesma forma, a relação entre as anomalias e as consequências no desempenho do sistema resultam no indicador de queda de desempenho ( $I_d$ ), obtido pela equação 3.2, e reflete no impacto de cada anomalia sobre o desempenho do sistema. O  $I_d$  é a razão entre a soma dos

fatores de desempenho de determinada anomalia e a soma total dos fatores de desempenho de todas as anomalias.

$$I_d = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{d_{total}} \quad (3.2)$$

Em que o  $I_d$  é o indicador de queda de desempenho de uma anomalia,  $N$  é o número de anomalias;  $d_i$  é o valor representativo de cada anomalia relacionado ao desempenho;  $d_{total}$  é a soma dos valores de  $d_i$  considerando todas as anomalias.

O  $k_{cn}$  é a razão entre o produto entre o indicador das causas e o indicador de desempenho e a normalização pelo máximo valor do produto entre o indicador de desempenho e o indicador das causas, conforme equação 3.3. Essa normalização permite a quantificação e reflete diretamente a importância das anomalias, fornecendo melhores subsídios no estudo dos modelos de degradação e estimativa da vida útil de fachadas (Santos, 2018).

$$k_{cn} = \frac{I_c \cdot I_d}{\max(I_c \cdot I_d)} \quad (3.3)$$

Em que o  $k_{cn}$  é o coeficiente de importância relativa da anomalia,  $I_c$  é o indicador de causas de cada anomalia e  $I_d$  é o indicador de queda de desempenho de uma anomalia.

### 3.1.2 Coeficiente dos níveis de condição ( $k_n$ )

O coeficiente de nível de condição de degradação classifica a extensão da degradação. Este indicador estabelece uma escala de degradação, de forma hierárquica, das anomalias conforme sua extensão de ocorrência. A descrição dos níveis de condição e os coeficientes de ponderação das anomalias referente ao nível de condição adotados nessa pesquisa estão dispostos na Tabela 3.2 e Tabela 3.3. Os critérios adotados são fundamentados pela análise exploratória de compreensão do indicador de degradação como resposta do comportamento da degradação ao longo do tempo (seção 4.1.2) e pela literatura (Bordalo *et al.*, 2010; NBR 15575, 2013; Souza, 2016).



Tabela 3. 2 – Descrição dos níveis de condição.

Nível de condição ( $k_{(n)}$ )	Descrição
1 Condição boa (aceitável)	Condição caracterizada por apresentar boas condições. A incidência de anomalias não prejudica a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação. Essa condição não causa riscos à segurança dos usuários. Nessa condição é sugerida a realização de manutenções preventivas.
2 Condição de degradação pontual	Condição caracterizada pela presença de anomalias pontuais que prejudicam a funcionalidade do sistema de vedação. Entretanto não prejudicam a durabilidade e segurança dos usuários. Nessas condições é sugerida a realização de manutenções preditivas, isto é, manutenções periódicas que avaliem o desempenho do sistema.
3 Condição de estado limite de serviço	Condição caracterizada pela presença generalizada e simultânea de anomalias que prejudicam a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação. O impacto visual do excesso de anomalias na fachada pode gerar insegurança e transtornos psicológicos aos usuários. Nessas condições é sugerida a realização de manutenções corretivas.
4 Condição de estado limite último	Condição caracterizada pela presença generalizada de anomalias que prejudicam a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação. Essa condição reduz significativamente os níveis de segurança apresentando risco de colapso ou ruína do sistema de vedação. Nessas condições é sugerida a realização de restauração ou reabilitação do sistema.

Tabela 3. 3 – Coeficientes referente ao nível de condição das anomalias.

Nível de condição ( $k_n$ )		% de área degradada			
		Descolamento Cerâmico	Fissuração	Falha nas Juntas	Eflorescência
1	Condição boa (aceitável)			10%	10%
2	Condição de degradação pontual	5%	20%	30%	30%
3	Condição de estado limite de serviço	30%	50%	maior que 30%	maior que 30%
4	Condição de estado limite último	maior que 30%	maior que 50%		

### 3.2 Caracterização da amostra de estudo

Os edifícios contemplados no banco de dados estão situados no Distrito Federal, unidade federativa do Brasil, na região centro Oeste (Figura 3.2). Brasília, situada no centro do país, tem coordenadas geográficas de latitude 15,78 ° ao sul e de longitude 47,92 ° ao Oeste e tem uma altitude de 1.130 m. A cidade de Brasília é reconhecida pela qualidade de sua arquitetura e urbanismo, especialmente por serem considerados “Patrimônio Nacional” e “Patrimônio Cultural da Humanidade” pela UNESCO. O terreno, situado no planalto central brasileiro, é

marcado por planalto de topografias suaves, isto é, terreno plano ou com suaves ondulações. Os edifícios residenciais são implantados isoladamente uns dos outros e são limitados a altura máxima de seis pavimentos.

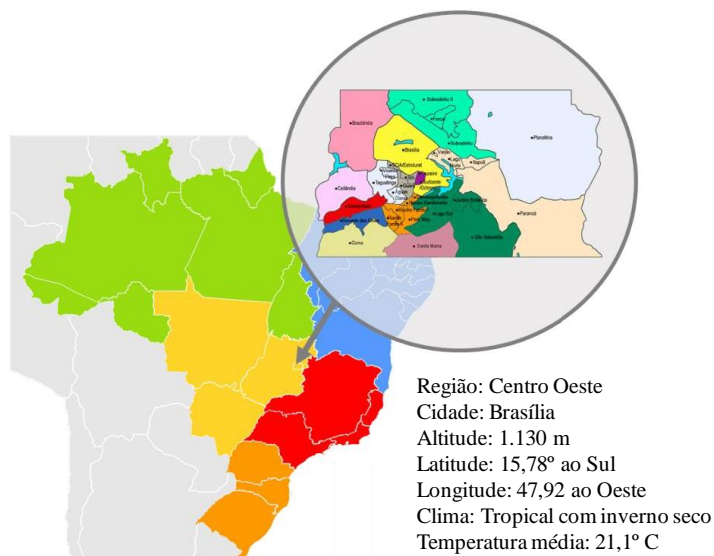


Figura 3. 2 – Localização geográfica do Distrito Federal.

Brasília tem clima tropical com inverno seco de acordo com a classificação de Köppen devido ao longo período de seca durante o ano e está situada na zona bioclimática 4, conforme ilustrado na Figura 3.3 (Maciel, 2002). Nascimento *et al.* (2016) referem que cerca de 39% das horas do ano apresentam alta umidade relativa (acima de 75% de HR) e uma temperatura média de 21,1 ° C.

Geralmente os edifícios residenciais de Brasília são alongados, isto é, apresentam certa horizontalidade, e possuem seis pavimentos mais *pilotis*. O *pilotis* permite a circulação dos usuários no térreo da edificação. As fachadas apresentam grande semelhança nos elementos arquitetônicos, tais como os cobogós e as empenas laterais cegas. O sistema de vedação vertical comumente empregado no Distrito Federal é composto por alvenaria de blocos cerâmicos com revestimento em cerâmicas (Braga e Amorim, 2004; Amorim e Flores, 2005). Embora seja uma cidade considerada jovem, Brasília sofreu uma evolução tecnológica na qualidade dos materiais e mão de obra ao longo de seus 59 anos (Moura *et al.*, 2014; Bauer *et al.*, 2015).

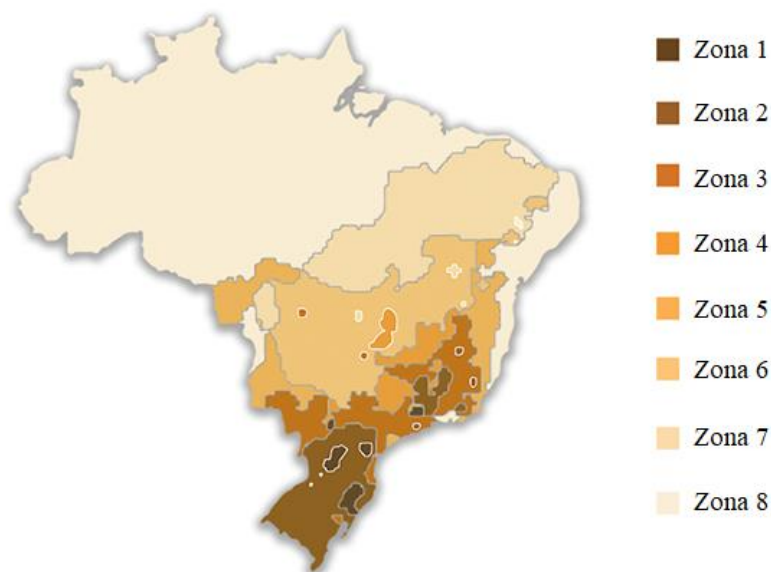


Figura 3. 3 – Zonas bioclimáticas do Brasil (adaptado de NBR 15220-3, 2005 e Joaquim *et al.*, 2015).

Com as informações sistematizadas do banco de dados é possível proceder a análise do comportamento da degradação de edifícios situados no Distrito Federal. A qualidade das amostras é mais importante do que a quantidade de amostras, por isso devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenha amostras representativas quanto às suas natureza e características. Para realizar inferências sobre a durabilidade e degradação de edifícios de uma determinada localidade não é necessário obter informações de todo o universo de edifícios (Silva *et al.*, 2016). A qualidade é medida pela variabilidade das amostras, em que quanto menor a variabilidade maior a qualidade do banco de dados. Conforme Norman e Streiner (2008), a quantidade de casos de estudos necessários para realizar inferências sobre a questão abordada pode ser reduzida, desde que essa disponha de uma amostra representativa.

A amostra de estudo é constituída pela inclusão de informações no banco de dados que tem sido elaborado por pesquisadores da Universidade de Brasília orientados pelo Professor Bauer (Silva, 2014; Souza, 2016; Pinheiro, 2017; Piazzarollo, 2019). O banco de dados estudado por Souza (2016) é nomeado como ‘Base de dados A’ e o novo banco de dados com a inserção de novos casos de fachadas desta pesquisa é nomeada como ‘Base de dados B’. A ‘Base de dados A’ apresenta déficit de informações nas idades superiores a 20 anos, principalmente na lacuna entre os 20 e 30 anos. Desta forma, a presente tese empenhou-se em suprir essa lacuna. Inicialmente a ‘Base de dados A’ contemplava 184 amostras de fachadas.

Em uma análise comparativa das bases de dados se observa que houve aumento considerável das informações de fachadas de edifícios com idades superiores a 20 anos (Figura 3.4). Entretanto, o tratamento dos dados foi baseado em uma análise de espúrios devido a elevada dispersão dos resultados de FGD (Figura 3.5). Esse tratamento tem como finalidade identificar amostras de fachadas que apresentam particularidades em sua condição de degradação e, por conseguinte, não são representativas para o fenômeno estudado. O banco de dados considerados no presente estudo, ‘Base de dados B’, após a análise de espúrios, contempla 307 amostras de fachadas.

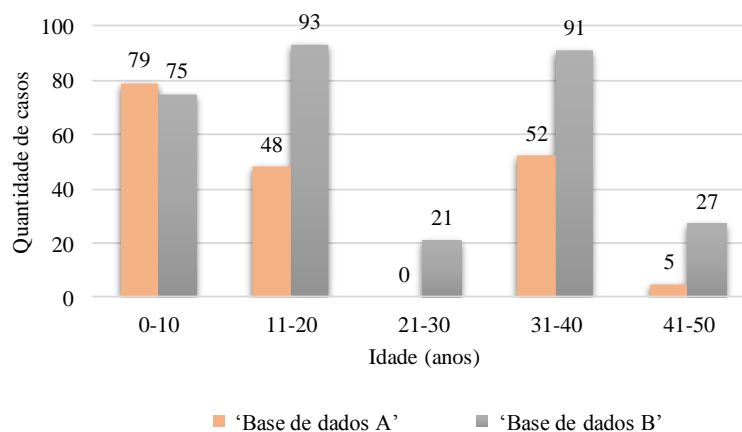


Figura 3. 4 – Distribuição de idade das amostras de fachadas.

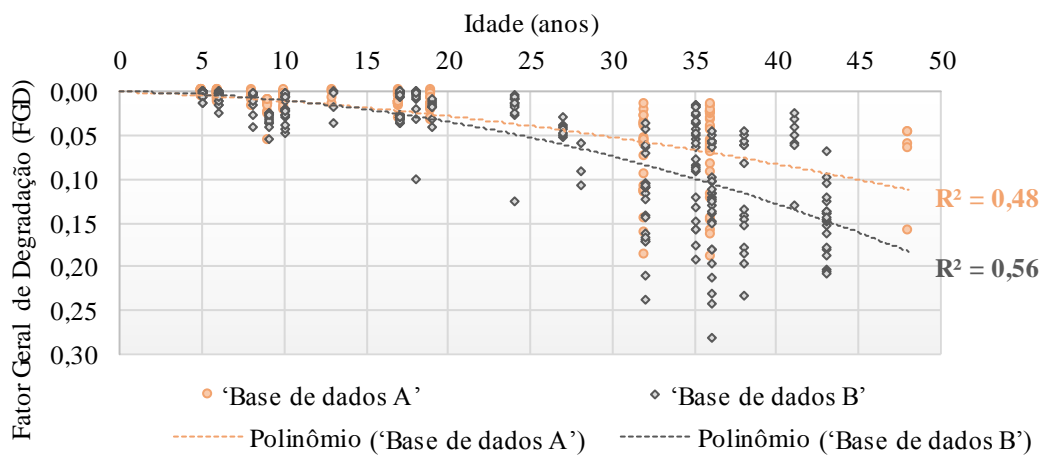


Figura 3. 5 – Evolução da degradação ao longo do tempo dos edifícios no Distrito Federal.

A Figura 3.5 ilustra a evolução da degradação ao longo do tempo dos edifícios residenciais localizados no Distrito Federal. Uma vez atualizado o banco de dados, o indicador de degradação pode ser analisado em termos da curva de degradação. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) aumentou em comparação com a curva apresentada pela ‘Base de dados A’ de 0,48 para 0,56. A elevada variação de FGD reflete a complexidade do fenômeno de degradação. A frequente atualização e aumento do banco de dados é essencial para aumentar

o poder estatístico e preencher possíveis lacunas existentes (Galbusera *et al.*, 2014; Bauer *et al.*, 2015).

A caracterização da amostra pode auxiliar na avaliação dos diversos aspectos que influenciam na degradação de revestimento cerâmico. Desta forma, o objetivo da caracterização da amostra é descrever as particularidades, tipificar os edifícios analisados e estabelecer as variáveis dependentes e independentes. A distribuição das amostras do banco de dados em função da idade e das características consideradas neste estudo estão ilustradas na Figura 3.6. Os padrões de distribuição de quantidade de amostras são distintos para cada tipo de característica. Essa divergência de padrão é reflexo das condições dos edifícios situados no Distrito Federal. Há uma semelhança entre os edifícios de Brasília, uma vez que esta foi uma cidade devidamente planejada e apresenta particularidades em sua arquitetura (Gordon, 2006; Machado, 2007; França *et al.*, 2009; Bezerra *et al.*, 2017).

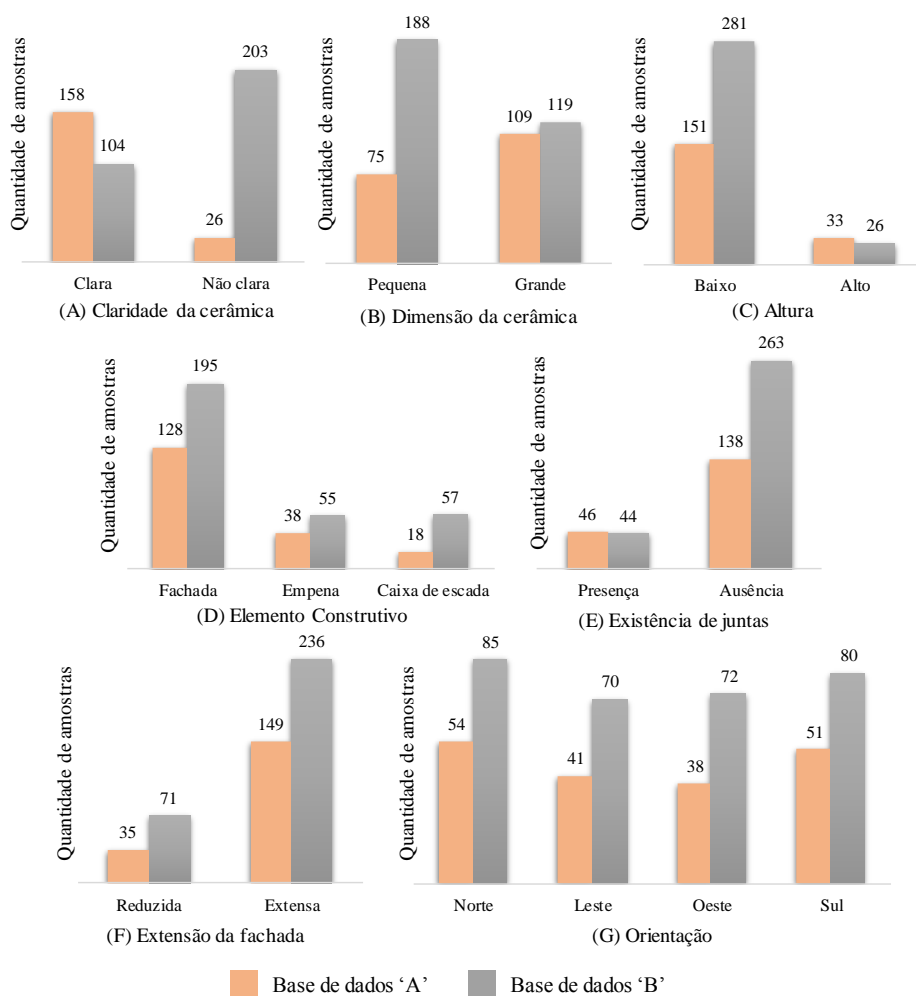


Figura 3. 6 – Distribuição da quantidade de casos para as características das amostras.

### 3.3 Condições de exposição

Com relação a condição de exposição da fachada, a análise é realizada em função das ações intrínsecas do sistema de vedação representado pelos aspectos construtivos relacionados à projeto (seção 3.3.1), da geometria de fachada (seção 3.3.2), das ações oriundas do ambiente no qual o edifício está inserido (seção 3.3.3), da influência das ações origem climática (seção 3.3.4) no desempenho do sistema de vedação.

#### 3.3.1 Características da fachada

O tempo não é o único fator que interfere no processo de degradação. Existem diversos fatores que afetam a durabilidade de edifícios, tais como características do material, condições de execução, uso adequado dos sistemas, frequência de manutenção. Como determinado por diversas normas (AIJ, 1989; BSI 7543, 1992; BSI 8000, 1989; ISO 15686-7, 2006), a avaliação da durabilidade deve contemplar o máximo de informações possíveis dos fatores de degradação.

As características do sistema de vedação abordadas nesse estudo, conforme ilustrado na Figura 3.7, contemplam: características de materiais, representada pela claridade e dimensão das cerâmicas; características de projeto, representada pelo elemento construtivo, existência de juntas, altura do edifício e área da fachada, e; características de exposição ao ambiente representada pela orientação da fachada.

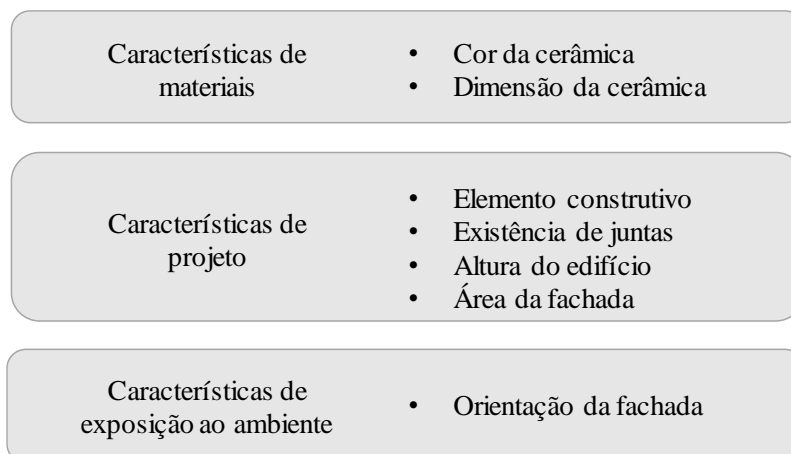


Figura 3.7 – Fatores de degradação em função das características da fachada.

Ainda que os fatores relacionados à execução influenciam no processo de degradação, estes ainda não foram considerados, sendo proposta para a continuidade dessa pesquisa verificar a degradação em função do nível de execução. Entretanto, há uma dificuldade de mensuração deste fator devido à falta de informações quanto a execução, uma vez que este estudo é

baseado em informações de inspeções após vários anos da execução desse. Ressalta-se ainda que as leis e as normas vigentes na época de construção não exigiam documentos que descrevem como e quais materiais foram usados em cada sistema da edificação.

Cabe destacar que, os fatores relacionados ao uso e manutenção não foram analisados devido à dificuldade de obtenção de informações. Além de, neste estudo, considerar que os revestimentos que sofreram alguma ação de manutenção recuperam o nível de desempenho e o processo de degradação do revestimento recomeça.

Uma vez que este estudo se baseia em inspeções realizadas in situ após vários anos da construção e devido à falta de informações sobre o processo de projeto e execução, algumas características são difíceis de analisar. Portanto, a análise da relação existente entre as escolhas dos materiais e o desempenho do sistema em análise é realizada apenas pela claridade da cerâmica e dimensão da cerâmica. Os edifícios que compõem o banco de dados apresentam fachadas em diversas cores. A fim de otimizar a análise da influência da claridade, a classificação das cerâmicas é definida em função da absorvância. A fachada com predominância de cerâmicas com absorvância igual ou inferior a 30 são consideradas fachadas claras. A fachada com predominância de cerâmicas com absorvância superior a 30% são consideradas fachadas não claras. Nas primeiras décadas após a inauguração de Brasília, cerâmicas com dimensões de 2 cm x 2 cm foram bastante utilizadas nos sistemas de revestimento de fachadas de edifícios residenciais. Entretanto, há também em menor proporção alguns edifícios com cerâmicas de dimensões superiores a 2 cm x 2 cm. Sendo assim, a classificação das fachadas em função da dimensão da cerâmica foi definida como fachadas com predominância de cerâmicas pequenas, área menor ou igual a 4 cm<sup>2</sup>, e fachadas com predominância de cerâmicas grandes, área superior a 4 cm<sup>2</sup>.

A relação existente entre as escolhas projetuais e o desempenho das edificações é possível perceber através de algumas análises, tais como área da fachada, presença de juntas e elementos construtivos (Goldberg, 1998; Silvestre e de Brito, 2011). Os elementos construtivos considerados referem-se a fachada, empena e caixa de escada conforme sugerido por Souza (2016) e Pinheiro (2017). As amostras classificadas como fachadas referem-se a linha de fachada frontal ou posterior, as empenas são as fachadas laterais do edifício e, por fim, as caixas de escada são fachadas onde estão situadas as escadas de incêndio do edifício. Os edifícios situados em Brasília refletem a evolução tecnológica da execução dos sistemas

de vedação vertical, por conseguinte, edifícios com idades mais avançadas não apresentam juntas horizontais nas fachadas.

Os edifícios situados no Distrito Federal apresentam particularidades na sua arquitetura, pois como já comentado essa foi uma cidade devidamente planejada e tem limitação quanto à altura dos edifícios. No plano piloto, região administrativa do Distrito Federal, a quantidade máxima de pavimentos para edifícios residências equivale a seis pavimentos sobre pilotis. Desta forma, o critério de classificação quanto à altura dos edifícios refere-se a seis pavimentos, em que edifício com até seis pavimentos é considerado baixo e edifício com mais de seis pavimentos é considerado alto. As fachadas classificadas como reduzidas são as que apresentam até 100 m<sup>2</sup> de área. As fachadas com áreas superiores a 100 m<sup>2</sup> são classificadas como fachadas extensas. Essa classificação é respaldada pela limitação de altura de edifícios para algumas regiões no Distrito Federal. Considerando que a grande maioria das fachadas apresentam alturas iguais ou menores que 6 pavimentos, aproximadamente 18 m, as amostras de fachadas com larguras de até 5,5 metros são estreitas. A orientação para qual a fachada está orientada é definida em função do azimute e classificada em um dos quatro quadrantes principais (Norte, Sul, Leste e Oeste), conforme descrito na seção 2.5.

### 3.3.2 Geometria da fachada

A análise da geometria da fachada explora a configuração em função das zonas constituintes. O processo de degradação ocorre de forma diferenciada ao longo da fachada, onde existem zonas que são mais suscetíveis ao surgimento de determinadas anomalias (Souza *et al.*, 2016). O padrão de degradação da fachada é analisado pela ocorrência de anomalias em cada zona e pelos indicadores de degradação FD das zonas, FDw e IGR obtidos pela aplicação do MMD.

### 3.3.3 Contorno do edifício

As fachadas de edifícios residenciais na cidade de Brasília enquadrar-se em um ambiente de construção com edifícios localizados em grandes centros urbanos, em que pelo menos metade dos edifícios tem mais de quatro pavimentos, conforme norma francesa DTU 20.1 (1994). Os critérios para determinação do grau de proteção é uma adaptação dos critérios propostos pela norma francesa DTU 20.1 (1994). Essa norma enfatiza que a importância do fator de exposição está associada a durabilidade da fachada, que apresenta gravidade em função da orientação e do relevo local. Desta forma, baseado nos conceitos da norma francesa



(DTU 20.1, 1994), as fachadas são classificadas em fachadas protegidas ou fachadas não protegidas. A Figura 3.8 ilustra condições para a classificação do grau de proteção da fachada.

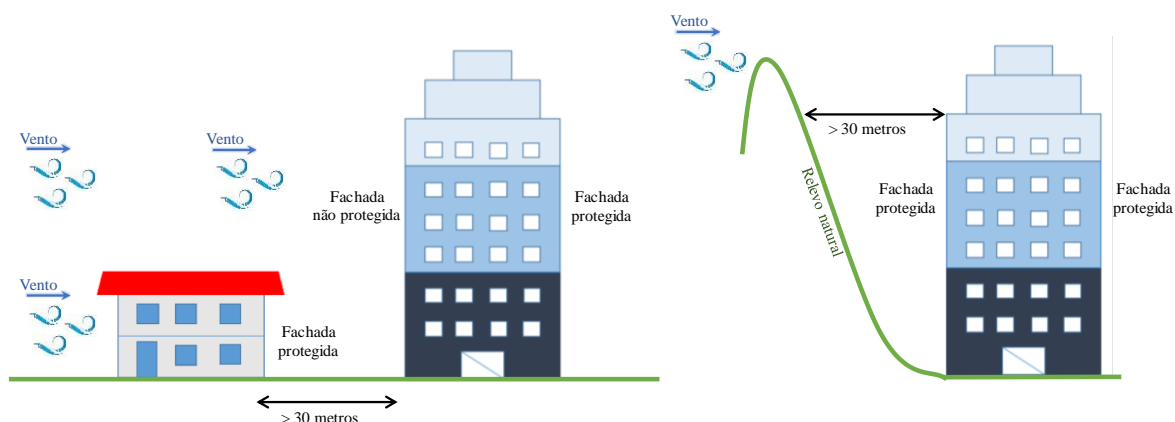


Figura 3.8 – Critério de classificação do grau de proteção (adaptado de DTU 20.1, 1994).

O conceito de fachada protegida deve ser apreciado com cautela, pois uma só pode ser considerada protegida se responder simultaneamente as seguintes condições: apresentar paredes de fachada até 28 m acima do nível do solo; fachadas opostas à direção de predominância anual dos ventos da chuva; fachadas protegidas por construções ou relevo natural localizado no máximo a 30 m de distância.

Conforme Zanoni (2015), a direção predominante do vento na cidade de Brasília é na orientação Norte, com valores máximos próximos de 10,4 m/s e com média anual de 2,45 m/s. A distância decrescente do obstáculo mais próximo mais alto até a fachada reduz a quantidade de chuva dirigida e incidência de radiação (Coutu *et al.*, 2013), indicando que fachadas protegidas tendem a degradar-se menos que as fachadas desprotegidas. As fachadas não protegidas são as que não satisfazem as condições estabelecidas para ser considerada fachada protegida. Isso significa que sob nenhuma circunstância edifícios com proximidade superior a 30 metros, independente da altura, possam ser considerados como condições protegidas contra as ações do vento e da chuva.

### 3.3.4 Agentes climáticos de degradação

A norma brasileira de desempenho NBR 15575-1 (2013) aponta como alguns dos requisitos exigidos para o sistema de vedação externa a estanqueidade à água e a resistência a carga térmicas. As fachadas devem ser estanques à infiltração de água proveniente das chuvas ou de outras fontes de umidade. Além disso, essas devem constituir-se em uma camada reguladora das cargas térmicas proporcionando ambiente confortável para o usuário.

A fim de verificar a função de estanqueidade e de resistência de cargas térmicas, o presente estudo considera, dentre as variáveis que conduzem o clima exterior, a ação da radiação solar como agente térmico e a ação da chuva dirigida como agente higroscópico. Para analisar a resposta da ação dos agentes climáticos, o agente térmico é verificado por meio dos gradientes de temperatura e o agente higroscópico é verificado por meio da variação do teor de umidade no sistema de vedação (Figura 3.9).

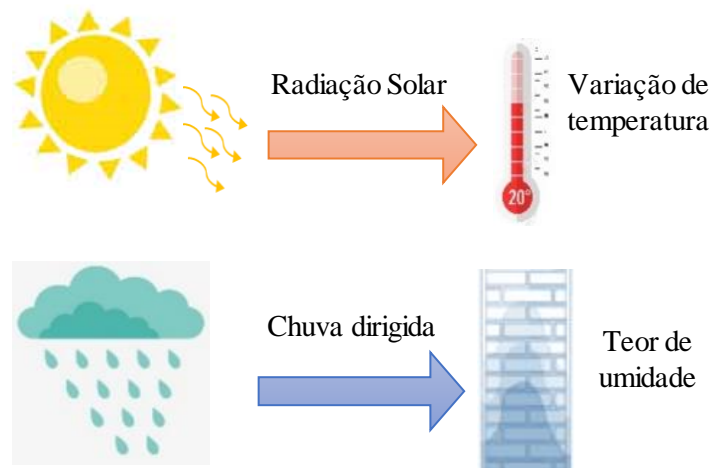


Figura 3. 9 – Ação dos agentes climáticos e variável de resposta no sistema.

O comportamento térmico do sistema de revestimento da fachada é avaliado em função da ação da radiação solar incidida sobre a fachada do edifício. A temperatura é resultado dos efeitos da radiação solar sobre as superfícies e do balanço energético (Zanoni, 2015). A orientação solar condiciona a incidência da radiação solar sobre a fachada (Haase *et al.*, 2009; Gonçalves e Graça, 2004). Neste estudo considera a radiação solar global, isto é, todas as parcelas de radiação difusa, direta e refletida. Portanto, a radiação solar está presente em todas as orientações durante longo período do dia.

O comportamento higroscópico pode ser analisado pela capacidade de absorção de água de cada material. A chuva dirigida é uma das principais fontes de umidade nas fachadas dos edifícios. A associação da precipitação com o vento dá origem a chuva dirigida. Conforme Straube e Burnett (2000) e Zanoni (2015) e Nascimento (2016), essa ação conjunta atinge principalmente as partes superior e lateral dos edifícios formando uma parábola de molhagem (Figura 3.10).

O processo de umidificação e secagem favorece o surgimento de anomalias (Petrucci, 2000; Freitas, 2011), e conseqüentemente, impacta diretamente no desempenho e durabilidade do sistema. Este processo é influenciado pelas condições climáticas da envolvente, representado

nesta pesquisa pela chuva dirigida e pela radiação solar, assim como pela orientação e geometria da construção.

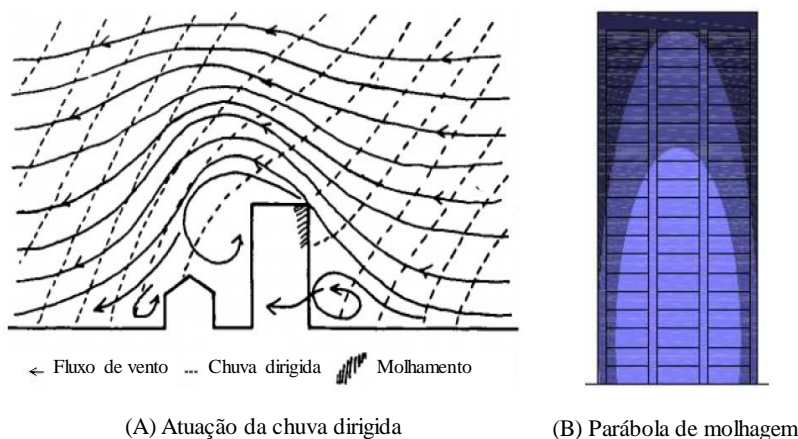


Figura 3. 10 – Ação da chuva dirigida sobre as fachadas de edifícios (adaptado de Straube, 1998 e Poyastro, 2011).

### 3.3.4.1 Simulação do comportamento higrotérmico

A análise do comportamento higrotérmico do sistema de vedação é conduzida pela linha de raciocínio de Zanoni (2015) e Nascimento (2016) e baseada em informações de simulação higrotérmica do *software* Wufi® Pro 5.3. Esse *software* refere-se a uma ferramenta de cálculo computacional para simulação do comportamento higrotérmico da envoltória da edificação e foi desenvolvido pela *Fraunhofer Institute for Building Physics* (WUFI, 2013). Uma vez que este *software* fornece informações higrotérmicas, esse é usado como a principal ferramenta para a mensuração dos agentes climáticos de degradação. As considerações realizadas no processo de simulação, as variáveis de estudo e a organização dos resultados estão sintetizados na Figura 3.11.

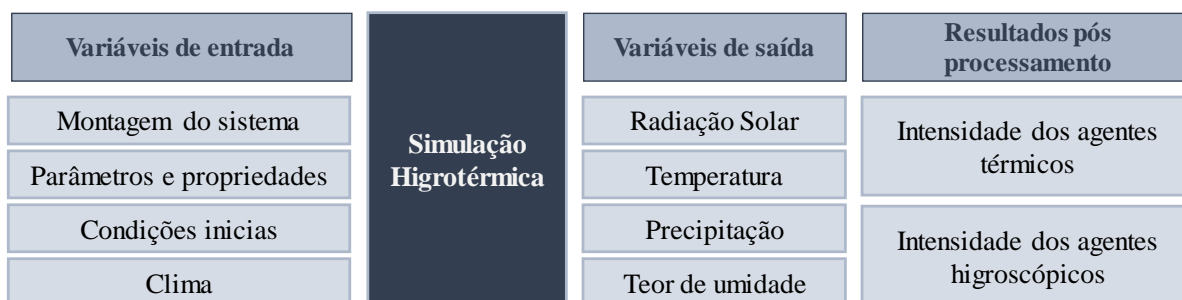


Figura 3. 11 – Etapas do processo de simulação.

As etapas do processo de simulação envolvem os dados de entrada, a simulação higrotérmica, os dados de saída e, por fim, pós processamento. Os dados de entrada referem-se às características e propriedades dos materiais, bem como as condições de contorno e o clima local. A qualidade e precisão da simulação é influenciada pelos dados que são inseridos no

sistema, portanto a definição deve ser criteriosa buscando condições mais próximas de situações reais e similares as encontradas em campo.

Após inserir os dados de entrada é realizado a simulação higrotérmica para um ano. Os dados gerados pelo *software* tratam-se de cargas de fatores climáticos impostas à edificação. Essas cargas referem-se aos dados horários de radiação solar, temperatura, precipitação e teor de umidade. A partir dos dados de saída é possível calcular índices que permitam verificar a intensidade dos agentes de degradação. O índice de temperatura é representado pelo Índice de Intensidade de Temperatura (*Iit*) e o índice de umidade é representado pelo Fator de Impacto da Chuva (FIC).

Uma vez que o presente estudo se refere a fachada com sistema de revestimento cerâmico, os materiais utilizados na composição do sistema de vedação vertical são cerâmica, argamassa de regularização externa, bloco cerâmico e argamassa de regularização interna (Figura 3.12). Ressalta-se que devido a carência de informações de propriedades das argamassas colantes e argamassas de rejunte, essas não foram inseridas no sistema para simulação.

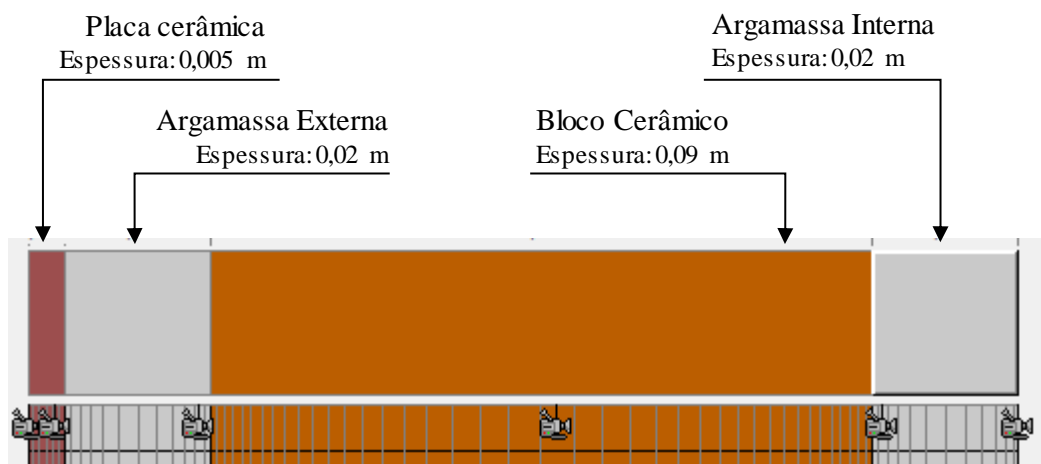


Figura 3. 12 – Camadas constituintes do sistema de vedação para simulação.

Embora dentro do *software* WUFI exista uma imensa base de dados de diversos materiais, para a realização da simulação foram inseridas para cada material as propriedades obtidas em ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM- UnB). Desta forma, a simulação representa a condição mais próxima possível da realidade das fachadas estudadas e gera informações confiáveis.

A argamassa utilizada é a mesma para o revestimento interno e externo. Portanto, as propriedades apresentadas referem-se a três materiais: argamassa, cerâmica e bloco cerâmico.

As propriedades inseridas no *software* WUFI estão apresentadas na Tabela 3.4 e na Figura 3.13.

Tabela 3. 4 – Propriedades dos materiais constituintes do sistema de vedação.

Propriedades Higrotérmicas	Argamassa	Bloco Cerâmico	Placa Cerâmica
Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1830	578	1730
Porosidade (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0,284	0,486	0,290
Calor específico (J/kg.K)	850	850	868
Condutividade térmica (W/m.K)	0,800	0,158	0,492
Fator de resistência à difusão do vapor de água ( $\mu$ )	24	23	116
Teor de umidade de referência (kg/m <sup>3</sup> )	26,00	13,00	1,44
Umidade de saturação livre (kg/m <sup>3</sup> )	210,0	193,0	192,0
Coefficiente de absorção de água (kg/ m <sup>2</sup> .√s)	0,089	0,090	0,001

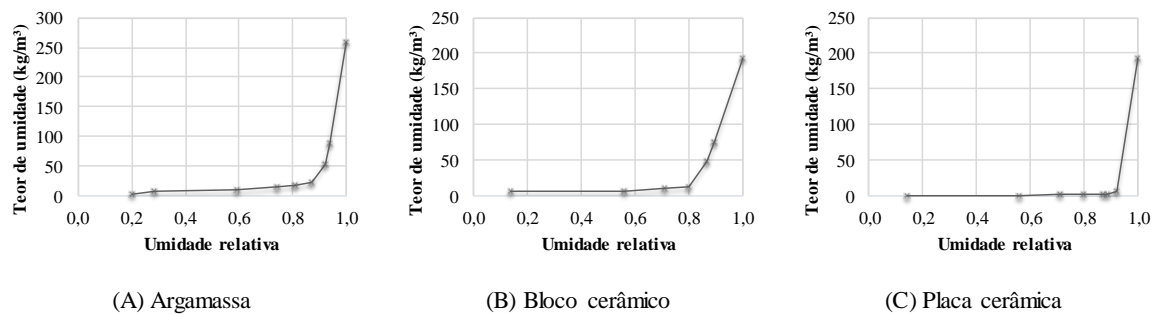


Figura 3. 13 – Curvas higroscópicas dos materiais constituintes do sistema de vedação.

Os dados horários de precipitação, temperatura, radiação e teor de umidade foram obtidos em função da orientação para qual a fachada está voltada. Considera-se as quatro principais orientações cardeais Norte, Sul, Leste, Oeste. Cada quadrante compreende intervalos de azimutes, como ilustrado na Figura 3.14.

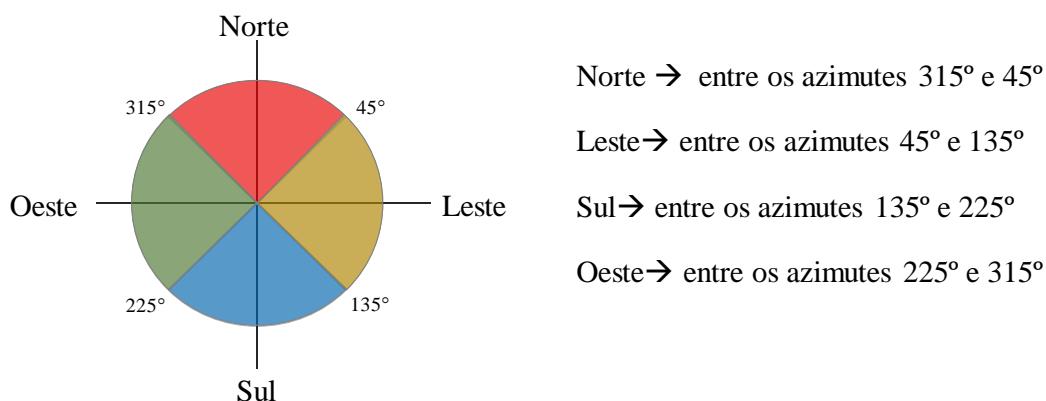


Figura 3. 14 – Quadrantes considerados para as orientações.

Embora diversos pesquisadores (Blocken *et al.*, 2011; Kubilay *et al.*, 2015; Zanoni, 2015) busquem quantificar os agentes climáticos, para chuva dirigida o método mais utilizado é o método semi-empírico proposto pela ISO 15927 (2009) devido a sua maior facilidade de utilização. Nas simulações higrotérmicas é indicado o uso de metodologia que reflita as condições reais do sistema. Cada método quantifica diferentes valores de chuva dirigida e, conseqüentemente, alteram significativamente o teor de umidade nos materiais (Blocken e Carmeliet, 2010; Nascimento, 2016). Entretanto, ressalta-se que os resultados obtidos pelas simulações devem ser usados de maneira cautelosa, pois há uma simplificação e limitação das condições e critérios adotados (Freitas, 2011).

Devido à facilidade de utilização, a mensuração da chuva dirigida foi realizada pelo método semi-empírico WUFI. O cálculo da chuva dirigida utilizada pelo *software* (equação 3.4) dependente da precipitação, velocidade e direção do vento e da disposição de dados horários relacionados a esses parâmetros.

$$R_{wdr} = R_h \cdot (R_1 + R_2 \cdot V_{10} \cdot \cos \theta) \quad (3.4)$$





Em que o  $R_{wdr}$  é a quantidade de chuva dirigida em mm/h,  $R_h$  é a intensidade de precipitação horizontal em mm/h,  $R_1$  é o coeficiente dependente do tipo de elemento construtivo,  $R_2$  é o coeficiente dependente da localização da fachada em s/m,  $V_{10}$  é a velocidade do vento de referência a 10 metros acima do solo e  $\theta$  é o ângulo entre a direção do vento e a normal à parede em °.

A inclinação adotada para a superfície que recebe chuva dirigida e radiação solar equivale a 90° por se tratar de fachada. Conforme Nascimento (2016) e Freitas (2011), a altura

condiciona os valores dos coeficientes utilizados para a quantificação da incidência de chuva dirigida na fachada. A altura representativa dos edifícios equivale ao intervalo entre 10 e 20 metros, pois a maioria dos edifícios constituintes do banco de dados apresentam seis pavimentos e a maior parte da altura do edifício está inserida nesse intervalo. Os coeficientes  $R_1$  e  $R_2$  equivalem a 0 e 0,1, respectivamente, conforme descrito por Freitas (2011).

A absorvância é a taxa de radiação absorvida pela superfície. Essa propriedade depende principalmente da cor da superfície (Zanoni, 2015). Os edifícios que contemplam o banco de dados apresentam infinidade de cores. A fim de otimizar as análises e reduzir a quantidade de simulações, quatro valores de absorvância foram definidas. Baseado na pesquisa de Dornelles e Roriz (2007), a absorvância adotada para a realização da simulação está apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3. 5 – Absorvância adotada para a realização da simulação.

Nº	Cor	Tonalidade	Abs. (%)
65		Claro 1	27,2
21		Claro 2	48,9
30		Escuro 1	63,5
20		Escuro 2	77,1

A condição inicial de umidade relativa e temperatura adotada equivale a 80% e 20 °C. O arquivo climático utilizado na simulação para o clima exterior refere-se ao arquivo *Typical Meteorological Year* (TMY) baseado nas informações da estação meteorológica do *Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET). Para o clima interior, adotou-se as equações propostas pela norma DIN EN 15026 (2007), que calcula transferência de calor e umidade em regime não estacionário.

As características relacionadas às condições climáticas podem ser utilizadas como indicadores de comportamento (Corbella e Castanheira, 2001; Maciel *et al.*, 2006). A mensuração da intensidade térmica sobre os edifícios é realizada pelo *Iit*, calculado pela equação 3.5. O *Iit*, proposto por Nascimento (2016), pondera os efeitos dos ciclos e valores alcançados de temperaturas no sistema para cada idade do edifício. A definição das faixas de ocorrência varia em função dos valores mínimos e máximos de  $\Delta T$ .

$$Iit = i \cdot \sum \left( \frac{\Delta T_{m\u00e9dio} \cdot f_n}{f_{total}} \right) \quad (3.5)$$

Em que o  $I_{it}$  é o índice de intensidade da temperatura (°C),  $i$  é a idade do edifício,  $\Delta T_{média}$  é a amplitude de temperatura média da faixa de ocorrência (°C),  $f_n$  é a frequência de ocorrência da faixa  $n$  de  $\Delta T$  ( $n = 4$ ) e  $f_{total}$  é a frequência de todas as ocorrências das quatro faixas de estudo ( $f_{total} = 365$ ).

A mensuração da ação climática referente ao teor de umidade é realizada pelo FIC. O FIC é definido como sendo a razão do maior teor de umidade da camada nos tempos  $t$  a  $t+5$  pelo teor de umidade no tempo  $t-1$ , sendo cada tempo correspondente ao intervalo de 1h, conforme descrito pela equação 3.6. O tempo  $t$  é o período em que ocorre a precipitação da chuva dirigida na fachada.

$$FIC = \frac{\left( \max_{1 \leq t \leq 5} H(t) \right)}{H(t-1)} \quad (3.6)$$

Em que o  $FIC$  é o fator de impacto,  $H$  é o teor de umidade em  $\text{kg/m}^3$  e  $t$  é o período em que ocorre a precipitação da chuva dirigida na fachada em horas.

#### 3.4 Modelos de previsão de vida útil

Nessa pesquisa, o estado limite de degradação adotado corresponde ao valor de FGD igual a 0,05, como explorado na seção 4.2. Esse valor de FGD indica que o sistema de revestimento não está em conformidade com a função para a qual foi projetado e que há urgência de manutenção. Cabe destacar que, o estado limite de degradação pode variar conforme os critérios exigidos. Esses critérios podem ser alterados conforme a época e a cultura local, tendo em conta o contexto econômico, social e/ou político.

Essa seção descreve alguns modelos de previsão de vida útil. Inicialmente, o método gráfico é descrito (seção 3.4.1). Esse método subsidia informações para a aplicação dos demais métodos. O método de transposição de pontos trata-se do ajuste da curva de degradação média para cada caso do banco de dados (seção 3.4.2). O método de regressão múltipla é fundamentado por ferramentas estatísticas e é capaz de estimar a vida útil considerando diversas variáveis (seção 3.4.3). Os modelos matemáticos obtidos por esse modelo referem-se a modelos lineares e não lineares. O método fatorial refere-se ao modelo proposto pela norma britânica ISO 15686-7 (2012), em que são consideradas influencia positivas e negativas dos fatores de degradação sobre a vida útil de referência (seção 3.4.4).



### 3.4.1 Método Gráfico

A estimativa de vida útil pelo Método Gráfico (MG) é baseada no método estatístico denominado análise de regressão simples. A relação entre a variável dependente e a variável independente pode ser obtida pela análise de regressão simples. Na regressão simples linear e não linear, a estimativa de vida útil é realizada em função de uma única variável por vez, assim estas são capazes de avaliar a durabilidade em apenas uma dimensão. A análise da durabilidade deve ser realizada com critério e verificar a coerência dos resultados obtidos, uma vez que o processo de degradação envolve diversos fatores simultâneos. Essa análise apresenta como um de seus resultados o modelo matemático, que permite prever a variável dependente a partir da informação da variável independente (Kutner *et al.*, 2005).

O fenômeno de degradação é indiscutivelmente afetado pelo tempo, porém os sistemas de revestimento de fachada também podem ser afetados por outros fatores. Inicialmente na presente pesquisa, a análise de regressão simples considera apenas a idade do sistema de revestimento como variável independente e o indicador de degradação FGD como variável dependente.

A estimação dos parâmetros dos modelos matemáticos obtidos na análise de regressão é alcançada pelo método dos mínimos quadrados, onde são avaliados os valores reais em comparação com os valores médios. Dessa forma, o modelo matemático obtido refere-se a uma tendência média dos valores, indicando que a relação entre a variável dependente e independente não é perfeita. Geralmente, essa relação é representada graficamente por digrama de dispersão.

Uma vez que o modelo se refere a valores médios, existem erros associados ao modelo. Desta forma, a adequação do modelo deve ser verificada pela análise dos resíduos entre o valor observado e o valor ajustado pela reta. Quanto menor forem os resíduos melhor o ajuste do modelo. Além da análise de resíduos, a regressão é avaliada pelo coeficiente de correlação ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ). O  $r$  verifica o grau de relacionamento entre as variáveis. O  $R^2$  se refere a uma medida da proporção da variação total que é explicada pelo modelo e mede a qualidade de ajustamento (Marôco, 2007). O  $R^2_{\text{ajustado}}$  mede a capacidade de generalização do modelo para outras amostras da mesma população.

A definição do modelo matemático que melhor se ajusta aos dados correspondente a uma tendência média. Essa tendência pode ser representada por uma equação linear ou não linear. Os modelos verificados se referem a polinômios de primeiro e segundo grau. Conforme Shohet *et al.* (1999) e Gaspar (2002), o fenômeno de degradação inicialmente é lento e acelera com o tempo. A Tabela 3.6 apresenta as equações genéricas dos modelos de regressão simples.

Tabela 3. 6 – Equações genéricas para a regressão simples.

Regressão Simples	Equação
Linear	$Y = b_1 \cdot x$
Não linear	$Y = b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$

### 3.4.2 Método Transposição de Pontos

A previsão da vida útil, de qualquer um dos casos estudados, pode ser feita pelo Método de Transposição de Pontos (MTP). Esse método possibilita traçar uma curva semelhante à curva média a cada caso. Dessa forma, é realizada uma transposição do caso real para a idade em que esse caso atingiu o estado limite de degradação. Conforme proposto por Gaspar (2002), essa transposição do ponto do caso de fachada analisado se dá pela conversão da função  $f$ , correspondente à curva média de degradação, numa função  $f'$ , da mesma família de  $f$ , passando pelo caso de fachada analisado, como ilustrado na Figura 3.15. A conversão da função  $f$  na função  $f'$  é realizada pelo ajuste da função  $f$  multiplicada pelo fator  $w$ . Esse fator é obtido pela razão entre o indicador de degradação real e o indicador de degradação médio da fachada em questão. A equação 3.7 expressa a função  $f'$ .

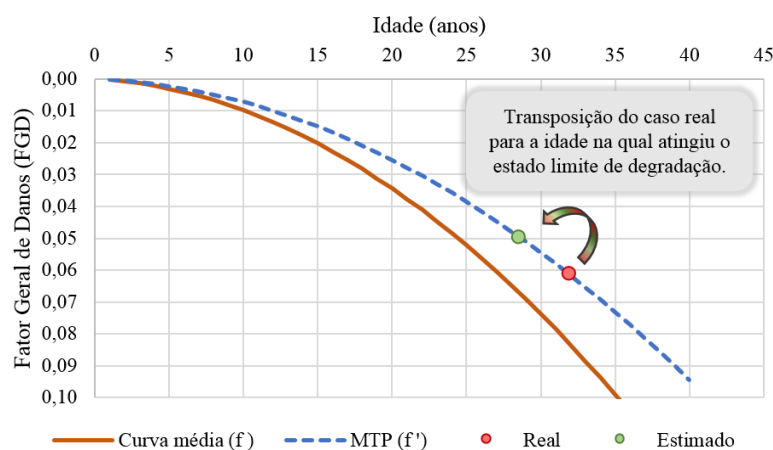


Figura 3. 15 – Esquema ilustrativo de estimativa da vida útil para um caso.

$$f' = w \cdot a \cdot t^2 + w \cdot b \cdot t \quad (3.7)$$

Em que o  $f'$  é a curva da mesma família da função  $f$  passando pelo caso de fachada analisado,  $w$  é o fator multiplicativo da função  $f$  ( $FGD_{real}/FGD_{curva\ média}$ ),  $a$  e  $b$  são os coeficientes de regressão e  $t$  é a idade da fachada.

A simplicidade matemática e a igualdade de critérios para qualquer caso são algumas das vantagens da aplicação do MTP. No esquema ilustrativo, apresentado na Figura 3.14, é apresentado o caso de fachada com idade igual a 32 anos e com FGD igual a 0,062. Conhecido a idade e o estado de degradação, representado pelo FGD, de uma fachada torna-se possível estimar a vida útil dessa fachada. Pelo MTP estimasse que essa fachada atingiu a vida útil aos 29 anos. Quando a fachada analisada apresenta indicador de degradação inferior ao limite aceitável ( $FGD = 0,05$ ), a estimativa de vida útil identifica o momento em que essa fachada possivelmente atingirá esse limite. Caso a fachada apresente indicador de degradação superior ao aceitável, a estimativa de vida útil identifica o momento em que essa fachada atingiu o limite de degradação aceitável.

### 3.4.3 Regressão Múltipla

Na regressão múltipla linear (RML) e não linear (RMNL), diversas variáveis são avaliadas simultaneamente possibilitando identificar as variáveis que apresentam elevada influência do fenômeno estudado e conseqüentemente resultando em equações mais eficazes. A identificação das variáveis a serem inseridas no modelo é uma etapa importante da análise de regressão. Conforme Martin *et al.* (1996) e Wooldrige (2009), para assegurar a eficácia dos modelos, estes devem distinguir as variáveis significativas das variáveis não significativas.

A relação entre a indicador de degradação e os fatores, representados pelas características dos revestimentos cerâmicos, pode ser modelada por equações lineares ou não-lineares. Isto é, ser modelada por funções quadráticas, cúbicas, exponenciais, logarítmicas, entre outras funções. Na presente pesquisa, a eficácia das diferentes funções adotadas (Tabela 3.7) são analisadas pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) e raiz do erro quadrático médio ( $\sqrt{EQM}$ ) com o auxílio do *software* SPSS.

Tabela 3. 7 – Equações genéricas para a regressão múltipla.

Regressão Múltipla		Equação
	Linear	$Y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n$
	Polinomial	$Y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_i \cdot x_i + b_{12} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + \dots + b_{ij} \cdot x_i^k$
	Potencial	$Y = A(x_1^{b_1} + x_2^{b_2} + \dots + x_i^{b_i})$
Não linear	Exponencial	$Y = A \cdot e^{b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i}$
	Weibull	$Y = A - b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot x^{b_2}}$
	Gompertz	$Y = A \cdot (1 - b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot t})^3$

Existem diversas funções polinomiais não lineares com diferentes graus. As funções polinomiais testadas correspondem a funções de segundo e terceiro grau. A análise apresentada no MG (seção 4.4.1) reconhece que polinômios de segundo grau conduzem a modelos de degradação credíveis, devido ao comportamento da curva fazer sentido físico com o fenômeno de degradação. Alguns pesquisadores defendem que o fenômeno de degradação pode ser modelado por funções de segundo grau (Ximenes *et al.*, 2014; Galbusera *et al.*, 2014).

Alguns pesquisadores afirmam que funções potenciais apresentam baixa capacidade preditiva quando utilizadas na modelação de dados com elevada variabilidade. Entretanto, essas funções apresentam como principal vantagem a sua simplicidade matemática (Anzanello e Fogliatto, 2007). Uma vez que Garrido *et al.* (2012) obtiveram resultados admissíveis em previsões de vida útil, nessa pesquisa são investigadas funções potenciais para a modelação do fenômeno de degradação.

As funções matemáticas que apresentam curvas em forma de “S” apresentam comportamento crescentes ao longo do tempo e ponto de inflexão, no qual ocorre a sua taxa máxima de variação (Florentino *et al.*, 2010; Silva, 2015). Conforme Galbusera (2013) e Ximenes *et al.* (2014), o fenômeno de degradação pode ser descrito por curvas “S”. A curva Gompertz e Weibull são investigadas, pois essas funções apresentam curvas em forma de “S” e são bastante utilizadas na área de engenharia. A função exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull (Gupta e Kundu, 2007). Silva (2015) afirma que funções exponenciais consideram a probabilidade de eventos futuros independente de eventos passados.

Os métodos de previsão de vida útil relacionados à regressão múltipla requerem que as variáveis, representada pelas características, que influenciam o fenômeno sejam quantificadas para que então esse seja aplicado. A quantificação das variáveis é realizada pela razão entre a

VUE<sub>MTP</sub> de cada variável e a VUE<sub>MTP</sub> que considera apenas a idade. Na Tabela 3.8 estão apresentados os valores da quantificação realizada para cada variável.

Tabela 3. 8 – Quantificação das variáveis para RML e RMNL.

Característica	Categoria	VUE <sub>MTP</sub>	Quantificação	Efeito
Geral	Idade	29		
Clareza da cerâmica	Clara	27	1,10*	(▲) Positivo
	Não Clara	30	1,03	(●) Neutro
Dimensão da cerâmica	Pequena	30	1,03	(▲) Positivo
	Grande	28	0,97	(▼) Negativo
Elemento construtivo	Fachada	29	1,00	(●) Neutro
	Empena	31	1,07	(▲) Positivo
	Caixa de Escada	29	1,00	(●) Neutro
Existência de Juntas	Presença	27	1,10*	(▲) Positivo
	Ausência	29	1,00	(●) Neutro
Altura do edifício	Baixo	29	1,00	(●) Neutro
	Alto	26	0,90	(▼) Negativo
Área da fachada	Reduzida	28	0,97	(▼) Negativo
	Extensa	29	1,00	(●) Neutro
Grau de proteção	Protegida	35	1,21	(▲) Positivo
	Desprotegida	26	0,90	(▼) Negativo
Orientação	Norte	25	0,86	(▼) Negativo
	Sul	26	0,90	(▼) Negativo
	Leste	34	1,17	(▲) Positivo
	Oeste	33	1,14	(▲) Positivo

\*Valores ajustados

As variáveis que não apresentam valores de vida útil credível, devido a limitação do banco de dados, assumem valores lógicos em função do comportamento da degradação encontrados na literatura. As variáveis clara e presença de juntas assumem o valor de 1,10, pois se considera que características opostas a estas tendem a se degradar mais facilmente. Quantificada as variáveis torna-se possível a aplicação da RML e RMNL, em que são avaliadas simultaneamente diversas variáveis.

Os procedimentos para a seleção de variáveis que apresentam forte relações com a variável dependente podem ser realizado por diversos métodos. Entretanto, conforme Marôco (2007) nenhum deles resultam no modelo perfeito. Para a RML o método de seleção das variáveis *stepwise* foi adotado com valor de  $\alpha$  igual a 0,05. Esse método é apropriado quando existem correlações significativas entre as variáveis independentes. Entretanto, embora o *software* SPSS identifique as variáveis que conduzem ao melhor modelo, o ajuste do modelo deve considerar o conhecimento do fenômeno estudado.

Para a RMNL, a estimativa dos parâmetros dos modelos não lineares é determinada a partir de um processo iterativo, em que são realizadas diversas análises das possíveis combinações das variáveis que conduzem ao melhor modelo. Diversos pesquisadores afirmam que o fenômeno de degradação é melhor descrito por funções não lineares e que não depende apenas de uma variável (Shohet e Paciuk, 2006; Galbusera *et al.*, 2015). Entretanto, não existe um modelo matemático consolidado que reflete o comportamento da degradação ou a previsão de vida útil. Portanto, a RMNL contempla análises de funções polinomiais, potenciais, exponenciais, curvas Gompertz e curvas Weibull, conforme equações genéricas já apresentadas na Tabela 3.7.

#### 3.4.4 Método Fatorial

O método fatorial (MF) consiste na ponderação da vida útil de referência (VUR) por uma série de fatores adaptados a condições específicas de cada caso para a determinação da VUE, conforme descrito na equação 3.8 (Hovde, 1998; ISO 15686-7, 2006). A norma ISO 15686-7 (2006) denota sete fatores para a previsão de vida útil e sugere adotar valores para os fatores entre 0,8 e 1,2. Os fatores condicionantes de degradação podem atuar sobre a VUR positivamente, quando maiores que 1,0, ou negativamente, quando menores que 1,0.

$$VUE = VUR . A . B . C . D . E . F . G \quad (3.8)$$

Em que a *VUE* é a vida útil estimada, *VUR* é a vida útil de referência, *A* é o fator referente a qualidade de materiais, *B* é o fator referente ao nível de projeto, *C* é o fator referente ao nível de execução, *D* é o fator referente às condições internas, *E* é o fator referente às condições externas, *F* é o fator referente às ações de uso, *F* é o fator referente às condições de uso, *G* é o fator referente à frequência de manutenção.

A análise desses fatores é realizada a partir da subdivisão dos fatores em subfatores. As variáveis influentes no processo de degradação são representadas pelos subfatores e traduzidos pelas características das fachadas, conforme ilustrado na Figura 3.16. Nessa presente pesquisa são avaliados apenas os fatores *A*, *B* e *E*, como já mencionado e justificado no seção 3.3.1.

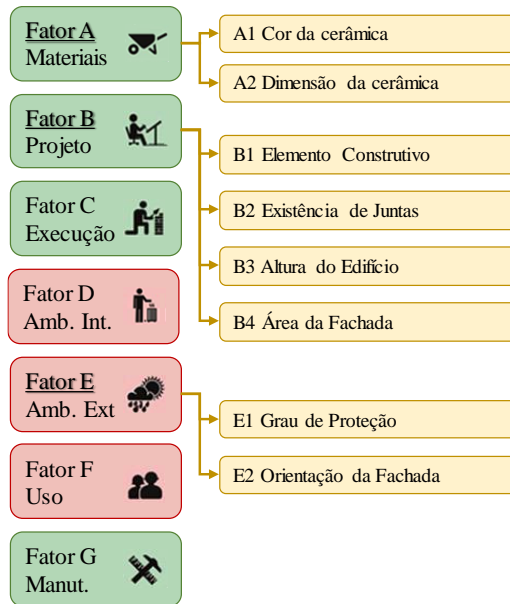


Figura 3. 16 – Classes de fatores e subfatores do método fatorial.

O método fatorial determinístico (FTD) estima a VU do elemento a partir da durabilidade de referência modificada por meio de fatores condicionantes de degradação. Conforme Gaspar (2002), o resultado desse método é um valor absoluto indicativo da durabilidade do elemento estudado. Este método tem como principal vantagem a facilidade de aplicação. Entretanto, o método é condicionado a forma de quantificação dos fatores, denominado para cada característica como  $N_{\text{fator}}$ . O conhecimento de como os fatores e a VUR são estimados é indispensável para a eficácia do resultado final (de Brito *et al.*, 2012). As informações de  $VUE_{\text{MTP}}$  subsidiam a definição inicial dos  $N_{\text{fator}}$  adotados no método fatorial.

Após a definição dos subfatores iniciais e da VUR, o cálculo da VUE pelo método fatorial torna-se possível tanto para abordagem determinística ( $VUE_{\text{FTD}}$ ), descrita pela equação 3.9.

$$VUE_{\text{FTD}} = VUR \cdot A1 \cdot A2 \cdot B1 \cdot B2 \cdot B3 \cdot B4 \cdot E1 \cdot E2 \quad (3.9)$$

Em que a  $VUE_{\text{FTD}}$  é a vida útil estimada pelo método fatorial determinístico, VUR é a vida útil de referência, A1 é o subfator referente a claridade da cerâmica, A2 é o subfator referente a dimensão da cerâmica, B1 é o subfator referente ao elemento construtivo, B2 é o subfator referente existência de juntas, B3 é o subfator referente à altura do edifício, B4 é o subfator referente a extensão da fachada, E1 é o subfator referente ao grau de proteção da fachada e E2 é o subfator referente a orientação da fachada.

Os valores de  $N_{\text{fator}}$  adotados inicialmente auxiliaram a determinação da VUR. Os valores de  $N_{\text{fator}}$  para a  $VUE_{\text{FTD}}$  são obtidos por uma análise de otimização, em que são considerados os

critérios e restrições descritos na Tabela 3.9 e Tabela 3.10. Essa otimização é uma adaptação dos critérios propostos por Galbusera (2013) e Silva (2015).

Tabela 3. 9 – Descrição dos critérios de otimização.

Critério de otimização	Descrição
Valor extremo	Os valores extremos obtidos a partir do FTD devem estar de acordo com a realidade esperada. Uma vez que os valores mais altos encontrados pela literatura (Souza <i>et al.</i> , 2018) estão em torno de 60 anos, a vida útil estimada deve ser inferior a 60 anos;
Relação $VUE_{FTD} / VUE_{MG}$	A média da relação entre $VUE_{FTD}$ e $VUE_{MG}$ não deve variar de 1 em mais de 5% ( $0,95 < \text{média de } VUE_{FTD} / VUE_{MG} < 1,05$ ). Este critério garante que os resultados obtidos por ambos os modelos sejam semelhantes, evitando maiores desvios entre a realidade e o valor previsto;
Convergência	A média do desvio padrão da relação $VUE_{FTD} / VUE_{MG}$ deve ser minimizada, garantindo que o número acumulado de relações $VUE_{FTD} / VUE_{MG}$ seja o mais possível próximo de 1;
Excesso de falhas	A frequência acumulada da relação $VUE_{FTD} / VUE_{MG}$ superior a 1,50 deve ser inferior a 10% da amostra, minimizando assim as estimativas falhas;
Racionalização	Mais de 40% da amostra deve apresentar relação $VUE_{FTD} / VUE_{MG}$ dentro da faixa de 0,85-1,15, garantindo assim resultados ótimos. Isso é menores erros entre o previsto (FTD) e o observado (MG) da vida útil estimada das amostras).

Tabela 3. 10 – Restrição das categorias dos fatores de durabilidade.

Subfator	Restrição		
A1 – Claridade	Clara	$\geq$	Não clara
A2 – Dimensão	Pequena	$\geq$	Grande
B1 – Elemento	Fachada	$\geq$	Empena Caixa de escada
B2 – Junta	Presença	$\geq$	Ausência
B3 – Altura	Baixo	$\geq$	Alto
B4 – Extensão	Extensa	$\geq$	Reduzida
E1 – Proteção	Protegida	$\geq$	Desprotegida
E2 – Orientação	Leste	$\geq$	Norte Oeste Sul



## 4 RESULTADOS

Esse capítulo contempla os resultados obtidos para cada fase da pesquisa. Para fase I são apresentados os valores dos coeficientes de ponderação do FGD, o comportamento da degradação e os níveis de condição de degradação. Para Fase II são apresentadas as curvas de degradação para as diversas análises da condição de exposição das fachadas. Para fase III são apresentadas a estimativa de vida útil para diferentes modelos de matemáticos.

### 4.1 Adequação dos coeficientes

#### 4.1.1 Coeficiente de importância relativa ( $k_{cn}$ )

A relação entre as anomalias e as suas causas podem ser representadas por meio da matriz de correlação (Tabela 4.1). Conforme proposto por Silvestre (2005), as possíveis causas são enumeradas e pontuadas conforme a relação entre a causa e a existência da anomalia com valores de 0 (não há relação), 1 (há uma baixa relação) ou 2 (há uma forte relação). A justificativa dessa pontuação é apresentada no Apêndice A.

Tabela 4. 1 – Matriz de correlação entre as anomalias e as possíveis causas.

		Causas / Anomalias	DC	FI	FR	EF
(A) PROJETO	A1	Especificação incorreta de materiais de base (argamassa de emboço)	1	1	0	0
	A2	Especificação incorreta de materiais de base (alvenaria e suporte)	1	2	1	0
	A3	Especificação incorreta de materiais de revestimento (argamassa de colante)	2	1	0	0
	A4	Especificação incorreta de materiais de revestimento (cerâmica e rejunte)	2	1	1	0
	A5	Ausência ou paginação incorreta das juntas de dilatação	1	2	1	0
	A6	Ausência ou especificação incorreta de elementos de controle de fluxo de água	1	1	0	1
(B) EXECUÇÃO	B1	Não atendimento ao tempo de execução	2	1	0	0
	B2	Espessura inadequada de argamassa colante	2	1	1	0
	B3	Falha no assentamento das cerâmicas e preenchimento do rejunte	2	1	1	1
	B4	Falha na execução das junta de dilatação	1	1	1	1
	B5	Dificuldade de execução do revestimento em zonas críticas	1	1	1	1
(C) USO E MANUTENÇÃO	C1	Adaptação e instalação de elementos não previstos	1	1	1	1
	C2	Limpeza incorreta ou ausente	0	0	1	0
	C3	Ausência de manutenção das juntas de dilatação	1	0	0	1
	C4	Ausência de manutenção pontual do revestimento	1	1	1	0

Dentre os requisitos estabelecidos pela norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais (NBR 15575-1, 2013), o desempenho do sistema de revestimento de fachada

pode ser verificado por fatores relacionados à segurança estrutural, estanqueidade e conforto visual. A existência de anomalias no sistema de vedação pode prejudicar o desempenho estrutural e de estanqueidade, além de provocar efeitos estéticos indesejáveis causando desconforto psicológico aos usuários. A matriz de correlação entre as anomalias e os critérios de desempenho estão apresentadas na Tabela 4.2. A justificativa desta pontuação é apresentada no Apêndice A.

Tabela 4. 2 – Matriz de correlação entre as anomalias e os requisitos dos usuários.

Requisitos	DC	FI	FR	EF
Estrutural	2	2	1	0
Estanqueidade	2	2	1	2
Estética	2	2	1	0

Os valores obtidos para os índices relacionados as causas ( $I_c$ ), ao desempenho ( $I_d$ ) de cada anomalia e a importância relativa das anomalias são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 – Coeficiente referente a importância relativa das anomalias.

	Requisitos	Anomalias (j)			
		DC	FI	FR	EF
Grupo das causas	(A) Projeto	1,33	1,33	0,50	0,17
	(B) Execução	1,60	1,00	0,80	0,60
	(C) Uso e Manutenção	0,75	0,50	0,75	0,50
	<b><math>I_c (\sum \mu_{cj} / \sum \mu_i)</math></b>	<b>1,50</b>	<b>1,15</b>	<b>0,83</b>	<b>0,52</b>
Fatores de desempenho	Estrutural	2	2	1	0
	Estanqueidade	2	2	1	2
	Estética	2	2	1	0
	<b><math>I_d (\sum d_j / \sum d)</math></b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,18</b>	<b>0,12</b>
Importância relativa	$I_c \cdot I_d$	0,53	0,41	0,15	0,06
	<b>Kcn</b>	<b>1,00</b>	<b>0,77</b>	<b>0,28</b>	<b>0,11</b>

Observa-se que o maior valor de  $I_c$  refere-se ao descolamento cerâmico (1,50) indicando forte influência das causas no surgimento dessa anomalia. Embora a fissura e a falha de rejunte apresentem valores inferiores ao descolamento cerâmico, a incidência dessas anomalias apresentam forte relação com as causas relacionadas a negligência dos projetistas, executores e usuários.

Os valores relacionados ao desempenho de sistemas de revestimento cerâmico apontaram o descolamento cerâmico (0,35) e fissuração (0,35) como as anomalias que mais interferem no desempenho do sistema de revestimento cerâmico. Ainda assim, a falha de rejunte (0,18),

embora apresente 50% do valor do descolamento cerâmico e a fissura, também influencia no desempenho do sistema. Uma vez que a incidência de falha de rejunte prejudica as funções de proteção do sistema contra a ação das intempéries, essa anomalia possibilita o ingresso de água na parte interna da edificação prejudicando o conforto e saúde do usuário.

A consideração conjunta das questões de desempenho e as causas das anomalias são traduzidas pela importância relativa da anomalia. Em consequência dessa análise conjunta, a tendência na ordem de grandeza dos índices  $I_c$  e  $I_d$  indica sempre o descolamento cerâmico como a anomalia que sofre mais influência das causas e que mais interfere no desempenho do sistema. Desta forma, a anomalia que apresentou maior valor de importância relativa foi o descolamento cerâmico (1,00). Esse resultado converge com os estudos de Bauer *et al.* (2010) que consideram o descolamento cerâmico como a anomalia mais grave. A existência da anomalia de descolamento cerâmico na fachada afeta diretamente a segurança dos usuários, exigindo urgência na reparação, que pode ser um processo com elevado custo (Souza *et al.*, 2019).

#### 4.1.2 Coeficiente de nível de condição

Em uma análise exploratória do comportamento da degradação ao longo do tempo é possível obter informações para embasar a definição dos coeficientes dos níveis de condição. Desta forma, foi realizada a avaliação do fator de danos de descolamento cerâmico. Esta avaliação é justificada pelo fato de que o FD delinea a degradação e o DC apresenta maior importância no processo de degradação de sistemas de revestimento cerâmico.

A fim de ilustrar e atestar os critérios expostos para os coeficientes dos níveis de condição, a Figura 4.1 ilustra quatro mapeamentos de danos de fachadas considerando diferentes situações com as respectivas idades e valores de FD referente às anomalias de descolamento cerâmico.

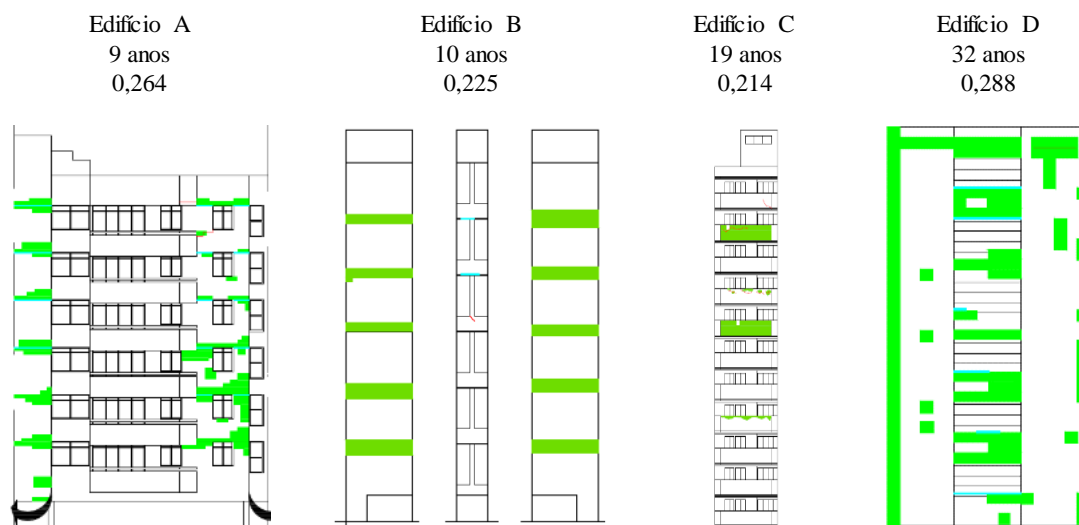


Figura 4. 1 – Exemplos de mapeamentos de descolamentos cerâmicos em fachadas.

A fachada referente ao edifício A apresenta uma degradação concentrada nas laterais da prumada. Visualmente a degradação não é generalizada, entretanto observa-se que a degradação acontece em diversos andares e abrangem zonas de paredes contínuas, aberturas e transição entre pavimentos, o que implica em uma manutenção pontual.

As anomalias de descolamento identificadas na inspeção do edifício A podem ser consideradas localizadas. Porém, essas apresentam risco potencial de queda do revestimento cerâmico, sugerindo urgência de reparação em locais que apresentam a armadura exposta devido ao descolamento e a falha no cobrimento da estrutura. As anomalias de descolamento cerâmico existentes não exigem apenas simples correções, mas sim substituições e restauração de grandes áreas da prumada. Considerando a idade do edifício, os descolamentos incidentes são prematuros, o que indica como principal causa a utilização de materiais e execução inadequadas.

Uma vez que o risco potencial de queda do revestimento cerâmico inflige diretamente na segurança do usuário e que a existência do destacamento caracteriza falha de desempenho na fachada, considera-se que a prumada referente ao edifício A já ultrapassou a vida útil. Ressalta-se que em casos que os descolamentos ocorrem em pequenas proporções é viável a realização de manutenções pontuais para recuperação do desempenho mínimo esperado pelo sistema de vedação.

A prumada de fachada referente ao edifício B apresenta descolamentos cerâmicos concentrados na zona de transição entre pavimentos e ao longo de todos os andares. Esta

disposição de descolamentos revela que a realização de manutenção pontual na zona de transição entre pavimentos cessa a degradação existente. As anomalias de descolamento encontradas não estão relacionadas as causas pertinentes dilatação térmica das cerâmicas, pois refere-se a uma reentrância da fachada.

As reentrâncias são consideradas fachadas protegidas por receber radiação solar por um período de tempo menor que as demais fachadas. Esse fato é constatado na inspeção do edifício B, em que os descolamentos cerâmicos identificados, na grande maioria dos casos, surgiram devido a deficiências de esmagamento dos filetes de argamassa colante no assentamento das cerâmicas. Essas falhas observadas podem ter origem por vários fatores, dentre os principais podem ser mencionados: formação de filme por secagem do filete, não atendimento ao tempo em aberto, não conformidade da argamassa colante e manuseio inadequado dos materiais.

Além da deficiência no assentamento, a execução das juntas de movimentação não atende aos critérios de norma e do fabricante, não respeitando o fator de forma e espessura mínima do selante. A partir do momento em que ocorre a fissuração do selante precocemente, a função do sistema de vedação quanto a estanqueidade é prejudicada.

Visto que o descolamento incidente no edifício B pode ser reparado por correções pontuais e não prejudica diretamente a durabilidade e segurança dos usuários, considera-se que esta prumada ainda não atingiu o fim de vida útil do sistema de vedação. Entretanto, ressalta-se que protelar a realização da manutenção pode resultar em uma evolução acelerada da degradação existente.

O edifício C apresentou anomalias de descolamento cerâmico mais intensos no sétimo e décimo pavimento. No quarto e no oitavo pavimento, a incidência de descolamento cerâmico ocorre em pequenas áreas e concentra-se na região superior do guarda corpo. A disposição das anomalias neste edifício não se estende a todos os andares, caracterizando uma degradação pontual.

As regiões com descolamento do revestimento cerâmico são localizadas e claramente identificadas. Os descolamentos cerâmicos presentes nesta fachada ocorrem devido a elevada espessura da argamassa de emboço, a saber haviam trechos com camadas de até 8 cm. Conforme Silvestre e de Brito (2005), muitas vezes a causa do descolamento cerâmico é a

inobservância dos procedimentos adequados de execução. Além disso, a elevada espessura e a utilização de saibro na composição da argamassa provoca sérios problemas de integridade e baixas propriedades mecânicas.

É natural que ao longo dos anos haja uma redução do desempenho e o surgimento de anomalias oriundas do próprio uso do edifício e de suas partes. Entretanto, a causa do descolamento cerâmico revela uma situação crítica no que diz respeito as propriedades mecânicas da argamassa, além de trazer riscos implícitos de descolamento e queda do revestimento. A disposição das anomalias de descolamento cerâmico caracteriza degradação pontual e indicador de degradação menor, quando comparado aos demais edifícios. Embora a condição de degradação da fachada do edifício C seja pontual e apresente baixo valor de FD, quando comparado com os demais edifícios, o sistema de revestimento apresenta risco significativo de destacamento e queda da fachada. Assim sendo, as operações de manutenção e recuperação devem ser encaradas como ações que destinam a prorrogar com segurança, desempenho e conforto, a vida útil do edifício.

O edifício D refere-se a uma fachada direcionada para o Norte. A disposição das anomalias de descolamento cerâmico ocorre ao longo de toda a fachada, isto é, em diversos andares e em diversas zonas, caracterizando uma degradação generalizada. Até o momento em que foi realizada a inspeção o edifício contemplava 32 anos e nunca havia sido realizada manutenção na fachada. Esse fato implica que possivelmente as anomalias não surgiram precocemente, essas surgiram ao longo dos anos devido a degradação natural do sistema, as ações climáticas e de uso.

Quanto as causas das anomalias de descolamento cerâmico, essas estão relacionadas ao ingresso de água no sistema pelas fissuras existentes. A camada de revestimento de argamassa do sistema de revestimento é muito espessa devido a época em que foi construído. A elevada espessura de revestimento associada ao ingresso de água no sistema provocou a queda parcial do revestimento em alguns pontos. A corrosão do aço estrutural foi identificada em alguns pontos em que ocorreram o descolamento. Possivelmente, com o passar do tempo a penetração de água dentre outros fatores, propiciou condições para a corrosão e o descolamento do revestimento. Adverte-se para o fato de que muito possivelmente outras regiões da estrutura que ainda estão cobertas pelas cerâmicas possam apresentar a mesma característica.

A queda de revestimento, principalmente mais espessos e mais pesados, juntamente com a corrosão do aço torna a situação muito grave, pois prejudica a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação, além de reduzir significativamente os níveis de segurança surgindo risco de colapso ou ruína do sistema de vedação ou até mesmo do edifício. Posto isto, considera-se que a prumada referente ao edifício D já ultrapassou a vida útil e que necessita de intervenções o quanto antes possível.

Em uma análise geral, as fachadas que apresentaram valores de FD próximos a 0,30 caracterizam uma condição de estado limite de serviço, onde a presença generalizada e simultânea de anomalias prejudica a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação. O impacto visual do excesso de anomalias na fachada pode gerar insegurança e transtornos psicológicos aos usuários. Nessas condições, a realização de manutenções corretivas é sugerida. É importante observar também se a correção pontual das anomalias permitirá uma elevação do desempenho apenas por um período curto, indicando a reincidência da anomalia em zonas próximas.

#### 4.2 Degradação de fachada

O banco de dados apresenta uma extensão de área próximo de 80.000 m<sup>2</sup>, onde apenas 18% apresenta ocorrência de anomalias, equivalente a aproximadamente 14.640 m<sup>2</sup>, conforme ilustrado na Figura 4.2. As anomalias identificadas no banco de dados referem-se ao Descolamento Cerâmico (DC), Fissuração (FI), Falha nas juntas (FR) e Eflorescência (EF).

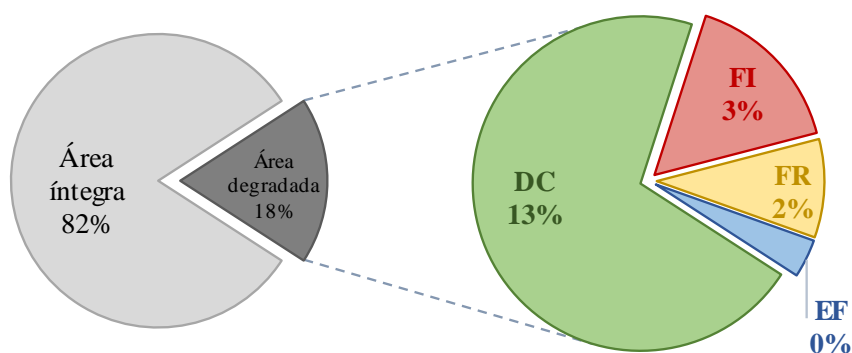


Figura 4. 2 – Porcentagem de área degradada.

Dentre as anomalias identificadas, o DC é a anomalia que apresenta maior percentual de ocorrência. O DC é considerado como a anomalia mais grave presente nas fachadas revestidas por cerâmicas, devido à queda da cerâmica ser risco ao usuário e ao custo de reparo elevado (Lo, 2002). Yiu *et al.* (2007) identificaram que a maioria das anomalias de DC ocorre devido

a redução da resistência de aderência causada pelos ciclos de aquecimento e resfriamento intensos. Entretanto, Just e Franco (2001) afirmam que o DC também pode ser causado por erros de execução ou seleção incorreta de materiais. As demais anomalias apresentam-se em menores proporções o que possivelmente indica que estas possuem menor influência no processo de degradação.

Considerando os níveis de condição das anomalias (Figura 4.3), a maioria das amostras de fachada com DC são classificadas como nível de condição 3. Esse fato certifica que o DC tem forte influência no desempenho do sistema de vedação. Mais de 85 % das amostras que apresentam FI são classificadas como nível de condição 2, indicando que o desempenho do sistema de vedação pode ser recuperado com a ação de manutenção pontual. As anomalias de FR e EF apresentam a maioria das amostras classificadas como nível de condição 1, significando que geralmente essas anomalias afetam pequena porção da área de revestimento.

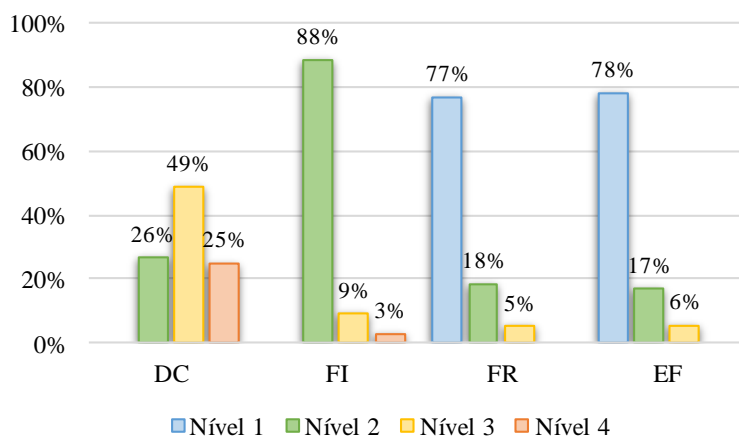


Figura 4. 3 – Porcentagem de amostras para cada nível de condição das anomalias.

As informações coletadas por meio do trabalho de campo permitem o cálculo da evolução da degradação da fachada. Uma vez que o fator de degradação mais importante é a idade (Galbusera *et al.*, 2014; Souza *et. al.*, 2017), o comportamento da degradação ao longo do tempo de edifícios localizados no Distrito Federal é ilustrado graficamente pela curva de degradação (Figura 4.4).



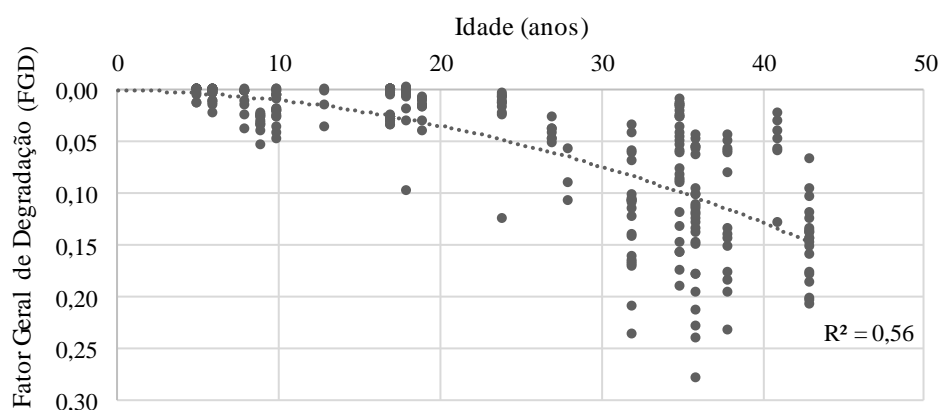
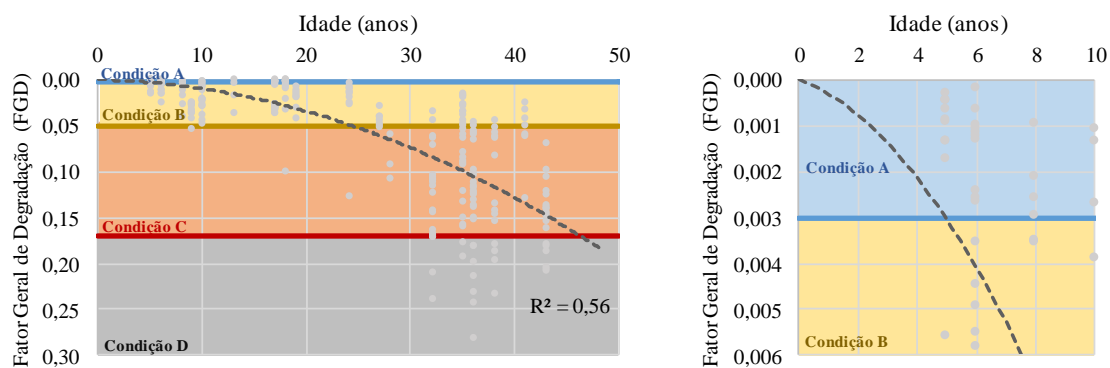


Figura 4. 4 – Comportamento da degradação ao longo do tempo de edifícios localizados no DF.

A Figura 4.4 ilustra os valores correspondentes ao nível de degradação dos revestimentos cerâmicos inspecionados, distribuídos de acordo com a idade de cada revestimento. O comportamento do indicador de degradação observado na curva de degradação é representado pelo polinômio de segundo grau. O crescimento da degradação inicialmente é lenta e aumenta ao longo do tempo. A forte influência da idade sobre o processo de degradação pode ser verificada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que equivale a 0,56. Esse valor indica que aproximadamente 56% da variabilidade de FGD pode ser justificada pelo modelo, que considera a idade do edifício como a única variável.

A vida útil de revestimentos cerâmicos externos pode ser estimada a partir da avaliação da evolução da degradação (Silvestre e de Brito, 2010; Souza *et al.*, 2018). O estado limite de degradação é sempre referido ao valor aproximado, devido à complexidade do fenômeno de degradação e a variabilidade das inúmeras variáveis desse fenômeno. Desta forma, na presente pesquisa são estabelecidas faixas de condição de degradação (Figura 4.5), conforme os critérios adotados no capítulo de metodologia na seção 3.1.2.



(A) Faixas de condição de degradação

(B) Aproximação da curva na condição ‘A’

Figura 4. 5 – Faixas de condição de degradação.

A Condição A, ampliada na Figura 4.5(B), é definida como condição de degradação leve. Fachadas que apresentem valores de FGD inferiores a 0,003 são classificadas na Condição A. A condição B refere-se a fachadas que apresentem FGD entre 0,003 e 0,05. As fachadas classificadas como condição B possivelmente apresentam degradação pontual. A condição C ultrapassa o limite de degradação aceitável. As fachadas que apresentem valores de FGD entre 0,05 e 0,17 são classificadas como Condição C. A condição D indica degradação generalizada da fachada. Essa condição é atribuída às fachadas com valores de FGD superior a 0,17.

Na presente pesquisa, o nível de condição C corresponde ao final da vida útil, isto é, quando o FGD ultrapassa o valor limite da condição B (FGD = 0,05). Neste estágio o sistema de revestimento não está em conformidade com a função para a qual foi projetado e há urgência de manutenção no sistema. Sendo assim, o valor do limite de degradação corresponde ao valor de FGD igual a 0,05. A Tabela 4.4 apresenta os valores limites dos indicadores de degradação FD e FGD adotados para cada condição de degradação.

Tabela 4. 4 – Valores limites dos indicadores para cada condição de degradação.

Limites	FD	FGD
Condição A	0,00 - 0,19	0,000 - 0,002
Condição B	0,20 - 0,84	0,003 - 0,049
Condição C	0,85 - 1,39	0,050 - 0,169
Condição D	> 1,40	> 0,170

Um dos parâmetros mais importantes a ser definido na utilização de modelos de previsão da vida útil é o estado limite de degradação, isto é, nível máximo aceitável de degradação (Branco *et al.*, 2013). O fim da vida útil, muitas vezes, não ocorre devido ao componente ou sistema da edificação atingir o limite de durabilidade. As razões para realizar alterações no sistema advêm de critérios definidos pelo usuário, que consideram questões de estética, modernidade, cultural, econômica e funcional (Gaspar, 2002).

A norma de desempenho (NBR 15575, 2013) dá uma referência para o desempenho mínimo, entretanto tem que conhecimento e critério técnico ao aplicar as exigências, pois há uma evolução na tecnologia construtiva. Desta forma, os critérios de norma de desempenho devem ser aplicados a edifícios que foram executados após a publicação da norma. Em edifícios antigos os critérios exigidos podem não atender, devido a exigências da época, sendo necessário uma avaliação contextualizada.

Diante do exposto, os critérios a serem considerados para a determinação do fim de vida útil do sistema de revestimento cerâmico de fachadas devem ser baseados em dados reais e considerar:

- Extensão e disposição das anomalias na fachada, com o propósito de verificar se as anomalias estão presentes em diversos andares e zonas da fachada caracterizando uma degradação generalizada;
- Aspectos de manutenção, a fim de verificar se a realização de manutenção pontual extingui a degradação existente, e por fim;
- Atendimento ao desempenho esperado com intenção de verificar se as anomalias existentes não prejudicam a funcionalidade e durabilidade do sistema de vedação, além de não causar riscos à segurança dos usuários.

#### 4.3 Comportamento da degradação para diferentes condições de exposição

Os resultados obtidos pela análise das condições de exposição da fachada são divididos em ações intrínsecas do sistema de vedação representado pelos aspectos construtivos relacionados à projeto (seção 4.3.1), da geometria de fachada (seção 4.3.2), das ações oriundas do ambiente no qual o edifício está inserido (seção 4.3.3), da influência das ações origem climática (seção 4.3.4) no desempenho do sistema de vedação.

##### 4.3.1 Características da fachada

As análises do comportamento de degradação em função das características do sistema de vedação são realizadas de forma qualitativa. Segundo Godoy (1995), por meio da análise qualitativa é possível compreender o comportamento de determinado grupo. A Figura 4.6 ilustra comportamento da degradação ao longo do tempo em função da claridade da fachada e o critério de absorvância adotado para a classificação das fachadas.

A curva de tendência das cerâmicas não claras apresenta boa correlação entre as amostras e o indicador de degradação FGD, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) equivalente a 0,53. O ajuste para as amostras com claridade de cerâmicas claras é relativamente baixo ( $R^2 = 0,38$ ). As curvas apresentadas indicam que as cerâmicas claras tendem a se degradar mais facilmente que as cerâmicas não claras nas idades iniciais e a longo prazo as cerâmicas não claras tendem a degradar-se mais que as cerâmicas claras. As anomalias iminentes no sistema de fachada devido a resposta da ação climática sobre o sistema não ocorrem de forma imediata. Desta forma, as tendências encontradas convergem com os encontrados por

Daniotti e Cecconi (2010), que afirmam que materiais de acabamento em cores mais claras tendem a ser mais duráveis que os de cores não claras.

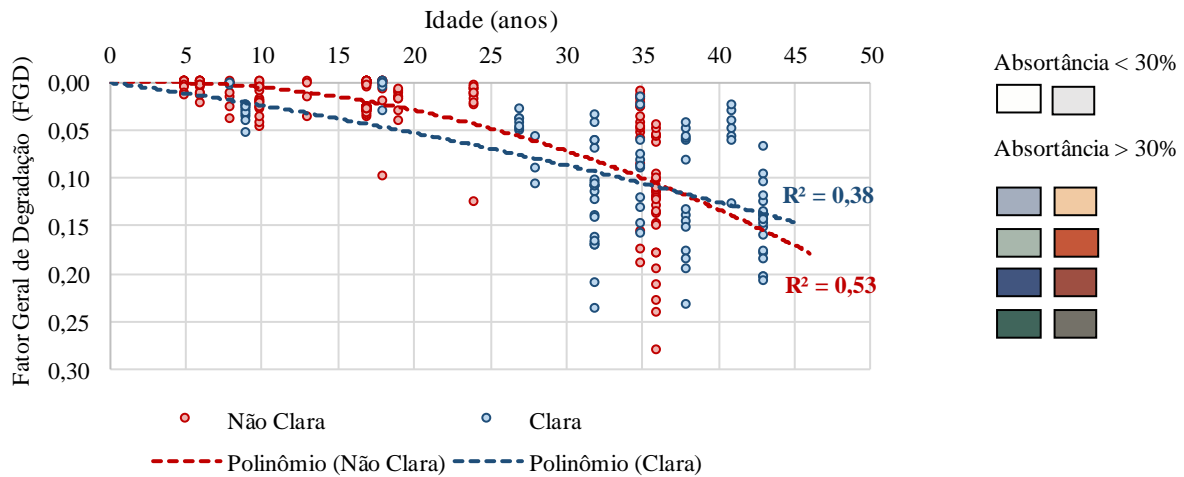


Figura 4. 6 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas ao longo do tempo em função da claridade das cerâmicas.

Saraiva (1998) confirmou que cerâmicas não claras apresentam aumento de 60% nas tensões dos revestimentos quando comparadas as cerâmicas claras. De acordo com Uchoa (2007) e Moscoso (2013), para as mesmas condições de insolação, a absorção da radiação solar das cerâmicas com superfícies não claras é maior. Edis *et al.* (2012) afirmam que as cerâmicas claras refletem mais a radiação solar permitindo menor variação de temperatura e, conseqüentemente, reduzindo a predisposição às anomalias provocadas pela variação dimensional. Portanto, a vida útil do sistema de revestimento cerâmico pode ser afetada devido à variação dimensional das cerâmicas, uma vez que o sistema de revestimento deve apresentar compatibilidade entre as tensões atuantes.

A Figura 4.7 ilustra o comportamento da degradação ao longo do tempo em função das dimensões das cerâmicas e o critério para a classificação das fachadas. Embora haja elevada dispersão dos resultados de FGD, as curvas de tendência para cerâmicas pequenas e cerâmicas grandes apresentaram boa correlação, com valores de  $R^2$  igual a 0,51 e 0,69, respectivamente. A dimensão das cerâmicas interfere na variação dimensional provocada pela dilatação térmica, visto que a dilatação térmica é proporcional a dimensão do material (Trumper e Gelbman, 1997; James *et al.*, 2001). Cerâmicas com menores dimensões apresentam maior estabilidade do sistema de revestimento cerâmico devido os esforços internos gerados pelo sistema serem dissipados pela maior área de juntas (Uchoa, 2015). Dessa forma, as curvas são condizentes, pois quanto maior é a cerâmica maior será a variação dimensional provocada pela dilatação térmica e, por conseguinte, acarretando no surgimento de anomalias.

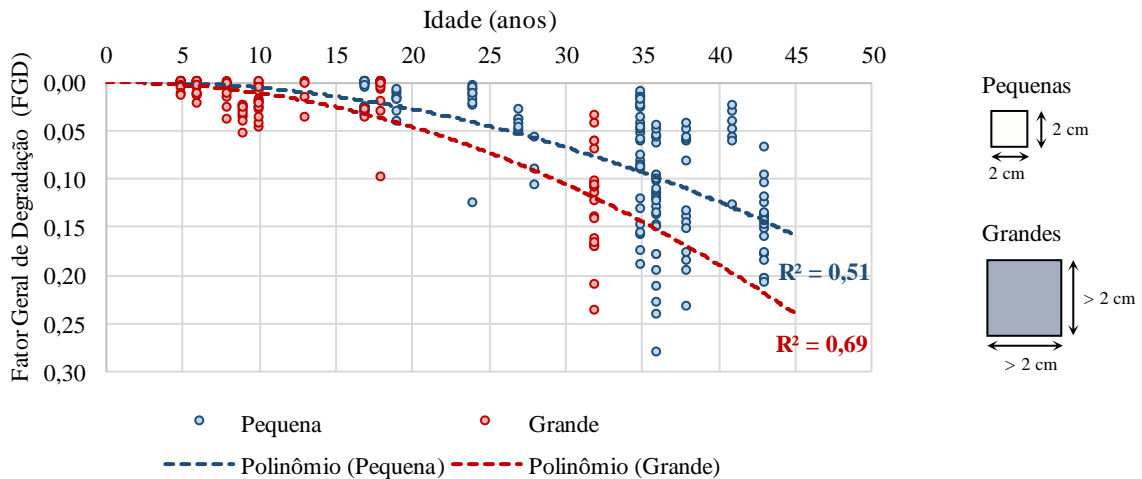


Figura 4. 7 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas a longo do tempo em função da dimensão das cerâmicas.

Shohet e Laufer (1996) afirmam que os revestimentos cerâmicos apresentam elevada incidência de anomalias devido a projetos inadequados, os quais não se atentam aos prazos curtos e falta de orientação técnica para a realização do serviço. Dentre as características que devem ser consideradas nos projetos de fachadas, citam-se o elemento construtivo, a existência de juntas, a altura dos edifícios e a área da fachada.

A Figura 4.8 ilustra o comportamento da degradação ao longo do tempo em função do elemento construtivo e o critério para a classificação das fachadas.

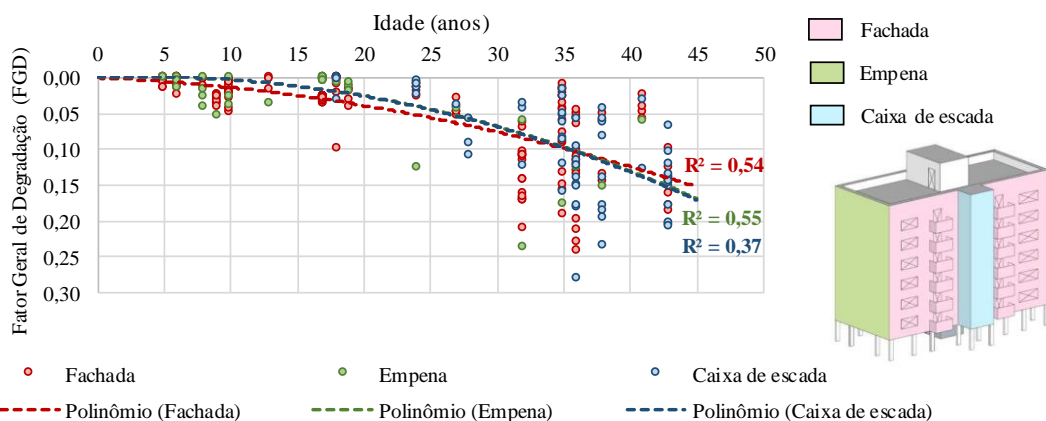


Figura 4. 8 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas a longo do tempo em função do elemento construtivo.

Embora os elementos construtivos considerados apresentem tendências semelhantes, nota-se pequena diferenciação no comportamento das fachadas. Nas idades iniciais as fachadas tendem a apresentar maior degradação que os demais elementos construtivos. Esse fato pode ser justificado devido as empenas e caixas de escada serem mais rígidas devido a presença de elementos estruturais que restringem a movimentação diferencial da estrutura, reduzindo o

risco de concentração de esforços no sistema de revestimento (Souza *et al.*, 2018). As empenas e caixas de escada nas idades mais avançadas tendem a apresentar maior degradação que as fachadas.

Em relação ao ajuste das curvas de tendência, as curvas de degradação obtidas para fachadas e empenas mostram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) consideráveis, 0,54 e 0,55 respectivamente. A curva de tendência referente a caixa de escada apresentou  $R^2$  inferior aos demais, entretanto a tendência da curva é condizente.

Os materiais componentes da fachada, mesmo que em níveis baixos, estão suscetíveis a sofrer variações volumétricas causadas pela mudança de temperatura. Na construção civil, a presença de juntas entre pavimentos nas fachadas permite a expansão e contração dos materiais sem afetar a integridade e desempenho do sistema de vedação. Conforme Ribeiro e Barros (2010), na literatura nacional não há informações e normas suficientes para a execução de juntas em sistemas de revestimento aderidos em fachadas. Diversos pesquisadores aludem sobre a importância das juntas em fachadas (Falcão Bauer, 1995; Medeiros, 1999; Junginger, 2014). A norma NBR 13755 (1996) apenas estabelecia distâncias padronizadas para a localização das juntas, independentemente da situação de aplicação ou mesmo de exposição. Com a atualização da norma NBR 13755 (2017), a determinação do posicionamento das juntas passa a depender de uma série de fatores, como tipo de edifício, comportamento estrutural, tipo, tamanho e cor das cerâmicas, entre outros.

A Figura 4.9 ilustra comportamento da degradação ao longo do tempo em função da presença de juntas horizontais na fachada e o critério de classificação das fachadas. Apenas casos com idades inferiores a 15 anos apresentam fachadas com juntas na transição entre pavimentos. Esse fato dificulta a análise do comportamento da degradação. Entretanto, os edifícios que apresentam juntas na transição entre pavimentos tendem a degradar-se mais lentamente do que os edifícios que não apresentam juntas. Uma vez que as juntas têm a função de absorver os esforços atuantes no sistema de revestimento a fim de evitar a ‘ruptura’ do sistema (Silvestre e de Brito, 2009), essas são essenciais para o bom desempenho e maior durabilidade das fachadas.

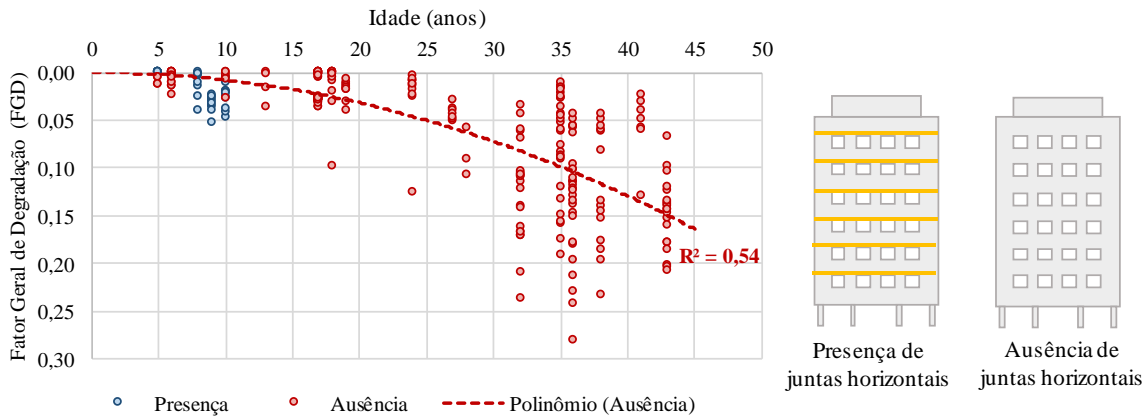


Figura 4. 9 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas em função da existência de juntas.

A Figura 4.10 ilustra comportamento da degradação ao longo do tempo em função da altura do edifício e o critério de classificação. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido para edifícios baixos equivale a 0,54, o que indica boa correlação entre os dados. Os edifícios altos não apresentam valor de coeficiente de determinação e tendência de comportamento credível devido à ausência de casos com idades superiores a 20 anos. A particularidade da arquitetura da cidade de Brasília dificulta a análise comparativa do comportamento da degradação para a altura dos edifícios. Entretanto, Poyastro (2011) afirma que edifícios mais altos são mais suscetíveis a ação da chuva e da radiação solar que edifícios mais baixos.

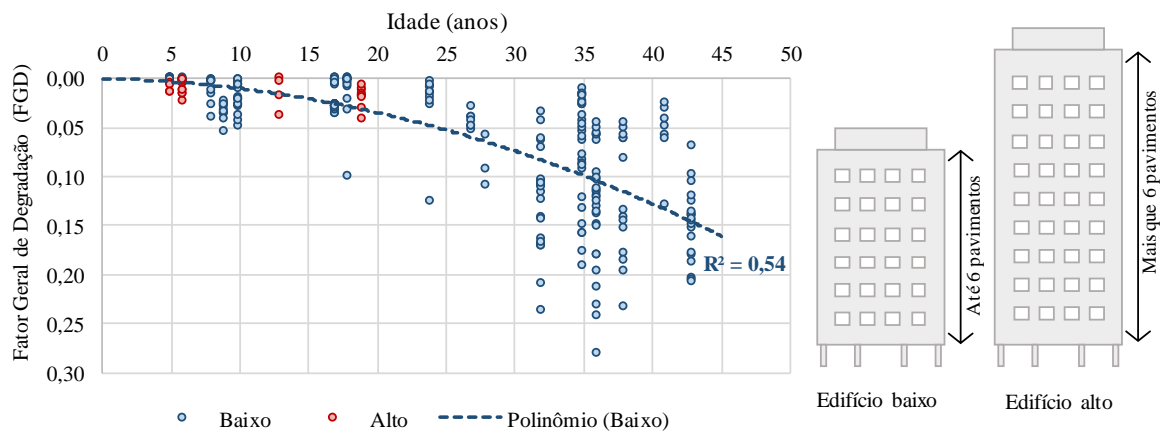


Figura 4. 10 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas em função da altura do edifício.

A Figura 4.11 ilustra comportamento da degradação ao longo do tempo em função da área da fachada e o critério para a classificação das fachadas. Os valores dos coeficientes de determinação para as curvas de tendência de fachadas com áreas reduzidas e extensas equivalem a 0,40 e 0,57, respectivamente. Há uma semelhança no comportamento de degradação de fachadas com áreas reduzidas e áreas extensas. Entretanto conforme Silvestre

e de Brito (2010) e Silva (2014), grandes panos de fachadas têm maiores probabilidades de surgimento de anomalias devido a estas apresentarem módulos de deformações mais elevados e esforços internos prejudiciais.

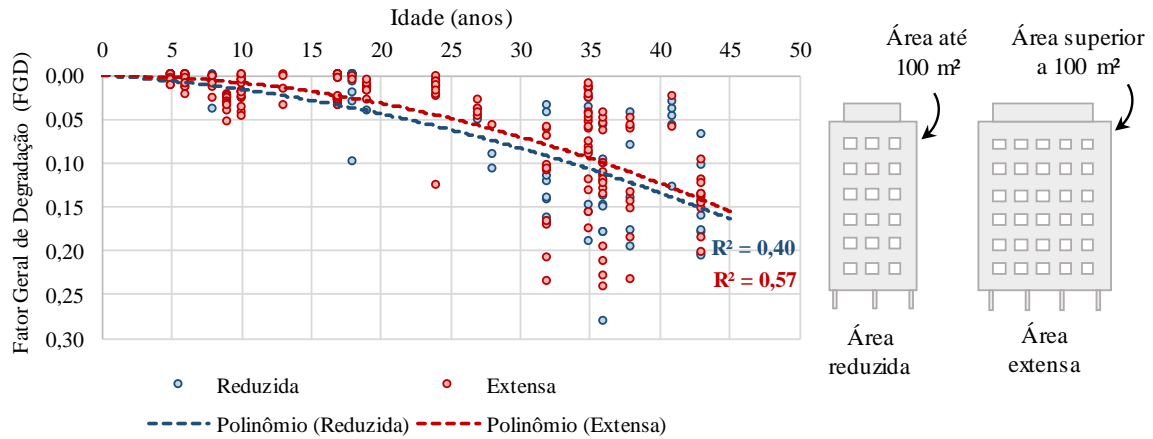


Figura 4. 11 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas em função da área da amostra de fachada.

A Figura 4.12 ilustra comportamento da degradação ao longo do tempo em função da orientação da fachada e o critério de classificação. Os coeficientes de determinação para as orientações Norte, Sul e Oeste são representativos. Embora, a orientação Leste apresente valor baixo de  $R^2$ , 0,38, a curva de tendência apresentada é credível conforme apontado por Nascimento (2016) e Souza (2016). As fachadas orientadas para o Norte tendem a degradar-se mais facilmente que as fachadas nas demais orientações. As fachadas orientadas para o Leste tendem menor susceptibilidade a degradação que as fachadas nas demais orientações.

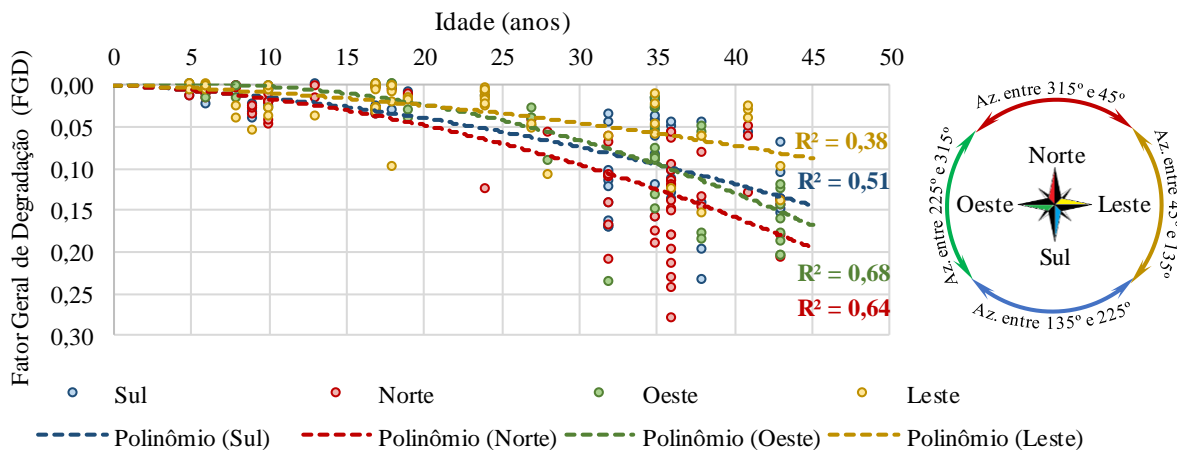


Figura 4. 12 – Tendência de comportamento de degradação de fachadas em função da orientação.

As fachadas orientadas para o Sul, inicialmente tende a degradar-se de forma semelhante as fachadas orientadas para o Norte, mas ao longo do tempo apresenta uma tendência a degradação menor que as fachadas orientadas para o Oeste. Esse comportamento diferenciado ao longo do tempo ocorre também nas fachadas orientadas para o Oeste, que inicialmente



tende a degradar-se de forma semelhante as fachadas orientadas para o Leste e ao longo do tempo apresenta uma tendência a degradação maior que as fachadas orientadas para o Sul. As tendências encontradas convergem com alguns estudos que afirmam que as orientações Norte e Oeste tendem a degradar-se mais rapidamente as orientações Leste e Sul (Bauer *et al.*, 2011; Francinete *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2016).

Segundo Haagenrud (2004) caracterização quantitativa dos agentes provenientes do clima, para associação com a previsão de vida útil podem ser representados pelos parâmetros de radiação solar, temperatura, umidade, vento e chuva dirigida. Cabe ressaltar que a análise da orientação contempla diversos fatores em conjuntos, tais como chuva dirigida e radiação solar, conforme discutido na seção 4.3.4.

#### 4.3.2 Geometria da fachada

O estudo das zonas constituintes da fachada permite estabelecer os padrões de degradação ao longo da fachada. Esses padrões podem ser influenciados pelas zonas e também pela orientação e elemento construtivo. A importância do estudo das zonas está diretamente relacionada à durabilidade, pois a identificação e correção das possíveis falhas contribuem para o aumento da vida útil dos revestimentos (Possan *et al.*, 2017). A Figura 4.13 apresenta a ocorrência de anomalias nas zonas constituintes da fachada.

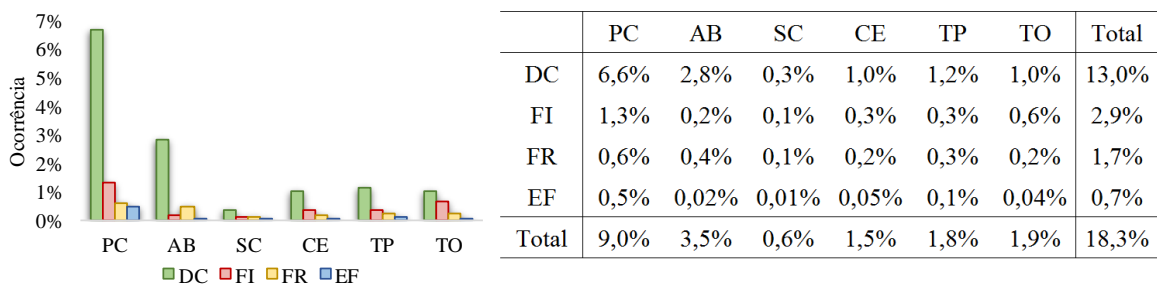


Figura 4. 13 – Ocorrência de anomalias nas zonas constituintes da fachada.

A área degradada refere-se a 18,3% de toda a área inspecionada. O DC apresenta maior percentual de ocorrência, independente da zona, seguido da FI, FR e EF. Há uma semelhança na sequência hierárquica do percentual de ocorrência das anomalias para as zonas. Apenas na zona de AB apresenta comportamento diferenciado, em que o percentual de ocorrência de FR é maior que o percentual de FI.

Independente da anomalia, a zona de PC apresenta maior percentual de ocorrência e a zona de SC apresenta menor percentual de ocorrência. Essa tendência está relacionada ao fato de

que zonas com maiores áreas tendem a apresentar grandes áreas de anomalia (Silva, 2014; Souza, 2016). A geometria da fachada e o nível de pormenorização (zonas da fachada) apresentam influência no padrão de degradação que ocorre nas fachadas. Muitas vezes estas considerações não são consideradas em projetos ou em ações de manutenção, assim impactando negativamente no desempenho do sistema de vedação.

O indicador de degradação FD, apresentado no capítulo 2, é obtido pela razão entre a área degradada de determinada anomalias e a área total da amostra de fachada. Esse indicador adaptado para zona revela a frequência as anomalias em cada zona. A Figura 4.14 apresenta os valores médios de FD para as zonas constituintes da fachada.

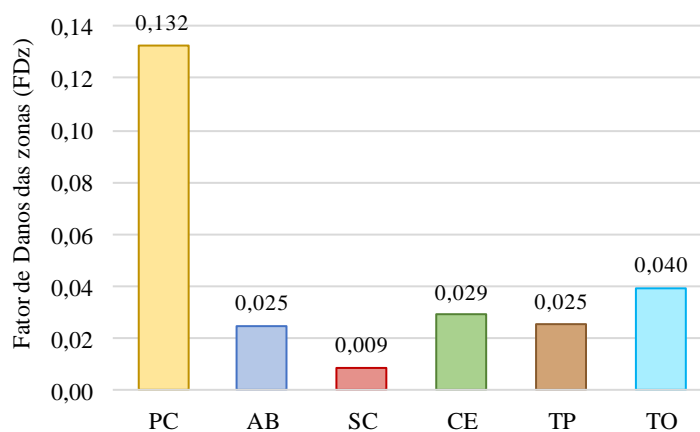


Figura 4. 14 – Valores médios de FD para as zonas.

A zona de PC apresenta elevados valores de FD das zonas. Esse fato ocorre devido o DC ser a anomalia com maior incidência e essa zona apresentar limitação na dissipação ou acomodação das tensões geradas pela variação dimensional dos materiais constituintes do sistema de vedação (Silva, 2014; Santos, 2017). A solicitação de cargas cíclicas na zona de PC facilita o surgimento de anomalias, enfatizando a importância do uso de juntas verticais nas fachadas dos edifícios e da elaboração correta de projetos.

As zonas TO, CE, TP e AB apresentam menores valores de FD das zonas em comparação a zona de PC. O TO está mais exposto as ações climáticas, assim essa zona apresenta condição de exposição mais severa que as demais zonas. As demais zonas (AB, CE e TP) são consideradas críticas devido a concentração de esforços existentes, quando não são acomodadas ou dissipadas provocam o surgimento de anomalias.

A zona de SC apresenta baixa frequência, representada pelo FD das zonas. Essa zona é definida pela norma NBR 9077 (2001) como parte de pavimento da edificação em balanço

em relação à parede externa do prédio. Uma das principais características dessa zona é a ligação com elementos estruturais e que mesmo em configuração de balanço tendem a ser zonas mais rígidas e com menores extensões. As sacadas são consideradas planos que sobressaem a linha da fachada, condicionando-as a maior exposição. Entretanto, o grau de proteção do edifício influencia na condição de exposição, tornando a zona SC com menor frequência de anomalias.

Embora a ocorrência e a frequência de anomalias para as diferentes zonas apresentem algumas tendências, a análise da intensidade da degradação das zonas é importante, a fim de verificar quais zonas apresentam maior criticidade. O FDw apresentado no capítulo 2, é um dos indicadores de degradação resultantes do MMD que permite avaliar a intensidade de degradação para as zonas. Esse indicador é obtido pela razão entre a área degradada da zona e a área da zona. A Figura 4.15 apresenta os valores médios de FDw para as zonas constituintes da fachada.

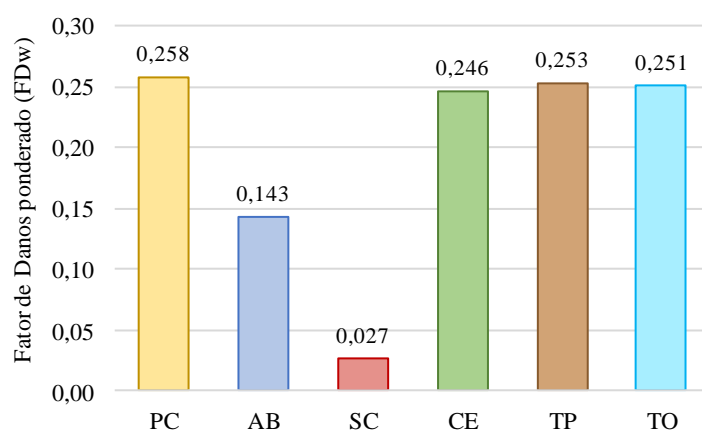


Figura 4. 15 – Valores médios de FDw para as zonas.

A intensidade de degradação nas zonas de PC, CE, TP e TO são maiores que as zonas de AB e SC. As zonas com maiores valores são consideradas críticas, sendo necessário maior detalhe quando elaborado os projetos executivos. Muitas vezes não são contempladas juntas verticais nos planos de fachadas facilitando o surgimento de anomalias em PC. A dificuldade de aplicação da argamassa colante e rejuntar os CE predispõe a incidência de anomalias. A incompatibilidade de comportamento existente entre alvenarias e estruturas de concreto armado é a principal causa de anomalias na TP (SAHB, 2005). Nessa zona, as juntas horizontais devem ser contempladas. A maior exposição à radiação solar e à chuva dirigida torna a zona de TO crítica.

A função da verga e contra verga é evitar a fissuração da alvenaria, pois essas absorvem e redistribuem os esforços concentrados nas extremidades das aberturas. Desta forma, o surgimento de anomalias na AB pode ser evitado quando o sistema de vedação apresenta verga e contra verga nos vãos da alvenaria (Ribeiro e Barros, 2010). Os menores valores de intensidade de degradação na AB podem ser atribuídos ao fato de que o uso de vergas e contra vergas é uma prática comum e está prescrita na norma brasileira de execução de alvenarias (NBR 8545, 1984). Em relação a SC, o cuidado com a movimentação estrutural na elaboração do projeto e na execução da estrutura reduz as movimentações dessa zona, resultando em menor intensidade de degradação.

A execução do revestimento cerâmico em zonas críticas (pequenas ou de difícil acesso) demanda maior cuidado. Muitas vezes a limitação dessas zonas podem refletir no desempenho do sistema de revestimento. Em casos de cantos que apresentem largura inferior a largura da desempenadeira, a aplicação da argamassa colante é dificultada. O preenchimento do rejunte é prejudicado em zonas que apresentam muitos recortes de cerâmica.

#### 4.3.3 Contorno do edifício

As ações oriundas do ambiente no qual o edifício está inserido pode ser avaliada em função do grau de proteção da fachada. Devido ao grau de proteção da fachada ser avaliado de forma qualitativa, a avaliação da degradação é baseada na curva de degradação ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 4.16.

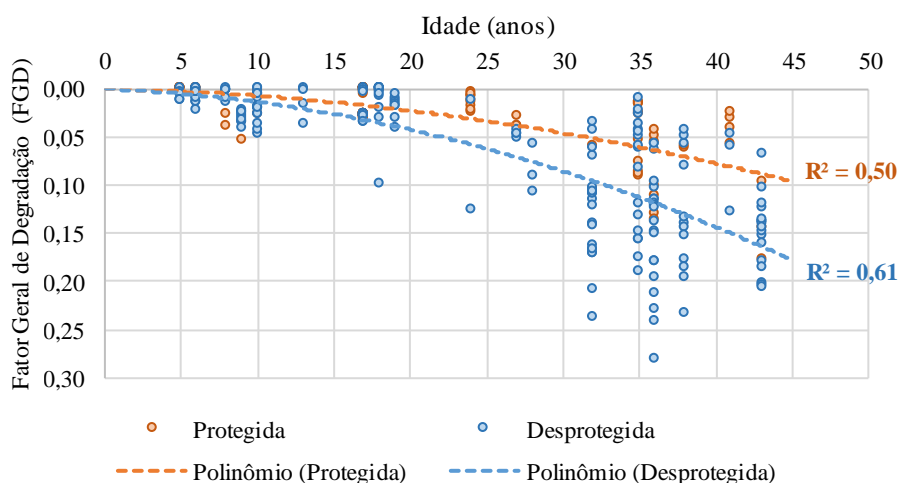


Figura 4. 16 –Tendência de comportamento de degradação de fachadas ao longo do tempo em função do grau de proteção da fachada. A curva de tendência das fachadas protegidas e não protegidas apresenta boa correlação entre as amostras e o indicador de degradação FGD, com coeficiente de determinação ( $R^2$ )

equivalente a 0,50 para as fachadas protegidas e 0,61 para as fachadas não protegidas. Assim como o esperado, as fachadas mais protegidas tendem a degradar-se mais lentamente que as fachadas não protegidas. Convergindo com os resultados encontrados por Poyastro (2011), quem constatou que edifícios mais altos tendem a apresentar faixas de molhamento maiores que edifícios mais baixos.

Os edifícios situados na cidade de Brasília possuem vegetação densamente arborizado em seu contorno, denominado como faixa verde. Essa faixa promove identidade a cada superquadra e passeio sombreado ao pedestre (Almeida *et al.*, 2018). Entretanto a altura da vegetação nem sempre é compatível com a altura do edifício. Coutu *et al.* (2013) afirmam que a consideração dos obstáculos ao redor do edifício desempenha papel importante na evolução da degradação nas fachadas. Cabe ressaltar ainda que, a dispersão dos resultados quanto ao grau de proteção da fachada pode ser influenciada pela ação conjunta da radiação e da chuva dirigida. Os entornos favorecem a proteção da fachada em relação a radiação solar, mas conforme Poyastro (2011), os entornos não protegem a fachada da chuva dirigida.

#### 4.3.4 Agentes climáticos de degradação

Os dados de saída da simulação higrotérmica referem-se ao teor de umidade, resultante da ação da chuva dirigida, e a variação de temperatura, resultante da ação da radiação solar. Essas informações permitem avaliar o desempenho da fachada quanto a sua função de proteção, especificamente a resistência a cargas térmicas e estanqueidade.

O comportamento térmico da fachada é analisado inicialmente em função da radiação solar acumulada, amplitude térmica diária e choque térmico. Posteriormente, a fim de verificar o efeito da variação de temperatura na superfície da fachada, é realizado a relação entre a incidência dos agentes climáticos e a degradação. Essa análise é embasada pelo (Iit) e pelo FGD.

Devido a sazonalidade do clima do Distrito Federal, os períodos de análises climáticas são divididos em período seco e período chuvoso. O período seco corresponde aos meses de abril a setembro. O período chuvoso corresponde aos meses de outubro a março. A radiação solar incidente em uma fachada independe das características da superfície. Entretanto, A radiação solar depende da orientação para qual a fachada está voltada. A radiação solar tem papel determinante no conforto térmico e no comportamento do sistema de vedação. A Figura 4.17

ilustra a variação da radiação diária ao longo do ano para diferentes orientações de fachadas de edifícios situados no Distrito Federal.

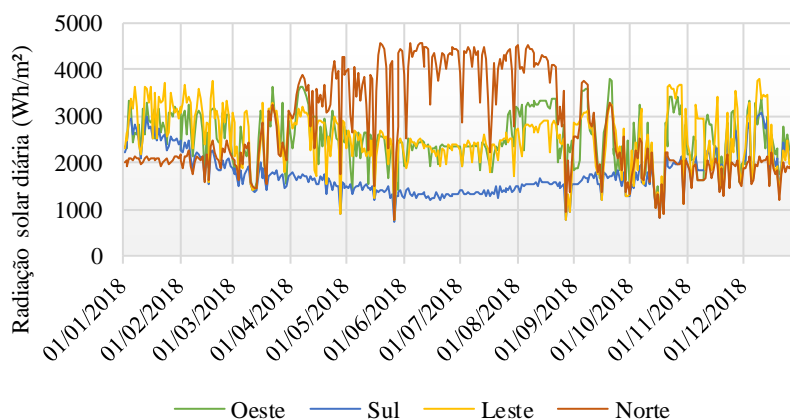


Figura 4. 17 – Radiação diária ao longo do ano para diferentes orientações.

No período seco, a radiação é mais intensa na orientação Norte, indicando que essa orientação fornece maior contributo de energia solar, seguida das orientações Oeste, Leste e Sul. No período chuvoso, nota-se uma inversão na intensidade de radiação para as orientações. A radiação é mais intensa nas orientações Leste e Oeste, seguida da orientação Sul e Norte. Conforme observado por Nascimento (2016), essa inversão de comportamento de incidência de radiação solar ocorre devido as mudanças de trajetória do sol.

No que diz respeito a amplitude térmica, a Figura 4.18 ilustra a amplitude térmica diária ao longo do ano para as diferentes orientações e absorvância. A amplitude térmica é verificada pela diferença entre os valores extremos diários.

Na Figura 4.18, os valores de radiação solar condicionam diretamente os resultados de temperatura. Embora o comportamento ao longo do ano apresente a mesma tendência para cada absorvância, há diferença na intensidade desse comportamento. As fachadas com tonalidades mais claras apresentam intensidade menores quando comparadas as fachadas com tonalidades não claras. Esse fato ocorre devido a temperatura superficial da fachada ser dependente radiação solar incidida e da tonalidade (Zanoni, 2015; Nascimento, 2016). Devido ao sistema de vedação ser composto por diferentes materiais, a variação de temperatura pode induzir o surgimento de tensões termomecânicas e, por consequência, facilitar o surgimento de anomalias (Sahb, 2005).

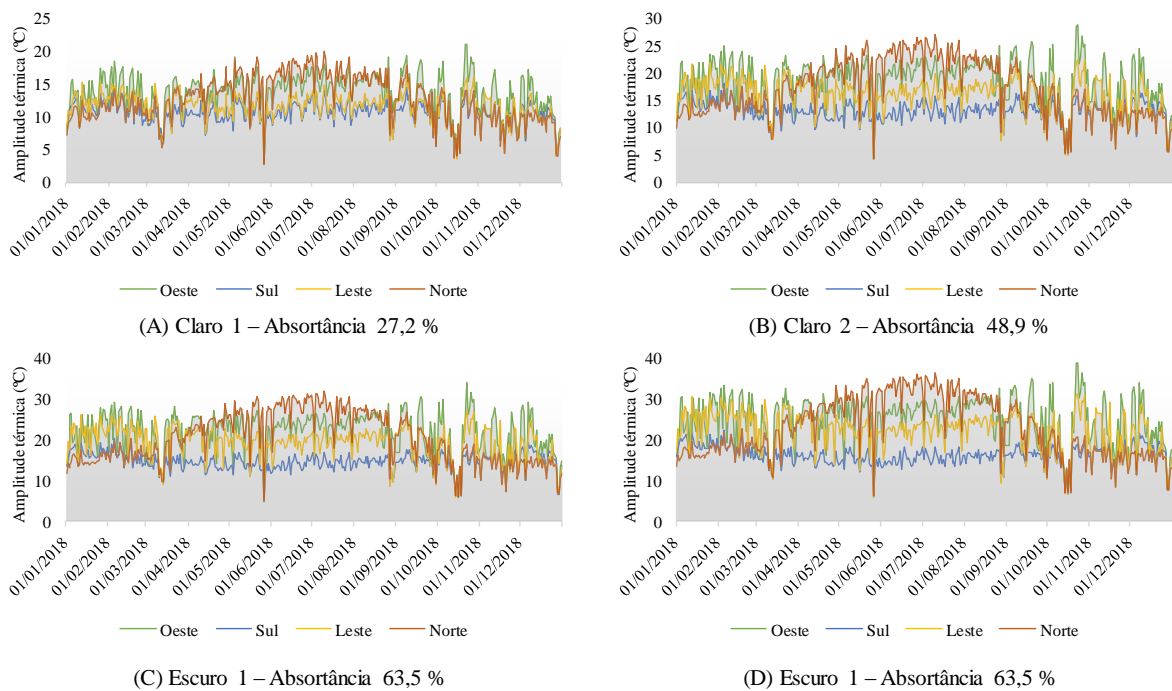


Figura 4. 18 – Amplitude térmica diária ao longo do ano para as diferentes orientações e absorptância.

No período seco, independente da tonalidade da fachada, a orientação Norte apresenta maiores valores de amplitude térmica, seguida da orientação Oeste, Leste e Sul. No período chuvoso, a orientação Oeste apresenta maiores valores quando comparada as demais orientações. Cabe salientar que a orientação Oeste ao longo do ano apresenta-se como uma orientação crítica, pois no período seco é a segunda mais intensa e no período chuvoso é a mais intensa, assim como constatado por Bauer *et al.* (2011) e Francinete *et al.* (2015). Nascimento (2016) afirma que a ação dos agentes térmicos é mais severa no período seco do que no período chuvoso devido as maiores intensidades nesse período.

O *Iit* é o índice que caracteriza de maneira bem distinta as fachadas estudadas e permite refletir sobre a relação dos agentes térmicos com a degradação da fachada, representada pelo FGD. A Figura 4.19 ilustra a relação entre a degradação mensurada pelo FGD e a intensidade do clima verificada pelo *Iit*. Essa análise é analogia a proposição da função dose-resposta proposta pela ISO 15586-2 (2012).

A relação entre a degradação e a intensidade da ação térmica apresenta uma elevada dispersão. Possivelmente este fato ocorre devido a formulação do *Iit* ser em função da idade e de  $\Delta T$ , em que a temperatura é influenciada pela absorptância e pela orientação. A medida que aumenta o indicador de degradação maior será a intensidade da ação climática referente à temperatura, como ilustrado na Figura 4.19. A influência da idade está relacionada a redução

da resistência de aderência causada pelos intensos ciclos de aquecimento e resfriamento que ocorrem nas fachadas ao longo do tempo (Yiu *et al.*, 2006).

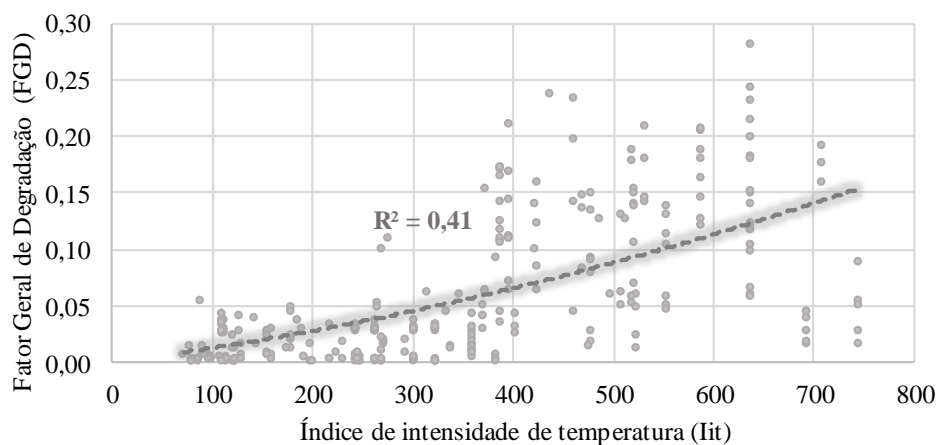


Figura 4. 19 – Relação entre a degradação e a intensidade da ação térmica.

A temperatura pode causar variações dimensionais ou atuar como catalisador e acelerar reações causando alterações físicas e químicas no sistema de vedação de fachada (Flores-Colen, 2009; Freitas, 2012). Conforme afirmado por Haagenrud (2004), a severidade dos fatores climáticos pode ser expressa em função da temperatura. A mudança rápida de temperatura no sistema de revestimento de fachada pode acarretar em anomalias. Essa alteração brusca de temperatura é representada pelo choque térmico. Daniotti *et al.* (2013) considera o choque térmico como variações abruptas (8° C) em um intervalo de tempo equivalente a uma hora. O choque térmico é considerado tanto nas variações de aquecimento, como nas de resfriamento, pois os valores são quantificados em módulo.

Dessa forma, a relação entre a ação de temperatura e a degradação pode ser verificada pela relação entre o FGD, Iit e a ocorrência de choque térmico. A Tabela 4.5 apresenta os resultados de Iit e choque térmico para algumas amostras selecionadas que apresentam FGD próximo aos limites de condição de degradação.

Em relação ao Iit, observa-se na Tabela 4.5 que os maiores valores estão situados na condição D, indicando que há relação entre o índice de temperatura Iit e a degradação da fachada. Esta relação é encontrada e discutida por diversos pesquisadores (Fiorito, 2010; Uchoa, 2015; Nascimento; 2016) que afirmam que o processo de degradação das fachadas revestidas por cerâmicas está relacionado às ações climáticas, especificamente as condições de temperatura. O Iit reflete o efeito cumulativo dos carregamentos e descarregamentos em relação a



temperatura. Diversos pesquisadores mostram que a ruptura no sistema de revestimento ocorre por fadiga, mesmo esse sendo composto por materiais frágeis (Bezerra *et al.*, 2018).

Tabela 4. 5 – Valores de Iit e a ocorrência de choque térmico para diferentes condições de degradação.

Condição	Orientação	FGD	Idade	Iit <sub>por ano</sub>	Iit <sub>total</sub>	Absortância (%)	Choque Pleno (1h)
A	Leste	0,0026	6	13,18	79,1	48,9	39
		0,0027	10	13,40	134,0	77,1	328
	Norte	0,0026	6	12,37	74,2	63,5	72
		0,0029	13	12,02	156,3	48,9	6
	Oeste	0,0016	17	12,97	220,5	48,9	90
		0,0024	6	12,97	77,8	48,9	90
	Sul	0,0023	17	11,79	200,4	48,9	4
		0,0026	8	10,86	86,9	27,2	0
B	Leste	0,037	13	13,18	171,3	48,9	39
		0,040	8	13,40	107,2	77,1	328
	Norte	0,037	9	11,44	103,0	27,2	0
		0,049	10	12,02	120,2	48,9	6
	Oeste	0,040	27	11,64	314,3	27,2	2
		0,041	19	12,97	246,4	48,9	90
	Sul	0,041	9	10,86	97,7	27,2	0
		0,044	32	10,86	347,5	27,2	0
C	Leste	0,140	43	13,00	559,0	27,2	1
		0,154	38	13,00	494,0	27,2	1
	Norte	0,151	36	12,02	432,7	48,9	6
		0,168	32	11,44	366,1	27,2	0
	Oeste	0,133	35	11,64	407,4	27,2	2
		0,146	43	11,64	500,5	27,2	2
	Sul	0,137	36	11,79	424,4	48,9	4
		0,169	32	10,86	347,5	27,2	0
D	Norte	0,192	35	12,37	433,0	63,5	72
		0,281	36	12,02	432,7	48,9	6
	Oeste	0,186	38	11,64	442,3	27,2	2
		0,204	43	11,64	500,5	27,2	2
	Sul	0,172	32	10,86	347,5	27,2	0
		0,234	38	10,86	412,7	27,2	0

Quanto maior o valor de absorvância maior é a ocorrência de choque térmico, conforme pode ser observado na Tabela 4.5. Esse comportamento converge com Zanoni (2015), que afirma que a absorvância é o parâmetro determinante para temperatura superficial dos revestimentos, mesmo com materiais completamente diferentes. Conforme Saraiva (2009) e Moscoso (2013), o choque térmico é uma das principais causas de descolamento cerâmico em fachadas, sendo essa uma análise importante para a compreensão da degradação de fachadas. Uma vez que a variação de temperatura depende da radiação solar incidente na fachada, a quantidade de choque térmico é menor na orientação Sul que nas demais orientações.

O comportamento higroscópico da fachada é verificado em função do teor de umidade das camadas constituintes da fachada. Inicialmente, o volume de chuva dirigida acumulada e os episódios de chuva são analisados. Posteriormente, a fim de verificar o efeito do teor de umidade na superfície da fachada, a relação entre a incidência dos agentes climáticos e a degradação é realizada. Essa análise é embasada pelo FIC e pelo FGD.

No que diz respeito a presença de água no sistema de vedação, Campante (2001) e Melo Jr. (2010) afirmam que muitas anomalias são oriundas da presença de umidade no sistema. A possibilidade de problemas relacionados às infiltrações pode ser evitada quando a água incidente na fachada é perdida em desvios de trajetória pelos fluxos de vento e obstáculos. Entretanto, conforme Straube e Schumacher (2005) e Vallejo (1990), grande parte da água incidente na fachada é absorvida pela superfície. A Figura 4.20 ilustra o volume de chuva dirigida acumulada e os episódios de chuva ao longo do ano em edifícios localizados no Distrito Federal.

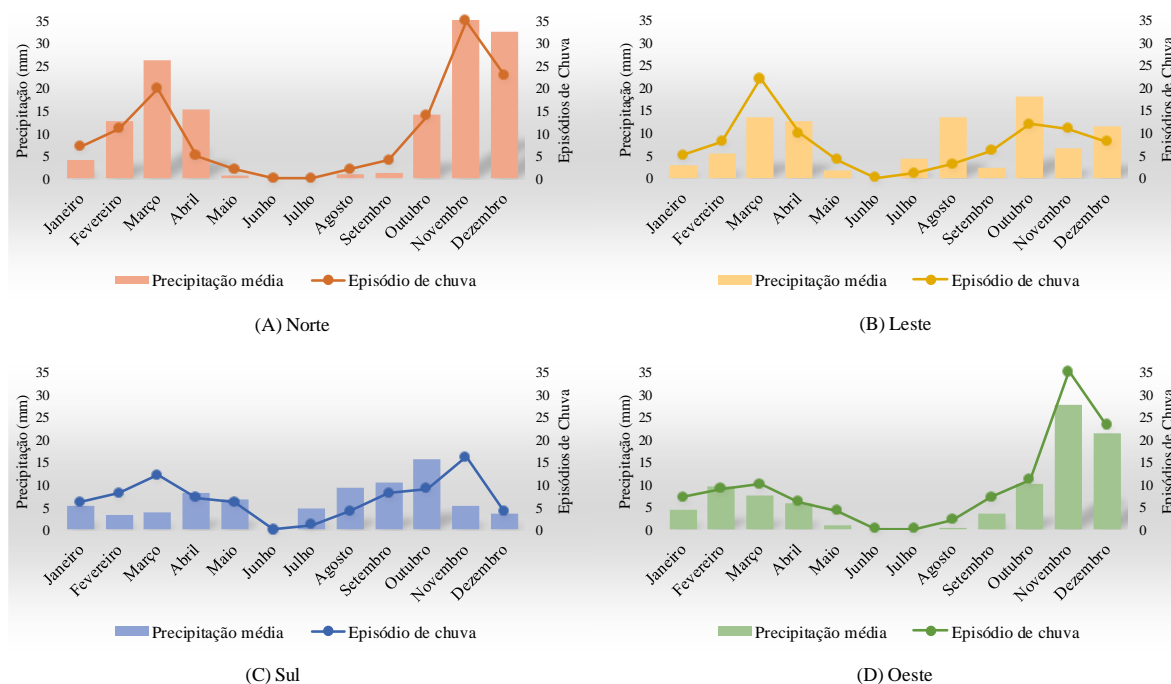


Figura 4. 20 – Volume de chuva dirigida acumulada e episódios de chuva ao longo do ano em função da orientação.

No período chuvoso, o mês com mais episódios de chuva refere-se ao mês de novembro para as orientações Norte e Oeste e ao mês de outubro para as orientações Leste e Sul. Esse fato ocorre devido a predominância do vento na direção Noroeste nesse período (Zanoni, 2015). Nascimento (2016) afirma que o volume de chuva no período chuvoso é três vezes maior que

no período seco. No período seco, o volume de chuva dirigida incidente nas fachadas ocorre na orientação Leste devido a predominância do vento na orientação Leste nesse período.

Devido a presença de água afetar a qualidade, desempenho, vida útil e durabilidade de qualquer elemento aplicado a construção civil, a tradução da variação do teor de umidade no FIC torna-se importante. O FIC está associado basicamente a chuva incidente e quanto que essa é absorvida pela fachada, em que o coeficiente de absorção da camada mais externa do sistema de revestimento cerâmico equivale a  $0,001\text{kg/m}^2.\sqrt{s}$ , conforme apresentado na Tabela 3.4. Os valores de FIC para o ano simulado de amostras com diferentes orientações e em diferentes condições de degradação são diferenciados. A relação entre a degradação mensurada pelo FGD e a intensidade do clima, verificada pelo FIC, pode ser observada na Tabela 4.6.

Tabela 4. 6 – Valores de FIC para diferentes condições de degradação.

Condição	Orientação	FGD	Idade	FIC
A	Leste	0,0026	6	14,20
		0,0027	10	15,77
	Norte	0,0026	6	20,25
		0,0029	13	17,70
	Oeste	0,0016	17	18,90
		0,0024	6	18,90
	Sul	0,0023	17	15,35
		0,0026	8	12,09
B	Leste	0,037	13	14,20
		0,040	8	15,77
	Norte	0,037	9	12,35
		0,049	10	17,70
	Oeste	0,040	27	13,66
		0,041	19	18,90
	Sul	0,041	9	12,09
		0,044	32	12,09
C	Leste	0,140	43	9,80
		0,154	38	9,80
	Norte	0,151	36	17,70
		0,168	32	12,35
	Oeste	0,133	35	13,66
		0,146	43	13,66
	Sul	0,137	36	15,35
		0,169	32	12,09
D	Norte	0,192	35	20,25
		0,281	36	17,70
	Oeste	0,186	38	13,66
		0,204	43	13,66
	Sul	0,172	32	12,09
		0,234	38	12,09

Há uma diferenciação do FIC para as orientações, em que os maiores valores FIC referem-se quase sempre a orientação Norte e as orientações Leste e Sul apresentam os menores valores de FIC, independente da condição de degradação. A chuva dirigida não atua decisivamente no principal mecanismo de degradação que é representado pelo descolamento cerâmico, mas pode incrementar esse mecanismo junto com diversos outros fatores. A forma como foi avaliada a ação da chuva não permite verificar a relação entre o impacto da chuva e a degradação.

A incidência de chuva na fachada causa alteração no teor de umidade dos materiais. A relevância do impacto da chuva pode ser observada por meio da análise pormenorizada de episódios de chuva e do teor de umidade incidente em uma fachada. Para essa análise considerou-se uma situação de fachada orientada ao Norte com absorvância igual a 27,2%. O mês que apresentou maior volume e episódios de chuva no ano foi o mês de novembro, como pode ser observado na Figura 4.21.

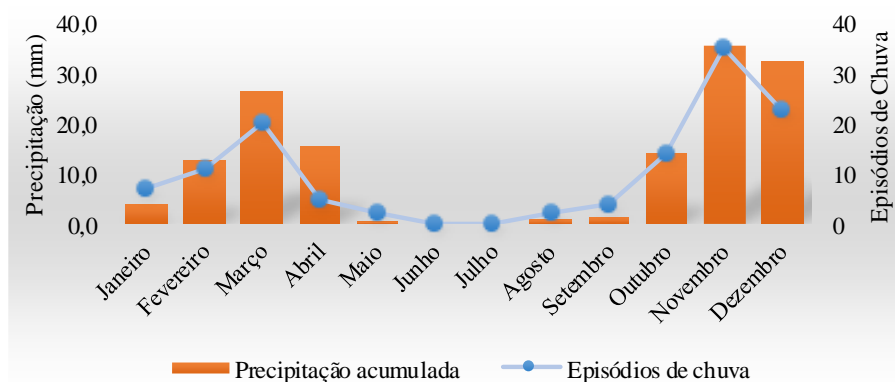


Figura 4. 21 – Volume e quantidade de episódios de chuva mensal para a análise pormenorizada, para fachada orientada a Norte.

No mês de novembro, o dia com maior volume e episódios de chuva foi o dia 28. O teor de umidade e o volume de chuva na superfície externa do sistema de vedação ao longo do desse dia está ilustrado na Figura 4.22. Observa-se que há dois picos na variação de umidade da cerâmica. Esses picos representam a resposta da ação da chuva dirigida. Desta forma, tem-se o agente de degradação representado pela chuva dirigida e a resposta da ação observado pela variação do teor de umidade.

A elevação do teor de umidade às três e as quinze horas indica episódio de chuva, isto é, dois episódios de chuva no mesmo dia. A queda do teor de umidade após o primeiro episódio de chuva indica que a chuva ocorreu durante uma hora, como pode ser observado na Figura 4.22.

No segundo episódio de chuva, há aumento crescente do teor de umidade, o que indica que a segunda chuva ocorreu durante quatro horas.

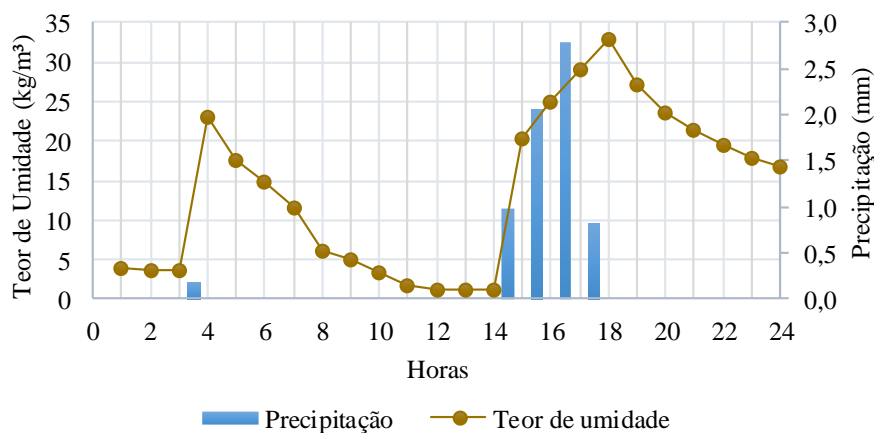


Figura 4. 22 – Teor de umidade e o volume de chuva ao longo do dia.

Ainda sobre a variação de umidade na superfície do sistema de vedação, note que no primeiro episódio de chuva teve aumento de 600% do teor de umidade em relação ao início da chuva. No segundo episódio, houve uma variação de 1700% do teor de umidade na primeira hora de chuva e 2800% ao final do episódio de chuva (com duração de quatro horas) em relação ao início da chuva. Desta forma, a influência da duração e do volume de chuva na variação do teor de umidade pode ser comprovada. A intensidade da chuva verificada pela relação entre o volume e a duração da chuva. Em consequência, a intensidade da chuva também pode-se apresentar-se como uma variável condicionante para o FIC.

A orientação das fachadas tem uma influência considerável na incidência de chuva dirigida, pois fachadas orientadas à direção predominante do vento são sistematicamente mais afetadas pela precipitação (Freitas, 2011). De modo geral considerando a ação dos agentes climáticos, temperatura e teor de umidade, sobre as fachadas, a ordem decrescente de intensidade de degradação para as orientações é Norte, Oeste, Leste e Sul. Esse resultado converge com o observado por Souza (2016), Nascimento (2016) e Piazzarollo (2019) que apresentam a mesma ordem considerando a tendência de degradação das fachadas para as diferentes orientações.

#### 4.4 Estimativa de vida útil

Essa seção apresenta os resultados obtidos pela aplicação de alguns modelos de matemáticos e a análise da vida útil estimada para cada modelo.

#### 4.4.1 Método gráfico

A partir da definição do estado limite de degradação ( $FGD = 0,05$ ) e dos parâmetros da equação obtida pela regressão é possível estimar a vida útil. A análise da vida útil deve ser realizada com critério, com a finalidade de garantir coerência dos resultados obtidos, já que o processo de degradação envolve diversos fatores simultâneos. O modelo proposto para a previsão da vida útil a partir da aplicação de regressão simples linear e não linear em função da idade do sistema de revestimento é mostrado na Figura 4.23. A curva de tendência obtida representa a perda de capacidade do sistema de revestimento para atender aos requisitos mínimos de desempenho ao longo do tempo.

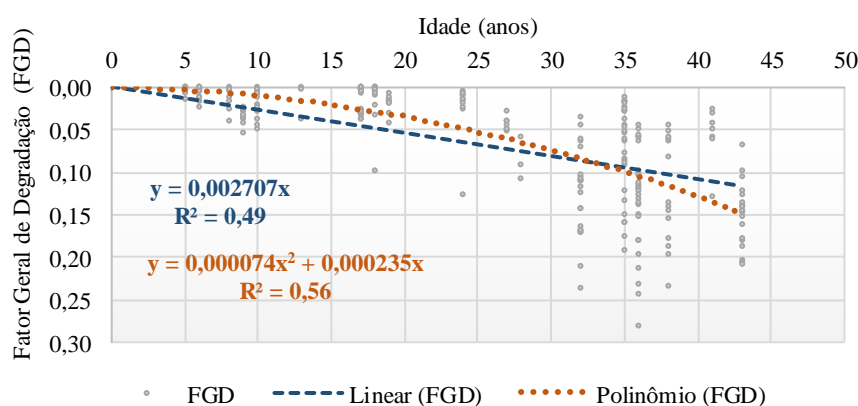


Figura 4. 23 – Comportamento da degradação ao longo do tempo obtido pela regressão simples.

Os  $R^2$  obtidos para os ajustes da curva de tendência equivalem a 0,49 para regressão linear e 0,56 para a regressão polinomial de segundo grau. O polinômio de segundo grau apresenta maior  $R^2$ , indicando que aproximadamente 56% da variabilidade de FGD pode ser justificada pelo modelo, que considera apenas a idade do edifício como variável. A dispersão dos resultados reflete a complexidade do fenômeno e indica que esse fenômeno não é dependente apenas do tempo. No entanto, independentemente da variabilidade dos resultados, a forte influência da idade sobre o processo de degradação pode ser verificada.

Semelhante à outras pesquisas (Gaspar e de Brito, 2008; Souza *et al.*, 2018), o comportamento do indicador de degradação observado pelo polinômio de segundo grau é inicialmente lenta e aumenta ao longo do tempo. A degradação inicial geralmente ocorre devido ao surgimento de anomalias precoces decorrentes de erro de execução. No segundo estágio, onde ocorre uma aceleração do processo de degradação, as anomalias passam a serem mais graves ou pode até mesmo ocorrer sobreposição dessas anomalias.

O comportamento do fenômeno de degradação adotado é representado por um modelo não linear. A adequação do ajuste é averiguada pela análise dos resíduos entre o valor observado e o valor ajustado pela reta. O valor obtido para o erro quadrático médio (EQM) equivale a  $1,67E-3$ . Uma vez que este valor se encontra próximo de zero, o ajuste do modelo é considerado adequado.

A arquitetura particular de Brasília limita a obtenção de informações de algumas características, por isso algumas tendências e modelos matemáticos não foram obtidos. As equações obtidas pela regressão não linear estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Equações dos polinômios da regressão simples não linear.

Característica	Categoria	Polinômio
Geral	Idade	$FGD = 0,00007415 t^2 + 0,00023478 t$
Clareza da cerâmica	Clara	$FGD = 0,00002415 t^2 + 0,00216467 t$
	Não Clara	$FGD = 0,00009336 t^2 - 0,0004102 t$
Dimensão da cerâmica	Pequena	$FGD = 0,00008585 t^2 - 0,00034001 t$
	Grande	$FGD = 0,00012161 t^2 - 0,00013071 t$
Elemento construtivo	Fachada	$FGD = 0,00005788 t^2 + 0,00078796 t$
	Empena	$FGD = 0,00009945 t^2 - 0,00071808 t$
	Caixa de Escada	$FGD = 0,00010084 t^2 - 0,00073937 t$
Existência de Juntas	Presença	
	Ausência	$FGD = 0,00008228 t^2 - 0,00006209 t$
Altura do edifício	Baixo	$FGD = 0,00007295 t^2 + 0,00028304 t$
	Alto	
Área da fachada	Reduzida	$FGD = 0,0000577 t^2 + 0,00103735 t$
	Extensa	$FGD = 0,00007371 t^2 + 0,00012782 t$
Grau de proteção	Protegida	$FGD = 0,00004011 t^2 + 0,00033408 t$
	Desprotegida	$FGD = 0,0000733 t^2 + 0,00066039 t$
Orientação	Norte	$FGD = 0,00007731 t^2 + 0,00086898 t$
	Sul	$FGD = 0,00004902 t^2 + 0,00100762 t$
	Leste	$FGD = 0,00002981 t^2 + 0,00062002 t$
	Oeste	$FGD = 0,00010269 t^2 - 0,00087442 t$

A estimativa de vida útil por meio do método gráfico, representado pela regressão simples não linear, para as diferentes características analisadas foram calculadas a partir dos modelos obtidos para cada característica. Na Figura 4.24 estão apresentadas a vida útil estimada por

meio do Método Gráfico ( $VUE_{MG}$ ). Devido a limitação do banco de dados, cabe salientar que nem todos os valores de  $VUE_{MG}$  são condizentes.

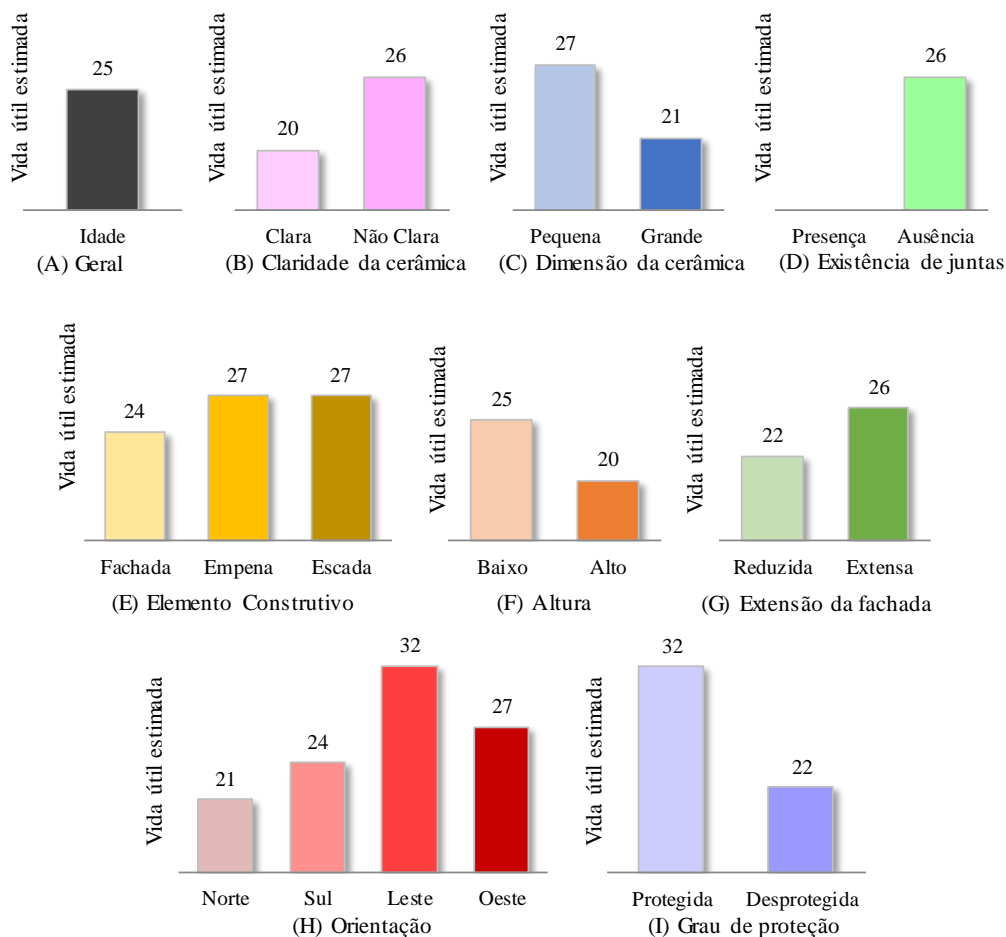


Figura 4. 24 – Vida útil estimada por meio do Método Gráfico.

A  $VUE_{MG}$  em função apenas da idade equivale a 25 anos. Essa  $VUE_{MG}$  é tomada como referência para a comparação com as outras variáveis. A influência da claridade da cerâmica é iminente a longo prazo. A  $VUE_{MG}$  para a dimensão da cerâmica indica que cerâmicas pequenas influenciam positivamente na durabilidade do sistema e, contrariamente, cerâmicas grandes afetam negativamente a durabilidade do sistema de revestimento.

Em relação ao elemento construtivo, as fachadas afetam positivamente e as empenas e caixas de escadas impactam negativamente comparado a  $VUE_{MG}$  que considera a idade. A ausência de informações para as análises da presença de juntas e altura do edifício inviabiliza essa comparação para o MG. As características de exposição ao meio ambiente relacionadas ao grau de proteção indicam que fachadas protegidas apresentam  $VUE_{MG}$  superiores a fachadas desprotegidas. A orientação da fachada apresenta também influencia positivas para as



orientações Leste e Oeste e negativas para as orientações Norte e Sul comparado a  $VUE_{MG}$  que considera a idade.

Dentre todos os valores de  $VUE_{MG}$ , o menor valor se refere a 20 anos e o maior a 32 anos. Esses resultados são credíveis devido a realidade de Brasília e convergem com os encontrados por Bauer *et al.* (2014). Além disso, esses resultados são condizentes com o proposto pela norma brasileira NBR 15575-1 (2013) que adota a vida útil de projeto de revestimento de fachada aderido igual ao período de no mínimo 20 anos e para os sistemas de vedação vertical externa equivalente a 40 anos.

#### 4.4.2 Método Transposição de Pontos (MTP)

A grande sensibilidade do MTP pode resultar em valores absurdos e utópicos, pois quanto mais distante o caso analisado estiver da curva média de degradação, maior será a possibilidade de erro. A credibilidade dos resultados obtidos por este método deve ser avaliada por profissional e deve ser baseada na literatura. Em sistemas de revestimento cerâmico, há uma variação dos valores de vida útil, em que variam de 10 anos a 60 anos (Galbusera *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2018). O critério para a validade dos resultados adota como valores utópicos idades acima de 70 anos e casos que estão claramente afastados da média dos valores obtidos para cada idade.

A distribuição da vida útil estimada pelo MTP ( $VUE_{MTP}$ ) para idade de cada caso está apresentada na Figura 4.25. O eixo da abscissa apresenta tempo, enquanto o eixo das ordenadas representa a vida útil estimada de cada caso. O valor obtido para o erro quadrático médio (EQM) equivale a  $7,57E-35$ . Uma vez que este valor se encontra próximo de zero, o ajuste do modelo é considerado adequado.

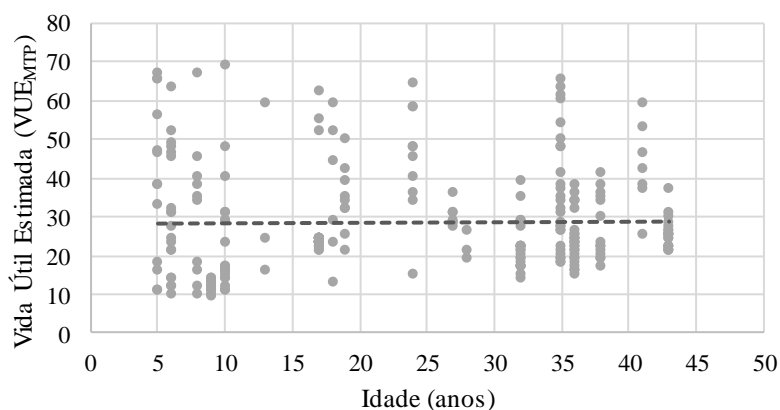


Figura 4. 25 – Distribuição da VUE para idade de cada caso pelo Método de Transposição de Pontos.

Estes resultados são satisfatórios, pois conforme Galbusera (2013) quanto mais horizontal a linha de tendência mais confiável é a estimativa. Os valores de  $VUE_{MTP}$  elevados referem-se a casos que apresentam baixos valores de FGD, indicando bom estado de degradação. A  $VUE_{MTP}$  para fachadas equivale a 29 anos, como pode ser observado pela linha de tendência apresentada na Figura 4.25.

Uma vez que a degradação não depende unicamente do tempo, o MTP também foi analisado considerando as outras variáveis que podem afetar o processo de degradação. A Figura 4.26 apresenta a  $VUE_{MTP}$  para as diversas variáveis consideradas.

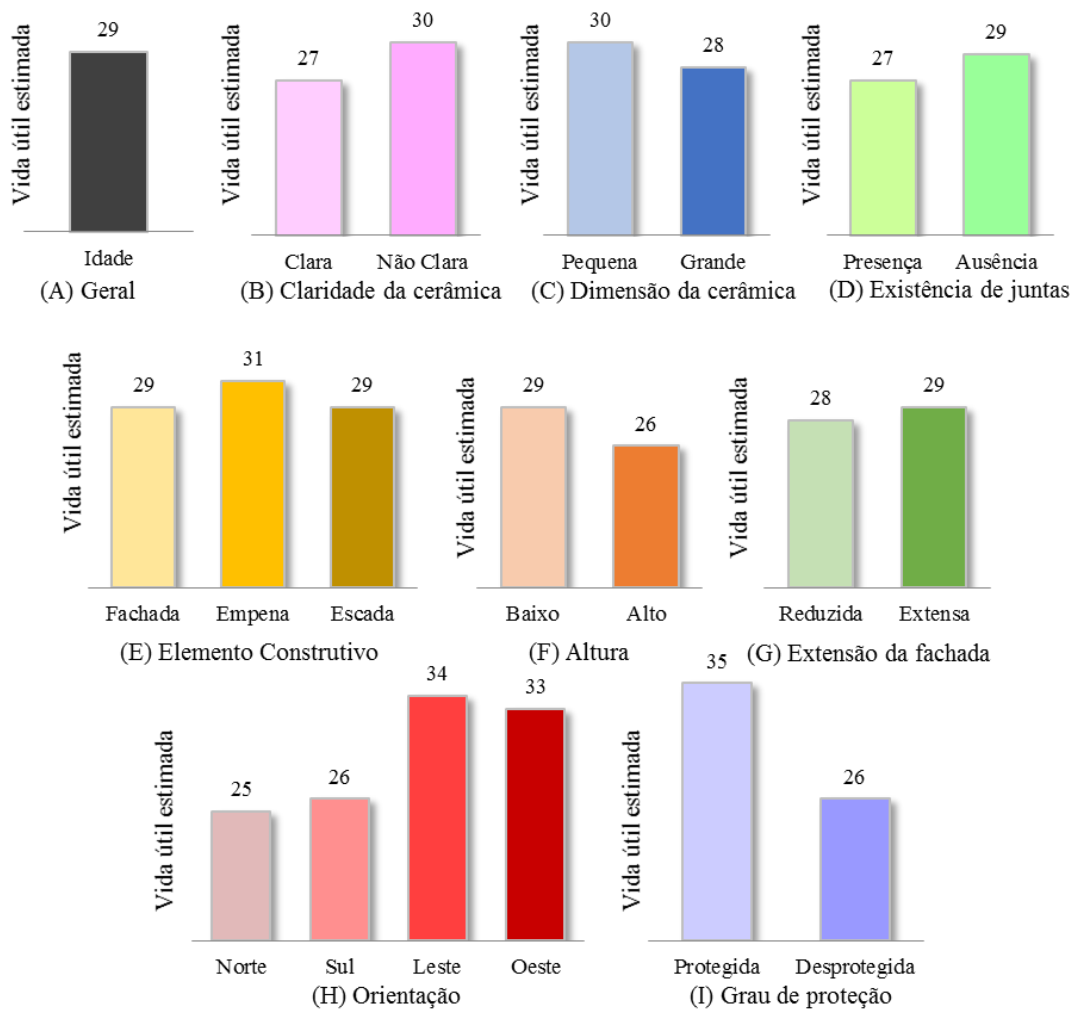


Figura 4. 26 – Vida útil estimada por meio do Método de Transposição de Pontos.

O maior valor de  $VUE_{MTP}$  equivale a 35 anos e o menor é igual a 25 anos. A  $VUE_{MTP}$  apresenta tendências semelhantes a encontrada no MG. Entretanto, o MTP apresenta intervalo de  $VUE_{MTP}$  menor que o MG. Embora esse método obtenha valor de  $VUE_{MTP}$  para todas as variáveis consideradas, cabe enfatizar que nem todos os resultados fazem sentido físico. As

características referentes a claridade da cerâmica e a existência de juntas não refletem a realidade. Como já comentado, esses resultados são reflexo da característica dos edifícios localizados na cidade de Brasília, que apresentam características semelhantes em idades mais avançadas e ao passar do tempo nota-se uma evolução tecnológica na execução desses sistemas.

Os resultados obtidos pelo MTP são satisfatórios e credíveis, pois convergem com a literatura (Galbusera, 2013; Souza *et al.*, 2017). Destaca-se ainda que muitas anomalias se tornam prejudiciais ao desempenho a longo prazo e o estado limite de degradação considerado nesta pesquisa demarca o instante em que as anomalias ainda não afetam significativamente o desempenho do sistema.

#### 4.4.3 Regressão Múltipla Linear

O método de seleção das variáveis *stepwise* testa vários modelos, sendo o último modelo apresentado o modelo com melhor ajuste. A eficácia das diferentes funções é analisada pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ) e raiz do erro quadrático médio ( $\sqrt{EQM}$ ). Na Tabela 4.8 é apresentado o sumário dos modelos de RML.

Tabela 4. 8 – Sumário do modelo de Regressão Múltipla Linear.

Modelo	$r$	$R^2$	$R^2_{ajustado}$	$\sqrt{EQM}$
1	0,732 <sup>a</sup>	0,536	0,534	0,04209
2	0,765 <sup>b</sup>	0,585	0,582	0,03986
3	0,773 <sup>c</sup>	0,598	0,594	0,03930
4	0,778 <sup>d</sup>	0,605	0,600	0,03901

a. Variáveis independentes: (Constante), Idade

b. Variáveis independentes: (Constante), Idade, Proteção

c. Variáveis independentes: (Constante), Idade, Proteção, Dimensão

d. Variáveis independentes: (Constante), Idade, Proteção, Dimensão, Orientação

O modelo final da RML apresentou  $R^2_{ajustado}$  igual a 0,600. Esse resultado indica que 60,0% da variabilidade total do FGD é explicada pelas variáveis independentes presentes no modelo de regressão. As variáveis consideradas como explicativas para o modelo de degradação obtido pela RML são idade, grau de proteção, dimensão da cerâmica e orientação da fachada.

A fim de verificar a significância estatística do modelo obtido, a análise de variância (ANOVA) foi aplicada ao modelo RML. Os resultados da ANOVA (Tabela 4.9) apresenta o

valor de significância igual a 0,000. Uma vez que este valor é inferior ao valor de 5% (*p-value* admitido), considera-se o modelo é altamente significativo. Isto é, o modelo tem capacidade explicativa estatisticamente significativa.

Tabela 4. 9 – Análise de variância do modelo de Regressão Múltipla Linear.

Modelo	Soma dos desvios quadráticos	Graus de liberdade	Desvio médio quadrático	F	Sig
Regressão	0,704	4	0,176	115,676	0,000 <sup>a</sup>
4 Resíduos	0,460	302	0,002		
Total	1,164	306			

a. Variáveis independentes: (Constante), Idade, Proteção, Dimensão, Orientação

Os coeficientes do modelo de regressão para cada variável são apresentados na Tabela 4.10. A partir dos valores dos coeficientes do modelo de regressão obtém-se a equação que expressa o modelo de degradação em função das variáveis explicativas (equação 4.1).

Tabela 4. 10 – Coeficientes do modelo de regressão.

Modelo	Coeficientes de regressão		Coeficientes padronizados Beta	Sig	VIF
	B	Erro padrão			
(Constante)	0,403	0,097		0,000	
Idade (Id)	0,004	0,000	0,802	0,000	1,768
4 Proteção (Pro)	-0,052	0,019	-0,125	0,005	1,515
Dimensão (Dim)	-0,343	0,104	-0,163	0,001	1,882
Orientação (Ori)	-0,043	0,018	-0,096	0,019	1,278

$$FGD = 0,004 . Id - 0,052 . Pro - 0,343 . Dim - 0,043 Ori + 0,403 \quad (4.1)$$

A avaliação da importância de cada variável pela simples comparação entre os coeficientes de regressão resulta em uma percepção errônea, pois as variáveis apresentem magnitudes diferentes. Conforme Marôco (2007), para essa comparação é necessária a padronização dos coeficientes de regressão. Abbad e Torres (2002) e Silva (2015) afirmam que a importância relativa de cada variável na explicação do FGD também pode ser obtida pela análise da variação de R<sup>2</sup> dos modelos testados. Na Figura 4.27 é apresentado a importância relativa das variáveis conforme sugerido por Marôco (2007) e Silva (2015).

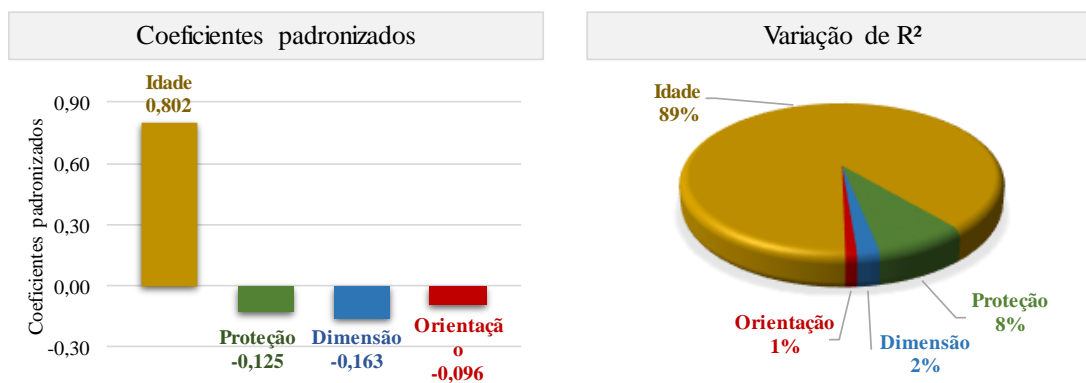


Figura 4. 27 – Importância relativa das variáveis obtido pela padronização dos coeficientes e pela variação de R<sup>2</sup>.

Os valores absolutos dos coeficientes padronizados indicam que a variável idade apresenta maior contribuição relativa para explicar o comportamento de FGD. As variáveis referentes a proteção, dimensão e orientação contribuem de forma negativa e em menor proporção no comportamento de FGD. Considerando a análise pela variação de R<sup>2</sup>, observa-se que a idade explica 89% da variabilidade de FGD, sendo essa a variável com maior poder preditivo. As variáveis de proteção, dimensão e orientação explicam 8%, 2% e 1%, respectivamente, da variabilidade de FGD. Mesmo que essas variáveis apresentem baixo percentual, essas produzem aumento na significância do modelo estatístico.

A validação do modelo de RML é obtida pela garantia dos pressupostos de distribuição normal e homogeneidade dos erros. Os pressupostos de distribuição normal e homogeneidade dos erros são avaliados graficamente pela distribuição de probabilidade normal (Figura 4.28).

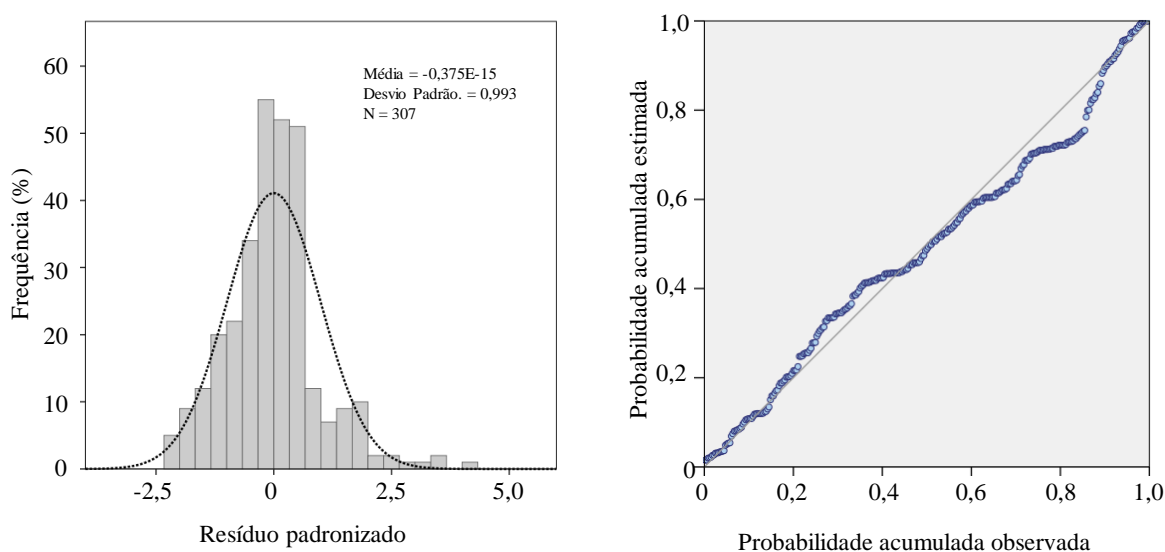


Figura 4. 28 – Histograma e distribuição de probabilidade normal para os resíduos.

Na distribuição de probabilidade normal, o eixo das abscissas representa a probabilidade observada acumulada dos erros e o eixo das ordenadas representa a probabilidade que se observaria se os erros possuísem uma distribuição normal. Conforme Marôco (2007), quando os erros apresentam distribuição normal, os valores apresentam-se próximo da diagonal principal. Desta forma, considera-se o pressuposto de distribuição normal e homogeneidade atendido.

Quando existe correlação entre as variáveis independentes (multicolinearidade), a análise do modelo de regressão é limitada, acarretando em análises confusas e até mesmo desprovida de significado. Entretanto, Myers (1986) afirma que a presença de multicolinearidade não afeta significativamente a qualidade do ajuste do modelo. A multicolinearidade pode ser verificada pela matriz de correlação bivariada entre as variáveis, em que a correlação bivariada entre variáveis independentes deve ser inferior a 0,75. A matriz de correlação entre as variáveis explicativas incluídas no modelo de regressão é apresentada na Figura 4.29.

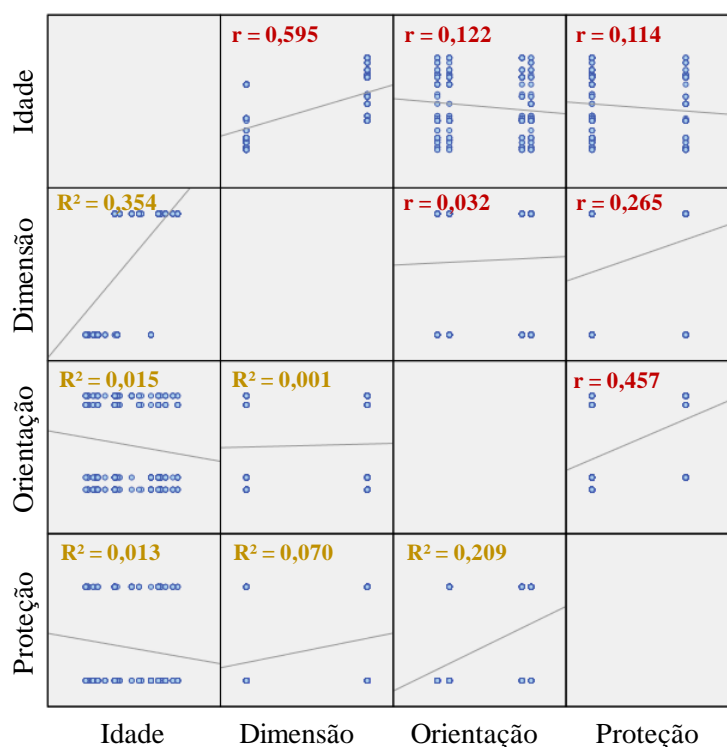


Figura 4. 29 – Matriz de correlação entre as variáveis explicativas.

A correlação entre variáveis independentes, representada pelo  $r$ , é inferior a 0,75. Esse fato indica que não há presença de colinearidade entre as variáveis explicativas consideradas no modelo de regressão. Entretanto, essa análise verifica apenas duas-a-duas, não verificando conjuntamente diversas variáveis (Marquardt, 1970).

Outra forma de diagnóstico de multicolinearidade é a análise do Fator de Inflação da Variância (VIF - *Variance Inflation Factor*). Alguns pesquisadores afirmam que VIF superior a 5 indica presença de colinearidade (Montgomery e Peck, 1982). Os valores de VIF obtidos pelo modelo de regressão (Tabela 4.10) são inferiores a 5, indicando que não há correlação entre as variáveis independentes.

A  $VUE_{RML}$  das diversas combinações possíveis entre as variáveis explicativas do modelo de RML está apresentada na Figura 4.30. Os valores de  $VUE_{RML}$  são obtidos a partir da consideração do estado limite de degradação ( $FGD = 0,05$ ) e da quantificação das variáveis usadas na regressão (Tabela 3.8).

Os resultados de  $VUE_{RML}$  são coerentes com a literatura e convergem com os resultados do MG e do MTP. As fachadas consideradas protegidas apresentam  $VUE_{RML}$  superior as fachadas desprotegidas, independente da orientação e da dimensão da cerâmica. As fachadas orientadas ao Leste e ao Oeste apresentam  $VUE_{RML}$  superiores as fachadas orientadas ao Norte e ao Sul. As fachadas revestidas por cerâmicas pequenas apresentam  $VUE_{RML}$  superiores as fachadas revestidas por cerâmicas grandes. A  $VUE_{RML}$  mínima obtida equivale a 16 anos para fachadas desprotegidas, orientadas ao Norte e com cerâmicas grandes. Essa condição tende a apresentar níveis de degradação críticos ocasionando o fim da vida útil mais rapidamente quando comparada às outras condições. Contraditoriamente, a  $VUE_{RML}$  máxima obtida equivale a 29 anos para fachadas protegidas, orientadas ao Leste e com cerâmicas pequenas, indicando que essas condições tendem a ser mais duráveis.

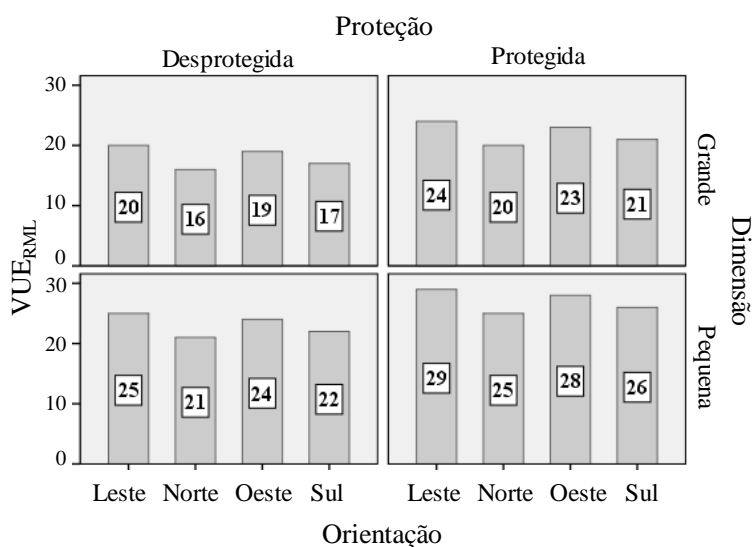


Figura 4. 30 – Vida útil estimada por meio do Método de Regressão Múltipla Linear.

A distribuição da  $VUE_{RML}$  para a idade de cada caso é ilustrada na Figura 4.31. O eixo da abscissa apresenta a idade real dos casos, enquanto o eixo das ordenadas representa a  $VUE_{RML}$  de cada caso.

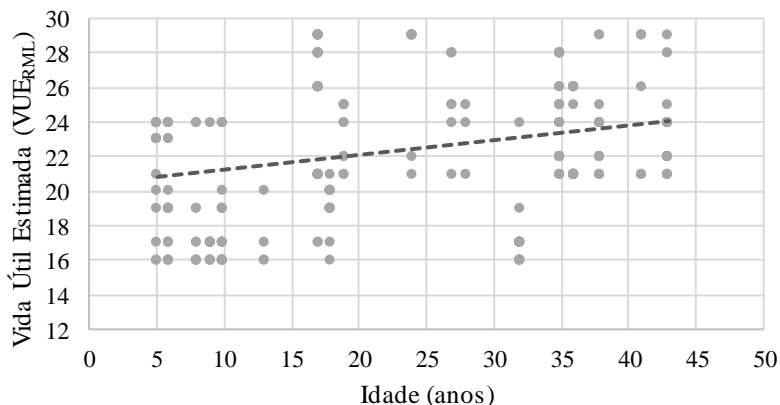


Figura 4. 31 – Distribuição da VUE para idade de cada caso pela Regressão Múltipla Linear.

Os valores de  $VUE_{RML}$  se situam próximo dos limites propostos pela norma brasileira NBR 15575-1 (2013) e convergem com o estudo de alguns pesquisadores (Bauer *et al.*, 2014). Embora a linha de tendência apresente leve inclinação, considera-se confiáveis os resultados de  $VUE_{RML}$ . Conforme Galbusera (2013) a confiabilidade da  $VUE_{RML}$  pode ser verificada pela horizontalidade da linha de tendência. A  $VUE_{RML}$  varia entre 16 e 29 anos, conforme as características da fachada. A média de  $VUE_{RML}$  para todos os casos do banco de dados pela RML equivale a 22 anos, como pode ser percebido pela linha de tendência apresentada na Figura 4.31.

#### 4.4.4 Regressão Múltipla Não Linear

A RMNL é baseada nas informações das variáveis explicativas e na análise de eficácia do modelo obtido da RML. A estimativa dos parâmetros e dos modelos não lineares da RMNL é determinada a partir de um processo iterativo, onde são realizadas diversas análises das possíveis combinações das variáveis que conduzem ao melhor modelo. O modelo mais adequado é definido quando há equilíbrio entre a complexidade do modelo e a significância estatística. Na Tabela 4.11, são apresentados os resultados dos modelos mais adequado obtido pela RMNL para cada uma das equações previamente estabelecidas.



Tabela 4. 11 – Modelos obtidos pela Regressão Múltipla Não Linear.

Modelo	Iterações	R <sup>2</sup>	Parâmetros de estimação
Polinomial $B_2 \cdot Idade^2 + B_4 \cdot Dimensão^2 + B_9 \cdot Orientação^2 + B_{10} \cdot Proteção^2 + A$	2	0,613	A = 0,1455178 B <sub>2</sub> = 8,0E-05 B <sub>4</sub> = -0,093461 B <sub>9</sub> = -0,021826 B <sub>10</sub> = -0,025393
Potencial $A \cdot (Idade^{B_2} + Dimensão^{B_4} + Orientação^{B_9} + Proteção^{B_{10}})$	55	0,602	A = 2,09E-05 B <sub>2</sub> = 2,331313 B <sub>4</sub> = -159,125 B <sub>9</sub> = -43,7549 B <sub>10</sub> = -60,3297
Exponencial $A^{(B_2 \cdot Idade + B_4 \cdot Dimensão + B_9 \cdot Orientação + B_{10} \cdot Proteção)}$	49	0,636	A = 18,98954 B <sub>2</sub> = 0,069336 B <sub>4</sub> = -5,59564 B <sub>9</sub> = -0,57437 B <sub>10</sub> = -1,52619
Weibull $A - B_0 \cdot (-B_1 \cdot (Idade^{B_2} + Dimensão^{B_4} + Orientação^{B_9} + Proteção^{B_{10}}))$	351	0,619	A = 454,482 B <sub>0</sub> = 454,5125 B <sub>1</sub> = 7,77E-07 B <sub>2</sub> = 1,61941 B <sub>4</sub> = -126,788 B <sub>9</sub> = -26,2838 B <sub>10</sub> = -34,3523
Gompertz $A \cdot -B_0^{(-B_2 \cdot Idade - B_4 \cdot Dimensão - B_9 \cdot Orientação - B_{10} \cdot Proteção)}$	44	0,654	A = 0,349868 B <sub>0</sub> = 0,060086 B <sub>2</sub> = 0,046357 B <sub>4</sub> = -2,96714 B <sub>9</sub> = -0,5562 B <sub>10</sub> = -1,10315

Os modelos Gompertz e Exponencial apresentaram maiores valores de R<sup>2</sup> (0,654 e 0,636). Entretanto, esses necessitam de elevado número de iterações para obtenção do modelo (44 e 49) evidenciando a complexidade do modelo. A escolha do modelo requer que o modelo descreva convenientemente o fenômeno, garanta que não haja sobreajuste aos dados e apresente menor complexidade possível (Montgomery, 1984). Dentre os diversos modelos não-lineares testados, o modelo que apresentou melhor capacidade de resposta é o modelo polinomial devido à pequena variação da significância estatística e com menor número de iterações.

As diversas combinações possíveis das variáveis presentes no modelo polinomial proporcionam condições distintas das fachadas e conseqüentemente em VUE<sub>RMNL</sub> diferentes. A Figura 4.32 ilustra a VUE<sub>RMNL</sub> obtidas a partir da consideração do estado limite de degradação (FGD = 0,05) e da quantificação das variáveis usadas na regressão (Tabela 3.8).

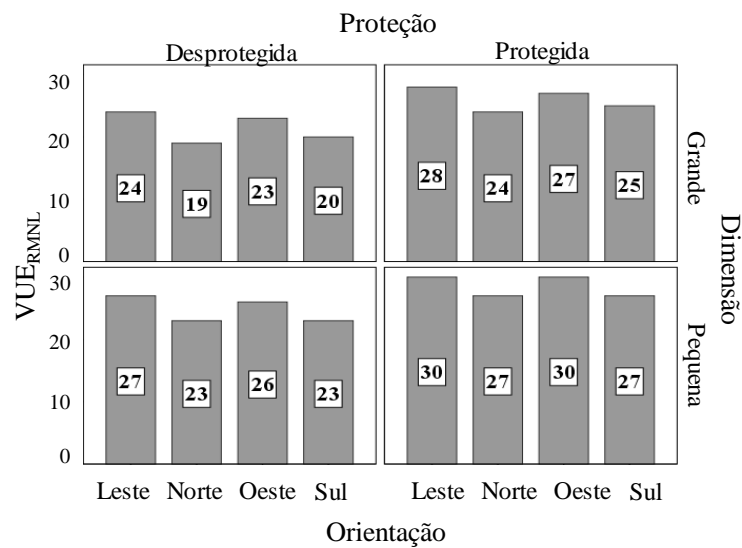


Figura 4. 32 – Vida útil estimada obtida pelo modelo polinomial da Regressão Múltipla Não Linear. Os resultados de  $VUE_{RMNL}$  são coerentes com a literatura, pois variam entre 19 e 30 anos (Souza *et al.*, 2018). As fachadas orientadas ao Norte e ao Sul apresentam  $VUE_{RMNL}$  inferiores as fachadas orientadas ao Leste e ao Oeste. Uma vez que a  $VUE_{RMNL}$  máxima obtida equivale a 30 anos, fachadas protegidas, revestidas por cerâmicas pequenas e orientadas para o Leste ou Oeste tendem a ser mais duráveis. Fachadas desprotegidas, revestidas por cerâmicas grandes e orientadas para o Norte, tendem a apresentar níveis de degradação críticos.

A distribuição da  $VUE_{RMNL}$  para a idade de cada caso é ilustrada na Figura 4.33. O eixo da abscissa apresenta a idade real dos casos, enquanto o eixo das ordenadas representa a  $VUE_{RMNL}$  de cada caso.

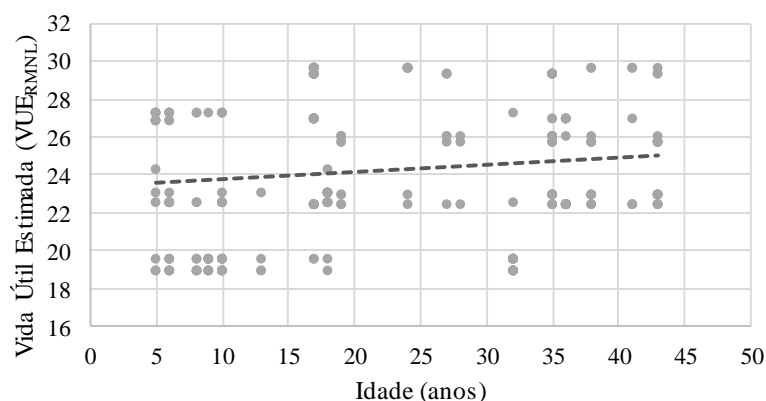


Figura 4. 33 – Distribuição da VUE para idade de cada caso pela Regressão Múltipla Não Linear.

Os valores de  $VUE_{RMNL}$  variam entre 19 e 30 anos conforme as características da fachada. Esse intervalo condiz com o intervalo entre 20 e 40 anos proposto pela norma brasileira NBR 15575-1 (2013). A horizontalidade da linha de tendência indica que os resultados são

confiáveis (Galbusera, 2013). A média de  $VUE_{RMNL}$  para todos os casos do banco de dados equivale a 25 anos, como pode ser percebido pela linha de tendência apresentada na Figura 4.33.

#### 4.4.5 Método Fatorial

O método fatorial, proposto pela norma ISO 15686-7 (2012), consiste na ponderação da VUR por fatores que afetam positivamente ou negativamente no desempenho do sistema analisado. A determinação dos  $N_{fator}$  é realizada em função da diferença da  $VUE_{MTP}$  de cada característica e a  $VUE_{IDADE}$ , equivalente a VUE considerando apenas a variável idade. Os valores de  $N_{fator}$  variam entre 0,8 a 1,0, conforme ilustrado na Figura 4.34. Os valores iniciais dos  $N_{fator}$  para obtenção da VUR estão descritos na Tabela 4.12.

Muito agressiva	<b>0,8</b>	$VUE_{MTP} - VUE_{IDADE} < -3$
Agressiva	<b>0,9</b>	$-3 < VUE_{MTP} - VUE_{IDADE} < -1$
Lentamente agressiva	<b>1,0</b>	$-1 < VUE_{MTP} - VUE_{IDADE} < 1$
Pouco favorável	<b>1,1</b>	$1 < VUE_{MTP} - VUE_{IDADE} < 3$
Favorável	<b>1,2</b>	$VUE_{MTP} - VUE_{IDADE} > 3$

Figura 4. 34 – Critérios para a determinação inicial do  $N_{fator}$  para obtenção da vida útil de referência.

Tabela 4. 12 – Quantificação inicial dos valores de  $N_{fator}$  para obtenção da VUR.

Característica	Categoria	Quantificação inicial do $N_{fator}$	Condição
(A1) Claridade da cerâmica	Clara	1,1*	Pouco favorável
	Não Clara	1,0	Lentamente agressiva
(A2) Dimensão da cerâmica	Pequena	1,0	Lentamente agressiva
	Grande	0,9	Agressiva
(B1) Elemento construtivo	Fachada	1,0	Lentamente agressiva
	Empena	1,1	Pouco favorável
	Caixa de Escada	1,0	Lentamente agressiva
(B2) Existência de Juntas	Presença	1,1*	Pouco favorável
	Ausência	1,0	Lentamente agressiva
(B3) Altura do edifício	Baixo	1,0	Lentamente agressiva
	Alto	0,8	Muito agressiva
(B4) Área da fachada	Reduzida	0,9	Agressiva
	Extensa	1,0	Lentamente agressiva
(E1) Grau de proteção	Protegida	1,2	Favorável
	Desprotegida	0,8	Muito agressiva
(E2) Orientação	Norte	0,8	Muito agressiva
	Sul	0,8	Muito agressiva
	Leste	1,2	Favorável
	Oeste	1,2	Favorável

\*Valores adequados ao sentido físico do fenômeno.

Várias propostas para a obtenção da VUR foram desenvolvidas (Rudbeck, 1999; Teplý, 1999; Silva *et al.*, 2016). Entretanto, a VUR deve ser coerente com a realidade do fenômeno em que

se aplica a metodologia (Galbusera *et al.*, 2014). Nessa pesquisa, a VUR é definida pela média de VUR obtida em três análises distintas, conforme apresentado na Tabela 4.13. A Figura 4.35 ilustra os valores de VUR para cada análise e VUR adaptada para a aplicação do método fatorial, que equivale a 33 anos.

Tabela 4. 13 – Análises para a obtenção da VUR.

Análise	Referência	Descrição
VUR <sub>1</sub>	Média VUE <sub>MTP</sub>	Valor médio dos valores de VUE obtida pelo MTP.
VUR <sub>2</sub>	Média VUE <sub>Condições neutras</sub>	As amostras consideradas em condições neutras são amostras que apresentam até dois valores de N <sub>fator</sub> diferente de 1,0.
VUR <sub>3</sub>	Média VUE <sub>Estatística</sub>	As amostras consideradas estatísticas são as que apresentam variação menor que 5 % do desvio da relação $\frac{VUR_1}{VUR_2}$ em relação à média da relação $\frac{VUR_1}{VUR_2}$ .

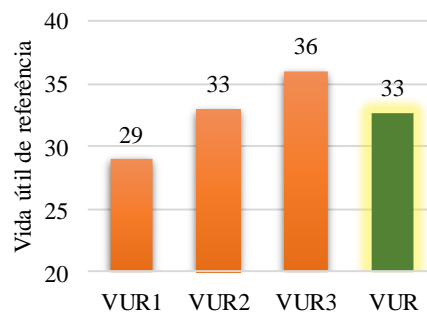


Figura 4. 35 – Vida útil de Referência obtida por análises distintas.

A otimização dos valores de N<sub>fator</sub> é realizada para que os valores previstos pelo método fatorial sejam condizentes com os valores observados pelo MG. Para isso, os critérios descritos na Tabela 3.10 devem ser atendidos. Ressalta-se ainda que, a otimização deve considerar o sentido físico dos fatores de durabilidade e a influência no processo de deterioração do revestimento, garantindo que os resultados sejam o mais realista possível. Os valores dos N<sub>fator</sub> para obtenção da VUE<sub>FTD</sub> estão descritos na Tabela 4.14.

Tabela 4. 14 – Quantificação dos valores de  $N_{\text{fator}}$  para obtenção da vida útil de estimada pelo metodo fatorial determinístico.

Fatores condicionantes da vida útil		$N_{\text{fator}}$
<b>Fator A</b> Qualidade de Materiais	A1 Clara	1,02
	Não Clara	0,90
	A2 Pequena	0,95
	Grande	0,90
<b>Fator B</b> Nível de projeto	B1 Fachada	1,12
	Empena	1,10
	Caixa de Escada	1,10
	B2 Presença	1,01
	Ausência	1,00
	B3 Baixo	1,00
	Alto	0,60
	B4 Reduzida	0,90
Extensa	1,00	
<b>Fator E</b> Condições de exposição	E1 Protegida	0,98
	Desprotegida	0,82
	E2 Norte	0,85
	Sul	0,80
	Leste	1,10
Oeste	0,72	

A distribuição da vida útil estimada para idade de cada caso está apresentada na Figura 4.36. O eixo da abscissa apresenta tempo, enquanto o eixo das ordenadas representa a vida útil estimada de cada caso.

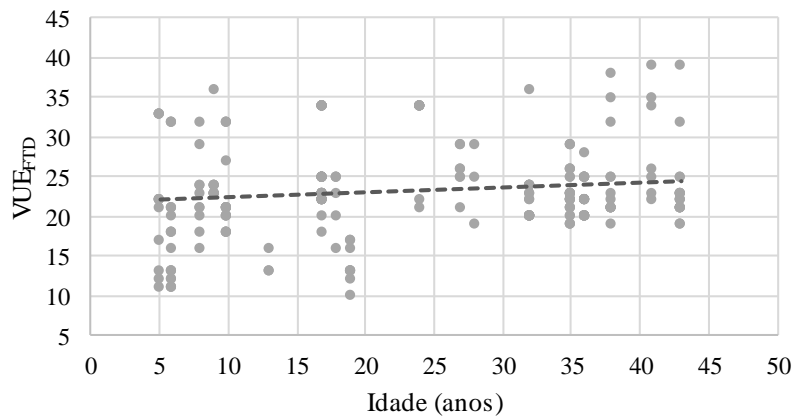


Figura 4. 36 – Distribuição da VUE para idade de cada caso pelo Método Fatorial Determinístico.

A horizontalidade da linha de tendência indica que esses resultados são satisfatórios (Galbusera, 2013). A vida útil média estimada pelo método fatorial determinístico equivale a 23 anos, como pode ser observado pela linha de tendência apresentada na Figura 4.36. Todos os valores de  $VUE_{\text{FTD}}$  estão contidos no intervalo de 10 a 40 anos.

O método fatorial permite diversas combinações das variáveis devido a formulação matemática contemplar todas as variáveis. Com o propósito de comparação entre as VUE pelos diferentes métodos de regressão, na Figura 4.37 é apresentada a  $VUE_{FTD}$  considerando apenas as características apontadas como relevantes no RML: dimensão, grau de proteção e orientação da fachada.

O intervalo entre 18 e 34 anos convergem com os valores de VUE encontrada na literatura. (Souza *et al.*, 2017). Mais uma vez a influência da orientação é perceptível. Entretanto diferentemente dos resultados da RML e RMNL, as fachadas orientadas ao Oeste apresentam menores valores de  $VUE_{FTD}$  que fachadas orientadas ao Norte e Sul. Considerando apenas estas variáveis, a pior condição de fachada refere-se a fachadas desprotegidas, revestidas por cerâmicas grandes e orientada ao Oeste. A melhor condição de fachada refere-se a fachadas protegidas, revestidas por cerâmicas pequenas e fachada orientada ao Leste, pois nestas condições apresentam o maior valor de  $VUE_{FTD}$ .

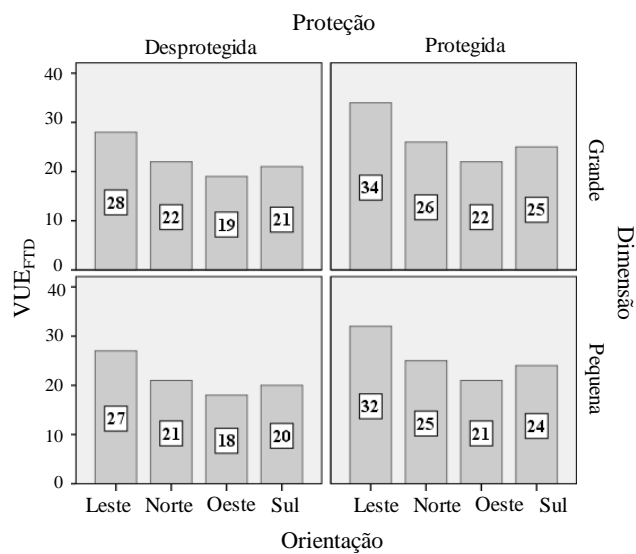


Figura 4. 37 – Vida útil estimada obtida pelo método fatorial determinístico para a combinação das variáveis obtidas na RML.

## 5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A complexidade da determinação da vida útil ocorre devido ao entendimento e a mensuração de cada dos fatores condicionantes de degradação. Portanto, a determinação dos critérios para estimar a vida útil deve ser cautelosa e sensata. Muitas vezes o critério que define o fim de vida útil é subjetivo, devido a este ser influenciado pela época, lugar, avaliador e contexto socioeconômico (Shohet e Paciuk, 2004; Ximenes *et al.*, 2014). Entretanto, o fim da vida útil é influenciado pelo não cumprimento das funções que lhe são impostas, pelo não atendimento ao conforto visual e segurança dos usuários e inadequada periodicidade de manutenção. Para tanto, uma vez que o desempenho pode ser avaliado pelo nível de degradação, ainda é necessário conhecer o limite máximo aceitável de degradação.

Conforme discutido na seção 4.2, evidencia-se o limite máximo de degradação aceitável o valor de FGD igual a 0,05, classificado como Condição C. A distribuição quantitativa das amostras classificadas em cada nível de condição da degradação está ilustrada na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1 – Distribuição quantitativa de amostras para cada nível de condição.

Condição de degradação	FGD	DC	FI	FR	EF
A	55 (18%) (Critério < 0,003)			109 (16%) (Critério < 0,10)	28 (4%) (Critério < 0,10)
B	147 (48%) (Critério < 0,05)	72 (11%) (Critério < 0,05)	194 (29%) (Critério < 0,20)	26 (4%) (Critério < 0,30)	6 (0,9%) (Critério < 0,30)
C	82 (27%) (Critério < 0,17)	133 (20%) (Critério < 0,30)	20 (3%) (Critério < 0,50)	7 (1%) (Critério > 0,30)	2 (0,3%) (Critério > 0,30)
D	23 (7%) (Critério > 0,17)	68 (10%) (Critério > 0,30)	6 (1%) maior que (Critério > 0,50)		

Em relação a área degradada de cada anomalia, a maior quantidade de amostras que apresenta DC (133) é classificada como nível de condição de anomalias C, representado por 20%. Entretanto, a degradação avaliada de forma geral com a ponderação de todas as anomalias, a maioria das fachadas analisadas apresentam nível de condição de degradação B (147 amostras). Isto significa que na maioria das amostras há uma degradação leve possivelmente com anomalias. A quantidade de casos para a classe de condição C pode expressar a importância e gravidade das anomalias, em que o DC apresenta maior quantidade de casos comparados com as demais anomalias, FI apenas 20 amostras, FR sete amostras e EF duas

amostras. Desta forma, cabe enfatizar que o DC é a principal anomalia em sistema de revestimento cerâmico, como pode ser observado na Tabela 5.1 e como já mencionado por outros pesquisadores (Bauer *et al.*, 2014; Galbusera *et al.*, 2015). Diferentemente de revestimento em argamassa, as fissuras e as manchas são as principais anomalias observadas em revestimentos com acabamento em argamassa e pintura, conforme investigado por alguns pesquisadores (Gaspar, 2005; Flores-Colen *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2018).

A idade é um dos fatores que influenciam no processo de degradação, entretanto esse não é o único fator. A análise dos outros fatores que influenciam no comportamento de degradação considerados nesse estudo abrangem: características de projeto, representada pela claridade e dimensão das cerâmicas; características de materiais, representada pelo elemento construtivo, existência de juntas, altura do edifício e área da fachada, e; características de exposição ao meio ambiente, representada pelo grau de proteção e orientação da fachada. A quantidade de amostras para cada nível de condição de cada variável está apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5. 2 – Quantidade de amostras para cada variável e cada nível de condição.

Condição de degradação		A	B	C	D
FGD		0,000 - 0,002	0,003 - 0,049	0,050 - 0,169	> 0,170
Claridade	Clara	5 (2 %)	29 (9 %)	<b>56</b> (18 %)	14 (5 %)
	Não Clara	50 (16 %)	<b>118</b> (38 %)	26 (8 %)	9 (3 %)
Dimensão	Pequena	17 (6 %)	<b>88</b> (29 %)	64 (21 %)	19 (6 %)
	Grande	38 (12 %)	<b>59</b> (19 %)	18 (6 %)	4 (1 %)
Elemento	Fachada	30 (10 %)	<b>112</b> (36 %)	42 (14 %)	11 (4 %)
	Empena	<b>23</b> (7 %)	22 (7 %)	8 (3 %)	2 (1 %)
	Caixa de Escada	2 (1 %)	13 (4 %)	<b>32</b> (10 %)	10 (3 %)
Juntas	Presença	14 (5 %)	<b>29</b> (9 %)	1 (0 %)	0 (0 %)
	Ausência	41 (13 %)	<b>118</b> (38 %)	81 (26 %)	23 (7 %)
Altura	Baixo	51 (17 %)	<b>125</b> (41 %)	82 (27 %)	23 (7 %)
	Alto	4 (1 %)	<b>22</b> (7 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
Área	Reduzida	9 (3 %)	18 (6 %)	<b>33</b> (11 %)	11 (4 %)
	Extensa	46 (15 %)	<b>129</b> (42 %)	49 (16 %)	12 (4 %)
Proteção	Protegida	29 (9 %)	<b>60</b> (20 %)	18 (6 %)	1 (0 %)
	Desprotegida	26 (8 %)	<b>87</b> (28 %)	64 (21 %)	22 (7 %)
Orientação	Norte	9 (3 %)	<b>35</b> (11 %)	29 (9 %)	12 (4 %)
	Sul	9 (3 %)	<b>41</b> (13 %)	26 (8 %)	4 (1 %)
	Leste	17 (6 %)	<b>41</b> (13 %)	12 (4 %)	0 (0 %)
	Oeste	20 (7 %)	<b>30</b> (10 %)	15 (5 %)	7 (2 %)



A condição que apresentou maior quantidades de amostras estão destacados, em vermelho, na Tabela 5.2. Para a maioria das variáveis o destaque quanto a maior quantidade de casos acontece na condição B. Este fato já era esperado devido a maior quantidade de casos estar inserida na condição B quando avaliado de forma geral, sem considerar as características, conforme pode ser observado na Tabela 5.1. Destaca-se as características equivalentes a fachadas claras, caixas de escada e fachadas com áreas reduzidas que não seguiram essa tendência apresentando destaques na condição C, ou seja, condições que superam a degradação máxima aceitável.

Considerando as zonas constituintes da fachada, a gravidade da presença de anomalias pontuais ou generalizadas pode ser averiguada pela análise comparativa da gravidade de uma amostra com grande intensidade e baixa ocorrência de anomalias frente a uma amostra com baixa intensidade e elevada ocorrência de anomalias. A análise conjunta da ocorrência e da intensidade de degradação é dividida em quadrantes. O primeiro quadrante refere-se a amostras com baixa intensidade e baixa ocorrência de degradação. O segundo quadrante revela as amostras com elevada ocorrência e baixa intensidade. O terceiro reflete as amostras apresentam elevadas intensidades e baixas ocorrências. O quarto quadrante indica as amostras com elevadas ocorrências e elevadas intensidades. A análise conjunta da ocorrência e da intensidade de degradação nas zonas é apresentada na Figura 5.1.

Para todas zonas, a presença da maioria das amostras ocorre no Quadrante 1, mais que 80%. Esse fato indica que a baixa intensidade da degradação em baixas ocorrências. No Quadrante 2, independente da zona, existem poucas amostras, menos que 5%, indicando que não é comum elevada ocorrência em baixa intensidade. A quantidade de amostras contidas no Quadrante 3, para todas as zonas estão entre 5% e 10% do total de amostras, exceto para a zona de sacada, que apresenta apenas 2% nesse quadrante.

O Quadrante 4 é considerado crítico devido a este representar situações com elevada ocorrência e elevada intensidade. As zonas de PC, TP e TO apresentam quantidade de amostras, equivalente a 11%, 7% e 6%, respectivamente, do total de amostras. As demais zonas apresentam uma quantidade de amostras inferior a 5%. Esta análise permite identificar as zonas de PC, TP e TO como zonas que frequentemente encontram-se em condições críticas, convergindo com os resultados de Silva (2014), Souza e Bauer (2016), Pacheco e Vieira (2017) e Souza e Bauer (2018).

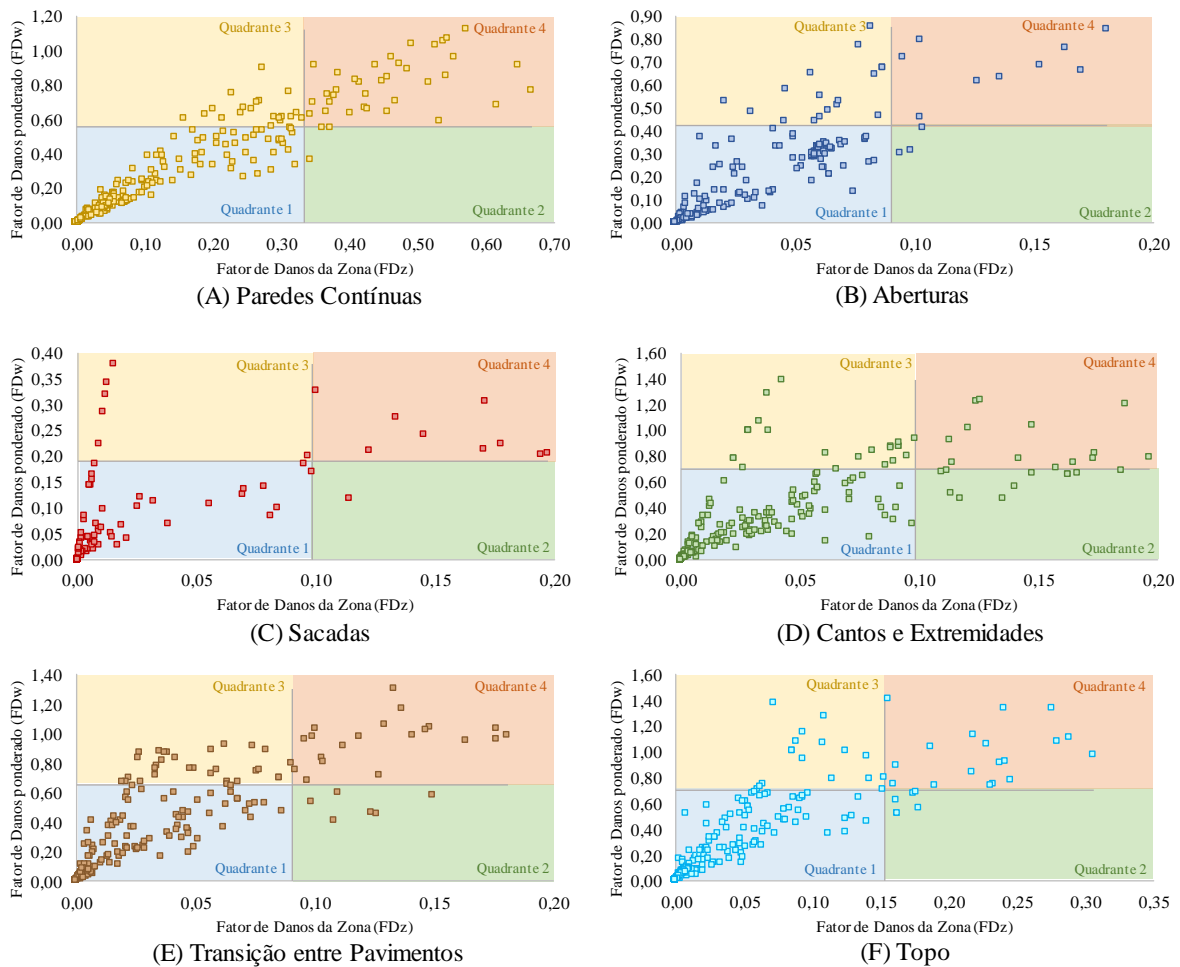


Figura 5. 1 – Relação entre a frequência (FD das zonas) e a intensidade de degradação (FDw).

A gravidade da presença de anomalias pode ser averiguada pela análise comparativa do IGR. A Figura 5.2 ilustra os resultados médios obtidos das zonas para cada quadrante de frequência de FD das zonas.

Os maiores valores de IGR ocorrem no primeiro quadrante para todas as zonas, o que indica que mesmo há uma frequência elevada de anomalias com baixa intensidade e baixa ocorrência. O segundo quadrante apresentou menores valores de IGR revelando que há uma baixa frequência de anomalias com baixa intensidade e elevada ocorrência. O terceiro e o quarto quadrante apresentam comportamento semelhantes, exceto para as zonas de PC e CE.

Em termo de gravidade, a zona PC apresenta elevados valores de IGR no quadrante 1, em comparação com as zonas de mesmo quadrante, a PC é a mais grave no quadrante 4. As SC e AB são as zonas que apresentam menor gravidade para todos quadrantes. No quadrante 3, a TP se mostra como a zona mais crítica, pois nestas zonas há uma baixa ocorrência de anomalias com elevada intensidade. Esse resultado concorda com os resultados de Souza e

Bauer (2016). O TO se destaca como a zona mais crítica no quadrante 1, mas essa se apresenta como uma das zonas mais críticas em todos os quadrantes.

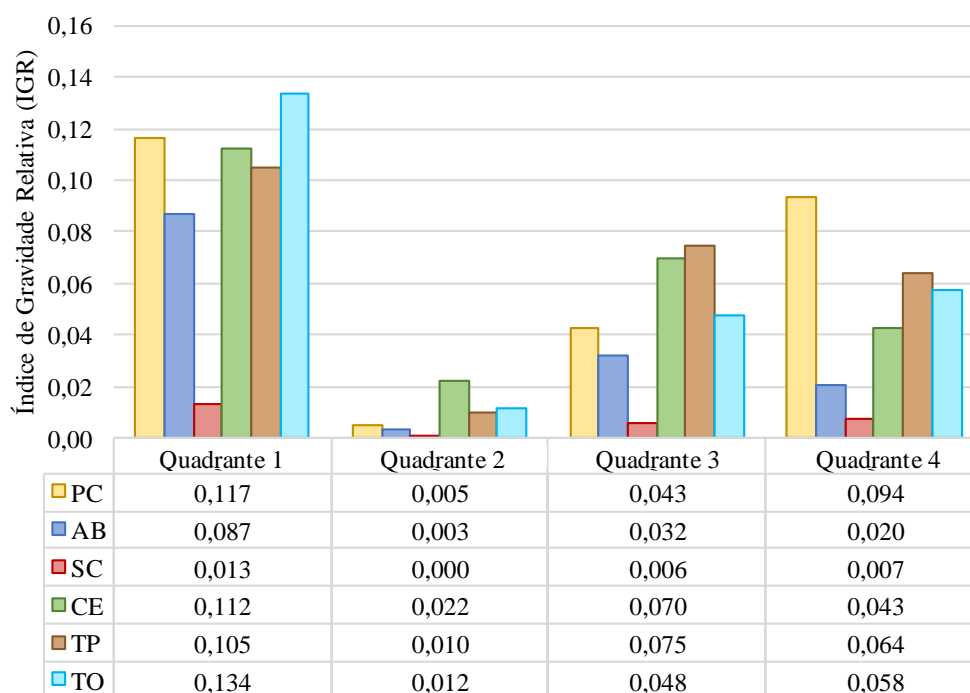


Figura 5. 2 – Índice de gravidade relativa para cada zona.

A partir da caracterização dos agentes climáticos de degradação, torna-se possível obter funções dose-resposta para determinados sistemas (Zanoni, 2015; Nascimento, 2016). Estas curvas de dose-resposta trazem conhecimento quanto ao comportamento dos sistemas frente às condições climáticas, convergindo em efeitos importantes no estudo da durabilidade. Considerando o efeito da ação térmica incidente sobre a fachada, esta pode ser obtida pela simulação higrotérmica e representada pelo Iit. Na Figura 5.3 é ilustrado a relação do FGD com o Iit e apontado os valores limites das condições de degradação.

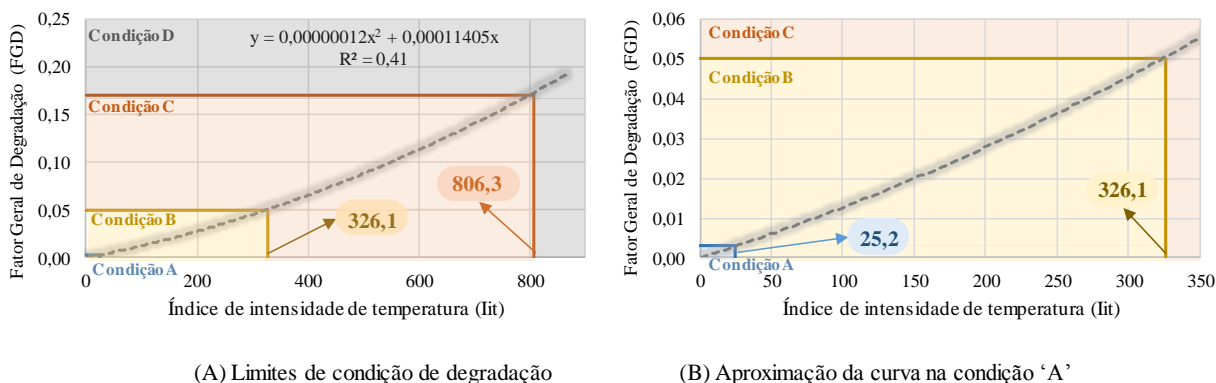


Figura 5. 3 – Relação entre a degradação e a ação térmica sobre a fachada.

O limite de Iit para a condição A ( $FGD = 0,003$ ) equivale a 25,2. A condição B é limitada pelo valor de Iit igual a 326,1 e a condição C igual a 806,3. Definido os limites das condições de degradação e considerando a possibilidade de correlacionar a degradação com a ação térmica, conforme proposto por Nascimento (2016), o potencial desta ferramenta torna-se perceptível, uma vez que permite prever a vida útil de sistemas de revestimento cerâmico. A ação térmica gera deformações no conjunto do sistema de vedação, na alvenaria, no emboço e na camada de revestimento, sendo esta última a mais externa e com maior sensibilidade a esta ação. A aplicabilidade desta ferramenta é justificada pelo fato de que a degradação em sistema de revestimento cerâmico é caracterizada principalmente pelas anomalias de DC que ocorrem basicamente por esforços oriundo da ação térmica.

Embora os fatores de degradação representados pelas condições de exposição e aspectos construtivos das fachadas afetem individualmente a vida útil das fachadas, a degradação é resultante da ação conjunta destes fatores e por isso a determinação da vida útil dos sistemas que constituem a edificação é um grande desafio. Entretanto, a partir da metodologia proposta nesta pesquisa, foi possível mensurar e avaliar a influência dos fatores condicionantes de degradação sobre a vida útil de fachadas. A Tabela 5.3 apresenta os valores de vida útil estimada para as diferentes variáveis consideradas pelo MG e MTP. Estes métodos permitem estimar a vida útil para cada característica.

A proposta de vários modelos de previsão de vida útil permite a comparação entre eles. O MG apresenta VUE entre o intervalo de 20 a 32 anos e média de 25 anos, sendo o menor valor para as fachadas revestidas por cerâmicas claras e maiores valores para fachadas protegidas e orientadas para o Leste. Desta forma, as variáveis de maior influência para o MG são as variáveis referente a claridade, orientação e proteção das fachadas. O MTP possui intervalo de  $VUE_{MTP}$  entre 25 e 35 anos, com média de 29 anos. Embora o intervalo de  $VUE_{MTP}$  seja menor que o do MG, há aumento na média de VUE. O menor valor de  $VUE_{MTP}$  se refere a fachadas orientadas para o Norte e os maiores valores de  $VUE_{MTP}$  se refere a fachadas protegidas. Em ambos métodos, a influência do grau de proteção e a orientação das fachadas são evidentes. Para o MG, a situação ideal é que o ajustes de todos os modelos apresentassem ajustes com coeficientes de determinação elevados, o que nem sempre acontece devido ao processo de degradação ser condicionado pelo conjunto de fatores. O MTP é um artifício para delinear uma curva de degradação para cada caso, conforme apresentado por Gaspar e Brito (2005).

Tabela 5. 3 – VUE para os métodos de análises singulares das variáveis.

Características		VUE <sub>MG</sub>	VUE <sub>MTP</sub>
Clareza	Clara	20	27
	Não Clara	26	30
Dimensão	Pequena	27	30
	Grande	21	28
Elemento	Fachada	24	29
	Empena	27	31
	Caixa de Escada	27	29
Presença de Juntas	Presença	-	27
	Ausência	26	29
Altura	Baixo	25	29
	Alto	-	26
Extensão	Reduzida	22	28
	Extensa	26	29
Proteção	Protegida	32	35
	Desprotegida	22	26
Orientação	Norte	21	25
	Sul	24	26
	Leste	32	34
	Oeste	27	33
Média		25	29
Desvio padrão		4	3

Os modelos de regressão e fatorial propostos nesta pesquisa consideram relevantes as variáveis de grau de proteção, dimensão da cerâmica e orientação da fachada. A VUE para estes modelos está apresentada na Tabela 5.4.

As médias de VUE para estes modelos equivalem 23 anos para RML, 26 anos para RMNL e 25 anos para a MF. Esses valores são condizentes com os valores encontrados pelo MG, MTP e alguns resultados apresentados pela literatura (BCIS, 2001; Shoet e Paciuk, 2004; Silva *et al.*, 2016). A VUE para fachadas protegidas revestidas com cerâmicas pequenas orientadas para o Leste apresentaram grandes diferenças de valores para os diferentes métodos. Tanto as fachadas protegidas como as desprotegidas revestidas por cerâmicas pequenas e orientadas para Norte ou Sul apresentam valores semelhante. Essas diferenças evidenciam a relevância destas características. O intervalo de VUE para o RML, RMNL e MF equivalem a 13, 11 e 16 anos, respectivamente, em que o menor intervalo ocorre para o modelo da RMNL. Cada modelo de previsão de estimativa aponta algum erro para as estimativas. O erro relativo para os modelos equivale a 1,67E-3 para o MG, 7,57E-35 para o MTP, 1,50E-03 para o RML e

1,47E-03 para RMNL. Os valores de erros encontrados na estimativa para os modelos são praticamente nulos, indicando que estes são considerados precisos.

Tabela 5. 4 –VUE para os métodos de análises conjuntas das variáveis.

Proteção	Dimensão	Orientação	VUE <sub>RML</sub>	VUE <sub>RMNL</sub>	VUE <sub>FTD</sub>
Protegida	Pequena	Norte	25	27	26
		Sul	26	27	25
		Leste	29	30	34
		Oeste	28	30	22
	Grande	Norte	20	24	25
		Sul	21	25	24
		Leste	24	28	32
		Oeste	23	27	21
Desprotegida	Pequena	Norte	21	23	22
		Sul	22	23	21
		Leste	25	27	28
		Oeste	24	26	19
	Grande	Norte	16	19	21
		Sul	17	20	20
		Leste	20	24	27
		Oeste	19	23	18
Média			23	26	24
Desvio padrão			4	4	5

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

O estudo comportamental permitiu identificar as diferenciações do processo de degradação em função dos aspectos construtivos e das condições de exposição dos sistemas de revestimento de fachadas. A observação dessas variáveis buscou identificar quais são condicionantes para o processo de degradação. Em termos de estimativa de vida útil, foi realizado uma análise singular e estatística que permitiu obter faixas de valores que caracterizam a vida útil de sistemas de revestimento cerâmico. Estas análises foram obtidas pelo aprimoramento da ferramenta de quantificação de degradação.

Os modelos de vida útil propostos servem como ferramentas para verificar a qualidade dos edifícios ou de seus sistemas, além de contribuir para estimativa de vida útil e indicar os períodos de manutenção evitando custos elevados em reparações generalizadas e urgentes. Embora a temática de durabilidade ser bastante abordada, os modelos propostos são inovadores e representam adequadamente os fenômenos estudados.

O método de quantificação de degradação é aprimorado por meio da adequação dos coeficientes de ponderação do indicador de degradação Fator Geral de Degradação conjuntamente com o aumento de mais de 30.000 m<sup>2</sup> de área inspecionada do banco de dados. Para realizar o estudo de estimativa de vida útil, os dados devem apresentar uma distribuição representativa ao longo das idades e uma elevada quantidade de amostras, superior a 250, pois a elevada quantidade de amostras foi decisivo na possibilidade de investigar os diversos fatores condicionantes de degradação.

Outra contribuição desta pesquisa é o referencial do nível de degradação de fachada. Mesmo que haja mudança do comportamento de degradação para diferentes localizações geográficas dos edifícios, a degradação de sistemas de revestimento cerâmico de fachadas é caracterizada principalmente pelo descolamento cerâmico. O conjunto de análise das amostras ponderadas pelas características de degradação considera como variável principal a idade e como variáveis secundárias os aspectos construtivos e as condições de exposição. De todo esse conjunto de análises, o valor característico de degradação considerado como limite de transição entre o aceitável e o não aceitável para o indicador Fator Geral de Degradação é

igual a 0,05. Essa definição embasa toda a formulação para a estimativa de vida útil e converge com valores similares na literatura internacional (BCIS, 2001; Shoet e Paciuk, 2004). Ressalta-se ainda que a definição das condições de degradação pelos intervalos do indicador de degradação permite durante a inspeção averiguar se a fachada inspecionada apresenta condições aceitáveis de degradação.

O conhecimento da influência das variáveis permite melhorar o entendimento do fenômeno de degradação de sistemas de revestimento. A importância das informações fornecidas na presente pesquisa advém do impacto que o processo de planejamento e uso tem sobre o desempenho das construções. Dentre os diversos fatores condicionantes de degradação, destaca-se como os mais relevantes neste processo o grau de proteção e orientação das fachadas. Desta forma, a degradação de fachadas revestidas por cerâmicas fica condicionada a localização geográfica e as condições de contorno do edifício.

A ordem de grandeza da vida útil estimada para todos os modelos é coerente. Embora os modelos pelo método gráfico e método de transposição de pontos sejam mais simples por considerar apenas uma variável por vez, esses apresentam resultados satisfatórios, sendo plausíveis a aplicação. Os modelos determinísticos, representados pelo regressão múltipla linear, regressão múltipla não linear e método fatorial, consideram variáveis que estatisticamente são relevantes. Estas variáveis são condizentes com realidade do fenômeno estudado, tornando esta abordagem focada no fenômeno de degradação. Uma vez que a degradação é resultante do conjunto de fatores e que a regressão múltipla não linear apresentou o menor erro, é sugerida a aplicação do modelo de regressão múltipla não linear para estimativa de vida útil de sistemas de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios localizados na zona bioclimática 4.

Embora os métodos mais simples permitam pelo estudo particular das variáveis obter uma estimativa de vida útil, os métodos determinísticos refinam as variáveis e determinam os principais influenciadores do processo de degradação observado. Nesse sentido, os modelos determinísticos apresentam significância provada que se traduz pelo ajuste adequado em função do coeficiente de determinação e dos erros relativos. A estimativa de vida útil pode seguramente ser obtida pelas variáveis referentes a idade dos edifícios, grau de proteção e orientação da fachada e pela dimensão das cerâmicas.



## 6.2 Propostas para pesquisas futuras

As sugestões para os trabalhos futuros são baseadas em lacunas percebidas ao longo dos estudos da tese e nos avanços necessários para a continuidade das pesquisas desenvolvidas:

- Adequar os modelos propostos para sistemas de revestimento em argamassa e pintura, sistemas de pisos, esquadrias, etc.
- Avançar na abordagem relativa a simulação higrotérmica por meio do aprimoramento da quantificação da ação climática sobre a fachada permitindo a correlação da degradação.
- Aprofundar nos estudos das zonas constituintes da fachada, de forma a compreender como essas influenciam no surgimento de anomalias e na estimativa de vida útil da fachada.
- Explorar a influência de outras variáveis sobre a degradação de sistemas de revestimentos de fachadas.
- Associar os limites de degradação e os modelos de vida útil ao desenvolvimento de planos de manutenção.
- Desenvolver aplicativos que permitam avaliar rapidamente a condição de degradação e a vida útil em inspeções de campo.

## REFERÊNCIAS

- Abbad, G. D. S.; Torres, C. V. (2002) Regressão múltipla stepwise e hierárquica em Psicologia Organizacional: aplicações, problemas e soluções. **Estudos de Psicologia**. v. 7. pp 19-29.
- Aberle, T.; Keller, A.; Zurbruggen, R. (2007) *Efflorescence Mechanisms of formation and ways to prevent*. Congresso Nacional de Argamassas para Construção - APFAC, Lisboa, Portugal. pp. 01-07.
- Abrahão, R. R. R.; Bittencourt, C.; Tsuruta, K. M.; Rade, R. S. L. (2008) **Fadiga de materiais: uma revisão bibliográfica**. Encontro Interno, Uberlândia, Brasil. pp 1-10.
- Alchapar, N. L.; Correa, E. N. (2016) *The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid "OASIS" city*. **Sustainable Cities and Society**. v. 27. pp. 1-14.
- AIJ Architectural Institute of Japan (1993) *The English edition of the principal guide for service life planning of buildings*. Tokyo, Japan.
- Alencastro, J.; Fuertes, A.; de Wilde, P. (2018) *The relationship between quality defects and the thermal performance of buildings*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 81. pp 883-894.
- Almeida, R. D. C.; Guimarães, S.; Pereira, A. P. F. (2018) **Belo Horizonte, Brasília e Lisboa: observando processos de gentrificação**. Congreso ALAS: Las encrucijadas abiertas de América Latina. La sociología en tiempos de cambio. Montevideo, Uruguai. pp. 1-19.
- Amaro, B.; Saraiva, D.; de Brito, J.; Flores-Colen, I. (2013) *Inspection and diagnosis system of ETICS on walls*. **Construction and Building Materials**, v. 47, pp. 1257-1267.
- Amaro, B.; Saraiva, D.; de Brito, J.; Flores-Colen, I. (2014) *Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls*. **Journal of Civil Engineering and Management**. v. 20. n. 4. pp. 511-526.
- Amorim, C. N. D.; Braga, D. K.; Lima, T. B. S.; Christakou, E. D.; Grillo, J. C. S.; Baldoíno, V. M. (2007) Reabilitação ambiental e uso da luz natural na arquitetura moderna: Brasília Palace Hotel e Palácio do Itamaraty. **Paranoá**. v. 3. pp. 115-128.
- Amorim, C. N.; Flores, A. L. (2005) **Edifícios residenciais das superquadras do Plano Piloto, Brasília: Aspectos de preservação e conforto ambiental**. Encontro Nacional e Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC/ELACAC. Maceió, Brasil. pp. 37–46.

Andrade, J. J. O.; Possan, E.; Dal Molin, D. C. C. (2017) *Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments*. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v.2. n. 1. pp. 6.

Antunes, G. R. (2010) Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília: sistematização da incidência de casos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 166 p.

Costa, M. S. (2014). Identificação de danos em fachadas de edificações por meio de imagens panorâmicas geradas por plataforma robótica fotográfica. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 184 p.

Pinheiro, P. I. S. (2016) Aplicação do Método de Mensuração da Degradação (MMD) ao estudo das fachadas de edifícios em Brasília. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 186 p.

Zanoni, V. A. G. (2015) Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 293 p.

Henrique, E. S. (2017) Sensibilidade à degradação das fachadas: estudo dos aspectos construtivos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 102 p.

Piazzarollo, C. B. (2019) Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 102 p.

Nascimento, M. L. M. (2016) Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 173 p.

Anzanello, M. J.; Fogliatto, F. S. (2007) Curvas de aprendizado: estado da arte e perspectivas de pesquisa. **Gestão e produção**. v 14. n. 1. p. 109-123.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT **NBR 13755** (1996): Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 13755** (2017): Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante: procedimento. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15220-3** (2005): Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-1** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-2** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-3** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-4** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-5** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15575-6** (2013): Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 6: Sistemas Hidrossanitários. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 15825** (2010): Qualificação de pessoas para a construção civil - Perfil profissional do assentador e do rejuntador de placas cerâmicas e porcelanato para revestimentos. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. ABNT **NBR 5674** (2012): Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro.

Bauer, E.; Castro, E. K.; Antunes, G. R. (2011) **Processo de identificação das manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico**. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Belo Horizonte, Brasil. pp. 1-11.

Bauer, E.; Castro, E. K.; Pavon, E.; Oliveira, A. H. S. (2015) *Criteria for application and identification of anomalies on the facades of buildings with the use of passive infrared thermography*. International symposium building pathology – ISBP. Porto, Portugal. pp. 1-12.

Bauer, E.; Castro, E. K.; Silva, M. N. B. (2015) Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília. **Cerâmica**. v. 6. pp. 151-159.

- Bauer, E.; Freitas, V. P.; Mustelieir, N. e Barreira, E.; Freitas, S. S. (2015) *Infrared thermography - Evaluation of the results reproducibility*. **Structural Survey**. v. 31, n. 3. pp. 181–193.
- Bauer, E.; Pavón, E.; Barreira, E.; Castro, E. K. (2016) *Analysis of building facade defects using infrared thermography: Laboratory studies*. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 93 - 104.
- Bauer, E.; Pavón, E.; Pereira, H. F.; Nascimento, M. L. M. (2016) *Criteria for identification of ceramic detachments in building facades with infrared thermography*. **Recent Developments in Building Diagnosis Techniques**. Cap. 5. pp. 51-68.
- Bauer, E.; Silva, M. N. B.; Zanoni, V. A. G. (2015) **Mensuração da degradação e vida útil em fachadas**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – SBTA, Porto Alegre, Brasil. pp. 1-8.
- Bauer, E.; Castro; E. K.; Silva, M. N. B.; Zanoni, V. A. G. (2014) *Evaluation of damage of building facades in Brasília*. International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC. São Paulo, Brasil. pp. 535-542.
- BCIS (2001) *Life expectancy of buildings components, Surveyor's Experiences of Building in Use - A Practical Guide*. **Building Cost Information Service**. Londres, Reino Unido.
- Beasley, K. J. (2014) *Building façade failure risk assessment*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 28, n. 5. pp 1-14.
- Bezerra, L. M.; Uchôa, J. C., Araújo, J. A.; Bonilla, J. (2018) *Experimental and Numerical Investigation of Fatigue in Base-Rendering Mortar Used in Façades Undergoing Thermal Cycles*. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 30. n. 8. pp.1-14.
- Bezerra, M.; Madsen, M.; de Mello, M. (2017) *Mobility on Modern Urbanism: A Study of Brasilia's Plano Piloto*. **Procedia Environmental Sciences**. v. 37. pp. 294-305.
- Blocken B.; Carmeliet J. (2006) *On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings*. **Building and Environment**. v. 41. n. 12. pp. 1798-1810.
- Blocken, B., Derome, D.; Carmeliet, J. (2013) *Rainwater runoff from building facades: A review*. **Building and Environment**. v. 60. pp. 339-361.
- Blocken, B.; Abuku, M.; Nore, K.; Briggen, P. M.; Schellen, H. L.; Thue, J. V.; Roels, S.; Carmeliet, J. (2011) *Intercomparison of wind-driven rain deposition models based on two case studies with full-scale measurements*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v 99. n. 4 pp. 448-459.

Blocken, B.; Carmeliet, J. (2010) *Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory*. **Building and Environment**. v. 45. n. 3. pp. 691-703.

Bordalo, R.; de Brito, J.; Gaspar, P. L.; Silva, A. (2010). Abordagem a um modelo de previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. v. 16. pp. 55-69.

Bordalo, R.; de Brito, J.; Gaspar, P. L.; Silva, A. (2011) *Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems*. **Building Research and Information**. v. 39. n. 1. pp.66-78.

Braga, D. K.; Amorim, C. N. (2004) **Conforto térmico em edifícios residenciais do Plano Piloto de Brasília**. Conferencia latino-americana de construyto sustentável. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. São Paulo. Brasil. pp. 18-21.

Branco, F.; Paulo, P.; Garrido, M. (2013) *Vida útil en la construcción civil*. Internacional boletín técnico asociación latinoamericana de control de calidad. Patología y Recuperación de la Construcción Alconpat. pp. 1-22.

Briffett, C. (1991) *The performance of external wall systems in tropical climates*. **Energy and Buildings**. v. 16. pp. 917–924.

British Standards Institution **BSI 7543** (1992) *Guide to durability of buildings and building elements, products and components*. Londres, Reino Unido.

British Standards Institution **BSI 8000** (1989) *‘Workmanship on building sites’ has a number of ‘Codes of Practice’*. Londres, Reino Unido.

Canadian Standards Association **S-478** (1995) *Guidelines on Durability in Buildings*.

Chagas, S. V. M. (2009) **Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassa de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

Chai C.; de Brito J.; Gaspar P.; Silva A. (2015) *Statistical modelling of the service life of exterior painted surfaces*. **International Journal of Strategic Property Management**. v. 19. n. 2. pp. 173-185.

Chew, M. Y. L.; De Silva, N.; Tan, P. P.; e Das, S. (2006) *Grading of risk parameters for facade maintainability*. **International Journal on Architectural Science**. v. 7. n. 3. pp. 77-87.

Cirne, L. S. R.; Oliveira, F. L.; Dumet, T. B. (2006) Levantamento das principais patologias de revestimentos de fachada de edifícios na cidade de Salvador. **Comunidade da Construção**. Salvador, Brasil.

Conceição, J.; Poça, B.; de Brito, J.; Flores-Colen, I.; Castelo, A. (2017) *Inspection, Diagnosis, and Rehabilitation System for Flat Roofs*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 31. n. 6. pp. 04017100.

Consoli, O. J. (2006). **Análise da durabilidade dos componentes das fachadas de edifícios, sob a ótica do projeto arquitetônico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. 208p.

Corbella, O.; Castanheira, R. G. (2001) **Sobre a necessidade de proteção da radiação solar incidente nas fachadas sul, para edifícios situados entre as latitudes 10° e 35°**. Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído – ANTAC. São Pedro, Brasil.

Coutu, S.; Wyrsh, V.; Rossi, L.; Emery, P.; Golay, F.; Carneiro, C. (2013) *Modelling wind-driven rain on buildings in urbanized area using 3-D GIS and LiDAR datasets*. **Building and Environment**. v. 59, pp. 528-535.

da Silva, C.; Coelho, F.; de Brito, J.; Silvestre, J.; Pereira, C. (2017). *Statistical survey on inspection, diagnosis, and repair of architectural concrete surfaces*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 31, n. 6. pp. 04017097.

Daniotti, B.; Cecconi, F. R. (2010) *Test Methods for Service Life Prediction-State of the Art Report on Accelerated Laboratory Test Procedures and Correlation between Laboratory Tests and Service Life Data*. **W080-Prediction of Service Life of Building Materials and Components**. pp. 220-207.

Daniotti, B.; Cecconi, F. R.; Paolini, R.; Galliano, R. (2013) *Durability Evaluation of External Thermal Insulation Composite Systems: Frequency Assessment of Thermal Shocks*. CIBWBC2013. CIB World Building Congress.

Davies, H.; Wyatt, D. (2004) *Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction*. **Building Research and Information**. v. 32. n. 6. pp. 552-553.

de Brito, J.; Gaspar, P. L.; Silva, A. (2012) **Previsão da vida útil dos revestimentos de fachada**. Congresso de patologia y rehabilitación de edificios – PATORREB. Santiago de Compostela, Espanha. pp. 177.

Deutsches Institut Für Normung. **DIN EN 15026** (2007) *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. CEN, Bruxelas, Belgica.

Duling, J.M.; Horak, E.; Cloete, C. (2008) *Service life prediction beyond the “Factor Method”*. International Conference on Durability of Buildings Materials and Components – DBMC, Istambul, Turquia. pp. T42.

Durbin, J.; Watson, G. S. (1971) *Testing for serial correlation in least squares regression III*. **Biometrika**. v. 58. n. 1. pp 1–19.

Dutta, A.; Samanta, A.; Neogi, S. (2017) *Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate*. **Energy and Buildings**. v. 139. pp. 680.

Emídio F.; de Brito Jorge; Gaspar P.; Silva A. (2014) *Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding*. **Construction and Building Materials**. v. 66. pp. 481-493.

Falcão Bauer, R. (1995) **Descolamentos em revestimentos cerâmicos, análises e recomendações**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas – SBTA. Goiânia, Brasil.

Fiorito, A. J. S. I. (2010) **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e Procedimentos de Execução**. 2. ed. São Paulo, Pini.

Florentino H.O.; Biscaro A.F.V.; Passos J.R.S. (2010) Funções sigmoidais aplicadas na determinação da atividade metanogênica específica - AME. **Revista Brasileira de Biologia**. v. 28. n. 1. pp. 141-150.

Flores-Colen, I.; de Brito, J.; de Freitas, V. P. (2009) *Methodology for in-service performance assessment of rendering facades for predictive maintenance*. TG75, W014, W080, W083 and W086, pp. 388.

Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Freitas, V. P. (2004) *Methodology for vertical envelope design, inspection and maintenance*. CIB Student Chapters International Symposium-Sustainability and Innovation in Construction and Real Estate, Tsinghua University. Pequim, China. pp. 269-278.

Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Freitas, V. P. (2010) *Discussion of criteria for prioritization of predictive maintenance of building façades: Survey of 30 experts*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 24. n. 4. pp. 337-344.



França, F.; Holanda, F. (2009) *Indiscipline which transforms architecture appropriations of domestic space in the Federal District*. International Space Syntax Symposium. Estocolmo, Suécia. pp. 1-14.

Francinete Jr, P.; Souza, J. S.; Zanoni, V. A. G.; Bauer, E.; Silva, M. N. B. (2015) **Relação entre a degradação de fachadas e a incidência de chuva dirigida e temperatura - Estudo de caso para os edifícios de Brasília-Brasil**. Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção – CONPAT. Lisboa, Portugal. pp. 1-8.

Freitas, A. S. S. L. A. (2011) **Avaliação do comportamento hidrotérmico de revestimentos exteriores de fachadas devido à acção da chuva incidente**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 170 p.

Freitas, V. P.; Vieira, M.; Guimarães, A. S. (2013) *The French, Norwegian and Danish experience*. A State-of-the-Art Report on Building Pathology. CIB Publication 393. pp. 30-35.

Frohnsdorff, G. J. (1996) *Towards prediction of building service life: the standards imperative*. International Conference on Durability of Building Materials and Components. v. 2. pp. 1417-1428.

Frohnsdorff, C. H.; Sjöström, C. H.; Soronis, G. (1999) *International standards for service life planning of buildings*. International Conference on Durability of Buildings Materials and Components – DBMC. v. 8. pp. 1537-1542.

Galbusera M. (2013) *Application of the factor method to the prediction of the service life of ceramic external wall claddings*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.

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

Galbusera, M. M.; de Brito, J.; Silva, A. (2015) *Application of the factor method to the prediction of the service life of ceramic external wall cladding*. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. 29. n. 3. pp. 04014086.

Garrido, M. A.; Paulo, P. V.; Branco, F. A. (2012) *Service life prediction of façade paint coatings in old buildings*. **Construction and Building Materials**. v. 29. pp. 394-402.

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. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Gaspar, P. L.; Brito, J. (2005) *Assessment of the overall degradation level of an element, based on field data*. International Conférence On Durability of Building Materials and Components. Lyon, França. 2005.

Gaspar, P. L.; Brito, J. (2005) *Mapping defect sensitivity in external mortar renders*. **Construction and Building Materials**. v. 19. p. 571–578.

Gaspar, P.; Brito, J. (2008) *Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: a comparison between different degradation indicators*. **Building and Environment**. v. 43. n. 11, pp. 1818-1828.

Gaspar, P.; Flores-Colen, I.; Brito, J. D. (2006) **Técnicas de diagnóstico e classificação de fissuração em fachadas rebocadas**. Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB. Lisboa, Portugal.

Godoy, A. S. (1995). Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **Revista de Administração de empresas**. v. 35. n. 3. pp. 20-29.

Goldberg, R. P. (1998) *Direct adhered ceramic tile, stone and thin brick facades – technical design manual*. **Laticrete International**. 200 p.

Gonçalves, H.; Graça, J. M. (2004) **Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal**. DGGE/IP-3E.

Gonçalves, T. D. (2007) *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tese de doutorado, Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

Gordon, D. (2006) **Planning twentieth century capital cities**. Routledge.

Gupta, R. D.; Kundu, D. (2007). *Generalized exponential distribution: Existing results and some recent developments*. **Journal of Statistical Planning and Inference**. v.137. n. 11. pp. 3537-3547.

Haagenrud, S. E. (2004) *Guide and bibliography to service life and durability research for buildings and components – Part II Factors causing degradation*. CIB080. Norway, p. 1.

Haapio, A.; Viitaniemi, P. (2008) *Workmanship in service life planning agents affecting the service life*. International conference on durability of buildings materials and components – DBMC. Istanbul, Turquia. pp. T45.

Haase M.; Silva F.M.; Amato A. (2009) *Simulation of ventilated facades in hot and humid climates*. **Energy and Buildings**. v. 41. n. 4. pp.361-373.

Halpern, S. (1978) *The assurance sciences: an introduction to quality control and reliability*. 1 edição. Prentice. Englewood, Estados Unidos da América, pp. 413.

Hovde, P. (2004) *Factor methods for service life prediction*. CIB W080/RILEM 175 SLM: Service Life Methodologies Prediction of Service Life for Buildings and Components, Task Group: Performance Based Methods of Service Life Prediction, Trondheim, Norway, 51 p.

Hovde, P. J. (1998) *Evaluation of the factor method to estimate the service life of building components*. Proceedings of the CIB World Building Congress. v 1, pp. 223-231.

Hovde, P.J. (2005) *The Factor Method - a simple tool to service life estimation*. International conference on durability of buildings materials and components –DBMC. Lyon, France. pp. 1-8.

International Organization for Standardization **ISO 15686-1** (2011): Buildings - Service life planning. Part 1: General principles and framework, International Organization for Standardization.

\_\_\_\_\_. **ISO 15686-2** (2012): Buildings - Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures, International Organization for Standardization.

\_\_\_\_\_. **ISO 15686-7** (2006): Buildings - Service life planning. Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. International Organization for Standardization.

James, J. D.; Spittle, J. A.; Brown, S. G. R.; Evans, R. W. (2001) *A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures*. **Measurement science and technology**. v. 12. n. 3, pp. 1.

Jernberg, P.; Lacasse, M. A.; Haagenrud, S. E.; Sjöström, C. (2004) *Guide and bibliography to service life and durability research for building materials and components*. CIB Report. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Rotterdam, Netherlands.

Joaquim, K.; Gihad, M.; Eduardo Santos, K.; Mohamad, V. (2015) Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira. **Revista Matéria**. v. 20. n. 4. pp. 1030-1047.

John, V. M.; Sato, N. M. N.; Agopyan, V.; Sjöström, C. (2001) **Durabilidade e Sustentabilidade: desafios para a construção civil brasileira**. Workshop sobre durabilidade das construções. v. 2.

John, V. M.; Sjöström, C.; Agopyan, V. (2002) *Durability in the built environment and sustainability in developing countries*. International Conference on Durability of Building Materials and Components. v. 9. pp. 1-7.

Junginger, M. (2014) **A nova NBR 13755**. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. v. 15.

Just, A.; Franco, L. S. (2001) **Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/285. São Paulo. Brasil. 25 p.

Kanniyapan, G.; Mohammad, I. S.; Nesan, L. J., Mohammed, A. H.; Ganisen, S. (2015) *Façade Material Selection Criteria for Optimising Building Maintainability*. **Sciences and Engineering**. v.75 n. 10 pp.17-25.

Kazmierczak, C. S.; Kulakowski, M. P.; Brehm, F. A.; Sentena, J. A. A.; Marquette, L. (2016) **Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaios Acelerados com Ciclos Térmicos**. Ed. Scienza. Porto Alegre. Cap. 6. pp. 147 - 175.

Korolev, I. O.; Symonds, L. L.; Bozoki, A. C. (2016) *Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. Predicting progression from mild cognitive impairment to Alzheimer's dementia using clinical, MRI, and plasma biomarkers via probabilistic pattern classification*. **PloS one**. v. 11. n. 2. pp. 0138866.

Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J.; Neter, J.; Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. v. 5. Boston: McGraw-Hill Irwin.

Lacasse, M. A. (2003) *Durability and performance of building envelopes*. BSI 2003 Proceedings. pp. 1-6.

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F.O.R. (2004) **Eficiência energética na Arquitetura**. 2ª ed. São Paulo: Pro Livros.

Leissner, J.; Kilian, R.; Kotova, L.; Jacob, D.; Mikolajewicz, U.; Broström, T.; Antretter, F. (2015) *Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations*. Heritage Science. v. 3. n. 1. pp.38.

Lo Y. (2002) *Delamination of external wall finishes of housing*. IAHS World congress on housing - housing construction - an interdisciplinary task, FCTUC. Coimbra, Portugal. pp. 1571-1576.

Lourenço, T.; Matias, L.; Faria, P. (2017) *Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography*. **Construction and Building Materials**. v. 148, n. 9. pp. 419–428.

Lowry, G. (2002) *Modelling user acceptance of building management systems*. **Automation in Construction**. v.11. n. 6. pp. 695-705.

Maciel, A. A.; Andrade, S.; Gugel, E. C.; Batista, J. O.; Marinowski, D. L.; Lamberts, R. (2006) **Projeto Casa Eficiente: demonstração de eficiência energética em habitação unifamiliar**. Encontro nacional em tecnologia do ambiente construído – ENTAC. v. 6, pp. 3392-3401.

Maciel, Alexandra A. (2002) **Projeto bioclimático em Brasília: estudo de caso em edifício de escritórios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brasil.

Madureira, S.; Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Pereira, C. (2017) *Maintenance planning of facades in current buildings*. **Construction and Building Materials**. v. 147. pp. 790-802.

Maroco J. **Análise estatística usando o SPSS**, Edições Sílabo, 3ª Edição, Lisboa, Portugal, 2007.

Marquardt, D. W. (1970) Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. **Technometrics**, v. 12. n. 3. pp. 591-612.

Medeiros, J. S.; Sabbatini, F. H. (1999) **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Medeiros, J.S. (1999) **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 457p.

Meira, G. R.; Padaratz, Ivo J. (2002) **Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa**. Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído – ENTAC. p. 1425-1432.

Montgomery, D. C.; Peck, E. A.; Vining, G. G. (1982). **Linear regression analysis**. New York: Wiley and Sons. pp 94-96.

Montgomery, J. C. (1984). *Frequency response characteristics of primary and secondary neurons in the electrosensory system of the thornback ray*. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology**. v. 79. n.1. pp. 189-195.

Morrissey, J.; Moore, T.; Horne, R. E. (2011) *Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation*. **Renewable Energy**. v. 36. n. 2. pp. 568-577.

Moscoso, Y.F.M. (2013) **Estudo numérico e experimental de tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2013, 142p.

Moser K. (1999) *Towards the practical evaluation of service life - illustrative application of the probabilistic approach*. Durability of Building Materials and Components – DBMC. Ottawa, Canada.

Moura, A. C. Ribeiro, S.; Correa, I.; Braga, B. (2014) *Parametric modelling of urban landscape: Decoding the Brasília of Lúcio costa from modernism to present days*. **Journal of Land Use, Mobility and Environment**. v. 1. n. 1. pp. 695-708.

Myers, R. H. (1986) *Classical and modern regression with applications* (Vol. 2). Belmont, CA: Duxbury press.

Nadoushani, Z. S. M.; Akbarnezhad, A., Jornet, J. F.; Xiao, J. (2017) *Multi-criteria selection of façade systems based on sustainability criteria*. **Building and Environment**. v. 121. pp. 67-78.

Nascimento, M. L. M.; Bauer, E.; Souza, J. S.; Zanoni, V. A. G. (2016) *Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation*. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. v. 1, n. 1, p. 5.

**DTU 20.1 P3** (2008): *Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs - Partie 3 : Guide pour le choix des types de murs de façades en fonction du site*. Indice de classement : P10-202-3.

Norman G. R.; Streiner D. L. (2008) *Biostatistics. The bare essentials*. 3rd ed. Shelton, Connecticut: People's Medical Publishing House.

Oliveira, A. D. (2007). **Fundamentos de meteorologia e climatologia**. Núcleo de Engenharia.

Ortega Madrigal, L.; Serrano Lanzarote, B., e Fran Bretones, J. M. (2015) *Proposed method of estimating the service life of building envelopes*. **Revista de la Construcción**. v. 14. n. 1.

Pacheco Machado. M. (2007) **Superquadra: pensamento e prática urbanística**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.

Pel, L.; Huinink, H.; Koping, K; van Hees, R.P.J.; Adan, O.C.G. (2004) *Efflorescence pathway diagram: understanding salt weathering*. **Construction and Building Materials**. v. 18. n. 5. pp. 309-313.

Pérez-Bella, J. M.; Domínguez-Hernández, J.; Cano-Suñén, E.; del Coz-Díaz, J. J.; Rabanal, F. P. Á. (2017a) *On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure. Part II: directional analysis*. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, pp. 1-17.

Pérez-Bella, J. M.; Domínguez-Hernández, J.; Cano-Suñén, E.; del Coz-Díaz, J. J.; Alonso-Martínez, M. (2017b) *On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure. Part I: scalar approach*. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, pp.1-15.

Persily, A. K., & Persily, A. K. (1993) *Envelope design guidelines for federal office buildings: thermal integrity and airtightness*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory.

Petrucci, H. M. C. (2000) **A alteração da aparência das fachadas dos edifícios: interação entre as condições ambientais e a forma construída**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 107 p.

Pezzato, L. M., Sichieri, E. P Pablos J. M. (2010) Estudos de Casos em Fachadas Revestidas com Cerâmica. **Cerâmica industrial**. v.15. pp.5-6.

Possan, E.; Dal Molin, D. C. C.; Andrade, J. J. O. (2018). *A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures*. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. v. 3. n. 1. pp 2.

Poyastro, P. C. (2011) **Influência da volumetria e das condições de entorno da edificação no manchamento e infiltração de água em fachadas por ação de chuva dirigida**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 215 p.

Qu, M.; Yin, H.; Archer, D. H. (2010) *A solar thermal cooling and heating system for a building: experimental and model based performance analysis and design*. **Solar Energy**. v. 84. n. 2. pp.166-182.

Ribeiro, F. A. (2006) **Especificação de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios: levantamento do estado da arte**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

Ribeiro, F. A.; Barros, M. M. S. B. (2010). **Juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachada**. Pini, São Paulo.

Rudbeck, C. (1999) *Assessing the service life of building envelope construction*. International conference on durability of building materials and components – DBMC. Vancouver, Canada. pp. 1051-1061.

Rudbeck, C. (2002) *Service life of building envelope components: making it operational in economical assessment*. **Construction and Building Materials**. v.16. n. 2. pp. 83-89.

Sá, G.; Sá, J.; Brito, J. D.; Amaro, B. (2014) *Inspection and diagnosis system for rendered walls*. **International Journal of Civil Engineering**. v. 2. n. 2 pp. 279-290.

Sá, G.; Sá, J.; Brito, J. D.; Amaro, B. (2015) *Statistical survey on inspection, diagnosis and repair of wall renderings*. **Journal of Civil Engineering and Management**. v. 21. n. 5. pp. 623-636.

Santos, D.G.; Macedo, M. ; Souza, J. S.; Bauer, E. (2018) Mensuração e distribuição de patologias na degradação em argamassa. **Gestão e gerenciamento**. v. 8. p. 13-17.

Santos, D. G. (2018) **Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.136 p.

Santos, M. J. B. O. (2017) **Catologação de patologias em fachadas de edifícios residenciais de Brasília**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 212p.

Saraiva, A. G. (1998) **Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 164 p.

Savin, N. E.; White, K. J. (1977) *The Durbin-Watson test for serial correlation with extreme sample sizes or many regressors*. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**. pp. 1989-1996.

Shohet I.M.; Paciuk M. (2006) Service prediction of exterior cladding components under failure conditions. **Construction Management and Economics**. v. 24. n. 2. pp. 131-148.

Shohet I.M.; Puterman M.; Gilboa E. (2002) Deterioration patterns of building cladding components for maintenance management. **Construction Management and Economics**. v. 20. n. 4. pp. 305-314.

Shohet, I. M.; Laufer, A. (1996) Exterior cladding methods: A techno economic analysis. **Journal of Construction Engineering and Management**. v. 122. n. 3. pp. 242-247.

Shohet, I. M.; Paciuk, M. (2004) *Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions*. **Construction Management and Economics**. v. 22. n. 10. pp. 1081-1090.



Shohet, I. M.; Rosenfeld, Y.; Puterman, M.; Gilboa, E. (1999) *Deterioration patterns for maintenance management – A methodological approach*. Durability of Building Materials and Components. Institute for Research in Construction. Ottawa, Canada. pp. 1666-1678.

Silva A.; de Brito J.; Gaspar P. (2012) *Application of the Factor Method to maintenance decision support for stone cladding*. **Automation in Construction**. v. 22. n. 3. pp.165-174.

Silva A.; de Brito J.; Gaspar P. (2016) *Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings*. Springer International Publishing.

Silva A.; de Brito J.; Gaspar P. (2013) *Probabilistic analysis of the degradation evolution of stone wall cladding (directly adhered to the substrate)*. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25. n. 2. pp. 227-235.

Silva A.; Dias J.L.R.; Gaspar P.L.; de Brito J. (2013) *Statistical models applied to service life prediction of rendered façades*. **Automation in Construction**. v. 30. pp.151-160.

Silva A.; Gaspar, P.L.; de Brito J. (2014) *Durability of current renderings: a probabilistic analysis*. **Automation in Construction**. v. 44. pp.92-102.

Silva, A. F. F. (2015) **Modelação estatística da previsão de vida útil dos revestimentos de fachadas**. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

Silva, A.; Gaspar, P. L.; de Brito, J. (2015) **Modelos factoriais com carácter estocástico - Aplicação à previsão da vida útil dos revestimentos pétreos**. PATORREB. Porto. Portugal.

Silva, M. N. B. (2014) **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.

Silva, M. N. B. Bauer, E.; Castro, E. K. (2014) **Avaliação da degradação em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas de Brasília**. Simpósio de argamassas e soluções térmicas de revestimento – SBTA. p. 1-11. 2014.

Silva, M.N.B.; Bauer, E; Castro, E. K.; Zanoni, V.A.G. (2014) **Distribuição de ocorrência de danos e patologias em fachadas de Brasília – estudo de caso**. Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Universidade de Coimbra, Portugal.

Silvestre, J. D.; de Brito, J. (2011) *Ceramic tiling in building facades: Inspection and pathological characterization using an expert system*. **Construction and Building Materials**. v. 25, n. 4, pp. 1560-1571.

Silvestre, J. D.; de Brito, J. (2010) *Inspection and repair of ceramic tiling within a building management system*. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 22, n. 1, pp. 39-48.

Sousa, H.; Sousa, R.; Silva, F. M.; Sousa, F. (2016) **Fachada de edifícios**.

Sousa, J.; Carpaneda, L. V.; Maciel, A. C. P.; Gomes, M.; Romero, M. A. B. (2007) **Caracterização do clima para a cidade de Brasília: leituras comparativas**. Encontro Nacional de Conforto e Ambiente Construído – IX ENCAC. Ouro Preto, Brasil.

Souza, J. S.; Piazzarollo, C. B.; Bauer, E. (2019) **Aplicação do método de mensuração de degradação em revestimentos de fachadas**. TECSIC. São Paulo, Brasil. pp. 1-5.

Souza, J. S. (2016) **Evolução da degradação de fachadas - efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 114p.

Souza, J. S.; Bauer, E.; Nascimento, M. L. M.; Capuzzo, V. M. S.; Zanoni, V. A. G. (2016) *Study of damage distribution and intensity in regions of the facade*. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. v. 1, n. 1, pp. 1-9.

Souza, J. S.; Nascimento, M.; Bauer, E. (2015) **Estudo da quantificação da degradação de fachadas de edifícios por meio do mapeamento de anomalias**. Congresso Internacional na Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios – CIRMARE, Rio de Janeiro, Brasil.

Souza, J. S.; Silva, A.; de Brito, J.; Bauer, E. (2018) *Analysis of the influencing factors of external wall ceramic claddings' service life using regression techniques*. **Engineering Failure Analysis**. v.83, pp. 141-155.

Souza, J. S.; Nascimento, M. L. M.; Zanoni, V. A. G.; Bauer, E. (2016) **Estudo da intensidade e distribuição de danos em regiões de fachada**. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT. Belém, Brasil. pp. 1055-1067.

Straube J.F.; Schumacher C.J. (2005) *Driving rain data for Canadian building design*. Canadian Conference on Building Science and Technology, Ottawa, Canada. pp. 149-161.

Straube, J.F. (1998) *Moisture control and enclosure wall systems*. Tese de Doutorado. University of Waterloo. Ontario, Canada.

Teply, B. (1999) *Service life prediction of structures–Factor method*. Stavebni Obzor. **Structural Horizon**. v. 8. pp. 137-139.

Thomaz, E. (1989) **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini.

Thomaz, E.; Mitidieri Filho, C. V.; Cleto, F. D. R.; Cardoso, F. F. (2009). **Código de práticas nº 01: alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Torres, A. S.; Silva, J. (2015) Patologias nos sistemas construtivos das edificações do início do século XX no sul do Rio Grande do Sul – Estudo de caso de residência na cidade de Rio Grande/RS. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 10. n. 2.

Trinius, W.; Sjöström, C. (2005) *Service Life Planning and Performance Requirements*. **Building Research and Information**. v.33. n. 2. pp. 173-181.

Trumper, R.; Gelbman, M. (1997). *Measurement of a thermal expansion coefficient*. **The Physics Teacher**. v. 35. pp. 437-438.

Varejão-Silva, M. A. (2000). **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET.

Varejão-Silva; M. A. (2006) **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2.

Verçoza, E. J. (1991) **Patologia das Edificações**. Editora Sagra, Porto Alegre. 176 p.

Vu, K. A. T.; Stewart, M. G. (2002) *Service life prediction of reinforced concrete structures exposed to aggressive environments*. International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC. Brisbane, Australia.

White, C.; Tan, K. T.; Hunston, D.; Steffens, K.; Stanley, D. L.; Satija, S. K.; Vogt, B. D. (2015) *Mechanisms of criticality in environmental adhesion loss*. **Soft matter**. v. 11. n. 20. pp. 3994-4001.

Ximenes S.; de Brito J.; P.L. Gaspar; Silva A. (2014) *Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls*. **Materials and Structures**. v. 48. n. 7. pp. 2235-2249.

Yang, J.; Wang, Z. H.; Kaloush, K. E. (2015) *Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island?*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 47. pp. 830-843.

Yazigi, W. (1999). **A técnica de edificar**. Pini/SindusCon-SP.

Yiu, C. Y.; Ho, D. C. W.; Lo, S. M. (2007) *Weathering effects on external wall tiling systems*. **Construction and Building Materials**. v. 21. n. 3. pp. 594-600.

Zanoni, V. A. G.; Sanchez, J. M. M.; Bauer, E. (2014) **Chuva dirigida: um estudo da ISO 15927-3 no contexto brasileiro**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. pp. 1645-1654.

Zhou, B.; Rybski, D.,; Kropp, J. P. (2017) *The role of city size and urban form in the surface urban heat island*. **Scientific Reports**. v. 7. n. 1. pp. 4791.

# APÊNDICE

## APÊNDICE A

As justificativas para os valores adotados na matriz de correlação das causas e do desempenho estão apresentadas nas Tabelas A1 e A2, respectivamente.

Tabela A. 1 – Justificativa para valores da matriz de correlação das causas.

Causas		DC	FI	FR	EF				
A1	Especificação incorreta de materiais de base (argamassa de emboço)	A determinação do traço de argamassa de emboço inadequada pode provocar fissuras de retração na camada de emboço, as quais podem influenciar no surgimento de fissuras e até mesmo descolamento cerâmico no sistema de revestimento cerâmico.				1	1	0	0
A2	Especificação incorreta de materiais de base (alvenaria e suporte)	(i) Ausência de vergas e contra vergas não absorve a concentração de esforços nestas zonas provocando fissuras, descolamento e falha de rejunte. (ii) O projeto de alvenaria deve contemplar alguns cuidados na interface entre a alvenaria e a estrutura, pois geralmente nestas zonas tendem a surgir defeitos (fissura, descolamento e falha de rejunte) devido à movimentação diferenciada dos diferentes elementos.				1	2	1	0
A3	Especificação incorreta de materiais de revestimento (argamassa de colante)	Uma vez que a aderência das argamassas é resultante do processo de penetração capilar da água de amassamento e elementos mais finos nos poros do suporte, as especificações dos materiais das camadas influenciam diretamente no surgimento de defeitos (descolamento cerâmico e fissuras).				2	1	0	0
A4	Especificação incorreta de materiais de revestimento (cerâmica e rejunte)	Quando as dimensões e propriedades do rejunte e das cerâmicas são corretamente especificados, os esforços ocasionados pela variação dimensional do material constituinte do sistema de revestimento podem ser evitadas, assim mitigando o surgimento de defeitos como fissuras, descolamento cerâmico e falha de rejunte.				2	1	1	0
A5	Ausência ou paginação incorreta das juntas de dilatação	No projeto de alvenaria deve ser especificado a paginação das juntas de dilatação, pois estas têm a função de absorver os esforços gerados pela variação volumétrica dos materiais, assim mitigando o surgimento de alguns defeitos (fissuras, descolamento cerâmico e falha de rejunte).				1	2	1	0
A6	Ausência ou especificação incorreta de elementos de controle de fluxo de água	Os elementos de controle de fluxo de água devem ser contemplados no projeto de fachada, pois frequentemente as causas dos defeitos que surgem nas fachadas estão relacionadas à presença da água, como a eflorescência que está diretamente relacionada a presença de água e o descolamento cerâmico e a fissuração que podem surgir devido ao aumento das dimensões dos materiais cerâmicos ocasionado pela absorção de água.				1	1	0	1

Tabela A. 2 – Justificativa para valores da matriz de correlação das causas (continuação).

	Causas	DC	FI	FR	EF				
B1	Não atendimento ao tempo de execução	<p>(i) O surgimento de descolamento cerâmico pode ser originado pelo descumprimento do tempo de e utilização e o tempo de abertura dos panos de argamassa colante.</p> <p>(ii) O descumprimento do tempo para o início da execução da argamassa de emboço, a qual exige determinadas características do chapisco para que a aderência seja ideal, permite o surgimento de descolamento cerâmico.</p> <p>(iii) Os defeitos provenientes da presença de água podem surgir quando o tempo para a realização do rejuntamento não é atendido, pois os materiais ainda não apresentam as características e propriedades exigidas para que o rejunte seja executado adequadamente.</p>				2	1	1	1
B2	Espessura inadequada de argamassa colante	<p>A aderência da cerâmica ao sistema de revestimento pode estar comprometida quando, na aplicação da argamassa colante, os cordões têm espessuras inadequadas ou quando o fundo da cerâmica não é preenchido por completo no assentamento, assim facilitando o surgimento de descolamento cerâmico, falha de rejunte e fissuras.</p>				2	1	1	0
B3	Falha no assentamento das cerâmicas e preenchimento do rejunte	<p>(i) O rejunte tem função de contribuir na estanqueidade do sistema, desta forma a falha no preenchimento do rejunte facilita o surgimento de defeitos resultantes da presença de água, tal como eflorescência.</p> <p>(ii) O defeito de descolamento cerâmico pode ter como causa o uso equivocado dos equipamentos, como por exemplo, o uso de desempenadeira com os dentes inferior ao permitido ou inclinação errada desempenadeira.</p> <p>(iii) As cerâmicas quando assentadas devem ser pressionadas e movimentadas de forma a acomodar e espalhar a argamassa colante no fundo da cerâmica. Quando o assentamento da cerâmica não contempla estes cuidados, as chances do surgimento de defeitos (descolamento cerâmico e fissuração) aumentam.</p>				2	1	1	1
B4	Falha na execução das junta de dilatação	<p>Uma vez que as juntas de dilatação têm função de absorver os esforços gerados pela variação volumétrica dos materiais, o material de preenchimento deve ser flexível e a execução deve atender aos critérios de posicionamento e dimensões especificadas em projetos, assim dificultando o surgimento de defeitos (descolamento cerâmico, fissuração, falha de rejunte e eflorescência).</p>				1	1	1	1
B5	Dificuldade de execução do revestimento em zonas críticas	<p>(i) A execução do revestimento cerâmico em zonas de cantos que apresentem largura inferior à da desempenadeira dificulta a aplicação da argamassa colante, assim prejudicando a aderência do sistema (descolamento cerâmico).</p> <p>(ii) Zonas que apresentam muitos recortes de cerâmica o preenchimento do rejunte pode ser prejudicado, facilitando a falha de rejunte, fissuração, descolamento e eflorescência.</p>				1	1	1	1

Tabela A. 3 – Justificativa para valores da matriz de correlação das causas (continuação).

Causas		DC	FI	FR	EF				
C1	Adaptação e instalação de elementos não previstos	(i) Pode causar alteração nos esforços atuantes no sistema e quando não realiza a impermeabilização do sistema nos furos de instalação permite o ingresso de água, assim facilitando o surgimento de defeitos (descolamento cerâmico, fissuração, falha de rejunte e eflorescência). (ii) o uso de material incorreto pode afetar ou desgastar o rejunte, assim prejudicando a impermeabilidade do sistema.				1	1	1	1
C2	Limpeza incorreta ou ausente	(i) A remoção de eflorescências e manchas que favorecem o desenvolvimento de microrganismos, pois a presença de microrganismos permite o surgimento de fissuras devido a alteração nos esforços atuantes no sistema.				0	1	1	1
C3	Ineficiência de elementos de controle de fluxo de água pluvial	A incapacidade dos elementos de descolar a água da fachada pode facilitar o surgimento de defeitos provenientes da presença de água (descolamento cerâmico, fissuração e eflorescência).				1	1	0	1
C4	Ausência de manutenção das juntas de dilatação	A manutenção equivocada da junta de dilatação pode facilitar o surgimento de defeitos (descolamento cerâmico e eflorescência).				1	0	0	1
C5	Ausência de manutenção pontual do revestimento	Quando as atividades de manutenção são realizadas de forma errônea, os defeitos (descolamento cerâmico, fissuração e falha de rejunte) tendem a reaparecer mais rapidamente e até mesmo com maior gravidade que anteriormente.				1	1	1	0

Tabela A. 4 – Justificativa para valores da matriz de correlação do desempenho.

Grau de desempenho		DC	FI	FR	EF
Estrutural	O ingresso de agentes de degradação pode ser facilitado pelos defeitos de descolamento cerâmico, fissuras e falha nas juntas.	2	2	1	0
Estanqueidade	A presença de água no sistema de vedação é muitas vezes a principal causa dos defeitos (descolamento cerâmico, fissuração, falha nas juntas e eflorescência).	2	2	1	2
Estética	Sistema de revestimento com fissuras, descolamentos cerâmicos ou larga escala de falha nas juntas causa desconforto e insegurança ao usuário.	2	2	1	0