



**MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DE PARÂMETROS  
OBTIDOS DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA PARA OS EDIFÍCIOS DE  
BRASÍLIA**

**DAIANE TEODORO DE ANDRADE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DE PARÂMETROS  
OBTIDOS DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA PARA OS EDIFÍCIOS DE  
BRASÍLIA**

DAIANE TEODORO DE ANDRADE

ORIENTADOR: DR. ELTON BAUER  
COORIENTADORA: DRa. JÉSSICA SIQUEIRA DE SOUZA

DISSETAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA/DF – NOV/2022

DAIANE TEODORO DE ANDRADE

**MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DE PARÂMETROS  
OBTIDOS DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA PARA OS EDIFÍCIOS DE  
BRASÍLIA**

DISSERTAÇÃO 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  
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

---

Prof. Dr. ELTON BAUER (ENC-UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Dra. JÉSSICA SIQUEIRA DE SOUZA (ENC-UnB)  
(Coorientadora)

---

Prof. Dr. Elier Pavón de lá Fé (UFOB)  
(Examinador externo)

---

Prof. Dra. Vanessa Silveira Silva (UFBA)  
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF – NOV/2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

ANDRADE, DAIANE TEODORO

Modelação da degradação de fachadas a partir de parâmetros obtidos da simulação higratérmica para os edifícios de Brasília. [Distrito Federal] 2022.

XXII, 101 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2021).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Indicador de degradação  
2. Simulação computacional  
3. Agentes Climáticos

I. ENC/FT/UNB

II. Título (Mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Andrade, D. T. (2022). Modelação da degradação de fachadas a partir de parâmetros obtidos da simulação higratérmica para os edifícios de Brasília. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM11A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Daiane Teodoro de Andrade

TÍTULO: Modelação da degradação de fachadas a partir de parâmetros obtidos da simulação higratérmica para os edifícios de Brasília.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Daiane Teodoro de Andrade

Av Marabá, 4211, Casa 502

Bairro Bela Vista – CEP:38.703-236 – Patos de Minas – MG – Brasil

E-mail: daiane.andrade@aluno.unb.br/ daianeteodoro.a@hotmail.com

Dedico esse trabalho a todos que me apoiaram nessa jornada. A caminhada seria muito mais difícil sem as palavras de carinho conforto e todo apoio e incentivo recebido.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, a Nossa Senhora Aparecida e aos Três Reis Santos por me mostrar a luz nos momentos que eu me encontrava perdida na escuridão. Agradeço por tudo que na misteriosa ação do destino aconteceu exatamente quando tinha que acontecer me possibilitando alcançar mais um sonho.

Agradeço a toda minha família que estiveram ao meu lado a cada passo me incentivando a continuar e me lembrando que eu era capaz. Agradeço a minha mãe por me ensinar ser tão persistente e focada nos meus objetivos e me lembrar de meus valores e minha capacidade. Agradeço ao meu companheiro, meu amor, por todo amor, carinho e compreensão, por cuidar de mim principalmente nos momentos em que eu me esquecia de mim mesma.

Agradeço a meus amigos que ao longo dessa jornada dividiram comigo minhas frustrações, ouviram meus desabafos e acima de tudo estavam ao meu lado para qualquer decisão que eu tomasse. Obrigada por entenderem todas as vezes que troquei as “farras” pelos estudos, ou pior, quando eu levava os estudos para as farras. Foi muito mais fácil passar pelas dificuldades dessa jornada ao lado de vocês.

Agradeço aos meus professores, a todos os educadores que eu tive a oportunidade de ter como professores na minha jornada. Mais que ensinamentos, com vocês aprendi os valores para vida, aprendi uma profissão, aprendi o amor por lecionar. Agradeço ao meu orientador por me fazer superar meus próprios limites, por me possibilitar crescer e evoluir, sei que no meu dia a dia lecionando aplicarei todos os conhecimentos e experiências adquiridas ao seu lado. Agradeço a minha coorientadora que nessa jornada foi minha estrela guia, a luz no fim do túnel, representando a cada dia que é possível completar mais essa etapa.

Agradeço a minhas psicólogas e minha psiquiatra por me ajudar a me compreender, conhecer, valorizar e a entender que eu podia errar, para poder aprender com meus erros e assim evoluir. Não foi fácil compreender minha evolução em toda essa etapa e muito menos aceitar as mudanças que vieram e novos objetivos, mas hoje me vejo mais forte e com muito mais amor, carinho e cuidado para comigo.

*“Qualquer coisa que você faça será insignificante, mas é muito importante que você o faça. Pois ninguém o fará por você.”*

**Mahatma Gandhi**

## RESUMO

### MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DE PARÂMETROS OBTIDOS DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA PARA OS EDIFÍCIOS DE BRASÍLIA

Autora: Daiane Teodoro de Andrade

Orientador: Dr. Elton Bauer

Coorientadora: Dra. Jéssica Siqueira de Souza

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, novembro de 2022.

O processo de degradação de fachadas é influenciado por diversos fatores e agentes de degradação que podem favorecer a perda de desempenho do sistema de revestimento. As fachadas estão diariamente expostas aos agentes de degradação, mas a simples presença do agente não implica no surgimento de patologias. Os mecanismos de degradação, a partir da incidência dos agentes, alteram a estrutura física ou química do material e ocasionam nas patologias. No estudo da degradação é importante analisar quais as variáveis que influenciam no processo de degradação e selecionar as que sejam passíveis de identificação e de quantificação. Tem-se como objetivo propor a modelação da degradação de fachadas com revestimento cerâmico tendo por parâmetros as variáveis de comportamento obtidas com a aplicação da simulação higrotérmica e indicador de degradação medido em campo. A obtenção do modelo de degradação é efetuada pela análise de regressão múltipla, a qual permite também identificar quais são as variáveis mais relevantes na predição do modelo. No desenvolvimento dos modelos de degradação é considerado como variável dependente o indicador de degradação (FGD), o qual é calculado a partir de inspeções em campo. Para que os modelos possam ser desenvolvidos é realizada a inclusão dos valores quantitativos das variáveis de comportamento, variáveis independentes, obtidas com a simulação higrotérmica. Pelos resultados dos modelos a ação da chuva dirigida, teor de umidade e esforços térmicos, calculados a partir simulação higrotérmica, resultam em fatores representativos na predição dos modelos. A modelação da degradação tendo por parâmetros as variáveis de comportamento obtidas com a aplicação da simulação higrotérmica e o indicador de degradação é estatisticamente significativa. A aplicação da modelação linear permite determinar que o fim da vida útil das fachadas analisadas ocorre aos 24 anos ( $\pm 4$ ), já com a aplicação da modelação quadrática o fim da vida útil ocorre aos 25 anos ( $\pm 3,5$ ).

**Palavras-chave:** Simulação higrotérmica, Degradação, Vida Útil, Fachadas.



## **ABSTRACT**

### **MODELING THE DEGRADATION OF FAÇADES BASED ON PARAMETERS OBTAINED FROM THE HYGROTHERMAL SIMULATION FOR BUILDINGS IN BRASÍLIA**

Author: Daiane Teodoro de Andrade

Advisor: Dr. Elton Bauer

Advisor: Dra. Jéssica Siqueira de Souza

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, November 2022.

The degradation process of facades is influenced by several factors and degradation agents that can favor the loss of performance of the coating system. The facades are daily exposed to degradation agents, but the mere presence of the agent does not imply the emergence of pathologies. The degradation mechanisms, based on the incidence of the agents, alter the physical or chemical structure of the material and cause pathologies. In the study of degradation, it is important to verify which variables influence the degradation process and select those that can be identified and quantified. The objective is to propose the modeling of the degradation of facades with ceramic coating, having as parameters the behavior variables obtained with the application of hygrothermal simulation and the degradation indicator measured in the field. The degradation model is obtained by multiple regression analysis, which also allows identifying which are the most relevant variables in the prediction of the model. In the development of degradation models, the degradation indicator (FGD) is considered as a dependent variable, which is calculated from field inspections. So that the models can be developed, the quantitative values of the behavior variables are included, independent variables, obtained with the hygrothermal simulation. Based on the results of the models, the action of driving rain, moisture content and thermal stresses, calculated from hygrothermal simulation, result in representative factors in the prediction of the models. The degradation modeling using the behavior variables obtained with the application of hygrothermal simulation and the degradation indicator is statistically significant. The application of linear modeling allows to determine that the end of the useful life of the analyzed facades occurs at 24 years ( $\pm 4$ ), already with the application of quadratic modeling, end of useful life occurs at 25 years ( $\pm 3,5$ ).

**Keywords:** Hygrothermal simulation, Degradation, Service life, Facades.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema do revestimento cerâmico aplicado sobre a base (ABNT NBR 13755, 2017) .....	5
Figura 3- Esquema de forças e deformações higroscópicas no conjunto (FIORITO, 2009).....	7
Figura 4- Esquema da dilatação térmica no revestimento cerâmico/argamassa (FIORITO, 2009).....	11
Figura 5- Modelo com condições de contorno e os pontos de análise (SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 2002).....	13
Figura 6- Esforços normais ao longo do eixo y entre a argamassa colante e peças cerâmicas + rejunte (SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 2002).....	13
Figura 7- Condições de contorno e tipo de malha (TEMOCHE ESQUIVEL, 2009) .....	14
Figura 2- Causas, fatores, efeitos e sintomas (CÓIAS, 2009).....	18
Figura 8- Exemplo de divisão da fachada em zonas .....	22
Figura 9- Radiação diária ao longo do ano para diferentes orientações (SOUZA, 2019) .....	25
Figura 10- Volume de chuva dirigida acumulada e episódios de chuva ao longo do ano em função da orientação (SOUZA, 2019).....	26
Figura 11- Procedimentos Metodológicos.....	36
Figura 12- Parâmetros de degradação das amostras de estudo.....	39
Figura 13- FGD <sub>fach</sub> em função da idade das edificações.....	40
Figura 14- Sistema de revestimento cerâmico e posições de monitorização .....	42
Figura 15- Incidência dos agentes climáticos por orientação.....	49
Figura 16- Relação dos comportamentos da fachada com a orientação e absorvância.....	52
Figura 17- Curvas dose resposta, relação entre o indicador de degradação e os índices ponderados.....	53
Figura 18- Precisão dos modelos determinados nas modelações linear e quadrática .....	58
Figura 19- Significâncias das variáveis na predição dos modelos .....	60
Figura 20- Importância relativa das variáveis .....	61
Figura 21- Valor estimado por valor observado.....	64
Figura 22- (a) definição das amostras nas fachas; (b) quantificação com sobreposição de malha (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exemplo de cálculo de esforços devido a expansão por umidade .....	10
Tabela 2- Exemplo de cálculo de esforços devido a expansão pela variação de temperatura .	12
Tabela 3- Exemplo de cálculo de esforços devido a variação de temperatura .....	15
Tabela 4- Níveis de gravidade de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020)..	23
Tabela 5- Quantitativo das amostras de fachadas analisadas .....	38
Tabela 6- Parâmetros, características e indicadores de degradação de cada edificação.....	41
Tabela 7- Exemplo de cálculo do índice ponderado de amplitude de temperatura .....	44
Tabela 8- Dados para correlações.....	45
Tabela 9- Níveis de Radiação Total e Chuva Dirigida.....	49
Tabela 10- Faixas de ocorrência.....	50
Tabela 11- Resultado dos índices de ponderação .....	51
Tabela 12- Parâmetros para correlação .....	52
Tabela 13- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para o indicador de degradação e índices ponderados.....	54
Tabela 14- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para os índices ponderados multiplicados pela idade.....	55
Tabela 15- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado .....	55
Tabela 16- Modelação por regressão múltipla linear 1 .....	57
Tabela 17- Modelação por regressão múltipla linear 2 .....	57
Tabela 18- Modelação por regressão múltipla linear 3 .....	58
Tabela 19- Coeficientes da Modelação por regressão múltipla linear.....	59
Tabela 20- Idade prevista em cada nível de gravidade conforme modelação linear .....	62
Tabela 21- Idade prevista em cada nível de gravidade conforme modelação quadrática .....	63
Tabela 22- Classificação e agrupamentos das anomalias .....	79
Tabela 23- Descrição dos níveis de gravidades de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020). .....	80
Tabela 24- Critérios para definição do fator gravidade (G) (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020). .....	80
Tabela 25- Fator de importância relativa (RI) para cada grupo de anomalias (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020). .....	81
Tabela 26- Amostras iniciais .....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Parâmetros considerados na modelação da degradação .....	34
Quadro 2- Variáveis da pesquisa .....	37
Quadro 3- Dados horários da simulação .....	42
Quadro 4- Parâmetros de cálculos .....	43

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$A$	Área total do revestimento
$\underline{A}$	Peso assintótico
$A_{An(z)}$	Área degradada da zona $z$ em $m^2$
$Ad(n)$	Área de determinada anomalia ( $n$ ) em $m^2$
$A_n$	Área do revestimento afetada por dada anomalia
$A_t$	Área total da amostra de fachada em $m^2$
$A_{(z)}$	Área específica da zona $z$ da amostra em $m^2$
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC	Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
A. 1	Edificação “A”, fachada “1”
AB	Aberturas
Ab%	Absortância em porcentagem
B	Constante de integração
$B_0, B_1, B_k, B_i$	Coefficientes de regressão
$B_3$	Parâmetro que molda a curva ou o parâmetro de ponto de inflexão
Beta	Coefficientes padronizados
CE	Cantos e extremidades
CR	Fissuração
d	Extensão do revestimento cerâmico (cm)
DIN EN	<i>Deutsches institut für normung</i>
DMM <i>Project</i>	Degradação: mensuração e modelação
DT	Descolamento cerâmico
$e$	Base natural de logaritmo
$E_A$	Módulo de elasticidade da argamassa (gpa)
$e_A$	Espessuras da camada de argamassa (cm)
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto (gpa)
$e_c$	Espessuras da camada de concreto (cm)
$E_L$	Módulo de elasticidade do revestimento cerâmico (gpa)
$e_L$	Espessuras da camada de revestimento cerâmico (cm)

$FD$	Fator de Danos
$FD_{anom}$	Fator de Danos para cada anomalia
FGD	Fator geral de degradação
$FGD_{fach}$	Fator geral de degradação da fachada
$FGD_{fach}$	Fator geral de danos da fachada
$FGD_i$	FGD de cada amostra de fachada em análise
$FGD_{linear}$	Fator Geral de Degradação determinado na modelação linear
$FGD_{quadrática}$	Fator Geral de Degradação determinado na modelação quadrática
$F_{f(i)}$	Frequência de cada faixa de ocorrência
$F_{total}$	Frequência total
$G_{(n)}$	Nível de gravidade das anomalias (Tabela 23 e Tabela 24, anexo I)
$G_{máx}$	Constante equivalente ao nível da pior condição ( $G_{máx} = 14$ )
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$i$	Faixa de ocorrência
$I$	Idade da amostra em anos
$I^2$	Idade da amostra em anos ao quadrado
IBM	<i>International business machines</i>
$IFr_{(z)}$	Índice de Frequência de Degradação da Zona
$IGr_{(z)}$	Índice de Gravidade de Degradação
$Ip_n$	Índice ponderado para cada variável de comportamento da fachada (n)
$Ip_{A.T}$	Índice ponderado da Amplitude de Temperatura diária em $^\circ C$
$Ip_{C.D}$	Índice ponderado da Chuva dirigida em $l/m^2$
$Ip_{E.T.F}$	Índice ponderado dos Esforços Térmicos conforme equação 20 em MPa
$Ip_{E.T.T}$	Índice ponderado dos Esforços Térmicos conforme equação 22 em MPa
$Ip_{R.T}$	Índice ponderado da Radiação total em $W/m^2$
$Ip_{T.U}$	Índice ponderado do Teor de Umidade em $Kg/m^3$
$Ip_{U.S}$	Índice ponderado dos ciclos de umidificação e secagem
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JO	Falha nas juntas
$K$	Constante definida pela equação (11)
$K_{CT}$	Coefficiente de condutividade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

L	Espessura característica do material analisado (m)
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
$m$	Parâmetro que molda a curva
MMD	Método de Mensuração da Degradação
$n$	N=1 descolamento, n=2 fissuras, n=3 falha nas juntas, n=4 manchas
$N_A$	Forças de tração na argamassa, considerada endurecida (N)
NBR	Norma brasileira
$N_c$	Forças de tração no concreto, considerado endurecidos (N)
$N_L$	Forças de compressão no revestimento cerâmico
PC	Paredes contínuas
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
R	Coefficiente de correlação múltipla
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R^2_a$	Coefficiente de determinação ajustado
S	Indicador do nível geral de degradação
$S_A$	Seção do revestimento da argamassa (cm)
$S_c$	Seção do concreto (cm)
SC	Sacadas
$S_L$	Seção do revestimento cerâmico (cm)
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
ST	Manchas
$S_{w,c}$	Indicador de severidade de degradação para revestimentos cerâmicos
$S_{w,rp}$	Índice de severidade da degradação para revestimentos pétreos
t	Idade do elemento em análise
$t$	Resultados do teste t-Student para cada variável
$T_{int}$	Temperatura interna no centro do corpo (°C)
$T_{sup}$	Temperatura superficial (°C)
TMY	<i>Typical meteorological year</i>
TO	Topo
TP	Transição de pavimentos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

UnB	Universidade de Brasília
$\nu$	Coefficiente de Poisson
VIF	Estatísticas de colinearidade entre as variáveis
WUFI	<i>Wärme und feuchte instationär</i>
$\bar{X}_{f(i)}$	Valor médio da faixa de ocorrência
$x, x_1, x_2$ e $x_k, x_i$	Variáveis independentes
$y$	Variável dependente
$\alpha_L$	Coefficiente de dilatação térmica linear do revestimento cerâmico ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\beta$	Número de Biot
$\beta_0$	Constante
$\beta_i$	Coefficientes de regressão
$\delta$	Expansão por unidade do revestimento cerâmico
$\varepsilon$	Erros do modelo
$\varepsilon_j$	Resíduos ou erros
$\sigma$	Esforços térmicos (mpa)
$\sigma_A$	Esforços na argamassa (mpa)
$\sigma_C$	Esforços no concreto (mpa)
$\sigma_L$	Esforços no revestimento cerâmico (mpa)
$\psi$	Fator de atenuação dos esforços térmicos
$\pm$	Mais ou menos
$\Delta_{L1}$	Deslocamento total devido a expansão por unidade (cm)
$\Delta t$	Varição de temperatura uniforme ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\sqrt{QME}$	Raiz do quadrado médio dos erros



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	2
<b>2</b>	<b>DEGRADAÇÃO DE FACHADAS .....</b>	<b>4</b>
2.1	FACHADAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO	4
2.1.1	<i>Esforços no revestimento cerâmico .....</i>	<i>6</i>
2.2	DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	16
2.3	INDICADORES DE DEGRADAÇÃO	19
2.4	SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	23
2.5	MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA VIDA UTIL	26
2.5.1	<i>Regressão simples .....</i>	<i>27</i>
2.5.2	<i>Regressão múltipla linear .....</i>	<i>28</i>
2.5.3	<i>Regressão múltipla não linear .....</i>	<i>29</i>
2.5.4	<i>Utilização da modelação no estudo da degradação .....</i>	<i>32</i>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1	AMOSTRAS DE ESTUDO	37
3.2	SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	41
3.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – ANÁLISE	43
3.4	MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
4.1	AGENTES CLIMÁTICOS DE DEGRADAÇÃO	49
4.2	ANÁLISES DE COMPORTAMENTO DA FACHADA	50
4.3	CORRELAÇÕES	52
4.4	MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO	56
4.5	APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO	61
<b>5</b>	<b>SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO I- MMD .....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO II- FGD POR AMOSTRA DE FACHADA .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As fachadas devem ser, dentre outros requisitos: impermeáveis, resistentes ao vento, capazes de permitir expansão térmica e contração, ter desempenho térmico, serem duráveis e seguras. Como parte da envoltória da edificação, as fachadas recebem a incidência de agentes de degradação climáticos, como a radiação solar e a chuva dirigida. Um agente de degradação é tudo aquilo que ao agir sobre uma edificação, ou partes desta, afete negativamente seu desempenho (ISO 15686-2 2012).

Os comportamentos do sistema de revestimento cerâmico, em termos de fluxos de calor e umidade, devido a ocorrência e evolução da degradação, são particulares e condicionadas pelo nível de incidência dos agentes climáticos (TEMOCHE ESQUIVEL, 2009). O mecanismo de degradação ocorre quando a estrutura física ou química do elemento ou sistema é modificada ocasionando o aparecimento de anomalias devido a incidência dos agentes (ISO 15686-2 2012).

Os revestimentos cerâmicos são cada vez mais utilizados em fachadas devido à sua alta resistência às intempéries em comparação com outros revestimentos, como a pintura. No entanto, muitas anomalias são frequentemente identificadas em fachadas com revestimentos cerâmicos tal como descolamentos de peças cerâmicas e fissuras. O estudo das anomalias presentes nas fachadas possibilita a compreensão da tendência de degradação do sistema de revestimento. A vida útil e o nível de desempenho de uma edificação são dependentes da associação de fatores como: a qualidade dos materiais, o nível de projeto, o nível de execução, o ambiente interno, o ambiente externo, as condições de uso e a frequência de manutenção (ABNT NBR 15575-1, 2021; BAUER; SILVA, 2016; FIORITO, 2009; ISO 15686-1, 2011).

A influência do ambiente externo em fachadas pode ser determinada por simulações computacionais, que estimam a incidência horária dos agentes climáticos. Estes atuam de maneira singular em cada fachada sendo variáveis em função da zona bioclimática e da orientação da fachada, dentre outros aspectos relacionados a sua localização (HENRIQUE, 2017). Para as fachadas com revestimentos cerâmicos, a radiação e a chuva dirigida são os agentes climáticos que mais influenciam em seu processo de degradação (ZANONI, 2015).

A simulação higratérmica é uma ferramenta útil no processo de determinação dos agentes de degradação climáticos, que permite após inserção dos dados de entrada como, por exemplo,

dados meteorológicos e características dos materiais, quantificar a incidência de agentes como a chuva dirigida e incidência de radiação, bem como parâmetros associáveis a degradação como a umidade e a temperatura nas camadas do revestimento da fachada (ZANONI, 2015).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O presente estudo dará continuidade a linha de pesquisa correlata ao tema de degradação de fachadas com revestimento cerâmico do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB). A realização da modelação da degradação, utilizando variáveis quantitativas obtidas a partir do resultado da simulação higrotérmica e os indicadores de degradação já elucidados, é um avanço importante nas pesquisas já realizadas e promove o entendimento da importância das variáveis que influenciam a degradação.

As edificações analisadas nessa pesquisa pertencem a base de dados do projeto “DMM *Project*” (Degradação: mensuração e modelação) (BAUER, 2021) desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB). A base de dados do DMM *Project* contempla parâmetros de degradação, como o indicador de degradação (FGD- Fator Geral de Degradação) e características das amostras, tal como orientação, localização, idade, absorvância, tipologia construtiva dentre outros.

Os índices ponderados representam, de forma quantitativa, a incidência dos agentes climáticos chuva dirigida e radiação solar e as variáveis de comportamento das fachadas devido aos fluxos de umidade e temperatura. A modelação da degradação consiste na correlação da degradação quantificada com as variáveis associadas aos comportamentos obtidos com a simulação higrotérmica. Portanto a relevância deste estudo se justifica pela modelação da degradação utilizando o indicador de degradação FGD e o resultado da simulação higrotérmica na forma de variáveis quantitativas que influenciam o mecanismo de degradação.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é discutir a modelação da degradação tendo por parâmetros as variáveis de comportamento obtidas com a aplicação da simulação higrotérmica e os respectivos indicadores de degradação mensurados em edifícios de Brasília. Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Avaliar o indicador de degradação representativo de cada fachada dos edifícios, a partir das amostras selecionadas na base de dados.
- Quantificar, a partir de índices ponderados, o resultado da simulação higrotérmica para os agentes climáticos, chuva dirigida e radiação solar e para as variáveis de comportamento das fachadas com revestimento cerâmico.
- Modelar, a partir de ferramentas estatísticas, a degradação de fachadas com revestimento cerâmico, utilizando os índices ponderados resultantes da simulação higrotérmica com a idade da fachada e seu respectivo indicador de degradação.

## **2 DEGRADAÇÃO DE FACHADAS**

As informações utilizadas nos de estudo da degradação variam em função da base de dados empregada, podendo uma base apresentar uma maior quantidade de fatores e/ou agentes de degradação que a outra. Uma das dificuldades no estudo da degradação é a obtenção de dados e informações sobre os fatores que influenciam na degradação dos sistemas construtivos, por exemplo, as características dos materiais utilizados, o nível de projeto e execução, a frequência de manutenção, dentre outros (SOUZA; PIAZZAROLLO; BAUER, 2019).

Ao estudar a degradação, é importante entender as características do sistema construtivo a ser analisado, como sua composição e funções e estimar os fatores de degradação que afetam o sistema. Compreender os mecanismos de degradação associados as incidências dos agentes de degradação é fundamental para entender como ocorre a evolução da degradação dos sistemas construtivos ao longo dos anos (RODRIGUES, 2015; SOUZA, 2019).

### **2.1 FACHADAS COM REVESTIMENTO CERÂMICO**

Os revestimentos cerâmicos são constituídos de várias camadas com diferentes materiais aderidos. Uma deformação em uma única camada poderá resultar em esforços no conjunto variando de acordo com as características de cada camada. Para compreender seu processo de degradação é importante conhecer sua constituição e quais esforços são importantes em seu processo de degradação.

O revestimento cerâmico é um sistema constituído por múltiplas camadas aplicadas sobre uma base (Figura 1). A base pode ser constituída de concreto, alvenaria de tijolos maciços ou cerâmicos, blocos de concreto dentre outros (ABNT NBR 13755, 2017).

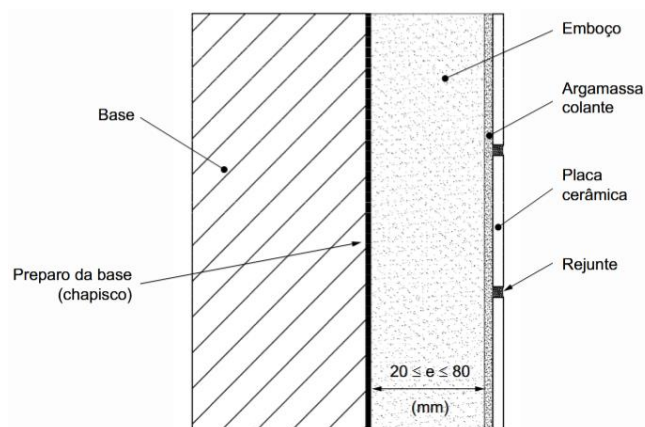


Figura 1- Esquema do revestimento cerâmico aplicado sobre a base (ABNT NBR 13755, 2017)

Sobre a base (alvenaria, estrutura) é aplicada uma camada de chapisco, podendo ser contínua ou descontínua, com finalidade de uniformizar a absorção da superfície e melhorar a aderência do revestimento (ABNT NBR 13529). A camada de emboço deve ser aplicada sobre o chapisco para cobrir e regularizar a superfície que receberá uma camada de argamassa colante para fixação da placa cerâmica (ABNT NBR 13529). A argamassa colante é um produto industrializado que quando misturado com água se torna viscosa, plástica e aderente, sendo ideal para o assentamento de placas cerâmicas para revestimento (ABNT NBR 14081-1). A placa ou pastilha cerâmica utilizadas como acabamento em fachadas devem atender requisitos de absorção máxima de 6%, ou de 3% para locais com temperaturas mínimas de 0°C ou inferior; apresentando expansão máxima por umidade de 0,6 mm/m (ABNT NBR 13818 e ABNT NBR 15463 (para porcelanatos)). Entre as placas cerâmicas utiliza-se argamassa para rejuntamento (ABNT NBR 14992), para aplicação nas juntas de assentamento das placas, a qual atua na restrição de movimentação das peças devido a expansões por umidade e temperatura (ANTUNES, 2010; ABNT NBR 13755, 2017; JUNGINGER, 2003; LODETTI LUIZ; ANTUNES, 2018; MAGALHÃES, 2008).

Em uma fachada com revestimento cerâmico há também a presença de juntas de movimentação ou estrutural. A junta de movimentação normalmente é mais larga que as juntas de assentamento, buscando subdividir o revestimento externo para aliviar os esforços provocados pelas movimentações das camadas do revestimento. Já a junta estrutural separa a estrutura da edificação em partes independentes (ABNT NBR 13755, 2017; JUNGINGER, 2014).

O sistema de revestimento cerâmico está sujeito a deformações em decorrência de agentes climáticos, em virtude das variações de temperatura e umidade. Ocorre expansão por umidade quando há aumento das dimensões do sistema construtivo, ou de uma ou mais de suas camadas, devido a presença de umidade (ABNT NBR 13755, 2017; COSTA, 2007; NASTRI, 2015; RODRIGUES, 2015; VAZ; CARASEK, 2019; ZANONI, 2015).

A placa cerâmica por apresentar uma menor dilatação térmica e maior módulo de elasticidade, que as demais camadas do revestimento, se expande ou se contrai mais que as camadas de argamassa colante e emboço. As variações das movimentações dimensionais de origem térmica geram esforços nas interfaces das camadas prejudicando a aderência e favorecendo a ocorrência do descolamento entre as mesmas (GUAN *et al.*, 1997). Cada camada do revestimento cerâmico contribui para o desempenho do sistema, desde as características próprias do material empregado em cada camada bem como as técnicas construtivas empregadas na execução (FIORITO, 2009; LUCENAS; BAUER, 2020; MOTA; BAUER, 2020; SARAIVA, 1998).

O deslocamento da placa cerâmica frequentemente é evidenciado como a anomalia de maior ocorrência em sistemas de revestimento cerâmico (BAUER *et al.*, 2014; CARASEK *et al.*, 2014; CARRETERO-AYUSO; MORENO-CANSADO; GARCÍA-SANZ-CALCEDO, 2019a; CARRETERO-AYUSO; SÁEZ-PÉREZ, 2020; PEREIRA; BRITO; SILVESTRE, 2018; PIAZZAROLLO, 2019; SILVA *et al.*, 2014). Consequentemente torna-se importante o estudo dos agentes e mecanismos de degradação que atuam sobre o sistema, compreendendo como ocorre o mecanismo de degradação em cada camada do revestimento.

### 2.1.1 *Esforços no revestimento cerâmico*

Dentre as principais causas para as deformações em revestimento cerâmico estão as movimentações dimensionais relativas as variações de temperatura e umidade. Uma das principais propriedades do sistema de revestimento cerâmico é a aderência entre as camadas constituintes, pois se há perda de aderência poderá ocorrer o descolamento entre as camadas (FIORITO, 2009; RIBEIRO; BARROS, 2010; WETZEL *et al.*, 2012b; YIU; HO; LO, 2007).

A partir das variações de temperatura que ocorrem diariamente, as camadas do sistema passam por processos de expansão e contração gerando esforços que, em conjunto com outros fatores como a presença de umidade, contribuem para o descolamento da peça cerâmica (CHEW, 1999; HERWEGH *et al.*, 2015; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016). O sistema de revestimento

cerâmico está sujeito diariamente a esforços térmicos oriundas da variação da temperatura e a esforços higroscópicos devido a expansão por umidade (MARANHÃO; LOH; JOHN, 2011; RIBEIRO; BARROS, 2010). Pode-se obter dados horários de temperatura e umidade nas camadas do revestimento cerâmico a partir da simulação higrotérmica, bem como parâmetros de comportamento devido aos fluxos de calor e umidade.

Fiorito (2009) considera em seu modelo de análise uma placa sem restrições de movimentações, ou seja, permitindo variações dimensionais nas extremidades sem que haja algum tipo de travamento ou restrição aos esforços e deformações. As camadas do conjunto (Figura 2 (a)) apresentam ligação (aderência) entre si, o comportamento de expansão por umidade do revestimento cerâmico é demonstrado na Figura 2 os deslocamentos são detalhados conforme equações de (1) a (7). A expansão por umidade em conjunto com ausência de juntas adequadas poderá favorecer o descolamento do revestimento (FIORITO, 2009).

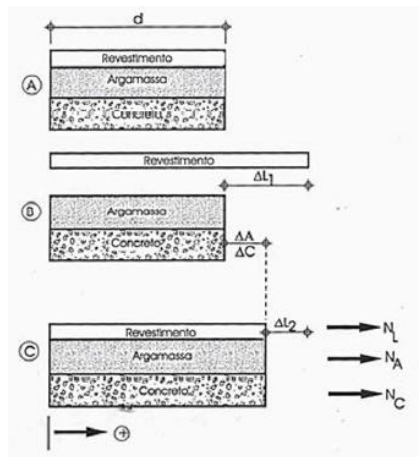


Figura 2- Esquema de forças e deformações higroscópicas no conjunto (FIORITO, 2009)

$$N_L + N_A + N_C = 0 \quad (1)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta_A \quad (2)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta_C \quad (3)$$

$$\Delta L_1 = \delta d \quad (4)$$

$$\Delta L_2 = \frac{N_L (d + d\delta)}{E_L S_L} \quad (5)$$

$$\Delta A = \frac{N_A d}{E_A S_A} \quad (6)$$



$$\Delta C = \frac{N_c d}{E_c S_c} \quad (7)$$

Onde:

$d$ = extensão do revestimento cerâmico (cm);

$\Delta L_1$ = deslocamento total devido a expansão por umidade (cm);

$N_L, N_A$  e  $N_c$ = forças de compressão no revestimento cerâmico, Forças de tração na argamassa e no concreto, considerados endurecidos (N);

$S_L, S_A$  e  $S_c$ = seção (cm)

$E_L, E_A, E_c$ = módulo de elasticidade do revestimento cerâmico, argamassa e concreto (GPa);

$\delta$ = expansão por umidade do revestimento cerâmico de 0,0003 a 0,0007 mm/mm;

A expansão por umidade é mais evidente na peça cerâmica (Figura 2- b). Como o sistema se encontra interligado a deformação é proporcional em todas as camadas (Figura 2- c), gerando esforços, no eixo x, atuantes nas interfaces. Como o sistema se encontra em equilíbrio o somatório das forças no eixo x é igual a zero e conseqüentemente os deslocamentos ocorrerão na mesma dimensão (equações (1)-(3)). O deslocamento total é proporcional à dilatação do revestimento e a sua extensão.

A equação (1) expressa o equilíbrio das forças, considerando que a soma das forças atuantes na cerâmica ( $N_L$ ) na argamassa ( $N_A$ ) e no concreto ( $N_c$ ) é igual a zero. As equações (2) e (3) consideram os deslocamentos individuais devido a expansão por umidade da argamassa e do concreto. A equação (4) deixa claro que o deslocamento total da placa cerâmica ocorre em função da expansão por umidade sendo proporcional ao coeficiente de expansão por umidade do revestimento cerâmico e a sua extensão. A equação (5) pondera o deslocamento da placa cerâmica restringido pelas camadas de argamassa e concreto, sendo que os deslocamentos destas são definidos nas equações (6) e (7). Conseqüentemente a expansão por umidade da placa cerâmica resulta em compressão no revestimento, tração na argamassa e no suporte (concreto).

As equações de (8) a (11) são utilizadas para determinação dos esforços nas camadas do revestimento (cerâmica, argamassa e concreto), estas são definidas pelas considerações das equações de (1) á (7), considerando os módulos de elasticidade e as espessuras de cada camada do revestimento, bem como a expansão por umidade do revestimento cerâmico.

$$\sigma_L = \frac{N_L}{e_L} = -k * E_L * \delta \quad (8)$$

$$\sigma_A = \frac{N_A}{e_A} = E_A * \delta * (1 - k) \quad (9)$$

$$\sigma_C = \frac{N_C}{e_C} = E_C * \delta * (1 - k) \quad (10)$$

$$K = \frac{E_A S_A + E_C S_C}{E_L S_L + E_A S_A + E_C S_C} \quad (11)$$

Onde:

$\sigma_L, \sigma_A, \sigma_C$ = esforços no revestimento cerâmico, na argamassa e no concreto (MPa);

$N_L$ = forças de compressão no revestimento cerâmico (N);

$N_A$  e  $N_C$ = forças de tração na argamassa e no concreto, considerados endurecidos (N);

$e_L, e_A, e_C$ = espessuras das camadas de revestimento cerâmico, argamassa e concreto (cm);

$K$  = constante definida pela equação (11);

$E_L, E_A, E_C$ = módulo de elasticidade do revestimento cerâmico, argamassa e concreto (GPa);

$\delta$ = expansão por umidade do revestimento de 0,0003 a 0,0007 mm/mm;

Nas equações de (8) a (11) considera-se as forças atuantes no sistema devido a expansão por umidade e as características e propriedades dos materiais, como o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão por umidade e a espessura das camadas do revestimento. A argamassa de assentamento limita a expansão por umidade, restringindo a movimentação e gerando consequentemente esforços de cisalhamento que podem ocasionar o rompimento da argamassa.

Observa-se na Tabela 1 o resultado de dois exemplos de cálculo para os esforços no revestimento cerâmico, na argamassa e no concreto devido a expansão por umidade. A variação do módulo de elasticidade da argamassa, de 14 para 4 GPa, mostra variações mais evidentes nos esforços na própria argamassa apresentando pequenas variações nos esforços na placa cerâmica e do concreto.

Tabela 1- Exemplo de cálculo de esforços devido a expansão por umidade

DADOS DA AMOSTRA	UNID.	EXEMPLO 1	EXEMPLO 2
Módulo de elasticidade do concreto ( $E_c$ )	GPa	30,00	30,00
Espessura do concreto ( $e_c$ )	cm	20,0	20,0
Módulo de elasticidade do revestimento cerâmico ( $E_L$ )	GPa	41,0	41,0
Espessura do revestimento ( $e_L$ )	cm	0,5	0,5
Expansão por umidade do revestimento ( $\delta$ )	mm/mm	0,0006	0,0006
Módulo de elasticidade da argamassa ( $E_A$ )	GPa	<b>14,0</b>	<b>4,0</b>
Espessura da argamassa ( $e_A$ )	cm	2,5	2,5
Forças no revestimento ( $N_L$ ) equação (8)	N	-1191,5	-1190,0
Forças na argamassa ( $N_A$ ) equação (9)	N	65,7	19,5
Forças no concreto ( $N_C$ ) equação (10)	N	1125,9	1170,5
Constante ( $K$ ) definida pela equação (11)		0,969	0,967
Esforços no revestimento ( $\sigma_L$ ) equação (8)	MPa	-23,83	-23,80
Esforços na argamassa ( $\sigma_A$ ) equação (9)	MPa	0,263	0,078
Esforços no concreto ( $\sigma_C$ ) equação (10)	MPa	0,563	0,585

Em relação as deformações nas camadas dos revestimentos oriundas de variações térmicas (aquecimento ou resfriamento), o revestimento pode apresentar esforços de compressão que aumentarão ou diminuirão com a variação da temperatura. O rompimento na ligação do revestimento/suporte poderá acontecer gradativamente após uma sequência de variações térmicas (CARLOS *et al.*, 2016; FIORITO, 2009; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

Considerando um modelo sem restrições laterais, ou seja, permitindo variações dimensionais nas extremidades sem que haja algum tipo de travamento ou restrição aos esforços e deformações, pode-se estimar os esforços atuantes. Devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica nas camadas do sistema de revestimento tem-se a compressão da placa cerâmica quando a temperatura externa da edificação é inferior à do ambiente interno, ou quando há queda bruscas de temperatura (Figura 3). As deformações e forças são expressas nas equações de (12) a (19) (FIORITO, 2009).

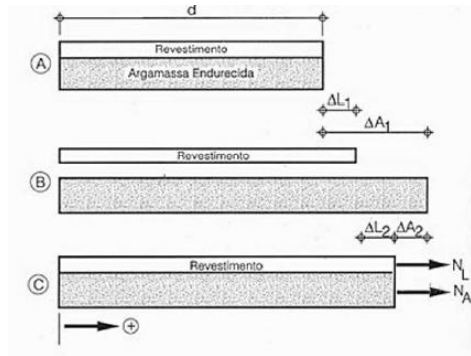


Figura 3- Esquema da dilatação térmica no revestimento cerâmico/argamassa (FIORITO, 2009).

$$\Delta L_1 = \alpha_L * \Delta t * d \quad (12)$$

$$\Delta A_1 = \alpha_A * \Delta t * d \quad (13)$$

$$\Delta L_2 = \frac{N_L}{E_L S_L} * (d + \Delta L_1) \quad (14)$$

$$\Delta A_2 = \frac{N_A}{E_A S_A} * (d + \Delta A_1) \quad (15)$$

$$N_A + N_L = 0 \quad (16)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta A_1 + \Delta A_2 \quad (17)$$

$$(1 + \alpha_L \Delta t) \cong (1 + \alpha_A \Delta t) \cong 1 \quad (18)$$

$$N_L = \frac{E_L S_L}{1 + \frac{E_L S_L}{E_A S_A}} * (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (19)$$

Onde:

$d$  = extensão do elemento (cm);

$S_L, S_A$  = seção do revestimento e da argamassa (cm);

$E_L, E_A$  = módulo de elasticidade do revestimento e da argamassa (GPa);

$\alpha_A, \alpha_L$  = coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa e do revestimento cerâmico ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$\Delta t$  = variação de temperatura uniforme ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta L, \Delta A, \Delta L_2, \Delta A_2$  = deslocamentos (cm);

$N_L$  e  $N_A$  = forças internas (N);

As deformações são resultantes da variação de temperatura no sistema e ocorrem em função dos coeficientes de dilatação térmica das camadas e sua extensão (equações (12)-(13)). Considerando o sistema em equilíbrio e a espessura de cada camada e seu respectivo módulo

de elasticidade calcula-se as forças internas atuantes conforme as equações (14) e (19). Para uma queda de temperatura uniforme em todo conjunto ocorre esforços de compressão no revestimento e de tração na argamassa e para uma elevada temperatura no conjunto há esforços de tração no revestimento e de compressão na argamassa. Para uma faixa de largura unitária: onde "e<sub>L</sub>" e "e<sub>A</sub>" são espessuras do revestimento e da argamassa, os esforços térmicos no revestimento e na argamassa, respectivamente, são descritas pelas equações (20) e (21) (FIORITO, 2009).

$$\sigma_L = \frac{E_L}{1 + \frac{E_L e_L}{E_A e_A}} (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (20)$$

$$\sigma_A = \frac{N_A}{e_A} \text{ Sendo } N_A = - \frac{E_L S_L}{1 + \frac{E_L S_L}{E_A S_A}} * (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (21)$$

Observa-se na Tabela 2 o resultado de dois exemplos de cálculo dos esforços devido a variação térmica, calcula-se as forças internas para largura unitária e para uma variação de 10°C e 20°C. Os esforços encontrados no revestimento cerâmico e na argamassa se mostram proporcionais a variação da temperatura.

Tabela 2- Exemplo de cálculo de esforços devido a expansão pela variação de temperatura

DADOS DA AMOSTRA	UNID.	EXEMPLO 1	EXEMPLO 2
Módulo de elasticidade do revestimento (E <sub>L</sub> )	GPa	41,0	41,0
Espessura do revestimento (e <sub>L</sub> )	cm	0,5	0,5
Coefficiente de dilatação térmica linear do revestimento cerâmico α <sub>L</sub>	/ °C	0,0000068	0,0000068
Módulo de elasticidade da argamassa (E <sub>A</sub> )	GPa	14	14
Espessura da argamassa (e <sub>A</sub> )	cm	2,5	2,5
Coefficiente de dilatação térmica linear da argamassa α <sub>A</sub>	/ °C	0,0000115	0,0000115
Variação de temperatura uniforme ΔT	(°C)	10	20
Forças no revestimento (N <sub>L</sub> ) equação (19)	(N)	0,608	1,215
Forças na argamassa (N <sub>A</sub> ) equação (16)	(N)	-0,608	-1,215
Esforços no revestimento cerâmico (σ <sub>L</sub> ) equação (20)	MPa	1,215	2,430
Esforços na argamassa (σ <sub>A</sub> ) equação (21)	MPa	-0,243	-0,486

Saraiva, Bauer e Bezerra (2002) desenvolvem e aplicam uma metodologia, empregando elementos finitos, para investigação dos esforços e deformações no revestimento cerâmico sob a ação da temperatura. A análise por modelação numérica considera um sistema restringido (Figura 4) de forma que não seja permitido variações dimensionais em suas extremidades. É aplicado um carregamento térmico estacionário no momento de máxima energia térmica (maior temperatura externa), havendo um gradiente térmico entre a fachada e interior da edificação. Os níveis de esforços normais ao longo do eixo Y entre a camada de argamassa colante e peças cerâmicas do sistema de revestimento com emboço com 20 mm são apresentadas na Figura 5.

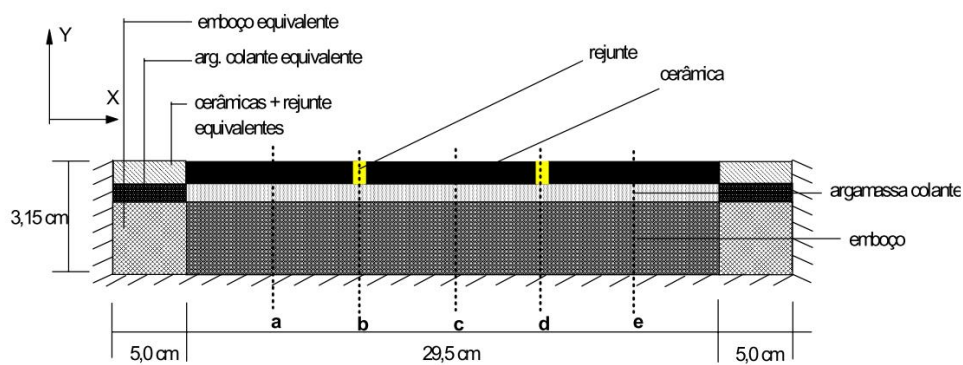


Figura 4- Modelo com condições de contorno e os pontos de análise (SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 2002)

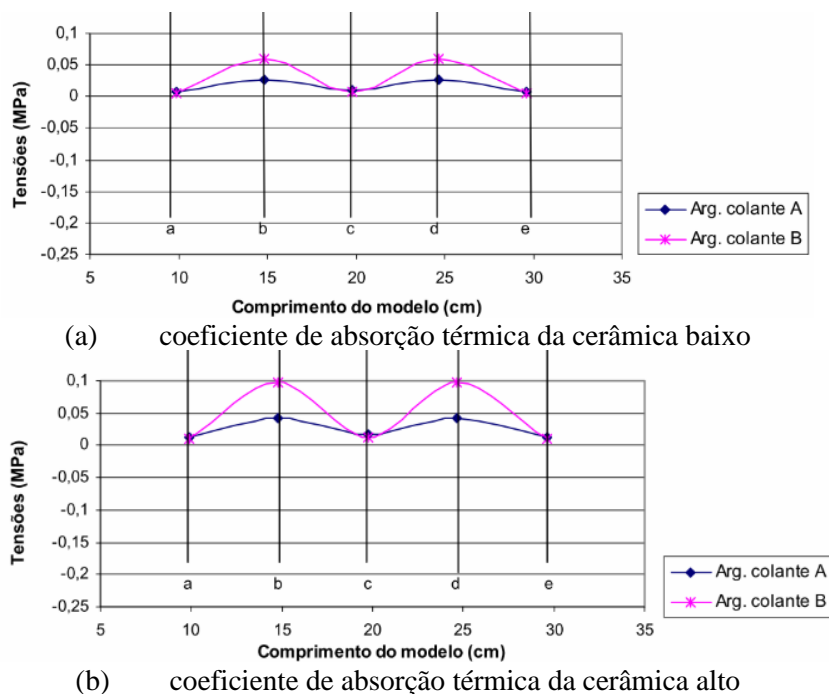


Figura 5- Esforços normais ao longo do eixo y e entre a argamassa colante e peças cerâmicas + rejunte (SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 2002)

As argamassas colantes A e B apresentam respectivamente coeficientes de dilatação térmica de  $7,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  e  $8,7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Os maiores esforços térmicos são evidenciados no rejunte, pontos b e d, para ambas as análises. Observa-se que no modelo com peças cerâmicas com alto coeficiente de absorvância (cores escuras) os esforços térmicos aumentam em torno de 60% quando comparado o modelo com cerâmicas claras.

Temoche Esquivel (2009), traz uma formulação semiempírica proposta por Manson (1966). As equações de (22) a (24) consideram um sólido prismático homogêneo e isotrópico, sendo considerado um sistema bidimensional e com total restrição à deformação do prisma (Figura 6).

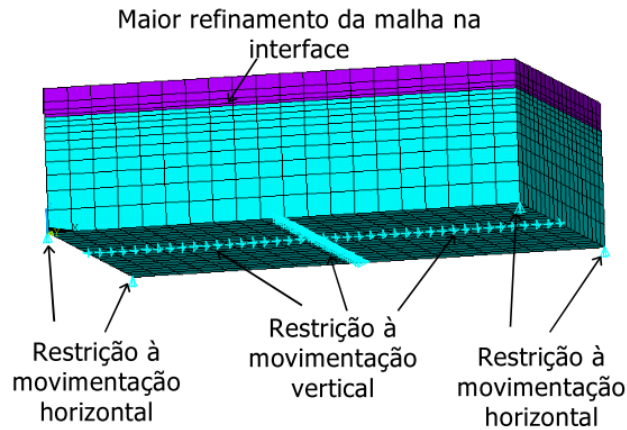


Figura 6- Condições de contorno e tipo de malha (TEMOCHE ESQUIVEL, 2009)

$$\sigma = \frac{\psi * E * \alpha (T_{sup} - T_{int})}{(1 - \nu)} \quad (22)$$

$$\psi^{-1} = 1,5 + \frac{3,25}{\beta} - 0,5 \frac{-16}{\beta} \quad (23)$$

$$\beta = \frac{hL}{K_{CT}} \quad (24)$$

Onde:

$\sigma$  = esforços térmicos (MPa)

$\psi$  = fator de atenuação dos esforços térmicos

$E$  = módulo de elasticidade do material (MPa)

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )

$T_{sup}$  = temperatura superficial ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{int}$  = temperatura interna no centro do corpo ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\nu$  = coeficiente de Poisson

$\beta$  = Número de Biot

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$L$  = espessura característica do material analisado (m)

$K_{CT}$  = coeficiente de condutividade térmica ( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

A equação (22) considera o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica e o coeficiente de Poisson do material, sendo a tensão de tração normal variável conforme diferença de temperatura entre as superfícies do corpo. Essa formulação considera o fator de atenuação dos esforços térmicos, equação (23), que é calculado utilizando-se do número de Biot (equação (24)), o qual representa a medida da queda de temperatura no sólido em relação à diferença de temperaturas entre a superfície do sólido e o fluido (ar). Em outras palavras o número de Biot é uma relação entre as resistências térmicas dos materiais.

Observa-se na Tabela 3 o resultado de dois exemplos de cálculo para os esforços térmicos no revestimento cerâmico segundo Temoche Esquivel (2009).

Tabela 3- Exemplo de cálculo de esforços devido a variação de temperatura

<b>DADOS DA AMOSTRA</b>	<b>UNID.</b>	<b>EXEMPLO 1</b>	<b>EXEMPLO 2</b>
<b>Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)</b>	( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ )	100	100
<b>Espessura do revestimento (L)</b>	cm	0,5	0,5
<b>Coeficiente de condutividade térmica (<math>K_{CT}</math>)</b>	( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	0,4924	0,4924
<b>Módulo de elasticidade do revestimento (<math>E_L</math>)</b>	GPa	41	41
<b>Coeficiente de dilatação térmica linear do revestimento cerâmico <math>\alpha_L</math></b>	/ $^{\circ}\text{C}$	$6,0 * 10^{-6}$	$6,0 * 10^{-6}$
<b>Coeficiente de poisson (<math>\nu</math>)</b>		0,2	0,2
<b>Varição de temperatura entre a superfície e o interior do corpo <math>\Delta t</math></b>	( $^{\circ}\text{C}$ )	<b>10</b>	<b>20</b>
<b>Número de Biot (<math>\beta</math>)</b>		1,02	1,02
<b>Fator de atenuação dos esforços térmicos (<math>\psi</math>)</b>		$-1,81 * 10^{-5}$	$-1,81 * 10^{-5}$
<b>Esforços no revestimento cerâmico (<math>\sigma</math>) equação</b>	MPa	-0,63	-1,26



Nos exemplos de cálculo da Tabela 3 as forças internas são calculadas para largura unitária. Observa-se, pela variação da temperatura entre a superfície e o interior do corpo, considerada nos exemplos de 10°C e de 20 °C, que os esforços térmicos ocorrem de maneira proporcional a variação da temperatura.

Fiorito (2009) considera um sistema sem restrições laterais, o que difere das metodologias de Saraiva, Bauer e Bezerra (2002) e Temoche Esquivel (2009) que consideram um sistema restringido. Os autores também diferem na consideração da variação da temperatura, a metodologia de Saraiva, Bauer e Bezerra (2002) considera os esforços pela variação da temperatura externa e interna da edificação. O equacionamento de Fiorito (2009) é calculado conforme a amplitude da temperatura ocorrida no sistema de revestimento. A metodologia descrita por Temoche Esquivel (2009) calcula os esforços em função do gradiente de temperatura entre a superfície externa e na peça cerâmica.

A partir da simulação higrotérmica é possível obter dados de temperatura do ambiente externo e interno, na superfície externa e a peça cerâmica bem como a variação da temperatura no sistema de revestimento de forma horária durante todo o ano. Logo, as metodologias de cálculo apresentadas por Fiorito e por Temoche Esquivel são passíveis de aplicação na modelação da degradação utilizando as equações (20) e (22).

## 2.2 DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

A ISO 15686-1 (2011), identifica e estabelece os princípios e procedimentos que se aplicam ao projeto no planeamento da vida útil das edificações já construídas. Essa norma define como agente de degradação tudo aquilo que ao agir sobre um sistema contribui para reduzir o desempenho, sendo variável conforme o nível de incidência do agente e a ocorrência do mecanismo de degradação. Um agente/fator de degradação afeta negativamente o desempenho dos componentes e materiais de construção, podendo incluir fatores climáticos, biológicos, incompatibilidade de uso, esforços, dentre outros (ASTM E632-82, 1996). Para fachadas com revestimento cerâmico pode-se destacar os agentes de degradação biológicos (como fungos emboloradores, por exemplo), esforços (movimentações dimensionais relativas as variações de temperatura e umidade), fatores atmosféricos (radiação solar, chuva dirigida), dentre outros. O desempenho de uma edificação está ligado a sensibilidade de cada sistema construtivo aos diferentes agentes/fatores de degradação, dependendo do tipo de ação e mecanismos

envolvidos. Um sistema com maior sensibilidade a um agente de degradação poderá desencadear de maneira mais rápida os mecanismos de degradação, favorecendo a ocorrência e evolução de anomalias e a perda de desempenho do sistema.

Os agentes de degradação por meio dos mecanismos modificam as propriedades do componente ou material de forma negativa podendo afetar seu desempenho e funcionalidade (Figura 7). Os mecanismos de degradação são processos que causam alterações ao longo do tempo na composição ou microestrutura do componente ou material, podendo causar degradação. Estes mecanismos ocorrem em decorrência da sequência de modificações físicas e/ou químicas que prejudicam as propriedades de um elemento ou material quando exposto a um ou mais agentes de degradação por um determinado tempo (ISO 15686-2, 2012). Os mecanismos são variáveis em função dos materiais empregados bem como do projeto e técnicas construtivas utilizadas.

Para que aconteça a ação dos mecanismos de degradação é necessário a existência de um sistema construtivo (estrutura física), onde ocorrerá a modificação. Se o elemento construtivo não for abastecido com energia a modificação em sua estrutura deve ser termodinamicamente favorável. As fachadas das edificações tendem a se degradar, em decorrência dos mecanismos de degradação principalmente devido a deformações na alvenaria, cristalizações de sais (eflorescências), concentração de esforços, ciclos de umidificação e secagem, retração da argamassa dentre outros (BAUER; SOUZA, 2022; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020; CARRETERO-AYUSO; MORENO-CANSADO; GARCÍA-SANZ-CALCEDO, 2019b; HERWEGH *et al.*, 2015; SILVESTRE; DE BRITO, 2011).

Os processos de iniciação e propagação da degradação ocorrem de maneira singular para cada sistema, levando a necessidade de um estudo detalhado das falhas e origens (FARMER, 2004). Pode-se considerar que a iniciação da degradação ocorre até o limite de vida útil da edificação e que a fase de propagação ocorre a partir do momento em que limite de vida útil é excedido (BAUER; SOUZA, 2022; BORDALO *et al.*, 2011). Cada um dos agentes de degradação atua de maneira singular em cada sistema e sua influência conjunta também é significativa. Para estimativas de vida útil, não se deve considerar apenas um fator ou agente de degradação, mas sim a sinergia dentre os fatores envolvidos, os quais afetam diretamente o desempenho do material ou componente (ISO 15686-1, 2011).

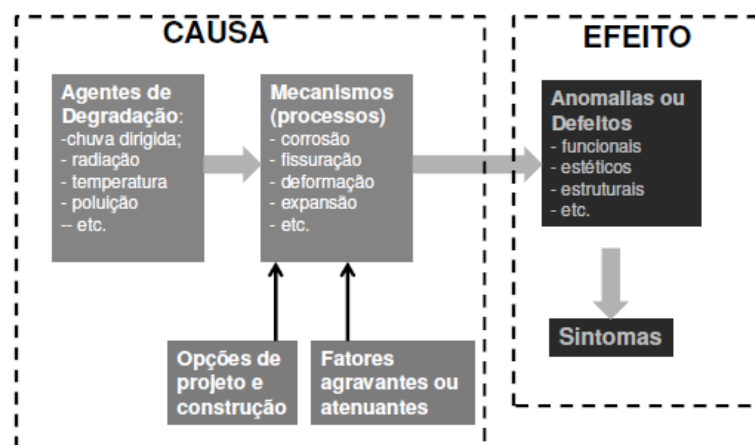


Figura 7- Causas, fatores, efeitos e sintomas (CÓIAS, 2009)

Os mecanismos se mostram distintos e peculiares tanto para as causas como para a propagação das anomalias. Ao se associar as anomalias e os mecanismos, as fissuras e os descolamentos se mostram condicionadas por esforços e deformações, enquanto manchas, pulverulência e eflorescências são mais influenciados pela molhagem e secagem (chuva dirigida). Estes processos ocorrem devido aos ciclos diários de variação de temperatura e umidificação e secagem, favorecendo a evolução da degradação (VALIATI, 2009; WETZEL *et al.*, 2012a; WINNEFELD *et al.*, 2012). Os mecanismos de degradação são variáveis em função dos materiais empregados (opções de projetos) e ocorrem com a incidência de certo nível do agente de degradação, podendo resultar nas anomalias ou defeitos (BAUER; SOUZA, 2022; FIORITO, 2009; MAIA; RAMOS; VEIGA, 2019; SILVA *et al.*, 2014).

As patologias são defeitos/falhas que surgem no revestimento afetando a fachada da edificação desde níveis estéticos até casos mais graves que representem riscos à segurança dos usuários (SILVESTRE, 2005). Pode-se classificar as patologias encontradas em fachadas cerâmicas em quatro grupos principais (BAUER; SOUZA, 2022; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020; BORDALO *et al.*, 2011; CARRETERO-AYUSO; MORENO-CANSADO; GARCÍA-SANZ-CALCEDO, 2019a; PEREIRA; BRITO; SILVESTRE, 2018):

- Descolamento: Todo desprendimento de peça cerâmica independente da causa ou modo de ocorrência.
- Fissuração: Fissuras no revestimento cerâmico independente da sua manifestação e origem.
- Falha nas juntas: Anomalias observadas nas juntas como fissuras ou falhas no selante.
- Manchas: Manchas na superfície de qualquer natureza, como, por exemplo, eflorescências.

O descolamento cerâmico é apontado por diversos pesquisadores como a anomalia mais severa em fachadas (BAUER *et al.*, 2011, 2014; BAUER; SOUZA, 2022; BORDALO *et al.*, 2010; CARASEK *et al.*, 2014; CARRETERO-AYUSO *et al.*, 2021; PIAZZAROLLO, 2019; SILVA *et al.*, 2014; SILVESTRE; DE BRITO, 2011). O descolamento ocorre pela perda ou falha na aderência entre as camadas do sistema de revestimento cerâmico. As falhas na aderência estão ligadas frequentemente a erros de construção, como uma camada de emboço com baixa aderência superficial, erros de colagem da peça cerâmica ou rejuntas inadequados com rigidez excessiva. O descolamento também pode ocorrer devido a causas físico e mecânicas, como a deformação da base (alvenaria, estrutura) e os efeitos de umidificação/secagem e aquecimento/resfriamento que ocorrem nas fachadas.

O desempenho de uma fachada é afetado pela ocorrência das anomalias e pela forma como cada uma afeta o sistema, podendo ser desde uma alteração estética até um problema estrutural. A quantificação das patologias presentes nas fachadas pode ser realizada a partir de metodologias de inspeção como o MMD (Método de Mensuração da Degradação), o qual possui metodologias para quantificação das patologias e ponderação da degradação a partir de indicadores de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

### 2.3 INDICADORES DE DEGRADAÇÃO

A quantificação das anomalias é parte do estudo da degradação das fachadas. Este processo auxilia na determinação do estado da vida útil do revestimento. A quantificação muitas vezes é modelada e expressa em indicadores de degradação os quais são determinados em função das anomalias presentes e da área proporcional afetada. Os estudos são condicionados por suas respectivas bases de dados, as quais apresentam características intrínsecas das amostras (SILVESTRE; BRITO, 2009; SOUZA; PIAZZAROLLO; BAUER, 2019).

O índice de severidade da degradação ( $S$ ) é um indicador de degradação amplamente estudado em Portugal (BORDALO *et al.*, 2010; BRITO; GASPAS; SILVA, 2013; GASPAS; BRITO, 2008; SILVA; BRITO; GASPAS, 2011), mesmo apresentando algumas diferenças entre as pesquisas o índice calcula a severidade da degradação da fachada, equação (25) (BORDALO *et al.*, 2010), como a razão entre o somatório do produto da área afetada pelas anomalias ( $A_n$ ) e seu respectivo nível de condição ( $K_n$ ) e importância relativa ( $K_{a,n}$ ) pelo produto da área da

fachada ( $A$ ) multiplicado pelo somatório do pior nível de condição das anomalias identificadas ( $\sum K_{m\acute{a}x}$ ).

$$S = \frac{\sum(A_n * K_n * K_{a,n})}{A * \sum(K_{m\acute{a}x})} \quad (25)$$

Onde:

$S$  = Severidade da Degradação;

$A_n$  - área do revestimento afetada por dada anomalia;

$k_n$  - fator multiplicativo das anomalias  $n$ , em função do seu nível de degradação (varia entre 0 e 4);

$k_{a,n}$  - coeficiente de ponderação correspondente ao peso relativo da anomalia;

$A$  - área total do revestimento;

$\sum(k_{m\acute{a}x})$  - somatório das constantes de ponderação correspondentes aos níveis de condição mais elevada da degradação de um revestimento de área  $A$  - somatório que toma o valor  $14 (2 + 4 + 4 + 4)$ .

Gaspar e Brito (2008) classificam cada fachada de 0 a 4 em função do nível das anomalias identificadas sendo 0 mais branda (sem degradação) e 4 mais avançada. Bordalo *et al.* (2010a) ao calcular o Índice de Severidade da Degradação para fachadas com revestimento cerâmico ressaltam que a degradação não pode ser modelada com rigor analisando apenas a idade, pois existem outros fatores que influenciam o processo de degradação. Silva, Brito e Gaspar (2011), determinam o Índice de Severidade para revestimentos pétreos demonstrando o estado global de degradação dos revestimentos. Brito, Gaspar e Silva. (2013) ao calculam o índice de Severidade da Degradação para a fachada como um todo, mesmo havendo tipos de revestimentos diferentes. Ao modelar a degradação utilizando a análise de regressão simples não linear, estes pesquisadores afirmam que a idade da edificação explica mais de 70% da severidade da degradação.

O Método de Mensuração de Degradação (MMD), que quantifica a degradação por meio da inspeção de edifícios, é aplicado por pesquisadores da Universidade de Brasília que fazem parte do DMM *Project* (BAUER, 2021; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020; PIAZZAROLLO, 2019; PINHEIRO; BAUER; SOUZA, 2017; SOUZA, 2019; SOUZA; BAUER, 2020). O MMD é extremamente útil no estudo da degradação de fachadas, possibilitando observar como ocorre o processo de degradação nas diferentes orientações de

uma edificação ao longo da vida útil. A aplicação do MMD permite melhorias nos estudos de durabilidade e auxilia no desenvolvimento de modelos mais precisos para quantificar a degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

A metodologia do MMD permite a quantificação da degradação e cálculo dos indicadores de degradação de edificações com semelhanças construtivas. Inicialmente são definidos dois indicadores de degradação o Fator de Dano (FD) e o Fator Geral de Degradação (FDG), ambos são calculados conforme equações de (26) a (28).

$$FD_{anom} = \frac{A_{d(n)}}{A_t} \times 100 \quad (26)$$

$$FD = \sum_{i=0}^n FD_{anom} \quad (27)$$

$$FGD = \frac{\sum A_{d(n)} \cdot G_{(n)} \cdot RI_{(n)}}{A_t \cdot \sum G_{máx}} \quad (28)$$

Onde:

$FD_{anom}$  = Fator de Danos para cada anomalia;

$FD$  = Fator de Danos;

$A_{d(n)}$  = área de determinada anomalia ( $n$ ) em  $m^2$ ;

$A_t$  = área total da amostra de fachada em  $m^2$ ;

$FGD$  = Fator Geral de Degradação (%);

$G_{(n)}$  = Nível de gravidade das anomalias (Tabela 23 e Tabela 24, anexo I);

$RI_{(n)}$  = Importância relativa das anomalias (Tabela 25, anexo I);

$G_{máx}$  = constante equivalente ao nível da pior condição ( $kmáx = 14$ );

$n$  = (n=1 descolamento, n=2 fissuras, n=3 falha nas juntas, n=4 manchas).

O FGD (equação 28) avalia a degradação em toda a amostra de fachada, quanto mais alto valor maior a gravidade da degradação. A amostra excede seu limite de vida útil com valores de FGD superiores a 0,05. Com o  $FD_{anom}$  (equação (26)) pode-se analisar a incidência de degradação para cada anomalia. O fator de danos FD, equação (27), realiza a soma de todos dos os  $FD_{anom}$  (equação (26)), ou seja, o somatório do fator de danos de cada grupo de anomalia analisado, representando uma frequência total da degradação na amostra (BAUER; SOUZA, 2022; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020; SOUZA; PIAZZAROLLO; BAUER, 2019).

Ao dividir a fachada analisada em zonas como mostra a (Figura 8), pode-se determinar indicadores de frequência (equação (29)) e gravidade do dano (equação (30)) em cada zona.

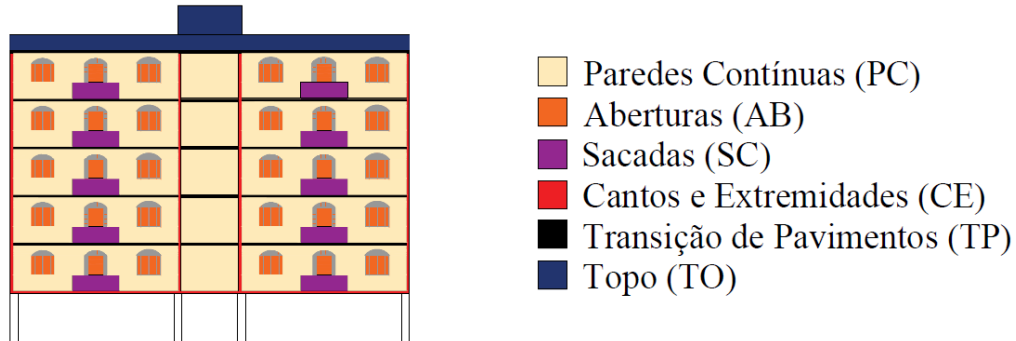


Figura 8- Exemplo de divisão da fachada em zonas

$$IFr_{(z)} = \frac{A_{An(z)}}{A} \quad (29)$$

$$IGr_{(z)} = \frac{A_{An(z)}}{A_{(z)}} \quad (30)$$

Onde:

$IFr_{(z)}$  = Índice de Frequência de Degradação da Zona;

$A_{An(z)}$  = Área degradada da zona z em m<sup>2</sup>;

$A$  = área da amostra em m<sup>2</sup>;

$IGr_{(z)}$  = Índice de Gravidade de Degradação;

$A_{(z)}$  = área específica da zona z da amostra em m<sup>2</sup>;

A partir do  $IFr_{(z)}$  é calculado em função de toda a área da amostra, possibilitando determinar em qual zona a degradação de cada anomalia é mais frequente. O  $IGr_{(z)}$  determina a gravidade da degradação em cada zona, ao dividir a área degradada em uma zona pela área dessa mesma zona. Os indicadores de frequência e gravidade da degradação nas zonas possibilitam a identificação das zonas mais críticas que afetam a degradação associando um padrão de falha (BAUER; SOUZA, 2022).

A aplicação do MMD e do indicador de degradação FGD permite estimar quando ocorre o limite de degradação do revestimento cerâmico (SOUZA; BAUER, 2020). Na Tabela 4 está detalhado os valores de FGD para cada nível de gravidade de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020) determinados a partir dos resultados da pesquisa realizada por Souza (2019).

Tabela 4- Níveis de gravidade de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020)

Gravidade	FGD	Estado da edificação
A	< 0,003	Degradação leve.
B	0,003 - 0,049	Degradação localizada, sem prejuízo ao desempenho.
C	0,050 - 0,169	Há a perda da funcionalidade e segurança do sistema, se excedendo o limite de degradação.
D	> 0,169	Degradação severa, com prejuízo ao desempenho e segurança dos usuários;

A condição A considerada como uma degradação leve, apresenta valores de FGD inferiores a 0,003. A condição B, possivelmente uma degradação pontual, apresenta valores de FGD entre 0,003 e 0,05. Já a condição C, ultrapassa o limite aceitável de degradação estando o FGD entre 0,05 e 0,17, nessa condição de degradação ações de manutenção já devem ser iniciadas. As degradações generalizadas são classificadas como Condição D, apresentando um FGD superior a 0,17.

Os indicadores de degradação se mostram como ferramentas úteis no estudo da evolução da degradação das fachadas visto que representam o estado atual de degradação da mesma e possibilitam identificar tanto as zonas quanto as anomalias que mais afetam a degradação ao associar aos padrões de falha mais relevantes (BAUER; SOUZA, 2022). Ao correlacionar os indicadores de degradação com os resultados da simulação higrotérmica torna-se possível compreender como os agentes climáticos de degradação se relacionam com a degradação medida em campo (SOUZA *et al.*, 2018).

## 2.4 SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

O WUFI® Pro é um dos vários *softwares* que podem ser utilizados para avaliação das condições higrotérmicas, amplamente empregado para as envoltórias das edificações. O programa realiza cálculos higrotérmicos e analisa os fluxos de calor e umidade atuantes nos elementos da fachada da edificação, considerando sua composição (alvenaria, argamassas, placas cerâmicas, dentre outros), dentre outros fatores como a umidade incorporada, chuva dirigida, radiação direta e refletida, transporte capilar e condensação (WUFI 2021).

Os dados de entrada da simulação são, dentro outros fatores, as condições iniciais, configuração dos componentes do sistema em estudo incluindo suas propriedades higrotérmicas, orientação



e inclinação da fachada (90°), coeficientes de transferência de calor à superfície e dados horários ao longo do ano simulado do clima interno e externo. Após realização da simulação, os dados de saída obtidos são as incidências dos agentes climáticos de degradação, dados de temperatura e umidade quantificados para o ambiente e cada camada do sistema em dados horários de todo um ano (DIN EN 15026, 2007).

O sistema de revestimento cerâmico de uma fachada é influenciado tanto pelo clima externo quanto pelo clima interno da edificação. A norma DIN EN 15026 (2007) estabelece equações para os cálculos de transferência de calor e umidade em regime não estacionário que podem ser utilizadas para determinação do clima interno, ou pode-se gerar um arquivo de clima interno específico para realização da simulação. Já o clima externo pode ser definido tendo por base arquivos climatológicos da localização das edificações em análise (ZANONI *et al.*, 2020).

Usualmente, os arquivos climatológicos empregados nas simulações higrotérmicas representam anos típicos de incidência de chuva, radiação, vento, dentre outros parâmetros. Estes arquivos referem-se a determinadas localizações podendo apresentar valores que expressam as maiores probabilidade de ocorrência (representativos) ou os valores que expressam as piores condições (críticos) da incidência dos agentes climáticos de degradação. Um arquivo de TMY (*Typical Meteorological Year*) é formado por 12 meses climáticos típicos e contém 8760 horas de dados de precipitação, radiação, temperatura do ar, umidade relativa, nebulosidade, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento. Um ano típico é composto pelos meses mais representativos de vários anos distintos. A análise é realizada respectivamente para o mesmo mês de vários anos, sendo excluído de maneira sucessiva os que apresentarem temperaturas mais quentes e mais frios, de forma que reste apenas um, sendo este considerado o mês típico do local. O TMY é formado por 12 meses reais, podendo ser de diferentes anos em um período de 10 anos a 30 anos no mínimo (COELHO; SILVA; HENRIQUES, 2018; RORIZ, 2012; ZANONI, 2015).

Em relação a chuva dirigida (parcela da chuva que incide diretamente sobre a fachada) o WUFI® Pro traz um método semiempírico para mensuração da mesma. A determinação da chuva dirigida é dependente da precipitação, da velocidade e direção do vento e da disposição de dados horários relacionados a esses parâmetros (BLOCKEN *et al.*, 2010; BLOCKEN;

CARMELIET, 2004; FREITAS, 2011; SOUSA *et al.*, 2018; SOUZA, 2019; ZANONI; SÁNCHEZ; BAUER, 2016).

Uma característica importante da peça cerâmica da fachada que deve ser empregada na simulação higrotérmica é sua absorvância (taxa de radiação absorvida pela superfície). A absorvância varia conforme características do material empregado e principalmente com a variação da cor, superfícies claras tem absorvâncias menores que superfícies escuras, o que influencia diretamente nas temperaturas da superfície externa da fachada (DORNELLES; RORIZ, 2007).

Antes de iniciar o processo de simulação deve-se inserir também as condições iniciais de temperatura e umidade relativa. Normalmente realiza-se o processo de simulação para 3 anos, desconsiderando os dois primeiros, sendo esses necessários para estabilização da umidade e temperatura nas superfícies (NASCIMENTO *et al.*, 2016; ZANONI, 2015). Os dados de saída fornecidos pelo programa consistem na distribuição dos fluxos e variações temporais da temperatura e umidade. Os resultados da simulação higrotérmica são importantes no estudo da degradação de fachadas, pois quantificam os níveis de incidência dos agentes climáticos, tal como chuva dirigida e radiação e mensuram os comportamentos do sistema em termos de fluxos de temperaturas e umidade para cada hora do ano simulado.

Souza (2019), aplica a simulação higrotérmica e quantifica os dados de radiação e chuva dirigida ao longo do ano, distribuindo-os nas respectivas orientações das fachadas, como observa-se na Figura 9 e na Figura 10.

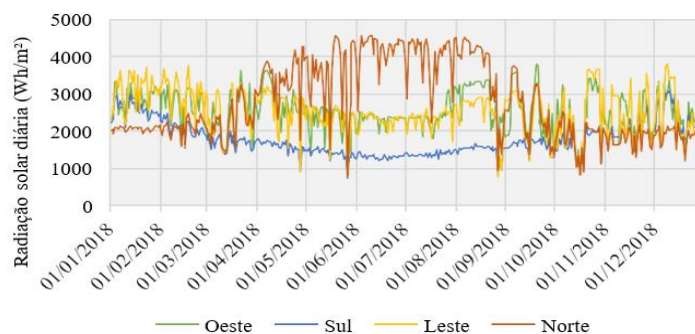


Figura 9- Radiação diária ao longo do ano para diferentes orientações (SOUZA, 2019)

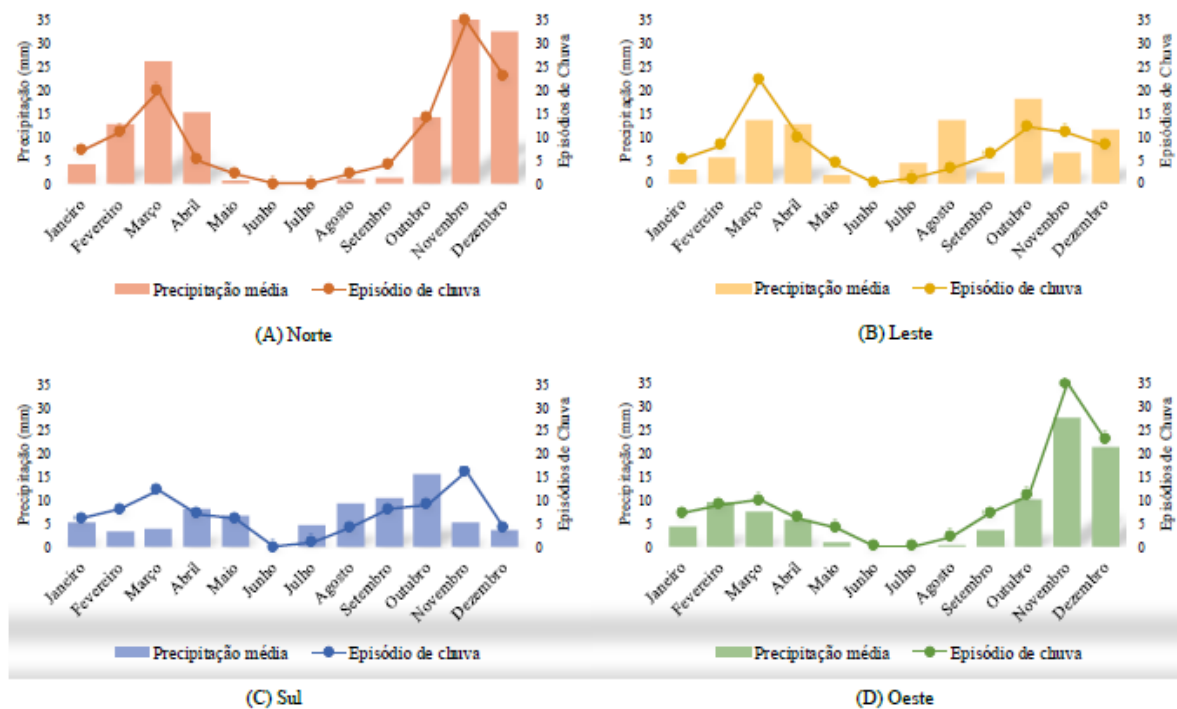


Figura 10- Volume de chuva dirigida acumulada e episódios de chuva ao longo do ano em função da orientação (SOUZA, 2019)

Observa-se nas figuras Figura 9 e Figura 10 respectivamente a radiação diária e o volume de chuva dirigida acumulada juntamente com os números de episódios de chuva dirigida para cada orientação. Em função dos maiores níveis de incidência dos agentes climáticos, as fachadas com orientação norte e oeste também se tornam mais suscetíveis a ocorrência de anomalias (SOUZA, 2019).

## 2.5 MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL

A vida útil de uma edificação representa o tempo que ela atende os requisitos e níveis de desempenho para os quais foi projetada. Para determinação da previsão de vida útil deve-se identificar as informações necessárias, selecionar ou executar de testes de avaliação e interpretar os resultados, analisando também a sensibilidade a degradação devido a intensidade dos agentes (ABNT NBR 15575-1, 2021; ISO 15686-2 2012; SILVESTRE; BRITO, 2009). No processo de análise da vida útil emprega-se funções que representam a evolução da degradação ao longo do tempo e também as curvas doses respostas, as quais trazem as ações de comportamento da edificação ou sistema frente a intensidade dos agentes de degradação (ISO 15686-2, 2012; NASCIMENTO *et al.*, 2016).

O processo de avaliação da vida útil dos sistemas construtivos apresenta diversos obstáculos, como a dificuldade de obtenção de dados históricos dos componentes e informações sobre a instalação e manutenções realizadas. Os processos de inspeção de edifícios dão correlação direta com o estado dos sistemas construtivos e o ambiente de exposição e o uso do edifício e as previsões de vida útil são melhoradas conforme há o aumento do conhecimento e casos estudados tendo por base pesquisas científicas (DANIOTTI; SPAGNOLO; PAOLINI, 2008). Os modelos de degradação ou de previsão da vida útil representam a evolução do processo de degradação ao longo do tempo e estimam o desempenho do sistema (ISO 15686-2, 2012). Os principais métodos de previsão de vida útil são:

- **Determinísticos:** São os mais simples (de fácil compreensão e aplicação) e consomem menos tempo, são fundamentados pelos agentes de degradação e seus mecanismos e resultam em uma função que permite estimar a vida útil.
- **Probabilísticos ou estocásticos:** São baseados em informações da probabilidade de deterioração do sistema, resultam em um possível intervalo de vida útil.
- **Engenharia:** Contemplam uma 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.

A modelação da degradação é avaliada inicialmente a partir dos métodos determinísticos, os quais dependem do conhecimento e experiência do profissional que os aplica. Os resultados dos métodos determinísticos servem de base para aplicação dos probabilísticos e de engenharia. A exemplo de métodos determinísticos pode-se realizar a modelação da degradação a partir da regressão simples e múltipla, linear e não linear, as quais fundamentadas pelos fatores e/ou agentes de degradação e seus mecanismos estimam a vida útil das edificações tendo por base uma função que correlaciona as variáveis pontuadas. A análise de regressão é utilizada como técnica estatística para previsão de uma variável dependente em função de uma ou mais variáveis independentes (CHEIN, 2019; MAROCO, 2007; SOUZA, 2019).

### *2.5.1 Regressão simples*

A regressão simples realiza a correlação da degradação em função do indicador de degradação e uma variável, escolhida dentre as variáveis que representam os fatores ou agentes de degradação. Podendo apresentar uma correlação linear ou não linear, variando conforme a

função matemática do modelo que melhor se ajusta a amostra. O modelo matemático apresenta uma tendência média dos valores, permitindo a análise por um diagrama de dispersão, o quanto a variável dependente é explicada pela variável independente (CHEIN, 2019; MAROCO, 2007; SILVA; BRITO; GASPAR, 2016; SOUZA, 2019).

A partir da regressão linear pode-se analisar a modelação da degradação pelo indicador de gravidade da degradação e sua respectiva idade. Esta análise permite o estudo gráfico da perda de desempenho dos revestimentos ao decorrer da idade da edificação. Este método por mais que seja simples de ser aplicado e adaptado as diferentes bases de dados não explica em totalidade a variabilidade da gravidade da degradação. Deve-se considerar a existência de outros fatores que explicam em conjunto com a idade a evolução da degradação em revestimentos. Utilizando uma simples análise de regressão pode-se analisar a evolução da degradação em revestimentos de fachada, buscando prever o comportamento de uma variável dependente com base em uma variável independente (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016). Pode-se dizer que a análise de regressão simples é usada para explicar a variabilidade de  $y$  em função de  $x$ , tal relação é expressa por meio da equação (31):

$$y = B_0 + B_1 \cdot x + \varepsilon \quad (31)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$B_0$  e  $B_1$  = coeficientes de regressão

$x$  = variável independente

$\varepsilon$  = erros do modelo

A evolução da degradação ao longo do tempo não ocorre necessariamente de forma linear, visto que a idade da edificação pode não ser capaz de explicar em totalidade a evolução da degradação. Portanto, para que um modelo seja mais próximo da realidade há a necessidade da inclusão de outras variáveis que afetam o processo de degradação (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

### 2.5.2 Regressão múltipla linear

Para definições dos diversos parâmetros que influenciam na evolução da degradação das edificações é útil a utilização de ferramentas de análise de regressão múltipla linear. Sendo uma

extensão da regressão simples, a regressão múltipla analisa a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, conforme equação (32), possibilitando a verificação de uma relação causa-efeitos. Ressalta-se a importância de uma análise criteriosa dos resultados encontrados, a fim de observar se estes estão de acordo com os mecanismos no âmbito físico do fenômeno (SOUZA *et al.*, 2018).

$$y = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + \dots + B_k \cdot x_k + \varepsilon \quad (32)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$B_0, B_1$  e  $B_k$  = coeficientes de regressão

$x_1, x_2$  e  $x_k$  = variáveis independentes

$\varepsilon$  = erros do modelo

Na regressão múltipla pode-se avaliar simultaneamente várias variáveis representativas dos fatores e agentes de degradação, os quais apresentam alta importância e correlação com a degradação, o que leva consequentemente a modelos mais eficazes na predição da vida útil. A eficácia dos modelos de regressão múltipla é diretamente dependente das variáveis incluídas no mesmo, portanto é importante a diferenciação entre as variáveis significativas e as não significativas por parâmetros estatísticos e em função de como ocorrem os mecanismos de degradação do sistema construtivo em análise (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

As variáveis incluídas no processo de modelação da degradação, ao possuir relação com o mecanismo de degradação do sistema em estudo, possibilitam a identificação de quais são as variáveis mais significativas. A evolução da degradação é complexa e influenciável por inúmeras variáveis. O modelo determinado pela regressão múltipla não irá representar de maneira global o comportamento da degradação mas, conforme a importância das variáveis consideradas, pode se aproximar dos valores de degradação determinados a partir de inspeções realizadas *in loco* (CHEIN, 2019; MAROCO, 2007; SHOHET *et al.*, 1999; SILVA; BRITO; GASPAR, 2016; SOUZA, 2019).

### 2.5.3 Regressão múltipla não linear

A regressão múltipla não linear, pode abranger mais de uma variável independente e produzir um modelo não linear. Os fenômenos reais, como a degradação, são expressos geralmente por

modelos não lineares. Este modelo busca elencar todas as variáveis significantes à modelação da degradação dos revestimentos de fachada. Este tipo de modelagem é mais complexo que a modelação pela regressão múltipla linear e a modelação pela regressão simples, visto que há uma maior exigência para análise do mesmo (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016)(SOUZA et al., 2018)(MAROCO, 2007).

A regressão múltipla não linear leva a uma expressão não linear que podem incluir como variáveis além da idade da edificação as características dos elementos analisados. Com a finalidade de avaliar adequadamente a degradação diversos modelos não lineares são propostos, apresentando relações de interação ou uma combinação de relações não lineares entre as variáveis independentes (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016). A exemplo tem-se a regressão polinomial, cujo modelo genérico está detalhado na equação (33), que é expressa como uma extensão da regressão múltipla:

$$y = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + \dots + B_i \cdot x_i + B_{12} \cdot x_1^2 + B_{22} \cdot x_2^2 + \dots + B_{ik} \cdot x_j^k + \varepsilon \quad (33)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$B_i$  = Coeficientes de regressão

$x_i$  = variáveis independentes

$\varepsilon$  = erros do modelo.

Considerado apenas a idade como variável independente pode-se utilizar a Curva de Gompertz, equação (34), para estudar a evolução da degradação ao longo do tempo, a qual é aplicada a diversas áreas do conhecimento, inclusive na vida útil de fachadas. De maneira semelhante a curva de Von Bertalanffy, equação (35), permite a quantificação do crescimento de organismos vivos relacionando seu tamanho (peso ou comprimento) com a idade. A partir de adaptações a curva de Von Bertalanffy pode ser aplicada como um modelo matemático que reflete a evolução da degradação ao longo do tempo. Com um novo paradigma para as curvas de crescimento a curva Richards, equação (36), de maneira análoga é expressa por uma função de quatro parâmetros com um ponto de inflexão variável (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016; SOUZA, 2019; SOUZA et al., 2018).

$$y = Ae^{-B_0e^{-B_1t}} \quad (34)$$

$$y = A(1 - B_0e^{-B_1t})^3 \quad (35)$$

$$y = A(1 - B_0 e^{-B_1 t})^m \quad (36)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$A$  = peso assintótico

$B$  = constante de integração

$e$  = base natural de logaritmo

$t$  = idade do elemento em análise

$m$  = parâmetro que molda a curva

A curva de Morgan-Mercer-Flodin, equação (37), com modificações, pode ser utilizada para modelação da degradação de revestimentos de fachada. A utilização de quatro parâmetros pode dar mais flexibilidade ao modelo, mas em contrapartida gera um maior risco de não convergência (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

$$y = \frac{B_1 B_2 + A x^{B_3}}{B_2 + x^{B_3}} \quad (37)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$A$  = peso assintótico

$B$  = constante de integração

$B_3$  = parâmetro que molda a curva ou o parâmetro de ponto de inflexão

$e$  = base natural logaritmo

$x$  = variável independente

A curva de Weibull, equação (38), foi elaborada em relação a fadiga do material, sua aplicação apresenta alta flexibilidade podendo ser utilizada inclusive em pequenas amostras e na modelação de fenômenos físicos relacionados a reabilitação. A distribuição exponencial, equação (39), pode ser considerada como um caso especial da curva de Weibull. As funções exponenciais se mostram útil na modelagem de ciclos de vida, tanto em organismos vivos quanto em materiais e equipamentos. O modelo potencial, equação (40), também pode ser aplicado a previsão da vida útil dos revestimentos de fachada, mesmo apresentando algumas limitações quando comparado com o modelo exponencial (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

$$y = A - B_0 e^{-B_1 x^{B_2}} \quad (38)$$



$$y = Ae^{B_1x_1+B_2x_2+\dots+B_ix_i} \quad (39)$$

$$y = \underline{A}(x_1^{B_1} + x_2^{B_2} + \dots + x_i^{B_i}) \quad (40)$$

Onde:

$y$  = variável dependente

$\underline{A}$  = peso assintótico

$B$  = constante de integração

$e$  = base natural do logaritmo

$x$  = variáveis independentes

Como visto, os modelos de regressão não linear são compostos por uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes e parâmetros de estimativa. A modelação da degradação é usada para compreensão de um comportamento através das equações matemáticas. Essas formulações não expressam perfeitamente a realidade modelada mas se aproximam dela, permitindo a compreensão e comparação quantitativa de parâmetros que influenciam na vida útil do elemento em análise (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

A modelação da degradação é definida no ajuste dos dados, de forma que o mesmo apresente um poder explicativo estatisticamente significativo. Na modelação da degradação é importante validar que o modelo seja capaz de expressar a realidade das amostras em questão, apresentando níveis de precisão e confiabilidade. Muitos dos modelos de previsão de vida útil são baseados em ferramentas matemáticas ou estatísticas, mas seu resultado também depende da perspectiva do pesquisador, visto que uma mesma evolução de degradação possa ser representada de duas ou mais maneiras distintas (BOCHEN; NOWOŚWIAT, 2019; SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

#### *2.5.4 Utilização da modelação no estudo da degradação*

Os modelos de degradação podem representar a evolução do processo de degradação ao longo do tempo e estimar o desempenho do sistema ao equacionar a evolução da degradação de forma quantitativa em relação às variáveis que o explicam (BAUER; SOUZA; MOTA, 2021; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020; GASPAR; BRITO, 2008; PIAZZAROLLO, 2019; PIAZZAROLLO; BAUER, 2018; SILVA; BRITO; DE BRITO, 2021; SILVA, 2014)

O fim da vida útil de um elemento de construção pode ser determinado pela obsolescência, desempenho econômico e durabilidade. A obsolescência dos sistemas construtivos ocorre nas condições em que estes deixam de ser funcionais podendo, por exemplo, resultar em sistemas tecnologicamente ultrapassados. O fim do desempenho econômico ocorre devido a depreciação do valor da edificação e quando reabilitações não são mais economicamente viáveis. A durabilidade remete ao tempo que a edificação atende as exigências de serviço impostas. Nesse contexto a vida útil da edificação representa o tempo em que esta atende aos requisitos e níveis de desempenho para qual foi projetada, sendo influenciada pela incidência de agentes de degradação e pela realização de manutenções dentre outros fatores (GASPAR, 2003; 15686-1, 2011).

As fachadas com revestimento cerâmico, mesmo apresentando maior vida útil quando comparadas com outros sistemas de revestimento, como por exemplo os sistemas em argamassa revestidos com pintura, estão sujeitas diariamente a diversos agentes de degradação que contribuem para o aparecimento de patologias (BAUER; SILVA, 2016; RODRIGUES, 2015). A existência de patologias em fachadas pode implicar na perda da capacidade do revestimento de exercer a função para o qual foi projetado. As patologias surgem em virtude da ocorrência dos mecanismos de degradação em função da incidência dos agentes de degradação, das características e propriedades do sistema, da ocorrência de erros construtivos, de erros de utilização e manutenção, dentre outros (ISO 15686-1, 2011; SILVESTRE, 2005).

Os modelos de previsão de vida útil apresentam algumas restrições como a variabilidade dos acontecimentos reais, a precisão do modelo estatístico, dentre outros. Devido a quantidade variável dos processos de degradação e das variáveis que a afetam a vida útil das edificações os modelos de previsão de vida útil podem não ser tão precisos quanto o esperado. Deve-se analisar os resultados dos modelos como uma aproximação do real, visto que a determinação do fim da vida útil de um sistema é complexa, sendo variável conforme critérios considerados (15686-1, 2011; SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

No Quadro 1 está detalhado algumas pesquisas e os respectivos parâmetros e variáveis consideradas no estudo da degradação.

Quadro 1- Parâmetros considerados na modelação da degradação

Pesquisas e Elemento construtivo	Variáveis consideradas	Metodologia	Variáveis significativas	Coefficientes de ponderação
<b>Gaspar e Brito (2008)</b> - Fachadas cimentícias.	Idade da edificação e o indicador do nível geral de degradação (S) ponderado pelo peso relativo de cada anomalia (manchas, fissuração, descolamento) conforme nível de degradação em função da área total afetada.	Regressão Simples Linear	Idade da edificação	$R^2= 0,97$
<b>Bordalo Et al. (2010)</b> - Fachadas com revestimento cerâmico.	Indicador de severidade de degradação ( $S_{w,c}$ ), realizando a ponderação das anomalias (anomalias visuais, fendilhação, anomalias em juntas, descolamento) com base no custo de reparação.	Regressão Simples Linear	Idade da edificação	$R^2= 0,74$
<b>Silva et al. (2011)</b> - Revestimentos de pedra natural de paredes (fixados diretamente ao suporte).	Índice de severidade da degradação ( $S_{w,rp}$ ) calculado pela ponderação relativa entre diferentes tipos de anomalia (visuais, em juntas, na fixação ao suporte, perda de integridade) em função dos custos de reparação das mesmas. Sendo analisado segundo as características do revestimento: tipo de pedra, cor da pedra, tipo de acabamento, proximidade ao mar, orientação, exposição ao vento e chuva, exposição a umidade.	Regressão Simples linear	Cor do revestimento, distância ao mar, alta exposição a chuva e vento;	$R^2= 0,82$
<b>Piazzarollo (2019)</b> - Revestimento Cerâmico.	Fator de danos (Fd) ponderado em função das zonas das fachadas, (fator geral de degradação (FGD) calculado pela importância relativa, custo de reparação e gravidade das anomalias descolamento cerâmico, fissuração, falha de rejunte e eflorescência), orientação e tipo de elemento construtivo.	Regressão múltipla linear	Fator de dano para paredes contínuas, sacadas, topo, aberturas, cantos e extremidades.	$R^2_a= 0,96$
<b>Souza (2019)</b> - Revestimento Cerâmico.	Fator geral de degradação (FGD) calculado pela ponderação das anomalias (descolamento cerâmico, fissuração, falha nas juntas e eflorescência) em função da gravidade e importância relativa, ponderado pelas características do revestimento: 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.	Regressão múltipla linear	Idade, Proteção, Dimensão, Orientação.	$R^2_a= 0,60$
		Regressão Múltipla não Linear (Gompertz)	Idade, Proteção, Dimensão, Orientação	$R^2_a= 0,65$

Devido a quantidade de variáveis que afetam a degradação é notório a variabilidade das adotadas nas pesquisas do Quadro 1. As variáveis mais recorrentes é idade e a orientação da fachada que, respectivamente, representam o tempo total de incidência de agentes e/ou fatores de degradação e as diferenças nas incidências conforme orientação solar. As demais variáveis consideradas pelos autores são, na visão deles, as variáveis passíveis de determinação para as amostras em análise e que também influenciam no desempenho do sistema. A eficácia de cada variável pode ser determinada tendo por base análises estatísticas que determinam o quanto aquela variável é representativa na formulação do modelo de degradação em questão (MAROCO, 2007).

Ressalta-se que o estudo e modelação da degradação a partir de uma base de dados é condicionada a mesma. Os agentes e mecanismos de degradação são particulares as edificações da base de dados bem como os critérios pré-estabelecidos de vida útil e variáveis consideradas, logo a comparação e aplicação de um modelo com outras bases de dados diferentes da qual foi desenvolvido pode levar a resultados equivocados, sendo necessário uma análise crítica dos resultados (BAUER; SOUZA, 2022).

No processo de modelação algumas propriedades consideradas são quantificadas facilmente, como a altura da edificação, mas em contrapartida a exposição aos agentes climáticos de degradação muitas vezes é incluída como uma escala qualitativa, como alta e baixa exposição. A análise qualitativa na modelação da degradação pode levar a erros nos resultados do modelo, sendo necessário a transformação da influência desses agentes em valores quantitativos (SILVA; BRITO; GASPAR, 2016).

### 3 METODOLOGIA

Se propõem nesta investigação estudar o processo de degradação de fachadas com revestimento cerâmico utilizando o indicador de degradação (FGD) e os resultados da simulação higrotérmica. Com a simulação higrotérmica estima-se de maneira quantitativa os índices ponderados dos níveis de incidência dos agentes climáticos e as variáveis de comportamento do sistema de revestimento de fachadas em termos de fluxos de temperatura e umidade. A modelação da degradação consiste na correlação das variáveis de comportamento com os respectivos indicadores de degradação mensurados em edificações de Brasília. Observa-se na Figura 11 o fluxo de desenvolvimento da pesquisa.

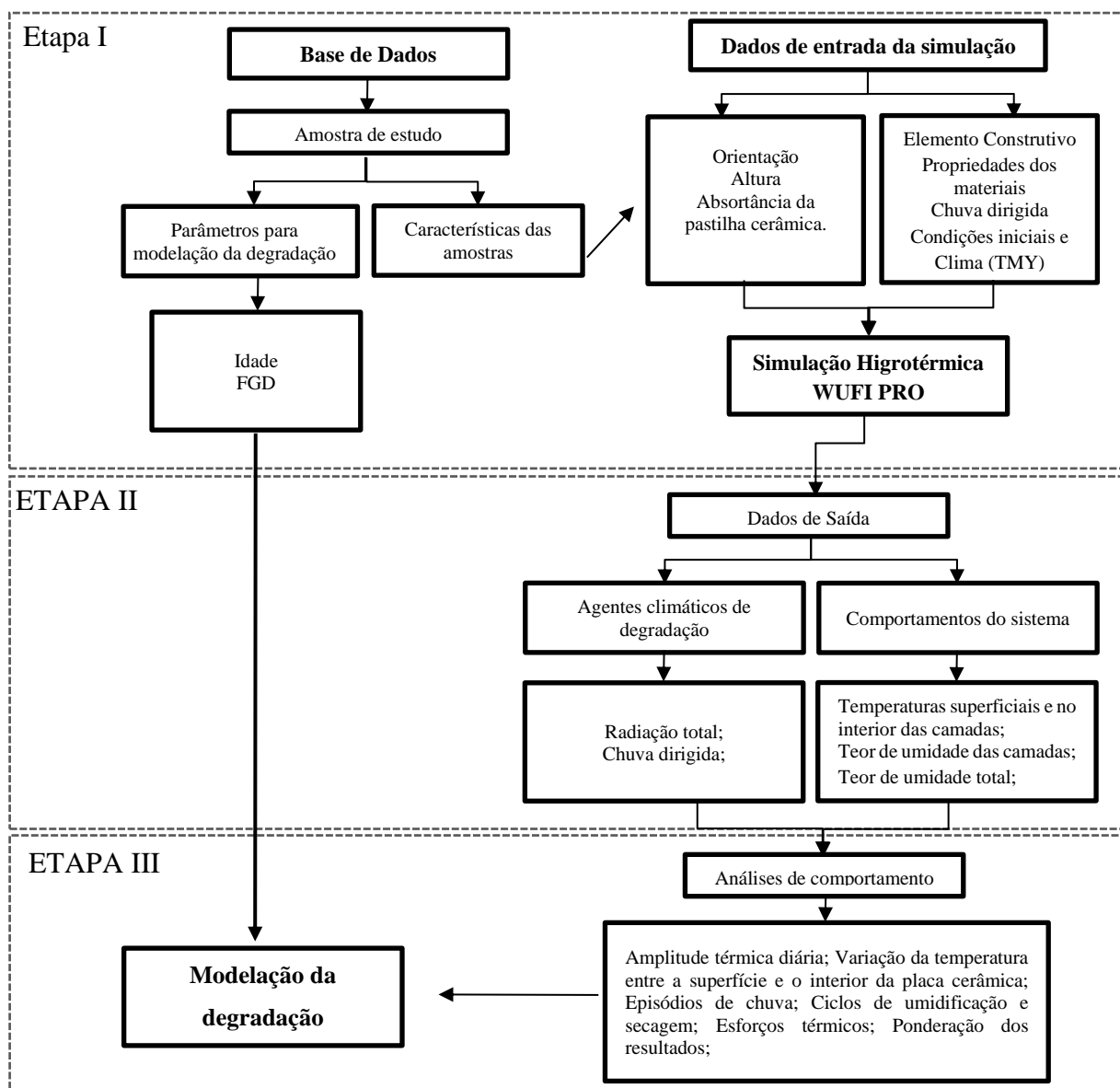


Figura 11- Procedimentos Metodológicos

Na etapa I, a partir da base de dados do *DMM Project*, seleciona-se as edificações que compõem a amostra de estudo contendo seus respectivos indicadores de degradação e idade, bem como as características do sistema de revestimento que serão utilizadas na simulação higrotérmica. Realiza-se simulação higrotérmica efetuando o preenchimento dos dados de entrada no *software* e definição das condições iniciais, bem como as demais informações pertinentes.

Na etapa II inicia-se a análise dos dados de saída da simulação com a quantificação dos agentes de degradação radiação solar e chuva dirigida e quantificação dos comportamentos do sistema de revestimento em termos de variações de fluxos de calor e umidade nas camadas do sistema.

Na etapa III realiza-se inicialmente as análises de comportamento do sistema, realizando a ponderação em índices específicos para correlação com o Indicador de degradação. A modelação da degradação é realizada tendo por base índices ponderados, resultantes da simulação higrotérmica, com a idade da fachada e seu respectivo indicador de degradação FGD. O modelo proposto é então utilizado para estimar a idade das edificações em cada nível de gravidade de degradação.

Pode-se observar no Quadro 2, as variáveis de entrada da pesquisa bem como as variáveis de saída que se espera obter.

Quadro 2- Variáveis da pesquisa

Entrada	Saída
Características do elemento construtivo; Propriedades dos materiais; Condições iniciais e clima (TMY); Orientação e altura da edificação; Absortância da pastilha cerâmica; Indicador de degradação (FGD);	Radiação total; Chuva dirigida; Temperaturas superficiais e no interior das camadas; Teor de umidade das camadas e total; Ciclos de umidificação e secagem; Episódios de chuva e molhagem; Amplitude térmica; Esforços térmicos; Modelação da degradação;

### 3.1 AMOSTRAS DE ESTUDO

As edificações analisadas nessa pesquisa pertencem ao projeto “*DMM Project*” (Degradação: mensuração e modelação) (BAUER, 2021) desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB). A base de dados do *DMM Project* contempla parâmetros de degradação, como o indicador de degradação (FGD) e características das amostras, tal como orientação, localização e idade para

edificações com características construtivas semelhantes. Em Brasília o clima é considerado como Tropical de Altitude, apresentando um período chuvoso e um período seco, conforme a classificação de Köppen (BAUER; SOUZA; MOTA, 2021; BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020). Brasília está localizada na zona bioclimática 4, que é caracterizada por ser relativamente árida apresentando entre o dia e a noite grandes variações de temperatura (ABNT NBR 15220-3, 2005).

Seleciona-se as edificações de estudo em quatro faixas de idade: de 10 a 20 anos, 20 a 30 anos, 30 a 40 anos e superior a 40 anos. Buscando uma seleção de edificações que melhor representassem o conjunto como todo, é escolhido em cada faixa de idade três edificações evitando, quando possível, que se repetisse idades e buscando que os indicadores de degradação se mostrassem menos dispersos em função da curva de degradação da base de dados. As fachadas das edificações selecionadas são inspecionadas seguindo metodologia do MMD, detalhada no anexo I, a qual separa a fachada da edificação em amostras para quantificação da degradação. As amostras de fachadas considerados no MMD são um trecho da fachada o qual é pré-determinado em função de sua área e elemento construtivo e inspecionado para cálculo do indicador de degradação. Observa-se na Tabela 5 as características das amostras das 12 edificações selecionadas contendo um total de 100 amostras de fachada.

Tabela 5- Quantitativo das amostras de fachadas analisadas

<b>Porcentagem de amostras de fachada por faixas de idade</b>	<b>10 - 20</b>	<b>21%</b>
	<b>20 - 30</b>	15%
	<b>30 - 40</b>	43%
	<b>&gt; 40</b>	21%
<b>Porcentagem de amostras de fachada por Orientação</b>	<b>Norte</b>	37%
	<b>Sul</b>	29%
	<b>Leste</b>	20%
	<b>Oeste</b>	14%
<b>Áreas e ocorrência de patologias na área degradada</b>	<b>Área total (m<sup>2</sup>)</b>	<b>≅ 20.000,00</b>
	<b>Área degradada</b>	31%
	<b>Descolamento cerâmico (DT)</b>	68%
	<b>Fissuração (CR)</b>	18%
	<b>Falha nas juntas (JO)</b>	12%
	<b>Manchas (ST)</b>	2%

As edificações selecionadas possuem de 6 a 12 pavimentos, todas com fachadas com revestimento cerâmico com cores variadas. Não é selecionado amostras de 0 a 10 anos, devido as anomalias presentes nessa faixa de idade serem em sua grande maioria decorrentes de falhas construtivas. Observa-se que a seleção possui amostras em todas as orientações solares, o que favorece o processo de pesquisa devido a degradação ocorrer de forma particular em cada orientação.

As amostras de pesquisa totalizam uma área de estudo de aproximadamente 20.000,00 m<sup>2</sup> sendo que 31% dessa área se encontra degradada. Dentre as áreas degradadas a anomalia com maior ocorrência (68%) é o descolamento cerâmico. Observa-se na Figura 12 (a) o comportamento da degradação ao longo do tempo das 100 amostras de fachada das edificações escolhidas para este estudo. Observa-se que a tendência da degradação acontece de maneira mais acentuada com o aumento da idade da edificação principalmente após o limite de vida útil (FGD >0,05). Na Figura 12 (b) a relação entre os indicadores FGD e FD, sendo respectivamente o estado atual de degradação do revestimento pela frequência de ocorrência das anomalias.

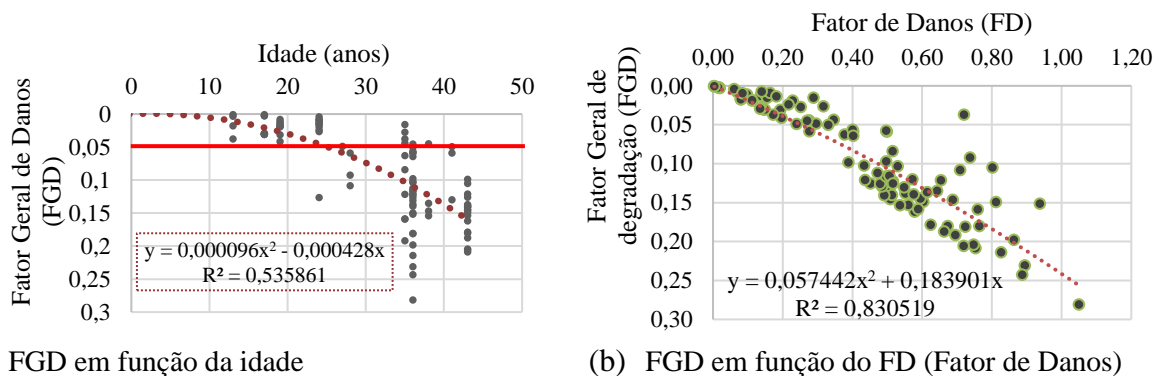


Figura 12- Parâmetros de degradação das amostras de estudo

A partir das amostras de fachadas das edificações selecionadas define-se um indicador de degradação da fachada ( $FGD_{fach}$  equação (41)) que representa cada fachada/orientação. A definição do  $FGD_{fach}$  leva em consideração a média dos valores dos FGD das amostras para cada respectiva fachada, realizando a ponderando em função a sua representatividade na tendencia de degradação tanto de maneira geral quanto por orientação. Ao identificar os resultados destoantes e os que fogem ao desvio padrão em relação à média, estes são considerados como espúrios e excluídos. Dessa forma a modelação da degradação é realizada para 34 indicadores de degradação ( $FGD_{fach}$ ) sendo que cada um representa uma fachada por orientação.



$$FGD_{fach} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FGD_i \quad (41)$$

Onde:

$FGD_{fach}$  = Fator geral de danos da fachada;

$n$  = número de amostras;

$FGD_i$  = FGD de cada amostra de fachada em análise.

A tendência de degradação das fachadas ao longo do tempo pode ser representada graficamente pelo  $FGD_{fach}$  em função da idade da edificação para os edifícios estudados (Figura 13). Com utilização do  $FGD_{fach}$  a curva de degradação passa de um  $R^2$  de 0,53 (Figura 12) para 0,70 (Figura 13).

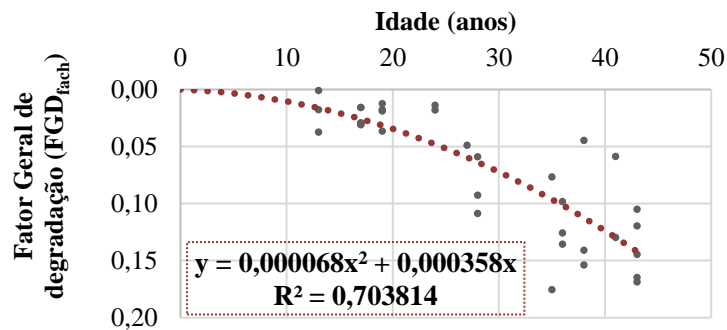


Figura 13-  $FGD_{fach}$  em função da idade das edificações

Na Tabela 6 observa-se os valores utilizados nesta pesquisa. As edificações escolhidas são subdivididas em quatro faixas de idade, (A (10-20), B (20-30), C (30-40), D (>40)), para melhor representação da base de dados. Devido a particularidade da própria base de dados as edificações apresentam fachadas em diferentes orientações, sendo resultados das inspeções realizadas segundo o MMD. Os valores de absorvâncias são obtidos em conformidade com apresentado por Dorneles e Roriz (2007) seguindo metodologia de comparação para determinação da absorvância predominante (PIAZZAROLLO; BAUER, 2018; SOUZA, 2019).

Tabela 6- Parâmetros, características e indicadores de degradação de cada edificação

<i>Edificação</i>	<i>Idade</i>	<i>Orientação</i>	<i>(FD)</i>	<i>(FGD<sub>fach</sub>)</i>	<i>Nº pavimentos</i>	<i>Absortância (Predominante)</i>
<i>A1</i>	13	Noroeste	0,081	0,017	12	62,5
		Sudeste	0,004	0,001		
		Nordeste	0,173	0,037		
<i>A2</i>	17	Nordeste	0,077	0,015	6	55,2
		Leste	0,145	0,030		
		Sudeste	0,147	0,031		
		Sudoeste	0,136	0,029		
		Oeste	0,140	0,029		
		Noroeste	0,077	0,016		
<i>A3</i>	19	Nordeste	0,093	0,017	11	39,9
		Sudeste	0,113	0,019		
		Sudoeste	0,196	0,036		
		Noroeste	0,118	0,012		
<i>B1</i>	24	Leste	0,207	0,018	6	62,5
		Sul	0,154	0,014		
<i>B2</i>	28	Norte	0,403	0,059	6	28,2
		Leste	0,710	0,108		
		Oeste	0,739	0,092		
<i>B3</i>	27	Leste	0,296	0,049	6	28,2
<i>C1</i>	35	Norte	0,643	0,175	6	62,5
		Sul	0,519	0,076		
<i>C2</i>	36	Nordeste	0,517	0,125	6	55,2
		Sudeste	0,467	0,098		
		Noroeste	0,643	0,135		
<i>C3</i>	38	Norte	0,666	0,141	6	55,2
		Leste	0,537	0,154		
		Sul	0,276	0,044		
<i>D1</i>	41	Norte	0,486	0,129	6	28,2
		Sul	0,278	0,059		
<i>D2</i>	43	Sul	0,803	0,105	6	39,9
<i>D3</i>	43	Nordeste	0,452	0,119	6	28,2
		Sudeste	0,557	0,144		
		Sudoeste	0,587	0,164		
		Noroeste	0,629	0,168		

### 3.2 SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

Realiza-se a simulação higrótérmica no *software* WUFI® Pro 6.5 considerando a orientação e a absorvância da placa cerâmica para cada amostra. As propriedades dos materiais são definidas em conformidade com o relatório interno dos ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de

Materiais (LEM-UnB) (BAUER; NASCIMENTO; CASTRO, 2015). Na Figura 14 são representados o sistema adotado e as posições de monitorização definidas na simulação, considerando as dimensões em metros.

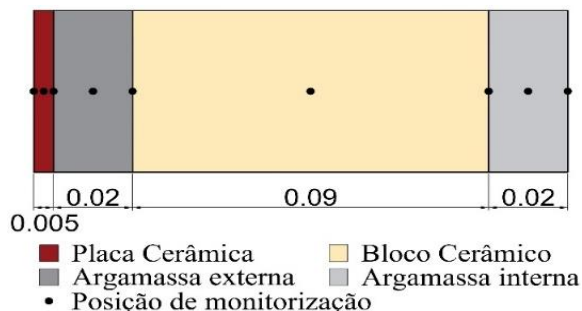


Figura 14- Sistema de revestimento cerâmico e posições de monitorização

A condição inicial do processo de simulação adotada é umidade relativa de 80% e temperatura inicial de 20° C. O período de simulação é pré-determinado para três anos, sendo os dois primeiros anos de simulação utilizados apenas para estabilização da umidade e temperatura no sistema, o ano de análise corresponde somente ao terceiro ano simulado, desprezando-se os dois primeiros conforme procedimento descrito por Zanoni (2015). Para os dados de clima exterior é utilizado o arquivo *Typical Meteorological Year (TMY)* (2018) da base de dados da ANTAC disponível no LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) da UFSC. Para o clima interno, é utilizado o estabelecido pela norma DIN EN 15026. O processo de simulação é realizado para cada amostra com suas respectivas orientações e absortâncias (DORNELLES; RORIZ, 2007). As variações horárias extraídas após cada simulação realizada estão detalhadas o Quadro 3.

Quadro 3- Dados horários da simulação

Descrição	Posição de monitorização
Precipitação (chuva dirigida)	Clima exterior
Radiação solar (total)	Clima exterior
Temperatura	Extremidades e interior de cada camada do sistema
Teor de umidade	Em cada ponto de monitorização

Após a extração dos dados de cada simulação estes são analisados, para posterior correlação com o indicador de degradação e modelação da degradação. O processo de simulação permite a quantificação em dados horários, totalizando 8760 dados no ano para cada parâmetro selecionado. Portanto, resulta do processo de simulação higrotérmica mais de 175 mil dados para cada orientação solar de cada fachada a ser analisada.

### 3.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – ANÁLISE

Os agentes climáticos e os comportamento da fachada são quantificados a partir dos dados de saída da simulação. Posteriormente, estes são correlacionados com o indicador de degradação. Os parâmetros de cálculos utilizados para analisar e representar os resultados de saída da simulação higrotérmica são expressos no Quadro 4.

Quadro 4- Parâmetros de cálculos

Parâmetro	Descrição
Valores médios, máximos e mínimos para cada dia	Calculados para a temperatura da superfície e do interior da placa cerâmica e para o teor de umidade do sistema considerando os seus respectivos valores hora a hora;
Total acumulado	Calculado para a Chuva dirigida e radiação total, considerando a soma dos seus respectivos valores horários para cada dia, mês e o total no ano;
Valores acumulados médios, máximos e mínimos para cada mês	Calculados para a Chuva dirigida e radiação total, considerando seus respectivos valores acumulados em um dia;
Amplitude diária	Calculado para a temperatura da superfície exterior da placa cerâmica, considerando a diferença entre a máxima e a mínima temperatura diária respectivamente;
Variação horária	Calculado para a variação da diferença de temperatura entre face exterior e o interior da peça cerâmica.
Episódios de chuva	Identificação e contagem da ocorrência dos episódios de chuva, quando há a incidência de chuva dirigida na respectiva fachada.
Ciclos de umidificação e secagem	Contabilização do número de ciclos de umidificação e secagem. Para cada episódio de chuva observa-se o teor de umidade na placa cerâmica, considerando como final do ciclo, quando o teor de umidade da camada for inferior a 40% do teor de umidade máximo alcançado no episódio de chuva. Obs.: Pode ocorrer do sistema não “secar” antes que ocorra um novo episódio de chuva.
Esforços térmicos	Calculadas conforme item 2.1.1, equações (20) e (22), As propriedades dos materiais são utilizadas em conformidade com o relatório interno dos ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM-UnB) (BAUER; CASTRO; SILVA, 2015) e as variações de temperatura obtidas com a simulação higrotérmica.

Para ponderação dos valores em função da frequência de ocorrência, o resultado é expresso a partir dos índices ponderados dos agentes climáticos e dos comportamentos da fachada, conforme é descrito na equação (42). A ponderação dos resultados traduz os efeitos do ano inteiro em um único valor representativo para cada agente ou comportamento da fachada. Para determinação da frequência de ocorrência os valores de cada um dos parâmetros, agentes climáticos ou comportamentos do sistema, são divididos em quatro intervalos equidistantes, considerando como delimitação (valores extremos) o valor máximo e o valor mínimo encontrado para todas as fachadas

$$Ip_n = \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{X}_{f(i)} \cdot F_{f(i)}}{F_{total}} \quad (42)$$

Onde:

$Ip_n$  = Índice ponderado para cada agente climático ou comportamento da fachada (n);

$\bar{X}_{f(i)}$  = Valor médio da faixa de ocorrência;

$F_{f(i)}$  = Frequência de cada faixa de ocorrência;

$F_{total}$  = Frequência total;

$i$  = Faixa de ocorrência, divide-se cada parâmetro analisado em quatro faixas de ocorrência equidistantes, considerando os valores mínimos e máximos de toda análise para cada parâmetro.

O índice ponderado para os agentes de degradação é calculado para a radiação total e chuva dirigida. Para as variáveis de comportamento dos agentes de degradação é calculado o índice ponderado do teor de umidade na interface da placa cerâmica com a argamassa, dos números de ciclos de umidificação e secagem, da amplitude de temperatura da superfície externa diária e dos esforços térmicos. Observa-se na Tabela 7 o exemplo de cálculo para o índice ponderado da amplitude de temperatura.

Tabela 7- Exemplo de cálculo do índice ponderado de amplitude de temperatura

Nº	FAIXAS DE INTERVALO		VALOR MÉDIO DA FAIXA	Nº DE CASOS	$\frac{\bar{X}_{f(i)} \cdot F_{f(i)}}{F_{total}}$
	Início	Fim			
1-	2,83	10,21	6,52	12,00	0,21
2-	10,21	17,58	13,90	91,00	3,46
3-	17,58	24,96	21,27	124,00	7,23
4-	24,96	32,34	28,65	138,00	10,83
<b><math>Ip_{A.T} =</math></b>					<b>21,70 ° C</b>

O exemplo da determinação dos índices ponderados é realizado para o índice ponderado da amplitude de temperatura, a qual é calculada pela diferença entre o valor máximo e o mínimo da temperatura superficial da placa cerâmica alcançado durante todo o dia. Considera-se o valor máximo e mínimo da amplitude de temperatura de todas as simulações realizadas na análise e a partir deste realiza a subdivisão em quatro faixas de intervalos equidistantes. Para cada intervalo é levantado a frequência de ocorrência daquela faixa de amplitude de temperatura para cada fachada durante todo o ano. O índice ponderado então é calculado pelo somatório da multiplicação do valor médio de cada faixa pela frequência de ocorrência, dividido pelo total de ocorrências. No caso da amplitude de temperatura o total de ocorrências é considerado todos os dias do ano, ou seja, 365 dias. Dessa forma neste exemplo, Tabela 7, o índice ponderado de amplitude de temperatura é igual a 21,70 °C para uma única fachada do estudo.

Os parâmetros para correlação são subdivididos em dados da amostra e indicadores de degradação, agentes climáticos de degradação e variáveis de comportamento. A correlação entre o indicador de degradação e os índices ponderados é proposta a partir dos dados de saída da simulação (Tabela 8).

Tabela 8- Dados para correlações

Dados da amostra e Indicador de degradação				Agentes Climáticos de degradação		Variáveis de comportamento			
Ident.	I	Ab%	FGD <sub>fach</sub>	<i>I<sub>p<sub>R.T</sub></sub></i>	<i>I<sub>p<sub>C.D</sub></sub></i>	<i>I<sub>p<sub>T.U</sub></sub></i>	<i>I<sub>p<sub>U.S</sub></sub></i>	<i>I<sub>p<sub>A.T</sub></sub></i>	<i>I<sub>p<sub>E.T</sub></sub></i>
A.1	I <sub>A.1</sub>	Ab% <sub>A.1</sub>	FGD <sub>fach A.1</sub>	<i>I<sub>p<sub>R.T</sub></sub></i> A.1	<i>I<sub>p<sub>C.D</sub></sub></i> A.1	<i>I<sub>p<sub>T.U</sub></sub></i> A.1	<i>I<sub>p<sub>U.S</sub></sub></i> A.1	<i>I<sub>p<sub>A.T</sub></sub></i> A.1	<i>I<sub>p<sub>E.T</sub></sub></i> A.1
A.2	I <sub>A.2</sub>	Ab% <sub>A.2</sub>	FGD <sub>fach A.2</sub>	<i>I<sub>p<sub>R.T</sub></sub></i> A.2	<i>I<sub>p<sub>C.D</sub></sub></i> A.2	<i>I<sub>p<sub>T.U</sub></sub></i> A.2	<i>I<sub>p<sub>U.S</sub></sub></i> A.2	<i>I<sub>p<sub>A.T</sub></sub></i> A.2	<i>I<sub>p<sub>E.T</sub></sub></i> A.2
A.3	I <sub>A.3</sub>	Ab% <sub>A.3</sub>	FGD <sub>fach A.3</sub>	<i>I<sub>p<sub>R.T</sub></sub></i> A.3	<i>I<sub>p<sub>C.D</sub></sub></i> A.3	<i>I<sub>p<sub>T.U</sub></sub></i> A.3	<i>I<sub>p<sub>U.S</sub></sub></i> A.3	<i>I<sub>p<sub>A.T</sub></sub></i> A.3	<i>I<sub>p<sub>E.T</sub></sub></i> A.3
N	I <sub>N</sub>	Ab% <sub>N</sub>	FGD <sub>fach N</sub>	<i>I<sub>p<sub>R.T</sub></sub></i> N	<i>I<sub>p<sub>C.D</sub></sub></i> N	<i>I<sub>p<sub>T.U</sub></sub></i> N	<i>I<sub>p<sub>U.S</sub></sub></i> N	<i>I<sub>p<sub>A.T</sub></sub></i> N	<i>I<sub>p<sub>E.T</sub></sub></i> N

Na determinação dos índices ponderados da radiação total e da chuva dirigida é considerado o total diário do agente incidente na fachada, em um total de 365 dados. O índice do teor de umidade é ponderado em função dos valores horários da umidade na interface da placa cerâmica e argamassa, em um total de 8760 dados. A ponderação dos ciclos de umidificação e secagem é realizada em função da quantidade de ciclos ocorridos em todas as fachadas, calculados conforme critérios detalhados no Quadro 4. A ponderação da amplitude de temperatura considera a variação entre o maior e o menor valor de temperatura registrado na face externa

da cerâmica em cada dia, em um total de 365 dados. No cálculo dos esforços térmicos são utilizadas as duas metodologias apresentadas no capítulo 2 item 2.1.1. A equação (22) proposta por Temoche Esquivel (2009) calcula o esforço térmico considerando a diferença de temperatura entre a superfície e o interior da peça cerâmica em um sistema com movimentações restringidas. Os esforços térmicos calculados conforme equação (20) proposta por Fiorito (2009) considera a amplitude de temperatura na interface cerâmica/argamassa ao longo do dia em um sistema sem restrições de movimento.

O comportamento do  $FGD_{fach}$  em relação aos agentes climáticos e as variáveis de comportamento da fachada é expresso por meio de curvas dose-resposta. Em uma análise inicial cada índice ponderado calculado para um único ano é correlacionado com  $FGD_{fach}$ , em sequência os índices ponderados são multiplicados pela idade da fachada e pela idade ao quadrado. Ao associar os índices ponderados pela idade considera-se de forma simplificada o total incidido sobre a fachada até o momento da inspeção, se assume que o comportamento é linear, ou seja, o efeito do ano se repete para todos os anos de uso do edifício. Com a utilização da idade ao quadrado espera-se um ajuste em função das curvas de degradação, que frequentemente são representadas por funções não lineares, conforme modelo apresentado na Figura 13, que traz uma curva de degradação de segunda ordem do indicador de degradação em função da idade da edificação.

Para compreender melhor os dados de análise os índices ponderados são analisados estatisticamente pelo teste de Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis no *software* IBM® SPSS® Statistics 26.0 (IBM, 2019), que analisa se há diferença significativa na distribuição de variáveis em duas ou mais categorias. Dessa forma os valores dos indicadores de degradação de cada fachada, bem como seus respectivos índices ponderados são analisados agrupando-os conforme critérios de cada categoria. Para cada categoria é realizado um teste não paramétrico com agrupamento das variáveis, verificando se os valores dentro dos grupos das categorias têm distribuição diferente ou igual. Observa-se a seguir as cinco categorias consideradas e seus respectivos critérios de agrupamento:

- **Absortâncias:** analisa os resultados em função dos quatro grupos de valores de absortância (28,2; 39,9; 55,2; 62,5);

- **Edificações:** analise os resultados em função das doze edificações, cada edificação representando um grupo de análise;
- **Grupo FGD:** analisa os resultados em função do valor de  $FGD_{fach}$  em dois grupos, fachadas com  $FGD < 0.05$  ou com  $FGD > 0.05$ ;
- **Idade:** analise os resultados em função dos quatro grupos de idade (10 a 20 anos; 20 a 30 anos; 30 a 40 anos; >40 anos);
- **Orientação:** analisa os resultados em função dos grupos de orientação das fachadas (Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste, Noroeste);

### 3.4 MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO

A modelação da degradação para previsão do  $FGD_{fach}$  a partir dos índices ponderados dos agentes climáticos de degradação e os comportamento da fachada permite identificar quais variáveis são estatisticamente relevantes, o que apresenta maior correlação e o que mais influência no processo de degradação.

A consideração da ação conjunta dos agentes climáticos é necessária, visto que a sinergia torna o processo de degradação mais complexo e difícil (ZANONI; SÁNCHEZ; BAUER, 2016). O processo de modelação da degradação por meio do método de regressão múltipla linear permite estimar essas relações em uma análise estatística. A regressão múltipla linear consiste em um conjunto de técnicas de análise estatística para modelação de relações entre uma variável dependente (resposta) e variáveis independentes (preditoras). Com os resultados da regressão múltipla linear é verificado quais as variáveis relevantes no processo de degradação dos revestimentos que possibilitam modelar a evolução da degradação em fachadas (SOUZA *et al.*, 2018). O modelo de regressão múltipla linear é estimado para previsão do  $FGD_{fach}$  em função dos agentes e comportamentos da fachada.

O método de seleção de variáveis aplicado é o Backward, que melhor se adequou ao conjunto de dados, o método consiste em iniciar um modelo com todas as variáveis que apresentam significância na predição da variável independente e então retirar as que apresentem menor relevância estatística. Este método de seleção calcula a estatística F parcial para cada variável, como se esta fosse a última a entrar no modelo e considera quais as variáveis que apresentariam menor significância estatística a serem consideradas no modelo. Dessa forma, a variável que apresentar o maior p-valor e não atender ao critério do p-valor crítico (0.05) é removida do



modelo. O processo repete até que todas as variáveis presentes estejam dentro do nível de significância determinado (MAROCO, 2007). A equação (43) apresenta a formulação do modelo determinado pela regressão múltipla linear.

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_i X_{nj} + \varepsilon_j \quad (j = 1, \dots, n) \quad (43)$$

Onde:

$Y_j$  = Variável dependente;

$\beta_0$  = Constante;

$\beta_i$  = Coeficientes de regressão;

$X_{n_j}$  = Variáveis independentes;

$\varepsilon_j$  = Resíduos ou erros;

A análise para determinação do modelo é fundamentada por vários coeficientes: coeficiente de correlação múltipla (R), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_a$ ) e raiz do quadrado médio dos erros ( $\sqrt{QME}$ ) (MAROCO, 2007; MYERS, 1986). O  $R^2$  representa percentualmente o quanto a variável dependente é explicada pelas variáveis independentes (preditoras). O  $R^2_a$  permite a comparação entre modelos.

O coeficiente de correlação (R) indica o quanto o conjunto de dados se relaciona com o modelo, quanto mais próximo de 1 maior a correlação (SOUZA *et al.*, 2018). Já o valor de  $R^2$  mostra o quanto o modelo encontrado explica o fenômeno de degradação, porém esse coeficiente é influenciado pela quantidade de variáveis inseridas no modelo. Uma maior quantidade de variáveis consequentemente representa um maior valor de  $R^2$ , sendo preferível que a análises dos modelos sejam realizadas em função pelo  $R^2_a$ , o qual corrige a interferência em relação a quantidade de variáveis inseridas (MAROCO, 2007).

A partir dos modelos resultantes da regressão múltipla linear é isolado a idade das demais variáveis e calculado a previsão da vida útil das edificações e determinado a idade de cada fachada em cada nível de degradação (Tabela 4). Esta análise permite observar a importância e influência dos agentes climáticos no processo de degradação de fachadas cerâmicas.

## 4 RESULTADOS

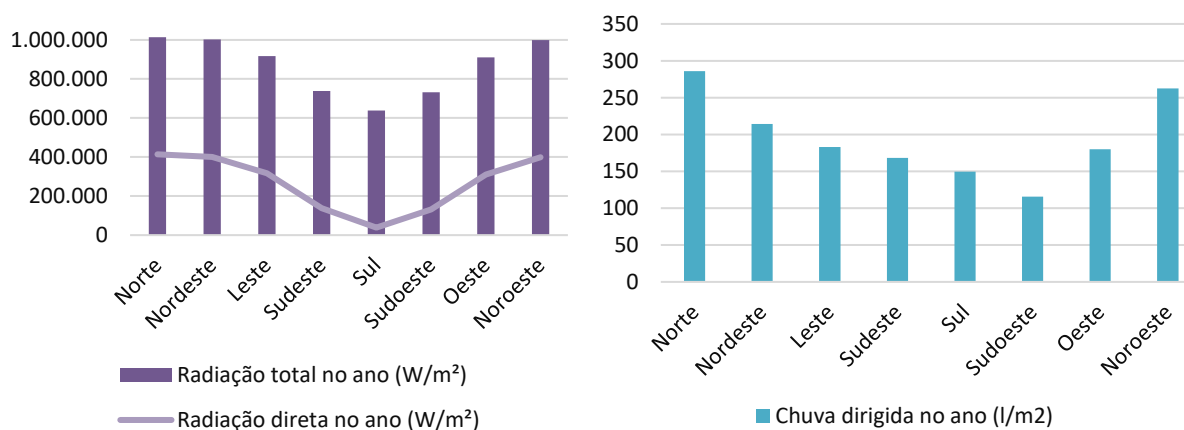
No contexto da proposição da modelação da degradação tendo por base o indicador de degradação FGD, e as variáveis de comportamento do sistema de revestimento cerâmico quantificadas a partir da simulação higrotérmica são apresentados os resultados observados.

### 4.1 AGENTES CLIMÁTICOS DE DEGRADAÇÃO

Observa-se na Tabela 9 e na Figura 15 os níveis de incidências de radiação direta e radiação total e chuva dirigida para todo um ano em função da orientação das fachadas.

Tabela 9- Níveis de Radiação Total e Chuva Dirigida

ORIENTAÇÃO	RADIAÇÃO TOTAL NO ANO (W/M <sup>2</sup> )	CHUVA DIRIGIDA NO ANO (L/M <sup>2</sup> )
NORTE	1.014.409,27	286,06
NORDESTE	1.001.849,54	214,35
LESTE	916.881,47	182,81
SUDESTE	738.325,27	131,78
SUL	639.041,97	149,57
SUDOESTE	731.935,00	115,69
OESTE	910.531,83	179,77
NOROESTE	999.260,25	262,68



(a) Incidência de radiação

(b) Incidência de chuva dirigida

Figura 15- Incidência dos agentes climáticos por orientação

A incidência dos agentes de degradação varia conforme a orientação da fachada. Observa-se na Figura 15 e na Tabela 9 em relação a incidência de radiação solar que os maiores valores são evidenciados nas orientações Norte, Nordeste e Noroeste, a menor incidência é apresentada na orientação Sul. As maiores incidências de chuva dirigida ocorrem nas orientações Norte e Noroeste e as menores em Sul e Sudoeste.

## 4.2 ANÁLISES DE COMPORTAMENTO DA FACHADA

As análises de comportamento da fachada consideram tanto a incidência dos agentes climáticos como chuva dirigida e a radiação solar, quanto as características do revestimento (utilizadas na simulação). Na Tabela 10 detalha-se as faixas de ocorrência consideradas para cálculo dos índices ponderados.

Tabela 10- Faixas de ocorrência

<b>AGENTE OU COMPORTAMENTOS DA FACHADA</b>	<b>Nº DA FAIXA</b>	<b>INÍCIO</b>	<b>FIM</b>
<b>RADIAÇÃO TOTAL (W/M<sup>2</sup>)</b>	1	734,70	1699,28
	2	1699,28	2663,87
	3	2663,87	3628,45
	4	3628,45	4593,03
<b>CHUVA DIRIGIDA (L/M<sup>2</sup>)</b>	1	0,00	7,05
	2	7,05	14,09
	3	14,09	21,14
	4	21,14	28,19
<b>TEOR DE UMIDADE (KG/M<sup>3</sup>)</b>	1	0,19	16,29
	2	16,29	32,38
	3	32,38	48,48
	4	48,48	64,57
<b>CICLOS DE UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM (Nº DE CICLOS)</b>	1	0,00	5,25
	2	5,25	10,50
	3	10,50	15,75
	4	15,75	21,00
<b>AMPLITUDE DE TEMPERATURA DIÁRIA (°C)</b>	1	2,83	10,21
	2	10,21	17,58
	3	17,58	24,96
	4	24,96	32,34
<b>ESFORÇOS TÉRMICOS TEMOCHE ESQUIVEL (MPA)</b>	1	0,0018	0,0064
	2	0,0064	0,0110
	3	0,0110	0,0157
	4	0,0157	0,0203
<b>ESFORÇOS TÉRMICOS FIORITO (MPA)</b>	1	0,09	0,67
	2	0,67	1,24
	3	1,24	1,82
	4	1,82	2,40

Os índices ponderados dos agentes climáticos de degradação e das variáveis de comportamento da fachada são detalhados na Tabela 11. Na Figura 16 observa-se graficamente a relação dos comportamentos da fachada em relação as respectivas absorvâncias e orientações solar.

Tabela 11- Resultado dos índices de ponderação

		Agentes Climáticos de degradação		Comportamentos da fachada				
Iden.	Orientação	$I_{p_{R.T}}$ (W/m <sup>2</sup> )	$I_{p_{C.D}}$ (l/m <sup>2</sup> )	$I_{p_{T.U}}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$I_{p_{U.S}}$ (Nº ciclos)	$I_{p_{A.T}}$ (°C)	$I_{p_{E.T.T}}$ (MPa)	$I_{p_{E.T.F}}$ (MPa)
A1.1	Noroeste	2694,26	3,85	8,87	5,25	21,74	0,014	1,607
A1.2	Sudeste	1988,66	3,70	8,51	3,06	15,49	0,010	1,109
A1.3	Nordeste	2749,75	3,77	8,79	4,81	20,04	0,013	1,495
A2.1	Nordeste	2749,75	3,77	8,83	5,25	18,16	0,011	1,334
A2.2	Leste	2514,55	3,79	8,74	3,94	17,80	0,011	1,307
A2.3	Sudeste	1988,66	3,64	8,52	3,50	14,68	0,009	1,062
A2.4	Sudoeste	1964,87	3,56	8,49	4,38	15,61	0,010	1,144
A2.5	Oeste	2422,06	3,66	8,68	5,69	19,41	0,012	1,425
A2.6	Noroeste	2694,26	3,85	8,91	5,69	20,44	0,013	1,512
A3.1	Nordeste	2749,75	3,77	8,89	5,25	15,19	0,010	1,138
A3.2	Sudeste	1988,66	3,64	8,53	3,94	12,95	0,008	0,925
A3.3	Sudoeste	1964,87	3,56	8,49	4,81	14,04	0,009	1,009
A3.4	Noroeste	2694,26	3,85	8,96	5,25	16,69	0,010	1,216
B1.1	Leste	2514,55	3,79	8,71	3,94	18,97	0,012	1,385
B1.2	Sul	1697,96	3,70	8,51	5,25	14,08	0,009	1,025
B2.1	Norte	2776,18	3,87	9,21	5,69	12,97	0,008	0,994
B2.2	Leste	2514,55	3,79	8,85	3,94	12,24	0,008	0,886
B2.3	Oeste	2422,06	3,66	8,79	6,13	13,31	0,008	0,986
B3.1	Leste	2514,55	3,79	8,85	3,94	12,24	0,008	0,886
C1.1	Norte	2776,18	3,87	9,00	6,13	19,64	0,012	1,463
C1.2	Sul	1697,96	3,70	8,51	5,25	14,08	0,009	1,025
C2.1	Nordeste	2749,75	3,77	8,83	5,25	18,16	0,011	1,334
C2.2	Sudeste	1988,66	3,64	8,52	3,50	14,68	0,009	1,062
C2.3	Noroeste	2694,26	3,85	8,91	5,69	20,44	0,013	1,512
C3.1	Norte	2776,18	3,87	9,04	5,69	18,50	0,012	1,371
C3.2	Leste	2514,55	3,79	8,74	3,94	17,80	0,011	1,307
C3.3	Sul	1697,96	3,70	8,51	5,25	13,65	0,009	0,964
D1.1	Norte	2776,18	3,87	9,21	5,69	12,97	0,008	0,994
D1.2	Sul	1697,96	3,70	8,54	5,25	11,49	0,007	0,868
D2.1	Sul	1697,96	3,70	8,52	5,25	12,97	0,008	0,916
D3.1	Nordeste	2749,75	3,77	8,96	5,25	12,44	0,008	0,916
D3.2	Sudeste	1988,66	3,64	8,55	4,38	11,59	0,007	0,868
D3.3	Sudoeste	1964,87	3,56	8,51	5,25	12,32	0,008	0,905
D3.4	Noroeste	2694,26	3,85	9,05	5,69	14,08	0,009	1,060

$I_{p_{R.T}}$ : índice ponderado da radiação total;

$I_{p_{C.D}}$ : índice ponderado da chuva dirigida;

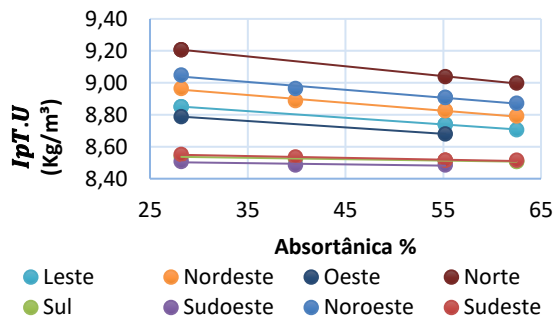
$I_{p_{T.U}}$ : índice ponderado do teor de umidade;

$I_{p_{U.S}}$ : Índice ponderado dos ciclos de umidificação e secagem;

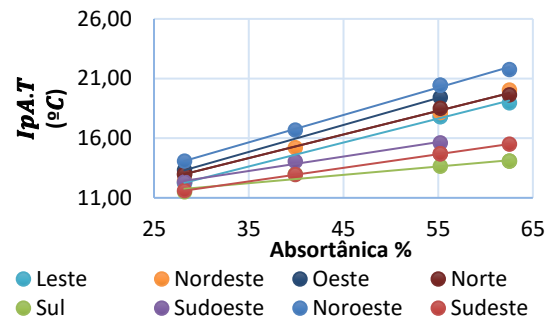
$I_{p_{A.T}}$ : índice ponderado da amplitude de temperatura;

$I_{p_{E.T.T}}$ : índice ponderado dos esforços térmicos segundo metodologia proposta por Temoche;

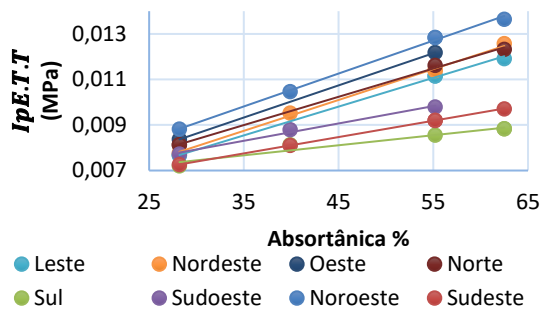
$I_{p_{E.T.F}}$ : índice ponderado dos esforços térmicos segundo metodologia proposta por Fiorito;



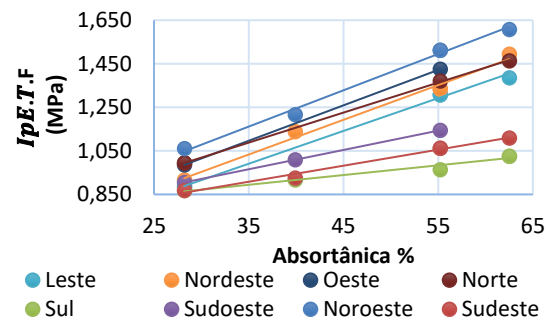
(a) Índice ponderado do teor de umidade



(b) Índice ponderado da amplitude de temperatura



(c) Índice ponderado dos esforços térmicos Temoche



(d) Índice ponderado dos esforços térmicos Fiorito

Figura 16- Relação dos comportamentos da fachada com a orientação e absorvância.

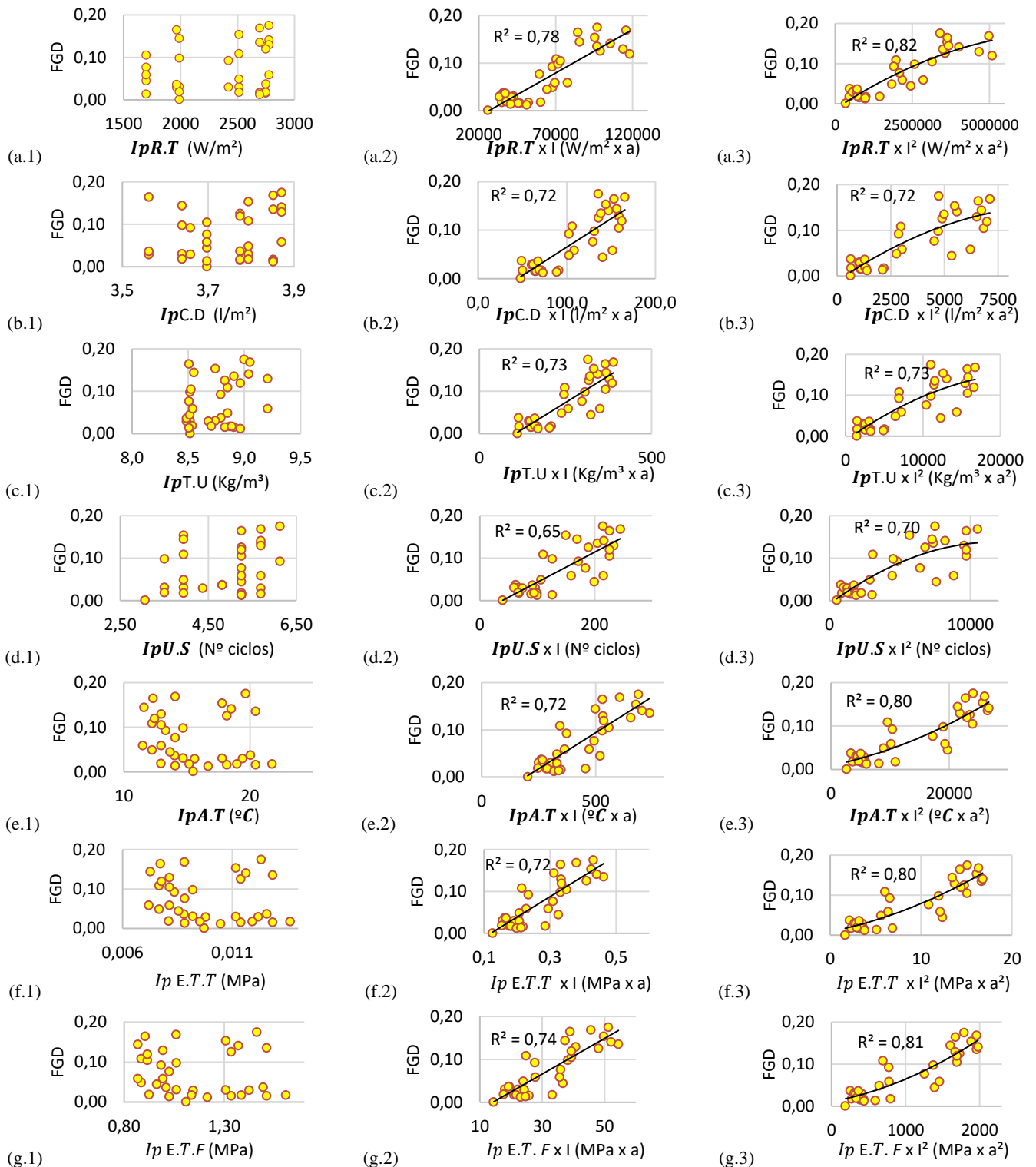
A orientação da fachada influencia diretamente no total de incidência do agente de degradação (chuva dirigida e radiação solar), enquanto a absorvância influencia nas temperaturas alcançadas no sistema e consequentemente nos comportamentos do sistema de revestimento.

### 4.3 CORRELAÇÕES

As correlações dos resultados visam compreender a relação entre os agentes climáticos de degradação e os comportamentos dos elementos do edifício, particularmente o sistema de revestimento cerâmico das fachadas. Na Tabela 12 estão elencados os parâmetros para correlação, sendo que todos os índices ponderados são associados a idade da edificação ou a idade ao quadrado. Na Figura 17 é observado as curvas dose-resposta do indicador de degradação pelos índices ponderados, considerando também o efeito da idade.

Tabela 12- Parâmetros para correlação

Indicadores de degradação	FGD			
Agentes Climáticos de degradação	$Ip_{R.T} \cdot I$ (W/m <sup>2</sup> x a)	$Ip_{C.D} \cdot I$ (l/m <sup>2</sup> x a)		
	$Ip_{R.T} \cdot I^2$ (W/m <sup>2</sup> x a <sup>2</sup> )	$Ip_{C.D} \cdot I^2$ (l/m <sup>2</sup> x a <sup>2</sup> )		
Variáveis de comportamento da fachada	$Ip_{T.U} \cdot I$ (Kg/m <sup>3</sup> x a)	$Ip_{U.S} \cdot I$ (Nº ciclos)	$Ip_{A.T} \cdot I$ (°C x a)	$Ip_{E.T} \cdot I$ (MPa x a)
	$Ip_{T.U} \cdot I^2$ (Kg/m <sup>3</sup> x a <sup>2</sup> )	$Ip_{U.S} \cdot I^2$ (Nº ciclos)	$Ip_{A.T} \cdot I^2$ (°C x a <sup>2</sup> )	$Ip_{E.T} \cdot I^2$ (MPa x a <sup>2</sup> )



(a.1) Radiação total; (a.2) Radiação total multiplicada pela idade; (a.3) Radiação total multiplicada pela idade ao quadrado; (b.1) chuva dirigida; (b.2) Chuva dirigida multiplicado pela idade ao quadrado; (b.3) Chuva dirigida multiplicado pela idade ao quadrado; (c.1) teor de umidade; (c.2) Teor de umidade multiplicado pela idade; (c.3) Teor de umidade multiplicado pela idade ao quadrado; (d.1) Número de ciclos de umidificação e secagem; (d.2) Número de ciclos de umidificação e secagem multiplicado pela idade; (d.3) Número de ciclos de umidificação e secagem multiplicado pela idade ao quadrado; (e.1) Amplitude de temperatura diária; (e.2) Amplitude de temperatura diária multiplicado pela idade; (e.3) Amplitude de temperatura diária multiplicado pela idade ao quadrado; (f.1) Esforços térmicos (Temoche); (f.2) Esforços térmicos multiplicado pela idade (Temoche); (f.3) Esforços térmicos multiplicado pela idade ao quadrado (Temoche); (g.1) Esforços térmicos (Fiorito); (g.2) Esforços térmicos multiplicado pela idade (Fiorito); (g.3) Esforços térmicos multiplicado pela idade ao quadrado (Fiorito)

Figura 17- Curvas dose resposta, relação entre o indicador de degradação e os índices ponderados

Na Figura 17 é representando a evolução da degradação em função dos índices ponderados. A idade se mostra como uma variável explicativa da degradação, visto que ao associar os índices ponderados pela idade uma tendência linear é observada em todos os casos, quanto maior o índice ponderado multiplicado pela idade maior o indicador de degradação. A Figura 17 (a.2) apresenta a curva de tendência com maior R<sup>2</sup>, em relação aos índices ponderados multiplicados pela idade, apresentando em uma relação linear com um R<sup>2</sup> de 0,784.

Com a correlação entre os valores de FGD e os índices ponderados associados a idade ao quadrado observa-se curvas de degradação de segunda ordem (quadráticas). A maioria das análises são aperfeiçoadas com a utilização de um modelo quadrático, como é o caso dos esforços térmicos, Fiorito- Figura 17 g.2 e g.3, que teve um aumento no valor do R<sup>2</sup> de 0,735 para 0,810. Os índices ponderados da chuva dirigida e do teor de umidade não mostram variações ao serem multiplicados pela idade ao quadro, em relação à quando são multiplicados pela idade, mantendo os mesmos valores de R<sup>2</sup> (0,72 na Figura 17 b.2 e b.3; 0,73 na Figura 17 c.2 e c.3).

Os resultados dos testes de Kruskal-Wallis são detalhados nas tabelas 13 a 15. Na Tabela 13 se observa o resultado dos testes para o indicador de degradação e índices ponderados, na Tabela 14 o resultado dos testes para os índices ponderados multiplicados pela idade e na Tabela 15 o resultado dos testes para os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado;

Tabela 13- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para o indicador de degradação e índices ponderados

Variável	A distribuição é igual nas categorias de absorvâncias?		A distribuição é igual nas categorias de edificações?		A distribuição é igual nas categorias de Grupo FGD?		A distribuição é igual nas categorias de Idade?		A distribuição é igual nas categorias de Orientação?	
	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado
<b>Ip<sub>R.T</sub></b>	0,018	Não	0,004	Não	0,000	Não	0,003	Não	0,268	Sim
<b>Ip<sub>C.D</sub></b>	0,017	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,514	Sim
<b>Ip<sub>T.U</sub></b>	0,014	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,537	Sim
<b>Ip<sub>U.S</sub></b>	0,034	Não	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,120	Sim
<b>Ip<sub>A.T</sub></b>	0,194	Sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,312	Sim
<b>Ip<sub>E.T.T</sub></b>	0,196	Sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,314	Sim
<b>Ip<sub>E.T.F</sub></b>	0,153	Sim	0,003	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,281	sim

Tabela 14- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para os índices ponderados multiplicados pela idade

Variável	A distribuição é igual nas categorias de absorvâncias?		A distribuição é igual nas categorias de edificações?		A distribuição é igual nas categorias de Grupo FGD?		A distribuição é igual nas categorias de Idade?		A distribuição é igual nas categorias de Orientação?	
	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado
$Ip_{R.T} \cdot I$	0,018	Não	0,004	Não	0,000	Não	0,003	Não	0,268	Sim
$Ip_{C.D} \cdot I$	0,017	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,514	Sim
$Ip_{T.U} \cdot I$	0,014	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,537	Sim
$Ip_{U.S} \cdot I$	0,034	Não	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,120	Sim
$Ip_{A.T} \cdot I$	0,194	Sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,312	Sim
$Ip_{E.T.T} \cdot I$	0,196	Sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,314	Sim
$Ip_{E.T.F} \cdot I$	0,153	Sim	0,003	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,281	sim

Tabela 15- Resultados do Teste de Kruskal-Wallis para os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado

Variável	A distribuição é igual nas categorias de absorvâncias?		A distribuição é igual nas categorias de edificações?		A distribuição é igual nas categorias de Grupo FGD?		A distribuição é igual nas categorias de Idade?		A distribuição é igual nas categorias de Orientação?	
	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado	Sig.	Resultado
$Ip_{R.T} \cdot I^2$	0,019	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,518	sim
$Ip_{C.D} \cdot I^2$	0,017	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,563	sim
$Ip_{T.U} \cdot I^2$	0,015	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,000	Não	0,613	sim
$Ip_{U.S} \cdot I^2$	0,032	Não	0,001	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,273	sim
$Ip_{A.T} \cdot I^2$	0,177	sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,395	sim
$Ip_{E.T.T} \cdot I^2$	0,177	sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,395	sim
$Ip_{E.T.F} \cdot I^2$	0,151	sim	0,002	Não	0,000	Não	0,001	Não	0,388	sim

Ao analisar os resultados dos testes para os valores do indicador de degradação de cada fachada (Tabela 13) observa-se que estes não apresentam distribuição igual nas diferentes categorias de absorvância, edificações Tabela 14, grupo FGD e idade. Os valores de FGD possuem uma distribuição semelhante somente quando analisados de maneira isolada por orientação.

Os índices ponderados da radiação total, chuva dirigida, teor de umidade e ciclos de umidificação e secagem apresentam distribuição semelhante nas diferentes categorias de absorvância (Tabela 13), ou seja, estes índices não se mostraram afetados pela absorvância da peça cerâmica, o que só é verificado para os índices ponderados da amplitude de temperatura e



esforços térmicos. Curiosamente este cenário é invertido ao multiplicar os índices ponderados pela idade e pela idade ao quadrado.

Nas categorias de edificações observa-se que somente os índices ponderados de radiação total, chuva dirigida, teor de umidade e ciclos de umidificação e secagem se mostram com distribuição semelhante. Ao multiplicar estes índices pela idade (Tabela 14) e pela idade ao quadrado (Tabela 15) é possível observar que há diferenciação na distribuição dos valores nas categorias de edificações.

Apenas o índice ponderado de esforços térmicos,  $I_{p_{E.T.T}}$ , não apresenta distribuição igual nas categorias de grupo de FGD. Os demais índices só se mostram distintos após serem multiplicados pela idade da edificação, ressaltando a influência do tempo, da repetição da incidência dos agentes climáticos no processo de degradação dos revestimentos cerâmicos. A distribuição é igual nas categorias de Idade apenas para os índices ponderados da radiação total, chuva dirigida, teor de umidade e ciclos de umidificação e secagem, ou quando estes são multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado.

Ao analisar a distribuição dos índices ponderados nas categorias de Orientação, conforme esperado, o resultado do teste demonstra que índices ponderados dos agentes climáticos bem como os índices ponderados do teor de umidade e ciclos de umidificação e secagem não apresentam distribuição igual. Comprova-se que há variabilidade da incidência dos agentes climáticos conforme orientação, porém essa variabilidade não é identificada para os índices ponderados de amplitude de temperatura e dos esforços térmicos. Quando os índices ponderados são multiplicados pela idade todos apresentam distribuição semelhante nas categorias de orientação o que reforça que a variabilidade dos resultados é afetada com a influência da idade.

#### 4.4 MODELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO

Realizou-se, primeiramente, a modelação da degradação realizada pela regressão múltipla linear para os índices ponderados sem considerar o efeito acumulativo da idade, os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16- Modelação por regressão múltipla linear 1

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>a</sub>	√QME	Durbin-Watson
1	0,422	0,178	-0,043	0,05683	
2	0,422	0,178	-0,005	0,05577	
3	0,422	0,178	0,031	0,05477	
4	0,421	0,177	0,063	0,05384	
5	0,412	0,170	0,087	0,05317	
6	0,389	0,152	0,097	0,05287	0,841

1- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{T.U}}$ ;  $I_{p_{U.S}}$ ;  $I_{p_{R.T}}$ ;  $I_{p_{C.D}}$ ;  $I_{p_{E.T.T}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
2- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{T.U}}$ ;  $I_{p_{U.S}}$ ;  $I_{p_{R.T}}$ ;  $I_{p_{C.D}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
3- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{U.S}}$ ;  $I_{p_{R.T}}$ ;  $I_{p_{C.D}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
4- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{R.T}}$ ;  $I_{p_{C.D}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
5- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{C.D}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
6- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F}}$ ;  $I_{p_{A.T}}$ ;  
Variável Dependente: *FGD*

A modelação por regressão múltipla linear é realizada inicialmente (modelo 1) com todas as variáveis preditoras, que explicam a variável dependente. A partir do primeiro modelo é retirada uma a uma as variáveis preditoras que apresentem menor relevância estatística, conforme parâmetros detalhados no capítulo 3 item 3.4. O resultado da modelação por regressão linear múltipla é o último modelo encontrado. Na modelação por regressão múltipla linear 1 é determinado o modelo 6 como o mais explicativo da variável dependente.

Observando o resultado do R<sup>2</sup><sub>a</sub> dos seis modelos definidos com os índices ponderados, nota-se que mesmo o modelo 6 apresenta um R<sup>2</sup><sub>a</sub> de 0,097 significando que o mesmo explica somente 9,7 % do indicador de degradação FGD. Logo a modelação utilizando somente os índices ponderados não se mostra efetiva para previsão da evolução da degradação em revestimentos cerâmicos. A próxima análise estatística para modelação da degradação é realizada para os índices ponderados multiplicados pela idade, modelação linear (Tabela 17).

Tabela 17- Modelação por regressão múltipla linear 2

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>a</sub>	√QME	Durbin-Watson
7	0,930	0,865	0,835	0,02262	
8	0,930	0,865	0,841	0,02222	
9	0,930	0,865	0,846	0,02184	1,717

7- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F} \cdot I}$ ;  $I_{p_{T.U} \cdot I}$ ;  $I_{p_{U.S} \cdot I}$ ;  $I_{p_{R.T} \cdot I}$ ;  $I_{p_{C.D} \cdot I}$ ;  $I_{p_{A.T} \cdot I}$ ;  
8- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F} \cdot I}$ ;  $I_{p_{T.U} \cdot I}$ ;  $I_{p_{U.S} \cdot I}$ ;  $I_{p_{C.D} \cdot I}$ ;  $I_{p_{A.T} \cdot I}$ ;  
9- Preditores: (Constante);  $I_{p_{E.T.F} \cdot I}$ ;  $I_{p_{T.U} \cdot I}$ ;  $I_{p_{U.S} \cdot I}$ ;  $I_{p_{C.D} \cdot I}$ ;  
Variável Dependente: *FGD*

Com base na Tabela 17, se observa que a inclusão da idade melhora os resultados da modelação, o modelo 9 que é definido ao utilizar os índices ponderados multiplicados pela idade

(modelação linear) apresenta um  $R^2_a$  de 0,846 indicando que o respectivo modelo explica 84,60% do FGD. A modelação da degradação realizadas para os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado (modelação quadrática) é detalhada na Tabela 18.

Tabela 18- Modelação por regressão múltipla linear 3

	Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>a</sub>	√QME	Durbin-Watson
	10	0,934	0,873	0,845	0,02192	
	11	0,934	0,873	0,850	0,02153	
	12	0,934	0,873	0,855	0,02117	
	13	0,930	0,864	0,850	0,02151	1,784
Modelação Quadrática	10- Preditores: (Constante); $I_{p_{E.T.F.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{T.U.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{U.S.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{R.T.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{C.D.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{A.T.}} \cdot I^2$ ; 11- Preditores: (Constante); $I_{p_{E.T.F.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{T.U.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{U.S.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{C.D.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{A.T.}} \cdot I^2$ ; 12- Preditores: (Constante); $I_{p_{E.T.F.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{T.U.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{U.S.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{C.D.}} \cdot I^2$ ; 13- Preditores: (Constante); $I_{p_{E.T.F.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{T.U.}} \cdot I^2$ ; $I_{p_{C.D.}} \cdot I^2$ ; Variável Dependente: FGD					

Os resultados são singelamente aperfeiçoados a analisar os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado (Tabela 18) sendo que neste caso o modelo 13 apresenta um  $R^2_a$  de 0,85 indicando que o respectivo modelo explica 85% do FGD.

Na Figura 18 podemos observar a precisão, o quanto os modelos explicam o indicador de degradação, tanto para modelação linear (modelos de 7 a 9) quanto para modelação quadrática (modelos 10 a 13) segundo seus respectivos  $R^2_a$ .

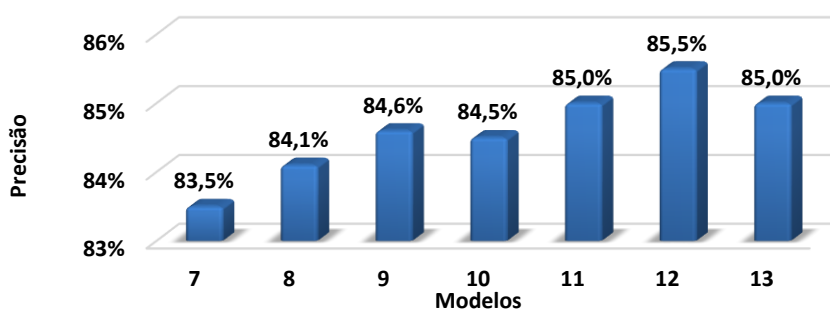


Figura 18- Precisão dos modelos determinados nas modelações linear e quadrática

A análise estatística exclui as variáveis conforme o resultado da probabilidade do teste F ao excluir a variável com menor influência no resultado do modelo. A modelação linear (modelos 7, 8 e 9) mostra uma precisão inicial de 83,5% (modelo 7) e com as exclusões determinadas pelo teste F chegando a um modelo com precisão de 84,6% (modelo 9), já a modelação quadrática (modelos de 10 a 13) apresenta precisão de 84,5% (modelo 10) a 85,5% (modelo 12) de precisão. O modelo 12 apresenta a maior precisão (85,5%) da modelação quadrática ao

analisar o  $R^2_a$ , porém a partir da análise estatística é determinado que o modelo 13 traz uma modelação estatisticamente mais significativa para predição do FGD em função das variáveis preditoras conforme os parâmetros da regressão múltipla linear.

O teste de Durbin-Watson aplicado ao último modelo de cada modelação verifica a independência dos resíduos, ou seja, se há diferença entre o valor previsto e o valor observado. Este teste apresentou resultado aceitável para o modelo 9 (1,717) e para o modelo 13 (1,784), pois o valor está entre 1.5 e 2.5 (MAROCO, 2007). Este fato indica que há independência dos resíduos e valida ambos os modelos definidos nas modelações linear e quadrática.

Na Tabela 19 são apresentados os coeficientes determinados na análise estatística para os modelos: coeficientes de regressão (B), coeficientes padronizados (Beta), os resultados do teste t-Student para cada variável (t) e as estatísticas de colinearidade entre as variáveis (VIF).

Tabela 19- Coeficientes da Modelação por regressão múltipla linear

Modelação	Coeficientes de regressão		Coeficientes padronizados Beta	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade		
	B	Erro				Tolerância	VIF	
Modelação linear (modelo 9)	(Constante)	-0,0735	0,012		-6,182	0,000		
	$Ip_{C.D} \cdot I$	-0,011	0,003	-7,982	-3,884	0,001	0,001	904,414
	$Ip_{T.U} \cdot I$	0,00503	0,001	8,556	4,154	0,000	0,001	908,818
	$Ip_{U.S} \cdot I$	-0,000329	0,000	-0,374	-1,745	0,092	0,102	9,818
	$Ip_{E.T.F} \cdot I$	0,00354	0,001	0,732	4,884	0,000	0,208	4,811
Modelação quadrática (modelo 13)	(Constante)	-0,00471	0,007		-0,684	0,499		
	$Ip_{C.D} \cdot I^2$	-0,000273	0,000	-11,348	-3,670	0,001	0,000	2110,321
	$Ip_{T.U} \cdot I^2$	0,000114	0,000	11,061	3,662	0,001	0,000	2013,068
	$Ip_{E.T.F} \cdot I^2$	0,000103	0,000	1,197	5,318	0,000	0,089	11,179

As estatísticas de colinearidade utilizadas para validar o modelo analisam se há multi-colinearidade entre as variáveis independentes. O valor de tolerância deve ser maior que 0,1 e o VIF menor que 10 para que não haja multi-colinearidade (MYERS, 1986). O modelo 9 determinado a partir da análise estatística dos índices ponderados multiplicados pela idade, modelação linear, apresenta duas variáveis com alto índice de multi-colinearidade, sendo o  $Ip_{C.D} \cdot I$ - índice ponderado da chuva dirigida e o  $Ip_{T.U} \cdot I$ - índice ponderado do teor de umidade ambos multiplicados pela idade. A multi-colinearidade dos dois índices pode ser explicada pela correlação entre o teor de umidade com a incidência da chuva dirigida. O modelo 13 determinado a partir da análise estatística dos índices ponderados multiplicados pela idade ao

quadrado, modelação quadrática, também apresenta multi-colinearidade para os índices ponderados  $Ip_{C.D}.I$  e o  $Ip_{T.U}.I$  com resultado do VIF superior ao dobro do valor encontrado para o modelo 9, este aumento da multi-colineriade acontece pela multiplicação da idade ao quadrado. A multi-colinearidade, mesmo que em menor valor, também é evidenciada no índice ponderado dos esforços térmicos multiplicado pela idade ao quadrado ( $Ip_{E.T.F}.I^2$ ).

As equações dos modelos são escritas utilizando os coeficientes de regressão (B), as equações (44) e (45) descrevem a modelação linear e a modelação quadrática respectivamente:

$$FGD_{linear} = -0,0735 - 0,011Ip_{C.D}.I + 0,00503Ip_{T.U}.I - 0,000329Ip_{U.S}.I + 0,00354 Ip_{E.T.F}.I \quad (44)$$

$$FGD_{quadrática} = -0,00471 - 0,000273Ip_{C.D}.I^2 + 0,000114Ip_{T.U}.I^2 + 0,000103 Ip_{E.T.F}.I^2 \quad (45)$$

Onde:

$FGD_{linear}$  = Fator Geral de Degradação determinado na modelação linear

$FGD_{quadrática}$  = Fator Geral de Degradação determinado na modelação quadrática

$Ip_{C.D}$  = Índice ponderado da chuva dirigida

$Ip_{T.U}$  = Índice ponderado do teor de umidade

$Ip_{U.S}$  = Índice ponderado do número de ciclos de umidificação e secagem

$Ip_{E.T.F}$  = Índice ponderado dos esforços térmicos segundo Fiorito (FIORITO, 2009)

$I$  = Idade da edificação em anos

Os coeficientes padronizados (Beta) representam a significância de cada variável independente em relação a variável dependente (PEREIRA *et al.*, 2019). Na Figura 19 estão ilustradas as significâncias de cada variável para o resultado da modelação linear e quadrática e na Figura 20 está ilustrada a importância relativa de cada variável dos modelos.

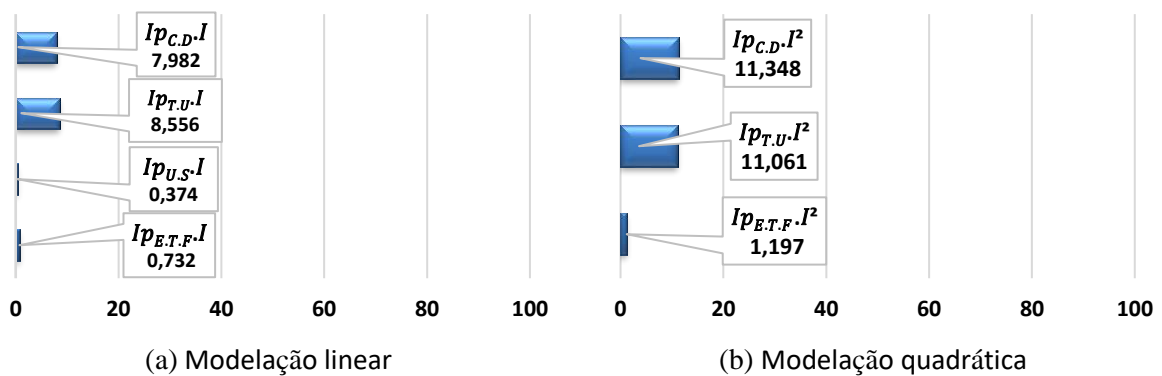


Figura 19- Significâncias das variáveis na predição dos modelos

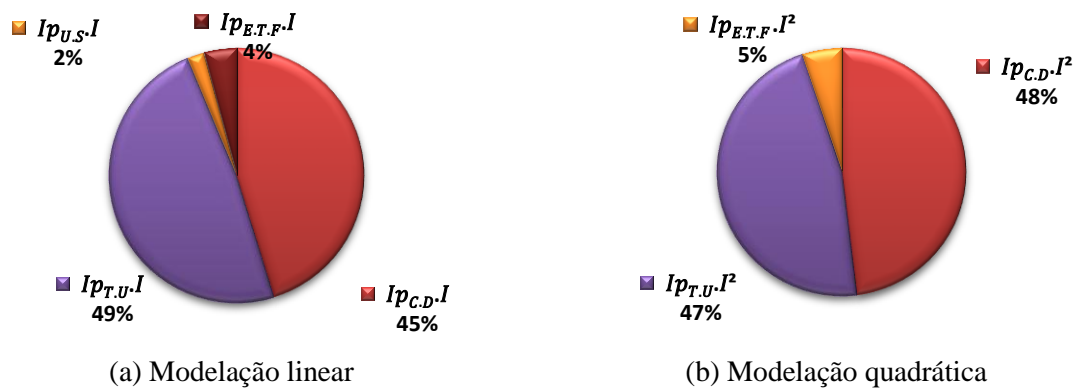


Figura 20- Importância relativa das variáveis

Em ambos os modelos as variáveis mais significativas são os índices ponderados pela chuva dirigida e pelo teor de umidade quando multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado. Na modelação linear o  $Ip_{C.D}.I$  apresenta nível de significância igual a 7,98% e importância relativa igual a 45% em relação as demais variáveis, o  $Ip_{T.U}.I$  apresenta nível de significância igual a 8,56% e importância relativa igual a 49% em relação as demais variáveis. Na modelação quadrática o  $Ip_{C.D}.I^2$  apresenta nível de significância igual a 11,35% e importância relativa igual a 48% em relação as demais variáveis, o  $Ip_{T.U}.I^2$  apresenta nível de significância igual a 11,06% e importância relativa igual a 47% em relação as demais variáveis.

#### 4.5 APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO

Com os modelos pode-se identificar o estado atual de degradação das fachadas utilizando as equações (44) e (45) e também estimar em qual idade as fachadas apresentaram condições severas de degradação. Em cada equação dos modelos obtidos pela regressão linear e quadrática a variável representativa da idade é isolada para cálculo das idades previstas em cada nível de gravidade de degradação, considerando os valores de FGD e os valores dos índices ponderados. Na Tabela 20 está detalhada as estimativas de idade de cada fachada para cada nível de gravidade de degradação conforme modelação linear.

Tabela 20- Idade prevista em cada nível de gravidade conforme modelação linear

IDENT.	GRAVIDADE A	GRAVIDADE B	GRAVIDADE C	GRAVIDADE D
A1.1	< 12	12 a 20	20 a 39	>39
A1.2	<15	15 a 24	24 a 48	>48
A1.3	<12	12 a 19	19 a 38	>38
A2.1	<13	13 a 21	21 a 41	>41
A2.2	<14	14 a 22	22 a 44	>44
A2.3	<14	14 a 23	23 a 45	>45
A2.4	<13	13 a 20	20 a 40	>40
A2.5	<12	12 a 19	19 a 37	>37
A2.6	<13	13 a 21	21 a 41	>41
A3.1	<14	14 a 22	23 a 44	>44
A3.2	<15	15 a 24	25 a 48	>48
A3.3	<14	14 a 22	23 a 44	>44
A3.4	<14	14 a 23	23 a 46	>46
B1.1	<14	14 a 22	22 a 43	>43
B1.2	<19	19 a 30	31 a 60	>60
B2.1	<14	14 a 23	23 a 45	>45
B2.2	<17	17 a 26	27 a 52	>52
B2.3	<14	14 a 23	23 a 45	>45
B3.1	<17	17 a 26	27 a 52	>52
C1.1	<13	13 a 21	21 a 42	>42
C1.2	<19	19 a 30	31 a 60	>60
C2.1	<13	13 a 21	21 a 41	>41
C2.2	<14	14 a 23	23 a 45	>45
C2.3	<13	13 a 21	21 a 41	>41
C3.1	<13	13 a 21	21 a 41	>41
C3.2	<14	14 a 22	22 a 44	>44
C3.3	<20	20 a 32	32 a 63	>63
D1.1	<14	14 a 23	23 a 45	>45
D1.2	<21	21 a 34	34 a 67	>67
D2.1	<21	21 a 33	33 a 65	>65
D3.1	<15	15 a 24	24 a 48	>48
D3.2	<16	16 a 26	26 a 51	>51
D3.3	<15	15 a 24	24 a 48	>48
D3.4	<15	15 a 24	25 a 48	>48
<b>MÉDIA</b>	<b>&lt; 14,9</b>	<b>14,9 a 23,8</b>	<b>24 a 47,1</b>	<b>&gt;47,1</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>2,5</b>	<b>3,9</b>	<b>4,0</b>	<b>7,7</b>
Gravidade A: FGD abaixo de 0.003 -> degradação leve.				
Gravidade B: FGD entre 0.003 e 0.049 -> degradação localizada, sem prejuízo ao desempenho.				
Gravidade C: FGD entre 0.050 e 0.169 -> há perda da funcionalidade e segurança do sistema.				
Gravidade D: FGD maior que 0.169 -> degradação severa, com prejuízo ao desempenho e segurança.				

Os níveis de gravidade de degradação determinadas a partir da modelação linear (Tabela 20), o qual considera apenas os índices ponderados multiplicado pela idade, mostram que fachadas de edifícios com idades de até 14,9 anos ( $\pm 2,5$ ) apresentam degradações leves ou localizadas e que o fim da vida útil ocorre a partir dos 24 anos ( $\pm 4$ ), as fachadas de edificações com mais de 47 anos ( $\pm 7,7$ ) apresentam degradação severa com prejuízos ao desempenho do sistema e a

segurança dos usuários. Na Tabela 21 está detalhada as estimativas de idade de cada fachada para cada nível de gravidade de degradação conforme modelação quadrática.

Tabela 21- Idade prevista em cada nível de gravidade conforme modelação quadrática

IDENT.	GRAVIDADE A	GRAVIDADE B	GRAVIDADE C	GRAVIDADE D
A1.1	<8	8 a 21	21 a 38	>38
A1.2	<10	10 a 27	28 a 48	>49
A1.3	<8	8 a 21	21 a 38	>38
A2.1	<8	8 a 22	22 a 40	>40
A2.2	<9	9 a 24	24 a 44	>44
A2.3	<10	10 a 25	26 a 46	>46
A2.4	<8	8 a 22	22 a 40	>40
A2.5	<8	8 a 20	20 a 36	>36
A2.6	<8	8 a 22	22 a 39	>39
A3.1	<9	9 a 24	24 a 42	>42
A3.2	<10	10 a 27	28 a 49	>49
A3.3	<9	9 a 24	24 a 43	>43
A3.4	<9	9 a 24	24 a 43	>43
B1.1	<9	9 a 24	24 a 43	>43
B1.2	<11	11 a 29	30 a 53	>53
B2.1	<9	9 a 24	24 a 44	>44
B2.2	<11	11 a 30	30 a 53	>53
B2.3	<9	9 a 23	23 a 41	>41
B3.1	<11	11 a 30	30 a 53	>53
C1.1	<8	8 a 22	22 a 39	>39
C1.2	<11	11 a 29	30 a 53	>53
C2.1	<8	8 a 22	22 a 40	>40
C2.2	<10	10 a 25	26 a 46	>46
C2.3	<8	8 a 22	22 a 39	>39
C3.1	<8	8 a 22	22 a 40	>40
C3.2	<9	9 a 24	24 a 44	>44
C3.3	<12	12 a 31	31 a 55	>55
D1.1	<9	9 a 24	24 a 44	>44
D1.2	<12	12 a 33	33 a 59	>59
D2.1	<12	12 a 32	32 a 57	>57
D3.1	<10	10 a 26	26 a 46	>46
D3.2	<11	11 a 28	29 a 51	>51
D3.3	<9	9 a 25	25 a 45	>45
D3.4	<9	9 a 25	25 a 45	>45
<b>MÉDIA</b>	<b>&lt; 9,4</b>	<b>9,4 a 25,1</b>	<b>25,3 a 45,2</b>	<b>&gt;45,2</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>1,3</b>	<b>3,4</b>	<b>3,5</b>	<b>6,0</b>

Gravidade A: FGD abaixo de 0.003 -> degradação leve.

Gravidade B: FGD entre 0.003 e 0.049 -> degradação localizada, sem prejuízo ao desempenho.

Gravidade C: FGD entre 0.050 e 0.169 -> há perda da funcionalidade e segurança do sistema.

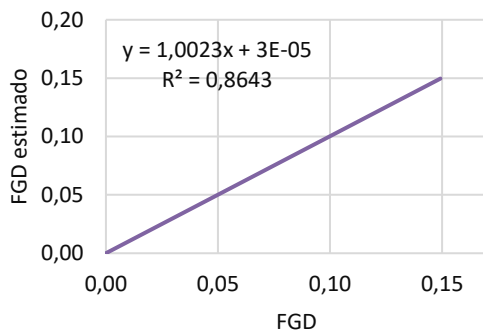
Gravidade D: FGD maior que 0.169 -> degradação severa, com prejuízo ao desempenho e segurança.

As condições de degradação determinadas a partir da modelação quadrática (Tabela 21), a qual considera apenas os índices ponderados multiplicado pela idade ao quadrado, mostram que

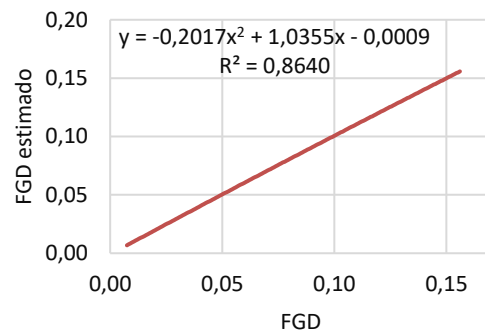


fachadas de edifícios com idades de até 9,4 anos ( $\pm 1,3$ ) apresentam degradações leves ou localizadas e que o fim da vida útil ocorre a partir dos 25 anos ( $\pm 3,5$ ), as fachadas de edificações com mais de 45 anos ( $\pm 6,0$ ) apresentam degradação severa com prejuízos ao desempenho do sistema e a segurança dos usuários.

A Figura 21 mostra a relação entre o valor predito pelo valor observado para ambas as modelações.



(a) Modelação Linear



(a) Modelação quadrática

Figura 21- Valor estimado por valor observado

A relação entre o valor predito pelo valor observado se mostra com altos níveis de correlação tanto para modelação linear quanto para modelação quadrática,  $R^2$  de 0,86, o que deixa claro que a modelação é efetiva na utilização dos índices ponderados multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado.

## 5 SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo os maiores valores de radiação solar são encontrados nas orientações Norte, Nordeste e Noroeste, a menor incidência é apresentada na orientação Sul. A incidência da radiação solar nas fachadas irá influenciar diretamente nas temperaturas alcançadas nas cerâmicas. Maiores temperaturas podem ocasionar em variações dimensionais que conseqüentemente geram esforços entre as camadas do revestimento que ao afetar a adesão entre as camadas pode ocasionar descolamentos (FIORITO, 2009; SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 2002; WETZEL *et al.*, 2012b).

As maiores incidências de chuva dirigida ocorrem nas orientações Norte e Noroeste e as menores em Sul e Sudoeste. A presença da umidade pode afetar a aderência entre as camadas do revestimento, visto que a partir das ocorrências de ciclos de umidificação e secagem há também as variações dimensionais ocasionadas pela expansão por umidade (WETZEL *et al.*, 2012a; WINNEFELD *et al.*, 2012).

As análises de comportamento da fachada consideram tanto a incidência dos agentes climáticos como chuva dirigida e radiação, quanto as características do revestimento (utilizadas na simulação). As correlações dos resultados visam compreender a relação entre os agentes climáticos de degradação e os comportamentos dos elementos do edifício, particularmente o sistema de revestimento cerâmico das fachadas.

Ao correlacionar os resultados da simulação higrotérmica com o  $FGD_{fach}$  pode-se analisar a real influência de agentes climáticos na evolução da degradação de fachadas cerâmicas. Os resultados dos índices ponderados dos agentes climáticos de degradação ( $Ip_{R,T}$  e  $Ip_{C,D}$ ) são condicionados pela orientação da fachada. Os índices ponderados em função ao teor de umidade ( $Ip_{T,U}$ ), amplitude de temperatura ( $Ip_{A,T}$ ) e esforços térmicos ( $Ip_{E.T.T}$ ,  $Ip_{E.T.F}$ ) ocorrem também em função da incidência dos agentes climáticos, mas são variáveis conforme as características do material, como a absorvância da peça cerâmica, dentre outros fatores.

A absorvância e a orientação solar se mostram como fatores importantes nos resultados da simulação higrotérmica, enquanto a orientação influencia no total do agente, a absorvância ocasiona na variação dos comportamentos do sistema. Uma absorvância menor conseqüentemente representa menores temperaturas superficiais, menores índices de amplitude

térmica e de esforços térmicos. As ponderações do teor de umidade ( $I_{p_{T,U}}$ ) e dos ciclos de umidificação e secagem ( $I_{p_{U,S}}$ ) são variáveis conforme a incidência de chuva dirigida na fachada e pelas amplitudes de temperatura que o sistema alcança (para favorecimento da secagem).

A idade se mostra como a principal variável explicativa da degradação, visto que ao multiplicar os índices ponderados pela idade uma tendência linear é observada em todos os casos, quanto maior o índice ponderado multiplicado pela idade maior o indicador de degradação. A multiplicação dos índices ponderados pela idade é justificada visto que mais de 70% do processo de degradação de revestimento é explicado pela idade (SILVA; BRITO; GASPAR, 2011). Os estudos sobre degradação fachadas são aprimorados com a inclusão dos índices ponderados dos agentes climáticos de degradação e comportamentos da fachada, obtidos pela simulação higrotérmica, como variáveis que influenciam no processo de degradação além da idade da edificação. A multiplicação dos índices ponderados pela idade da edificação remete ao total de ação dos agentes incidentes na fachada. Ao utilizar a idade ao quadrado busca-se que o modelo de degradação se aproxime-se mais de uma função quadrática.

A diferença entre as fachadas que possuem incidências de agentes climáticos de degradação semelhantes ocorre devido aos comportamentos da fachada. A degradação é influenciada não só pelos níveis dos agentes climáticos, mas também pelas características do sistema, tal como a absorvância da peça cerâmica. A multiplicação dos índices ponderados pela idade representa, de forma simplificada, o total de incidência do agente ou dos comportamentos da fachada em função da idade do revestimento.

Ao multiplicar os índices ponderados pela idade um crescimento linear é observado, quanto maior o índice ponderado multiplicado pela idade maior o indicador de degradação. Nota-se que tanto as incidências dos agentes climáticos quanto os comportamentos da fachada influenciam de maneira singular na degradação dos revestimentos cerâmicos. Confirma-se que o mecanismo de degradação do revestimento cerâmico é altamente influenciável pelos parâmetros térmicos, corroborando com as pesquisas de Fiorito (2009) e Saraiva, Bauer e Bezerra (2002). Observa-se também grande influência da umidade no sistema pela correlação entre os índices de chuva dirigida, teor de umidade e ciclos de umidificação e secagem com o indicador de degradação FGD, sendo necessário a modelação por análise estatística para

identificar quais os parâmetros que mais influenciam a evolução da degradação em revestimentos cerâmicos.

A modelação utilizando somente os índices ponderados não se mostra efetiva para previsão da evolução da degradação em revestimentos cerâmicos, visto que o modelo resulta em um  $R^2_a$  de 0,097 significando que o mesmo explica somente 9,7 % do indicador de degradação FGD.

A inclusão da idade na multiplicação pelos índices ponderados melhora os resultados da modelação, a modelação linear apresenta um  $R^2_a$  de 0,846 indicando que o respectivo modelo explica 84,60% do FGD. Os resultados são singelamente aperfeiçoados a analisar os índices ponderados multiplicados pela idade ao quadrado sendo que neste caso a modelação quadrática apresenta um  $R^2_a$  de 0,85 indicando que o respectivo modelo explica 85% do FGD. Tanto a modelação linear quanto a modelação quadrática atendem aos requisitos de independência dos resíduos, indicando que não há diferença significativa entre o valor previsto e o valor observado. Pela análise de variância as modelações linear e quadrática são consideradas como altamente significativas com p-valor igual 0,000.

Pela análise estatística é evidenciado, tanto na modelação linear quanto na modelação quadrática, que os índices ponderados da chuva dirigida e do teor de umidade multiplicados pela idade apresentam alto índice de multi-colinearidade, evidenciando a correlação entre esses índices ponderados. Na modelação quadrática a multi-colinearidade, mesmo que em menor dimensão, também é evidenciada no índice ponderado  $Ip_{E.T.F} \cdot I^2$ .

Em ambos os modelos, linear e quadrático, as variáveis mais significativas são os índices ponderados pela chuva dirigida e pelo teor de umidade quando multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado. Na modelação linear o índice ponderado da chuva dirigida multiplicado pela idade apresenta nível de significância igual a 7,98% e importância relativa igual a 45% em relação as demais variáveis, o índice ponderado do teor de umidade multiplicado pela idade apresenta nível de significância igual a 8,56% e importância relativa igual a 49% em relação as demais variáveis. Na modelação quadrática o índice ponderado da chuva dirigida multiplicado pela idade ao quadrado apresenta nível de significância igual a 11,35% e importância relativa igual a 48% em relação as demais variáveis, o índice ponderado do teor de umidade multiplicado pela idade ao quadrado apresenta nível de significância igual a 11,06% e importância relativa igual a 47% em relação as demais variáveis.

Com aplicação da modelação linear o fim da vida útil das fachadas analisadas ocorre aos 24 anos ( $\pm 4$ ) e com a aplicação da modelação quadrática o fim da vida útil ocorre dos 25 anos ( $\pm 3,5$ ). Os resultados da previsão de vida útil a partir da modelação da degradação linear e quadrática estão em concordância com o apresentado por Silva e Brito (2021). Estes pesquisadores analisaram 23 pesquisas sobre fachadas com revestimento cerâmico realizadas em todo mundo encontraram que a vida útil média estimada das fachadas é de 36 ( $\pm 15$ ) anos.

A modelação linear e quadrática se mostra efetiva com a utilização dos índices ponderados multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado devido aos altos níveis de correlação entre o valor predito e o valor observado. A relação entre o valor predito pelo valor observado se mostra com altos níveis de correlação tanto para a modelação linear quanto a modelação quadrática, o que deixa claro que a modelação é efetiva na utilização dos índices ponderados multiplicados pela idade e pela idade ao quadrado,  $R^2$  de 0,86.

## 6 CONCLUSÕES

O indicador de degradação representativo de cada fachada,  $FGD_{fach}$ , é essencial para correlação com índices ponderados dos agentes climáticos de degradação e comportamentos do sistema. A determinação do  $FGD_{fach}$  é importante para a modelação da degradação, visto que toda a análise é realizada considerando cada fachada como um todo.

Os principais modelos de degradação apontam que a idade é uma variável significativa, ao observar os resultados da modelação estes se mostram coerentes na utilização dos valores de  $FGD_{fach}$  com a associação da idade de forma correlata aos índices ponderados. Ao considerar isoladamente os índices ponderados quantificados pela ação climática e pelas variáveis de comportamento da fachada observa-se que eles não explicam a degradação, ou seja, não são estatisticamente significativos na predição do indicador de degradação. Algumas tendências podem ser observadas ao associar os índices ponderados a idade e a idade ao quadrado e correlacioná-los individualmente com o indicador de degradação  $FGD_{fach}$ .

Os mecanismos de degradação do revestimento cerâmico são influenciados pelos parâmetros relacionados a temperatura e a umidade, logo a simulação higrotérmica pode ser aplicada em seu processo de modelação da degradação. A modelação linear, que emprega a associação da idade, identifica os índices ponderados da chuva dirigida, teor de umidade, ciclos de umidificação e secagem e esforços térmicos como as variáveis que mais influenciam no processo de degradação dentre as variáveis consideradas. Em relação a modelação quadrática, que emprega a associação da idade ao quadrado, estas variáveis se repetem com exceção dos ciclos de umidificação e secagem. Em ambas as modelações, linear e quadrática, as variáveis mais significativas nos modelos são os índices ponderados pela chuva dirigida e pelo teor de umidade.

A modelação linear e quadrática são aplicáveis na determinação da evolução da degradação das fachadas, no entanto em relação ao que se espera do fenômeno de degradação de revestimentos cerâmico a modelação quadrática mostra mais condizente. Os índices ponderados da chuva dirigida, teor de umidade, ciclos de umidificação e secagem e os esforços térmicos ao serem associados a idade e a idade ao quadrado se mostram estatisticamente representativos na determinação do indicador de degradação e com a aplicação dos modelos a estimativa de vida útil pode ser definida. A aplicação da modelação linear permite determinar que o fim da vida

útil das fachadas analisadas ocorre aos 24 anos ( $\pm 4$ ), já com a aplicação da modelação quadrática o fim da vida útil ocorre aos 25 anos ( $\pm 3,5$ ).

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se as seguintes propostas para trabalhos futuros que darão continuidade nas pesquisas de degradação de fachadas com revestimentos cerâmicos:

- Ampliação das amostras utilizadas na pesquisa, bem como a possibilidade da análise de toda a base de dados do DMM *project*.
- Realizar a modelação através da regressão múltipla não linear.
- Realizar a modelação da degradação por zona de fachadas.
- Aplicar a metodologia proposta em outras cidades.
- Aplicar outras metodologias para determinação dos esforços térmicos tanto na placa cerâmica quanto na interface entre a placa e a argamassa.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E632-82**. : Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials. West Conshohocken: ASTM, 1996.

ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília: sistematização da incidência de casos**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil.—Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3**. : Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13755**. : Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**. : Edificações habitacionais - Desempenho: Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BAUER, E.; CASTRO, E. K. DE; ANTUNES, G. R.; LEAL, F. E. Identification and Quantification of Failure Modes of New Buildings Façades in Brasília. **XII DBMC - International Conference on Durability of Building Materials and Components**, p. 1–7, Porto- Portugal, abr. 2011.

BAUER, E.; KRAUS, E.; SILVA, M. N. B.; ZANONI, V. A. G. Evaluation of damage of building facades in Brasília. **XIII DBMC - International Conference on Durability of Materials and Components**, p. 535–542, São Paulo, set. 2014.

BAUER, E. **DMM Project: Degradação de Edifícios – Mensuração e Modelação**. Projeto de pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil—Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 2021.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B. Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 151–159, jun. 2015.

BAUER, E.; NASCIMENTO, M. L. .; CASTRO, E. . **Parâmetros e ensaios físicos de materiais e componentes da fachada**. Relatório interno, Universidade de Brasília: Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) –UnB/ENC- Brasília, 2015.

BAUER, E.; SILVA, M. D. N. Degradação de Fachadas com revestimento cerâmico de edifícios de Brasília-DF. **CBPAT Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, p. 853–860, abr. 2016.

BAUER, E.; SOUZA, A. L. R. Failure patterns associated with facade zones and anomalies in



the initiation and propagation of degradation. **Construction and Building Materials**, v. 347, n. 128563, p. 2–12, set. 2022.

BAUER, E.; SOUZA, J. S.; MOTA, L. M. G. Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 23–43, out. 2021.

BAUER, E.; SOUZA, J. S.; PIAZZAROLLO, C. B. Application of the Degradation Measurement Method in the Study of Facade Service Life. In: DELGADO, J. M. P. Q. (Ed.). **Building Pathology, Durability and Service Life**, v. 12. Porto, Portugal: Springer International Publishing, 2020. p. 105–119.

BLOCKEN, B.; DEZSÖ, G.; VAN BEECK, J.; CARMELIET, J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 14, p. 1714–1725, maio 2010.

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. A review of wind-driven rain research in building science. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 92, n. 13, p. 1079–1130, nov. 2004.

BOCHEN, J.; NOWOŚWIAT, A. Service life assessment of renders on the basis of changes of physical and mechanical properties during simulated weathering. **Construction and Building Materials**, v. 229, n. 117003, p. 1–14, dez. 2019.

BORDALO, R.; BRITO, J. DE; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Abordagem a um modelo de previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 16, p. 55–69, out. 2010.

BORDALO, R.; BRITO, J. DE; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems. **Building Research & Information**, v. 39, n. 1, p. 66–78, fev. 2011.

BRITO, J. DE; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Métodos de Previsão da Vida Útil dos Revestimentos de Fachada. **X SBTA- Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, p. 1–21, Fortaleza, maio 2013.

CARASEK, H.; JAPIASSÚ, P.; CASCUDO, O.; VELOSA, A. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 85–98, 30 maio 2014.

CARLOS, J.; UCHÔA, B.; MENDES, L.; MARCUS, B.; NORONHA DE BRITO, A.; CARLOS, A.; JÚNIOR, M.; TAYLOR, W.; SILVA, M.; UCHÔA, J. C. B.; BEZERRA, L. M.; BRITO, M. A. N. DE; JÚNIOR, A. C. M.; SILVA, W. T. M. Análise de tensões internas em sistemas de revestimentos cerâmicos de fachadas no distrito federal devido a carregamentos térmicos utilizando modelagem MEF 3D. **XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE**, p. 1–22, Brasília, nov. 2016.

CARRETERO-AYUSO, M. J.; RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, C. E.; BIENVENIDO-HUERTAS,

D.; MOYANO, J. J. Interrelations between the types of damages and their original causes in the envelope of buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 39, n. 102235, p. 1–13, fev. 2021.

CARRETERO-AYUSO, M. J.; MORENO-CANSADO, A.; GARCÍA-SANZ-CALCEDO, J. Anomalies in External Construction Elements in Spain according to Cause-Damage Relationship. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 25, n. 3, p. 1–7, set. 2019a.

CARRETERO-AYUSO, M. J.; SÁEZ-PÉREZ, M. P. Interaction and diagnosis of climatological factors in deficiencies in construction units outside buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 27, n. 100947, p. 1–11, set. 2020.

CARRETERO-AYUSO, M.; MORENO-CANSADO, A.; GARCÍA-SANZ-CALCEDO, J. Influence of Climate Conditions on Deficiencies of Building Roofs. **Applied Sciences**, v. 9, n. 7, p. 1389, 2 abr. 2019b.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear: Um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**. Brasília, Brasil: ENAP, 2019.

CHEW, M. Y. . Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 293–296, jul. 1999.

COELHO, G. B. A.; SILVA, H. E.; HENRIQUES, F. M. A. Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. **Building and Environment**, v. 142, n. March, p. 439–450, 1 set. 2018.

CÓIAS, V. **Inspeções e ensaios na reabilitação de edifícios**. 2 ed ed. Lisboa: IST PRESS, 2009.

COSTA, E. B. C. **Investigação do método de ensaio de determinação da resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. Dissertação (Mestrado)—Goiania: Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil, 2007.

DANIOTTI, B.; SPAGNOLO, S. L.; PAOLINI, R. Climatic data analysis to define accelerated ageing for Reference Service Life evaluation. **11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components**, p. 1–8, maio 2008.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15026**. : Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. CEN, Brussels, Belgium, 2007.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações. **X Congresso Internacional de Tintas - Artigo**, 2007.

FARMER, M. C. Unique Considerations for Stone Facade Inspection and Assessment. In: J. ERDLY; SCHWARTZ, T. A. (Eds.). **Building Facade Maintenance, Repair, and Inspection**. West Conshohocken, PA: ASTM International, STP 1444, 2004. p. 162–176.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos**. 2º ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2009.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS. **What is WUFI?** Disponível em: <<https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>>. Acesso em: 3 abr. 2021.

FREITAS, A. S. S. L. A. DE. **Avaliação do comportamento higrotérmico de revestimentos exteriores de fachadas devido à acção da chuva incidente**. Mestrado integrado em Engenharia Civil—Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

GASPAR, P. L.; BRITO, J. DE. Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators. **Building and Environment**, v. 43, n. 11, p. 1818–1828, nov. 2008.

GASPAR, P. M. DOS S. L. **Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes**. Mestrado em Construção—Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico- Universidade Técnica de Lisboa, 2003.

GUAN, W. L.; ALUM, J.; LIU, Z. J.; YANG, T. Performance of External Tiled-Wall Systems under Tropical Weathering. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 11, n. 1, p. 24–34, fev. 1997.

HENRIQUE, E. DE S. **Sensibilidade à degradação das fachadas: Estudo dos aspectos construtivos**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 2017.

HERWEGH, M.; ZURBRIGGEN, R.; METTIER, R.; WINNEFELD, F.; KAUFMANN, J.; WETZEL, A. Hygrical shrinkage stresses in tiling systems: Numerical modeling combined with field studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 1–10, jan. 2015.

IBM. **SPSS STATISTIC Software**. , 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15686-1**. : Buildings - Service life planning. Part 1: General principles and framework. Switzerland: BS ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15686-2**. : Buildings - Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. Switzerland, BS ISO, 2012.

JUNGINGER, M. **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos: Influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

JUNGINGER, M. A nova NBR 13755. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 1844–1852, nov. 2014.

LODETTI LUIZ, T.; ANTUNES, E. G. P. **Análise da influência da espessura das juntas de assentamento na resistência de aderência do sistema de revestimento cerâmico de**

**fachada.** Universidade do Extremo Sul Catarinense- UNESC—Criciúma: UNESC, 2018.

LUCENAS, R.; BAUER, E. Análise da degradação de fachada de edifício localizado em Brasília-DF. **Construção- Congresso de Construção Civil**, p. 854–864, maio 2020.

MAGALHÃES, T. C. M. DE. **Influência da pigmentação e/ou da quantidade de aditivo hidrorrepelente na patologia de desagregação da argamassa de rejuntamento.** Dissertação (mestrado)—Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 2008.

MAIA, J.; RAMOS, N. M. M.; VEIGA, R. A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 654–663, out. 2019.

MANSON, S. S. Thermal Stress and low-cycle fatigue. p. 404 p., 1966.

MARANHÃO, F. L.; LOH, K.; JOHN, V. M. The influence of moisture on the deformability of cement–polymer adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2948–2954, jun. 2011.

MAROCO, J. **Análise Estatística- Com utilização do SPSS.** 3ª ed. Lisboa: Edições Sílabo LDA, 2007.

MOTA, L.; BAUER, E. Quantificação do transporte de água em fachadas com emprego da simulação higrotérmica. **REHABEND 2020 Congress**, p. 2051–2059, mar. 2020.

MYERS, R. H. **Classical and Modern Regression with Applications.** Belmont, CA: Duxbury press, 1986. v. 2

NASCIMENTO, M.; BAUER, E.; SOUZA, J.; ZANONI, V. Estudo da degradação por ação de agentes climáticos nas fachadas de edifícios. **REHABEND 2016 congress**, p. 650–657, maio 2016.

NASTRI, S. **Expansão por umidade de revestimentos cerâmicos: métodos de medida e variáveis envolvidas.** Dissertação (mestrado)—São Carlos: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2015.

PEREIRA, A. DA S.; MANOSSO, T. W. S.; FOSSATTI, E. C.; BERTI, S. M. **Regressão Linear Múltipla: Como simplificar por meio do Excel e SPSS?** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo-UPF, 2019.

PEREIRA, C.; BRITO, J. DE; SILVESTRE, J. D. Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings. **Engineering Failure Analysis**, v. 90, p. 103–115, 2018.

PIAZZAROLLO, C. B. **Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada.** Dissertação (Mestrado)—Brasília: Universidade de Brasília-UNB, 2019.

PIAZZAROLLO, C. B.; BAUER, E. Quantificação dos agentes de degradação e sua associação com a mensuração da degradação-estudo de caso em Brasília-Brasil. **Construção- Congresso de Construção Civil**, 2018.

PINHEIRO, P. I. S.; BAUER, E.; SOUZA, J. S. DE. Aplicação do Método de Mensuração da Degradação com a finalidade de quantificação da Vida Útil. **XII SBTA- Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, p. 1–7, ago. 2017.

RIBEIRO, F. A.; BARROS, M. M. S. B. DE. **Juntas de movimentação em Revestimentos Cerâmicos de Fachadas**. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2010.

RODRIGUES, A. **Análise estatística na avaliação de teste de degradação acelerada de conjuntos cerâmicos em fachadas**. Dissertação (mestrado)—Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2015.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. **ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2012.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada**. Dissertação (mestrado)—Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 1998.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica. **ANTAC- Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 2, n. 2, p. 47–56, jun. 2002.

SHOHET, I. M.; ROSENFELD, Y.; PUTERMAN, M.; GILBOA, E. Deterioration patterns for maintenance management-A methodological approach. **Durability of Building Materials and Components**, n. 8, p. 1666–1678, 1999.

SILVA, A.; BRITO, J.; DE BRITO, J. Service life of building envelopes: A critical literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. April, p. 102646, 1 dez. 2021.

SILVA, A.; BRITO, J.; GASPAS, P. L. Modelo de previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes (fixados directamente ao suporte). **Engenharia Civil - UM**, n. 41, p. 35–50, 2011.

SILVA, A.; BRITO, J.; GASPAS, P. L. **Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings**. Lisboa, Portugal: Springer International Publishing Switzerland, 2016.

SILVA, M. DE N. B. DA; BAUER, E.; CASTRO, E. K.; ZANONI, V. A. G. Distribuição de ocorrência de danos e patologias em fachadas de Brasília – Estudo de caso. **Argamassas - Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento**, p. 1–11, jun. 2014.

SILVA, S. C. B. DA. **Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas**. Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense-UNESC, 2014.

SILVESTRE, J. D. **Sistema de apoio à inspeção e diagnóstico de anomalias em Revestimentos Cerâmicos Aderentes**. Dissertação (Mestrado)—Lisboa, Portugal: Universidade técnica de Lisboa, 2005.

SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. DE. Ceramic tiling inspection system. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 653–668, fev. 2009.

SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Ceramic tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1560–1571, abr. 2011.

SOUSA, J. DO N.; LUCENAS, R. R. D.; DIAS, S. C.; NASCIMENTO, M. L. M. A Simulação Higrotérmica no Estudo da Degradação de Fachadas em Teresina-PI. **Patorreb- Conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios**, n. 6, abr. 2018.

SOUZA, J. S. DE. **Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil)—Brasília: Universidade de Brasília- UNB, 2019.

SOUZA, J.; SILVA, A.; DE BRITO, J.; BAUER, E. Analysis of the influencing factors of external wall ceramic claddings' service life using regression techniques. **Engineering Failure Analysis**, v. 83, n. July 2017, p. 141–155, 1 jan. 2018.

SOUZA, J.; PIAZZAROLLO, C. B.; BAUER, E. Aplicação do Método de Mensuração de Degradação em revestimentos de fachadas. **TECSIC- 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos**, ago. 2019.

SOUZA, J. S.; BAUER, E. Estado limite de degradação de fachadas revestidas em cerâmicas. **CIRMARE-Congresso Internacional na “Recuperação, Manutenção e Restauração de Edifícios”**, 2020.

TEMOCHE ESQUIVEL, J. F. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Tese (doutorado)—São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VALIATI, V. G. **Estudo da estanqueidade de rejuntas em revestimentos cerâmicos externos**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. **Cerâmica**, v. 65, n. 374, p. 303–318, jun. 2019.

WETZEL, A.; HERWEGH, M.; ZURBRIGGEN, R.; WINNEFELD, F. Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 39–50, jan. 2012a.

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M.; GREMINGER, A.; KAUFMANN, J.

Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 335–348, dez. 2012b.

WINNEFELD, F.; KAUFMANN, J.; HACK, E.; HARZER, S.; WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R. Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 426–438, maio 2012.

YIU, C. Y.; HO, D. C. W.; LO, S. M. Weathering effects on external wall tiling systems. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 3, p. 594–600, mar. 2007.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)—Brasília: Universidade de Brasília, 2015.

ZANONI, V. A. G.; DANTAS, A. L. DE F.; NUNES, L. S.; RIOS, R. B. Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 109–120, jul. 2020.

ZANONI, V.; SÁNCHEZ, J. M.; BAUER, E. Desafios e Contribuições: Estudo da degradação das edificações por meio da simulação higrotérmica. **XVIENTAC- Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 2488–2498, set. 2016.

ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling. **Materials and Structures**, v. 49, n. 5, p. 1917–1933, 8 maio 2016.

## ANEXO I- MMD

No Método de Mensuração de Degradação (MMD) as fachadas são divididas em amostras e posteriormente é realizada a sobreposição de uma malha quadriculada em escala de 0,50 cm por 0,50 cm, que permite a contagem dos danos em função da área afetada (Figura 22). A separação das fachadas em amostras é importante para critérios de comparação com outras edificações com geometrias distintas. Cada amostra deve apresentar uma área entre 50 e 300m<sup>2</sup>, estando sempre no mesmo plano, com limite nas articulações estruturais e mesmo elemento arquitetônico (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

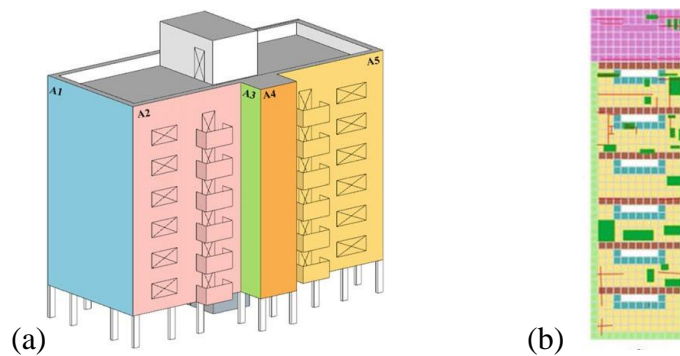


Figura 22- (a) definição das amostras nas fachas; (b) quantificação com sobreposição de malha (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

A quantificação da área degradada da fachada é feita realizando o agrupamento das patologias em quatro grupos principais como caracterizado na Tabela 22:

Tabela 22- Classificação e agrupamentos das anomalias

Anomalias	Descrição
<b>Descolamento cerâmico (DT)</b>	Envolve todas as anomalias associadas com o desprendimento de peças cerâmicas de fachadas, independentemente da causa (estresse, tensão, deslocamento, falhas na execução, entre outras) e independentemente de como ela ocorre (na superfície, na base de argamassa, entre outras).
<b>Fissuração (CR)</b>	Todas as fissuras no revestimento cerâmico, independentemente de sua manifestação e origem, bem como da zona da fachada onde ocorre.
<b>Falha nas juntas (JO)</b>	Anomalias observadas em qualquer junta na fachada. Qualquer situação é computada, tais como: rachaduras e remoção do material de enchimento, falhas nos selantes, entre outros.
<b>Manchas (ST)</b>	Manchas superficiais de qualquer natureza, como eflorescência, umidade, entre outras.

O FD (equação (26)) permite o estudo da incidência das anomalias em cada região da fachada, pode-se inclusive o calcular separadamente para cada anomalia e para cada amostra em cada fachada da edificação. Ao se calcular o FD para cada orientação tem-se a zona mais degradada,



pode-se fazer o mesmo para estudar o impacto dos elementos de arquitetura como as empenas e escadarias. O FGD (equação (28)) considera o custo de reparo e a gravidade das anomalias em função da área afetada, indicando a severidade da degradação e o estado atual do processo de degradação. O FGD pode ser expresso graficamente por uma curva de degradação que reflete a velocidade em que a edificação perde seu desempenho (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

Para determinação do fator (G) são associadas quatro condições de degradação (Tabela 23) para cada grupo de anomalias conforme seu  $FD_n$  (Tabela 24).

Tabela 23- Descrição dos níveis de gravidades de degradação (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

Gravidade	G	Descrição
A	1	Boas condições de serviço em que possíveis anomalias não prejudicam a funcionalidade e durabilidade do sistema. Não há risco para a segurança dos usuários e a manutenção preventiva é sugerida.
B	2	Presença de anomalias localizadas que prejudicam a funcionalidade, mas não prejudicam a durabilidade e a segurança dos usuários. A manutenção preditiva é sugerida e uma manutenção periódica para avaliar o desempenho do sistema.
C	3	Presença generalizada e simultânea de anomalias que prejudicam a funcionalidade, durabilidade e segurança do sistema. Procedimentos de manutenção corretiva são sugeridos.
D	4	Incidência generalizada de anomalias que prejudicam a funcionalidade, segurança e durabilidade, apresentando risco de colapso ou ruína do sistema. Neste nível, a reabilitação ou restauração do sistema é necessária.

Tabela 24- Critérios para definição do fator gravidade (G) (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

Gravidade	G	FD (%)			
		Descolamento (DT)	Fissuração (CR)	Falha nas juntas (JO)	Manchas (ST)
A	1	–	–	FD (JO) < 10	FD (ST) < 10
B	2	0 < FD (DT) < 5	0 < FD (CR) < 20	10 ≤ FD (JO) < 30	10 ≤ FD (ST) < 30
C	3	5 ≤ FD (DT) < 30	20 ≤ FD (CR) < 50	30 ≤ FD (JO)	30 ≤ FD (ST)
D	4	30 ≤ FD (DT)	50 ≤ FD (CR)		

Observa-se que a presença de descolamentos e fissuras já classifica a amostra como nível de gravidade B. Da mesma forma que não se deve classificar a ocorrência de falhas nas juntas e manchas como nível de gravidade D. Ao se considerar as piores condições para todas as anomalias tem-se o  $G_{max}$ , constante equivalente ao nível da pior condição correspondente a 14 (4+4+3+3) (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020). Na Tabela 25 observa-se a importância relativa (RI):

Tabela 25- Fator de importância relativa (RI) para cada grupo de anomalias (BAUER; SOUZA; PIAZZAROLLO, 2020).

	<b>Descolamento</b>	<b>Fissuração</b>	<b>Falha nas juntas</b>	<b>Manchas</b>
<b>RI</b>	1,00	0,77	0,28	0.11

A importância relativa (RI) é determinada pela relação entre as anomalias e suas causas e evolução e como elas afetam o desempenho. A partir das investigações de Souza (2019) (SOUZA, 2019) ao analisar mais de 300 amostras de fachadas cerâmicas pode-se determinar os coeficientes expressos na Tabela 25. Observa-se que o descolamento possui o maior valor de RI e que as manchas o mais baixo.

## ANEXO II- FGD POR AMOSTRA DE FACHADA

A Tabela 26 apresenta as amostras iniciais e seus respectivos valores de FGD.

Tabela 26- Amostras iniciais

<b>EDIFICAÇÃO</b>	<b>IDADE</b>	<b>ORIENTAÇÃO</b>	<b>FATOR GERAL DE DEGRADAÇÃO (FGD)</b>
<b>A1</b>	13	Sudeste	0,001
	13	Nordeste	0,037
	13	Noroeste	0,003
	13	Noroeste	0,017
<b>A2</b>	17	Oeste	0,029
	17	Noroeste	0,001
	17	Leste	0,030
	17	Nordeste	0,002
	17	Sudeste	0,031
	17	Sudoeste	0,029
	17	Sul	0,002
	17	Noroeste	0,031
<b>A3</b>	19	Noroeste	0,013
	19	Noroeste	0,011
	19	Sudeste	0,019
	19	Sudeste	0,008
	19	Sudoeste	0,031
	19	Sudoeste	0,041
	19	Nordeste	0,016
	19	Nordeste	0,017
	19	Nordeste	0,019
<b>B1</b>	24	Leste	0,026
	24	Leste	0,015
	24	Leste	0,009
	24	Leste	0,004
	24	Leste	0,014
	24	Leste	0,009
	24	Leste	0,019
	24	Leste	0,024
	24	Leste	0,008
	24	Sul	0,014
	24	Norte	0,126
<b>B2</b>	28	Norte	0,059
	28	Oeste	0,092

	28	Leste	0,108
<b>B3</b>	27	Leste	0,049
<b>C1</b>	35	Norte	0,192
	35	Norte	0,158
	35	Sul	0,121
	35	Sul	0,044
	35	Sul	0,159
	35	Sul	0,027
	35	Sul	0,063
	35	Sul	0,015
	35	Sul	0,084
	35	Sul	0,037
<b>C2</b>	36	Noroeste	0,198
	36	Noroeste	0,116
	36	Noroeste	0,120
	36	Noroeste	0,122
	36	Noroeste	0,097
	36	Noroeste	0,181
	36	Noroeste	0,231
	36	Noroeste	0,243
	36	Noroeste	0,180
	36	Noroeste	0,139
	36	Noroeste	0,281
	36	Noroeste	0,116
	36	Noroeste	0,214
	36	Noroeste	0,059
	36	Noroeste	0,103
	36	Noroeste	0,064
	36	Noroeste	0,149
	36	Noroeste	0,058
	36	Noroeste	0,151
	36	Sudeste	0,102
36	Sudeste	0,130	
36	Sudeste	0,137	
36	Sudeste	0,112	
36	Sudeste	0,056	
36	Sudeste	0,050	
36	Sudeste	0,045	
36	Nordeste	0,125	
<b>C3</b>	38	Norte	0,146
	38	Norte	0,135
	38	Sul	0,044

	38	Leste	0,154
<b>D1</b>	41	Norte	0,049
	41	Norte	0,129
	41	Sul	0,059
<b>D2</b>	43	Sul	0,105
<b>D3</b>	43	Sudoeste	0,126
	43	Sudeste	0,149
	43	Sudoeste	0,162
	43	Sudoeste	0,179
	43	Sudoeste	0,146
	43	Noroeste	0,180
	43	Sudeste	0,137
	43	Noroeste	0,145
	43	Sudoeste	0,204
	43	Sudoeste	0,206
	43	Sudoeste	0,187
	43	Sudoeste	0,121
	43	Noroeste	0,208
	43	Nordeste	0,140
	43	Nordeste	0,098
	43	Sudeste	0,138
	43	Sudeste	0,153
43	Noroeste	0,141	