

Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras

A. L. Ramos^{1*} , E. Bauer² 

* Autor de Contato: analin.ramos@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

Recepção: 10/01/2022 | Aceitação: 01/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

RESUMO

Logo, objetiva-se investigar as condições de exposição a agentes de degradação em edifícios localizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Estudar a ação do intemperismo é essencial para compreender a degradação das fachadas. Selecionou-se oito cidades representativas de cada Zona: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos e Belém. Definiu-se um edifício modelo para simulação higrotérmica para avaliação da radiação total, amplitude térmica, choque térmico, índice de intensidade da temperatura e chuva dirigida. Como resultado, são identificadas as zonas de condições críticas, que são classificadas em função de sua gravidade. Para temperatura e chuva dirigida, as cidades mais expostas são Goiânia-GO e Belém-PA, respectivamente. As de exposição mais amenas são Belém-PA para agente de temperatura e Niterói-RJ para chuva dirigida.

Palavras-chave: degradação; fachadas; revestimento cerâmico; zonas bioclimáticas; temperatura.

Citar como: Ramos, A. L., Bauer, E. (2022), "*Estudo da ação de agentes de degradação de fachadas associados à temperatura e a chuva dirigida em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 248 – 262, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.560>

¹ Aluna de mestrado PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

² Professor Doutor do PECC, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Contribuição de cada autor

este trabalho, Ana Lin Ramos contribuiu com a atividade de estruturação e redação do texto (100%), análise e discussão dos resultados (100%). Elton Bauer contribuiu com a atividade coleta de dados (100%), supervisão (100%) e correção do texto (100%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2022.

Study of the facade degradation agents associated with temperature and driving rain in different Brazilian bioclimatic zones

ABSTRACT

Therefore, the aim is to study the conditions of exposure to these degradation agents in buildings located in different Brazilian bioclimatic zones. Knowing the action of weathering is essential to understand the facades degradation. For this purpose, eight cities were selected: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos and Belém. A model building was defined for hygrothermal simulation to assess total radiation, temperature range, thermal shock, intensity index temperature and driving rain. As a result, zones of critical conditions are identified, providing exposure rankings. For temperature agents and directed rain, the most exposed cities are Goiânia-GO and Belém-PA, respectively. Finally, the mildest exposure zones are Belém-PA for temperature agent and Niterói-RJ for driving rain.

Keywords: degradation; facades; ceramic coating; bioclimatic zones; temperature.

Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas

RESUMEN

El objetivo es estudiar las condiciones de exposición a estos agentes degradantes en edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Conocer la acción de la meteorización es fundamental para comprender la degradación de las fachadas. Para ello, se seleccionaron ocho ciudades: Curitiba, Santa María, Florianópolis, Brasília, Niterói, Goiânia, Picos y Belém. Se definió un modelo de construcción de simulación higrótérmica para evaluar radiación total, amplitud térmica, choque térmico, índice de intensidad de temperatura y lluvia dirigida. Como resultado, se identifican zonas de condiciones críticas, proporcionando clasificaciones de exposición. Para agentes de temperatura y lluvia dirigida, las zonas más expuestas son Goiânia y Belém. Las zonas de exposición más suaves son Belém para agente de temperatura y Niterói para lluvia dirigida.

Palabras clave: degradación; fachadas; revestimiento cerámico; zonas bioclimáticas; temperatura.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A fachada é elemento construtivo de proteção da edificação ao ambiente externo tendo como consequência a sua maior exposição á fatores como radiação solar, chuva dirigida e temperatura. Tal exposição possibilita um processo de degradação complexo que envolve agentes de diferentes naturezas, que podem atuar em sinergia, afetando o desempenho e vida útil dos componentes e materiais por meio de diferentes mecanismos de degradação (Bauer et al., 2021).

O uso de revestimentos cerâmicos em fachadas é comum e está associado a um processo de degradação específico caracterizado principalmene pelo descolamento (Bauer et al, 2015; Pacheco e Vieira, 2017) além da fissuração, falta de adesão cerâmica-substrato e pela expansão de substratos devido à umidade ou variações térmicas (Bezerra et al., 2018). Nesse caso, as camadas que compões o sistema de revestimento apresentam propriedades distintas (coeficientes de dilatação térmica, módulo de elasticidade, condutividade térmica, etc) e a ação agentes associados à temperatura apresentam alta relevância (Gaspar e Brito, 2011).

A variação da temperatura superficial do revestimento pode causar alterações físicas no sistema de vedação de fachada (Silva, 2000). Esse mecanismo de degradação se dá a partir do efeito de dilatação e contração pelas variações e incrementos não homogêneos de temperatura, o que causa esforços de cisalhamento gerando uma tendência de separação na interface do sistema (Saraiva, 1998). Como resultado tem-se descolamentos e fissuras no revestimento cerâmico, o que pode ser intensificado pela fadiga causada pelos esforços termomecânicos derivados das variações de temperatura somados as restrições ás deformações (Barbosa, 2013).

A amplitude térmica ponderada representada pelo Índice de intensidade da temperatura (Iit), a radiação solar e choques térmicos são utilizados como valor representativo da amplitude térmica e indicativo de uma maior degradação. O IIT constitui uma análise da amplitude térmica obtendo-se uma medida ponderada em relação à frequência (Nascimento, 2016) e o choque térmico são eventos pontuais caracterizados por uma alta diferença de temperatura superficial em um curto intervalo de tempo (Zanoni, 2015).

Considera-se como agente de grande relevância a ação da chuva dirigida sob as fachadas (Nascimento et al., 2016). Esta se origina a partir da associação da chuva com o vento, e é uma das principais fontes de água nas fachadas dos edifícios. Sem a ação do vento a chuva cairia no sentido vertical e molharia de forma pouco significativa as paredes (Zanoni, 2015). Por causa da ação do vento, a chuva atinge principalmente as partes superior e lateral dos edifícios. Desse modo, apesar dos revestimentos cerâmicos sofrerem de forma menos significativa com a incidência das precipitações se comparado ao sistema em argamassa (Bauer et al., 2018), é importante considerá-la nas simulações higrotérmicas para se compreender o processo de degradação.

A degradação de sistemas de revestimentos cerâmicos é caracterizada principalmente pelo descolamento cerâmico, ainda que se considerem mudanças no processo de degradação para diferentes localizações geográficas dos edifícios (Souza, 2019). Por isso é necessário o estudo das condições de exposição ás ações de agentes climáticos de forma a compreender as diferentes condições que desencadeiam o processo de degradação em diferentes regiões.

O Brasil, como um país continental, apresenta variações climáticas ao longo de seu território. Por esta razão a ABNT NBR 15220-3 (2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, classificando 330 cidades a partir de seu clima em oito zonas bioclimáticas. Estas são definidas como regiões geográficas homogêneas quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano. As edificações e seus elementos localizados em zonas diferentes estão condicionados a diferentes condições de exposição aos agentes climáticos que ocasionam o processo de degradação.

O objetivo da investigação proposta é analisar a ação dos agentes de degradação associados à temperatura e a chuva dirigida nas fachadas de edifícios localizados em diferentes zonas

bioclimáticas brasileiras. Para tanto, a simulação higratérmica pelo software WUFI Pro 6.5, como ferramenta útil para finalidade de estudo da degradação (Bauer et al., 2018; Gonçalves et al., 2018) é utilizada na obtenção de dados relativos à radiação solar incidente, temperatura superficial e chuva dirigida das fachadas Norte de um edifício modelo submetido às diferentes condições climáticas de cada zona.

2. MÉTODOS

2.1 Detalhes do edifício modelo.

Determina-se um edifício modelo de 20 metros de altura com sistema de revestimento cerâmico de absorvência 63,5% (Dornelles, 2007) correspondente a cor vermelha escura, escolhida para ressaltar os efeitos da temperatura, devido a cores escuras apresentarem maior temperatura superficial quando exposta a radiação (Uchôa et al, 2016). Aplica-se este modelo a cidades localizadas nas oito zonas bioclimáticas brasileiras estabelecidas na ABNT NBR 15220-3 (2005). A Tabela 1 mostra as cidades escolhidas e a zona bioclimática correspondente.

Tabela1. Cidade, Estado e Zonas bioclimáticas.

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Curitiba-PR	Santa Maria-RS	Florianópolis-SC	Brasília-DF	Niterói-RJ	Goiânia-GO	Picos-PI	Belém-PA

2.2 Simulação

A simulação higratérmica no programa WUFI Pro 6.5 é usada para avaliar a ação dos agentes climáticos nas fachadas em cada cidade. O programa permite a entrada de dados, como: período de simulação, configuração, orientação e inclinação do sistema construtivo, coeficientes de chuvas incidentes e de transferência à superfície e condições iniciais de temperatura e umidade relativa e condições climáticas interiores e exteriores (Freitas, 2011). A partir disso, são obtidos como dados horários de saída os valores de radiação total incidentes nas fachadas, de temperatura superficial e de precipitação.

O período de simulação compreende ano de 01/01/2019 a 01/01/2020. Já para a definição das condições climáticas exteriores são utilizados os dados arquivos Typical Meteorological Year (TMY) da base EPW/ANTAC (Roriz, 2012) referente a cada cidade. A tabela 2 contém os valores adotados dos coeficientes de transferência à superfície.

Tabela 2. Coeficientes de transferência à superfície externa adotados na simulação.

Coeficiente	Unidade	Valor
Resistência Térmica (lado esquerdo)	m ² K/W	0,058
Absorção (Radiação de onda curta)	-	0,635
Refletividade do solo	-	0,2
Fator de redução de chuva incidente	-	0,7

No estudo, opta-se por analisar apenas a orientação Norte de cada edifício, uma vez que esta se apresenta como crítica para incidência de radiação solar nas cidades estudadas, situadas abaixo da linha do equador. O sistema construtivo simulado é composto por: revestimento cerâmico,

argamassa de emboço de composição cimentícia, bloco cerâmico e argamassa interna e o ponto de monitoramento principal na superfície do revestimento. A Figura 1 mostra o sistema lançado no programa.

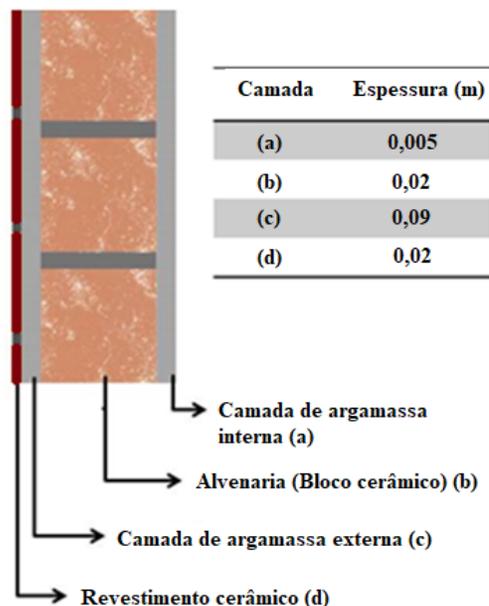


Figura 1. Sistema construtivo avaliado: (a) placa cerâmica; (b) argamassa externa/emboço; (c) bloco cerâmico; (d) argamassa externa.

As propriedades dos materiais componentes das camadas do sistema estudado são previamente de ensaios, realizados por outros pesquisadores. Tais ensaios são: massa específica aparente, porosidade, permeabilidade ao vapor de água para o cálculo do Fator de resistência à difusão de vapor de água; coeficiente de absorção de água ou coeficiente de capilaridade; curva higroscópica. Esse ensaios e seus resultados são descritos no Relatório Interno do LEM-UnB (Bauer et al., 2015), os quais estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo das propriedades dos materiais.

Propriedades	Bloco Cerâmico	Placa Cerâmica	Argamassa de emboço
Massa específica aparente (kg/m ³)	578	1730	1830
Porosidade (-)	0,486	0,29	0,2604
Permeabilidade ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))	$8,38 \cdot 10^{-12}$	$1,66 \cdot 10^{-12}$	$7,9 \cdot 10^{-12}$
Coeficiente de absorção de água (kg/m ² .√s)	0,09	0,001	0,089

2.3 Ação dos agentes associados à temperatura.

2.3.1 Radiação total, temperatura superficial máxima e mínima e amplitude térmica máxima.

A partir dos dados de temperaturas superficiais são determinadas as temperaturas máximas e mínimas assim como as amplitudes térmicas diárias ao longo do período de simulação, calculadas como mostrado em (1). Com os dados de radiação solar determinou-se a radiação solar acumulada na fachada ao longo do período de simulação, somando os valores diários observados em cada fachada.

$$\Delta T = t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

Onde ΔT é a amplitude térmica, $t_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima diária da superfície da fachada e $t_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima diária da superfície da fachada.

2.3.2 Choque térmico

Como parte do estudo dos efeitos associados à temperatura, é analisado o choque térmico (Zanoni, 2015). Para tanto, determina-se a frequência de ocorrência dos eventos denominados como choque térmico pleno e choque térmico atenuado para um ano de simulação em todas as fachadas. O primeiro configura-se quando há um diferença de temperatura superficial superior a 8 °C no intervalo de 1 hora, já o segundo quando a mesma diferença de temperatura é verificada em um intervalo de 2 h. As equações para choque térmico pleno e choque térmico atenuado são mostrados em (2) e (3), respectivamente.

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-1} \quad (2)$$

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-2} \quad (3)$$

Os resultados são apresentados em gráficos de frequência de ocorrência anual, tal frequência é dada em valores percentuais e calculada a partir da relação entre o número total ocorrência de choques térmicos e o número de horas em um ano.

2.3.3 Amplitude Térmica Ponderada

Na intenção de analisar os efeitos associados à temperatura, calcula-se para todas as fachadas a amplitude térmica ponderada expressa IIT, o qual leva em consideração os efeitos dos ciclos e valores alcançados de temperatura superficial nos sistemas (Nascimento, 2016). O IIT é estabelecido com base nas variações de temperaturas e suas frequências de ocorrência em um determinado intervalo pré-estabelecido. Para tanto, a faixa de variação de amplitude térmica é dividida em quatro intervalos iguais, os quais são representados por valores de amplitude média. O IIT é calculado como uma média ponderada a partir dos valores de frequências verificados para o clima de Brasília em um intervalo de tempo. Para apresentação dos resultados, o IIT foi calculado para um intervalo de 1 ano.

A Tabela 4 mostra os quatro intervalos iguais nos quais são distribuídas as faixas de variação da amplitude térmica (Nascimento, 2016), as quais consideram intervalos inferiores a 11,5°C (faixa 1) até intervalos superiores a 27,7°C (faixa 4). Por fim, o Iit é calculado como é mostrado em (4).

Tabela 4. Faixas de intervalo de amplitude térmica consideradas para o cálculo de Iit.

Faixa	$\Delta T(^{\circ}C)$	ΔT médio ($^{\circ}C$)
4	>27.7	31.8
3	19.7 a 27.7	23.7
2	11.5 a 19.6	15.6
1	< 11.5	7.5

$$I_{it} = \sum \frac{\Delta T_{m\u00e9dio} \times f_n}{f_{total}} \quad (4)$$

Onde I_{it} é o índice de intensidade da temperatura (°C), $\Delta T_{m\u00e9dio}$ é a amplitude de temperatura média da faixa de ocorrência (°C), f_n é a frequência de ocorrência da faixa “n” de ΔT e f_{total} é a frequência de todas às ocorrências das quatro faixas de estudo no ano, ou seja, $f_{total} = 365$.

2.3.4 Chuva Dirigida

O estudo de Chuva dirigida é realizado pelo método de quantificação do WUFI, no qual são obtidos os dados horários com um total de 8760 horas para precipitação, velocidade e direção do vento de modo a alimentar as simulações computacionais (Zanoni, 2015). A partir disso a intensidade de chuva dirigida é calculada em (5).

$$R_{wdr} = R_2 \cdot R_h \cdot V \cdot \cos(D - \theta) \quad (5)$$

Onde R_{wdr} é a Intensidade de chuva dirigida (mm/h); R_h é a Precipitação em superfície horizontal (mm); R_2 é o Coeficiente dependente da localização na fachada (s/m); V é a Média horária da velocidade do vento a 10m de altura (m/s); D é a Direção do vento (ângulo a partir do Norte); θ Orientação da fachada: ângulo entre o Norte e a direção normal à parede.

O valor de R_2 , na metodologia de quantificação do WUFI, depende da altura do edifício e da localização da área de estudo da fachada como mostrado na Tabela 5. Nesse caso, o valor adotado é 0,2 correspondente a edifícios altos, parte superior maior que 20 metros. Como dados de saída da simulação são obtidos os valores de precipitação incidente nas fachadas e o valor acumulado anual em l/m² de chuva dirigida é calculado.

Tabela 5. Valores tabelados de R_2 na metodologia de quantificação do WUFI.

Altura	R2
Edifício pequeno, altura até 10 metros	0,07
Edifício alto, parte baixa até 10 metros	0,05
Edifício alto, parte média 10 a 20 metros	0,1
Edifício alto, parte alta maior que 20 metros	0,2

3. RESULTADOS

3.1 Radiação total, temperatura superficial máxima e amplitude térmica máxima.

Os resultados de radiação total incidente e das amplitudes térmicas superficiais máximas absolutas, calculadas como mostrado em (1), das fachadas Norte das oito zonas são mostrados na Figura 2. Nota-se que os maiores valores de amplitude térmica ocorrem para a zona Z6 (38,15°C) seguido da zona Z2 (37,5°C) e Z1 (37,15°C), já o menor valor é verificado na Z8 (22,64°C) e as demais zonas apresentam valores intermediários. Quanto à incidência de radiação solar, a Z4 apresenta maior valor (1.014.409 W/m²) seguida da Z6 (995.347 W/m²), enquanto isso Z8 apresenta o menor valor de incidência de radiação (743.527 W/m²). Ademais, observa-se que a incidência de radiação solar está associada ao ganho de temperatura em cada fachada principalmente no que se nota nas zonas Z8 e Z6, com exceção a zona Z4 a qual apresentou maior incidência de radiação e a terceira

menor amplitude térmica.

Em relação à radiação total, as zonas Z4 e Z6 são críticas e a Z8 apresenta condições de exposição mais amenas, apesar de ser representada pela cidade de Belém-Pa localizada próximo á linha do equador. Esse resultado é encontrado devido à radiação solar incidente na fachada ser apenas uma parcela da radiação solar global horizontal (constituída pelas componentes direta, difusa e refletida) (Silva, 2011) dependente, portanto, da orientação e inclinação da fachada.

A temperatura superficial e a amplitude térmica na superfície, por serem resultados da interação entre a radiação solar e a elevação da temperatura do ar ao longo do dia, são melhores indicadores das variações higtotérmicas do que o total da irradiação solar incidente (Zanoni, 2015). Nesse caso, Z6 e Z7 são zonas críticas, por apresentarem maior amplitude térmica (Figura 2) e maior temperatura superficial (Figura 3) ao longo do ano, respectivamente.

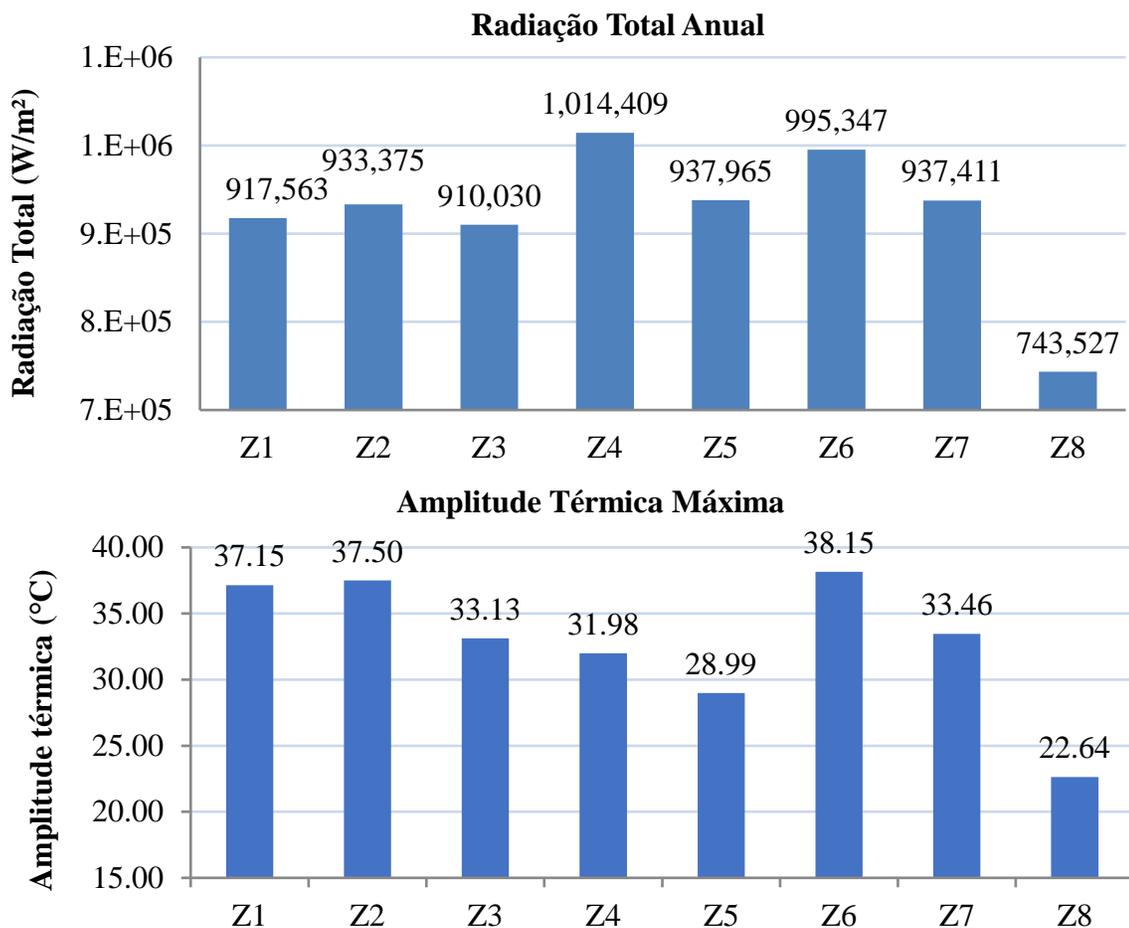


Figura 2. Radiação total acumulada e Amplitude térmica máxima em um ano de simulação.

Os resultados de temperatura máxima e mínima absoluta anual para cada uma das fachadas são mostradas na Figura 3. Nota-se que as temperaturas mínimas, as quais ocorrem quando não há incidência de radiação sobre a fachada, apresentam grandes distinções entre si. Z2, Z1 e Z3 apresentam os menores valores de temperatura 2,99°C, 5,48°C e 6,98°C, respectivamente. Enquanto isso, Z8 apesar de ter menor incidencia de radiação total na fachada apresenta temperatura mínima mais elevada (22,07°C) e menor valor de temperatura máxima (46,16 °C) o que condiz com amplitudes térmicas reduzidas, como mostrado na Figura 2. Nesse caso, enfatiza-se que a temperatura superficial está ligada não apenas a incidência de radiação na fachada, mas também á temperatura do ar (ASHRAE, 2009; Lamberts et al.,2011).

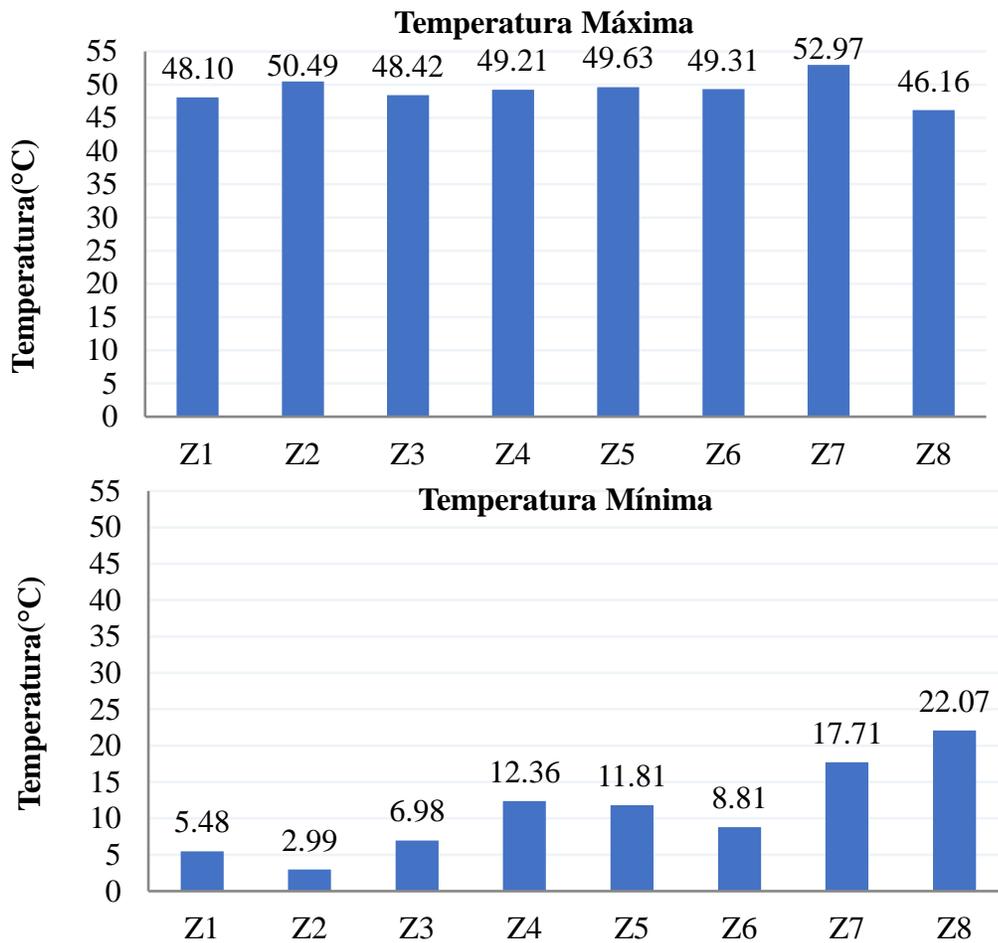


Figura 3. Temperatura superficial máxima e mínima absolutas em um ano de simulação para cada zona bioclimática.

3.2 Choque térmico.

Com relação aos resultados de choque térmicos, são apresentadas na Figura 4 as frequências de ocorrência de choques plenos para todas as fachadas. Ressalta-se a maior frequência na zona Z6, na qual 1,59% das medidas se caracterizam como choques térmicos plenos, seguido de Z1 (0,92%) e Z4 (0,79%). As zonas Z5 e Z7 apresentaram as menores frequências 0,16% e 0,19%, respectivamente.

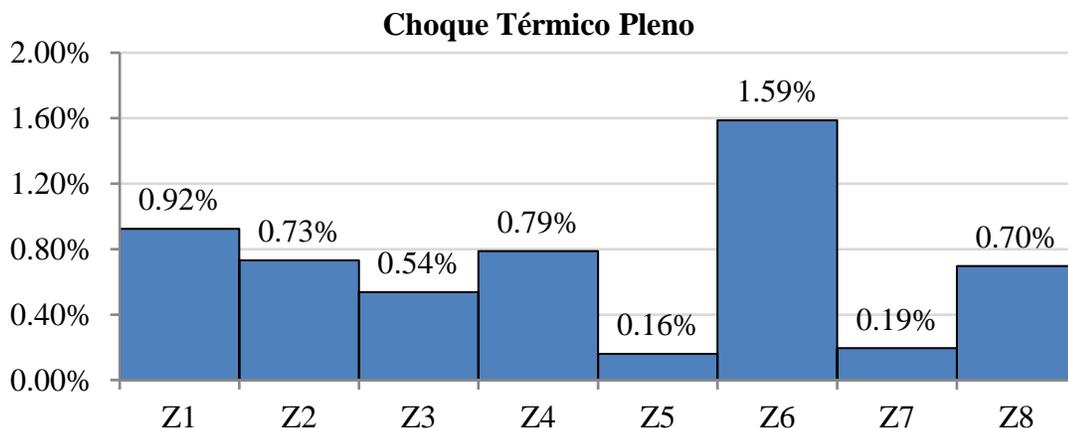


Figura 4. Frequência de ocorrência de choque térmico pleno para um ano de simulação.

Os picos de choques plenos estão concentrados nos meses de maio a julho segundo a Tabela 6, que expõe a distribuição mensal do número de choques. Ao longo de um ano, é possível verificar em qual mês ocorre o maior número de choques térmicos para cada zona isolada. Dessa forma, Z1 e Z5 têm seus respectivos picos de choques térmicos plenos em julho, Z3, Z4, Z6 e Z7 em junho e Z2 e Z8 em maio. Nas zonas de 1 a 7 os choques térmicos diminuem nos meses de outubro a março chegando à zero em um ou mais meses desse período. No entanto, isso não ocorre na Z8 que apresenta os eventos de choques térmicos melhor distribuídos ao longo do ano.

Tabela 6. Número de eventos de choque térmico pleno mensal ao longo de um ano de simulação.

Choque Térmico Pleno													
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	soma
Z1	1	1	1	9	14	18	25	9	1	1	0	1	81
Z2	0	1	0	4	21	10	7	12	7	0	0	2	64
Z3	1	0	0	1	6	25	14	0	0	0	0	0	47
Z4	1	1	0	4	17	23	19	0	0	1	0	3	69
Z5	0	0	0	0	1	5	6	1	1	0	0	0	14
Z6	4	1	3	10	13	53	38	12	0	0	1	4	139
Z7	0	1	3	3	2	6	2	0	0	0	0	0	17
Z8	5	5	6	7	10	5	2	3	1	4	5	8	61

A frequência de ocorrência de choques atenuados é mostrada na Figura 5. A Z6 apresenta maior ocorrência com 13,65%, seguida da Z4 com 10,88%. Z8, Z5 e Z2 apresentam as menores frequências sendo estas 2,84%, 3,35% e 4,95%, respectivamente. Nota-se que na Z6 ocorrem aproximadamente 5 vezes mais choques atenuados em comparação a Z8. Z4 e Z1 também apresentam valores elevados de frequência (10,88% e 10,31%, respectivamente) seguidos de Z3 e Z7 (8,75% e 8,60%).

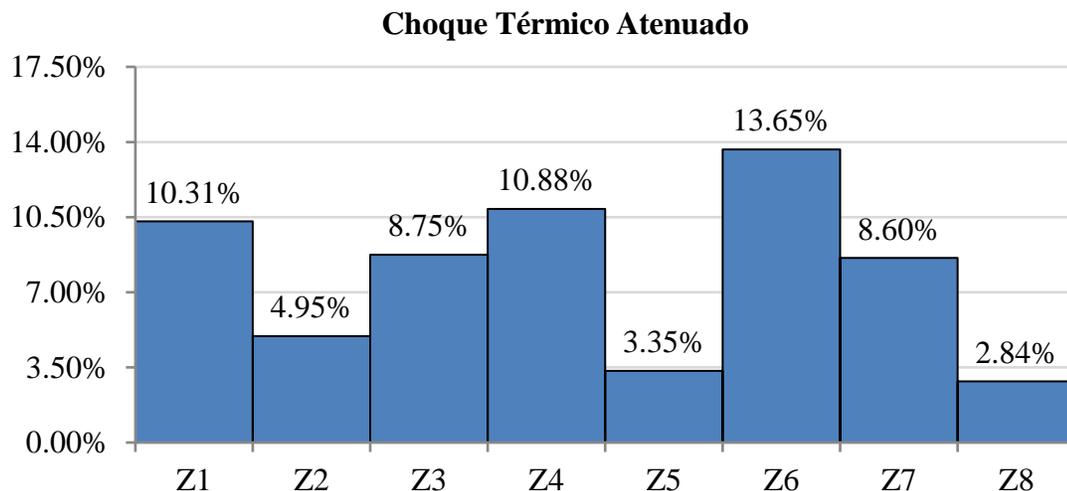


Figura 5. Frequência de ocorrência de choque térmico atenuado para um ano de simulação.

Quando a distribuição desses eventos no ano nota-se que eles ocorrem nos meses de maio a agosto, como mostra a Tabela 6. Apenas Z5 apresenta meses sem a ocorrência de choques térmicos (novembro e dezembro). Z2 e Z8 tiveram seu pico de ocorrência no mês de maio, Z4 e Z6 em junho, Z1, Z5 e Z7 em julho e Z3 em agosto. Evidencia-se uma melhor distribuição de ocorrências ao longo do ano em Z8, onde esta varia de 12 em setembro a 32 em maio, já em outras zonas há uma variação mais elevada entre os meses de menor e maior ocorrência como na Z6 que apresenta menor ocorrência em novembro com 14 eventos e maior em junho com 211.

Tabela 7. Número de eventos de choque térmico atenuado mensal ao longo de um ano de simulação.

Choque térmico Atenuado													
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	soma
Z1	13	24	64	112	146	103	190	114	78	46	4	9	903
Z2	6	14	39	65	85	38	50	62	44	27	1	3	434
Z3	6	25	72	106	127	115	76	128	73	28	5	5	766
Z4	6	18	52	120	148	182	177	143	71	16	10	10	953
Z5	2	1	5	32	46	56	82	44	22	3	0	0	293
Z6	27	33	76	121	175	211	207	170	84	56	14	22	1196
Z7	10	11	32	80	155	145	157	114	40	3	2	4	753
Z8	18	15	22	29	32	20	29	19	12	18	14	21	249

As zonas com maior frequência de choque térmico apresentam condições de exposição críticas e aquelas que apresentam menores frequências condições mais amenas. Destaca-se a Zona Z6 que apresentou maior frequência tanto para choques térmicos plenos quanto para atenuados. Por fim, a zona Z5 apresentou frequências reduzidas nos dois tipos de choques considerados e a Z8 menor frequência para choques atenuados.

3.3 Amplitude Térmica Ponderada.

A Figura 6 mostra os resultados de IIT para todas as fachadas correspondentes a cada zona bioclimática. Os resultados levam em consideração valores de variação de temperatura para um ano de simulação. Assim como notado nos resultados de amplitude térmica máxima e choque térmico, a zona Z6 apresentou valores críticos (22,55) quanto à ação de agentes de temperatura. Da mesma forma, a zona Z8 e Z5 apresentaram os menores valores de IIT (16,53 e 16,55). Z2, Z4 e Z7 apresentaram valores também elevados se comparados aos demais e Z3 e Z1 apresentaram valores intermediários.

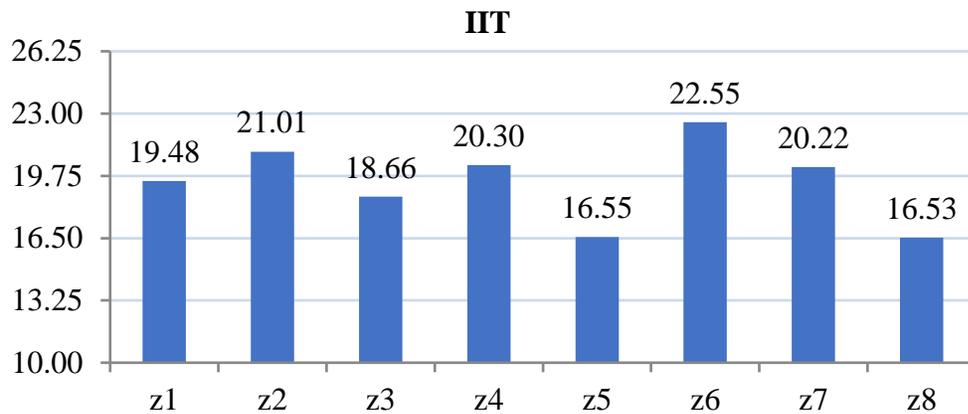


Figura 6. Valores de Iit para todas as zonas bioclimáticas.

As variações térmicas nas fachadas são causas de deformações no sistema de revestimento e induzem esforços por fadiga em consequência de sua característica cíclica. Desse modo, as variações térmicas estão relacionadas com as anomalias nos revestimentos de fachadas, principalmente no que se refere ao descolamento cerâmico e fissuração (Silva, 2014; Souza, 2016). O IIT é mostrado como um valor referência em nível de comparação entre as cidades, e que demonstra a gravidade de exposição ao agente térmico de degradação. Logo, valores mais elevados representam maior exposição e maior potencial para a degradação e diminuição da vida útil. Os valores de IIT foram considerados adequados quando relacionados à degradação de fachadas (Nascimento, 2016) e, a partir deles, foi estabelecido um Ranking relativo à exposição das fachadas à temperatura, classificadas de acordo com a sua gravidade. Logo, em ordem decrescente, as zonas de maior gravidade foram: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8.

3.4 Chuva dirigida.

A chuva dirigida foi analisada em termos de incidência precipitação total anual (l/m^2), Figura 7, para as mesmas fachadas de orientação Norte, de forma completar a análise dos agentes de degradação realizada. Nota-se que a zona Z8 é crítica para esse caso ($113,15 l/m^2$) apresentando valor cerca de 6 vezes mais elevado que a zona Z5 de menor incidência ($18,21 l/m^2$), contrastando com os resultados anteriores. As zonas Z4 ($100,12 l/m^2$) e Z3 ($71,72 l/m^2$) também apresentam valores elevados em comparação às demais. Por fim, Z1 ($52,19 l/m^2$) e Z6 ($59,67 l/m^2$) apresentam valores intermediários enquanto Z2 ($35,57 l/m^2$) e Z7 ($30,57 l/m^2$) valores mais amenos de incidência de chuva.

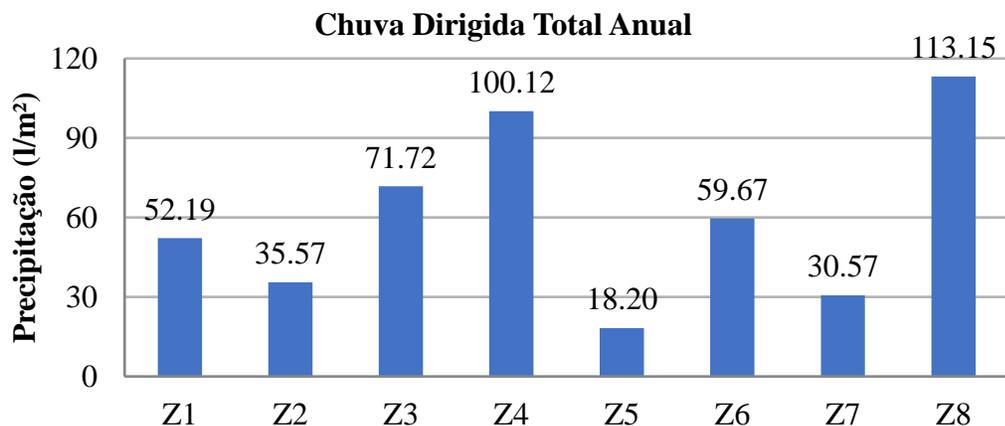


Figura 7. Valores de chuva dirigida acumulada para um não de simulação em todas as zonas bioclimática

Ressalta-se que a chuva dirigida é resultando da ação dos ventos sob a precipitação (Freitas, 2011; Zanoni, 2015), logo, está condicionada a velocidade e direção dos ventos. Para a cidade Brasília e Goiânia a orientação de maior incidência de chuva é a Norte (Zanoni et al., 2014; Zanoni et al., 2018; Andrade et al., 2021; Melo e Carasek, 2011) enquanto para Curitiba é a orientação Leste (Batista et al., 2017) e para Florianópolis é a orientação Sul (Giango et al., 2010; Giango, 2007). Nesse caso, os resultados apresentados não representam necessariamente a orientação de exposição crítica a umidade proveniente da chuva, mas a orientação adotada como referência, a Norte.

4. CONCLUSÃO

Propôs-se a investigar a ação dos agentes de degradação associados à temperatura e a chuva dirigida nas fachadas de edifícios localizados em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Nesse contexto, é possível identificar zonas que apresentam condições críticas de exposição aos agentes de degradação como forma de contribuir para o conhecimento das diferentes condições que desencadeiam o processo de degradação no Brasil. Dessa forma, foi possível levantar os seguintes comportamentos:

- A zona Z6, representada pela cidade de Goiânia-GO, proporciona condições críticas de exposição em relação a amplitude térmica, choque térmico atenuado e pleno e índice de intensidade da temperatura;
- A zona Z8, representada pela cidade de Belém-PA, apesar de apresentar condição de exposição mais amena para os agentes associados a temperatura (radiação solar, amplitude térmica, choque térmico atenuado e Índice de intensidade da temperatura) se mostra crítica para exposição à chuva dirigida.
- As zonas Z1, Z2, Z3, Z5 e Z7, representados pelas cidades de Curitiba-PR, Santa Maria-RS, Florianópolis-SC, Niterói-RJ e Picos-PI, respectivamente, apresentaram valores de incidência de radiação total anual na fachada Norte semelhantes. No entanto Z1 e Z2 apresentam elevadas amplitudes térmicas se comparada às demais.
- Em relação à Chuva dirigida, as fachadas Norte das zonas Z8 e Z4 (Brasília-DF) apresentaram mais exposição considerando valores anuais de precipitação e a Zona Z5 apresentou a condição mais amena de exposição.
- Conclui-se que as fachadas Norte analisadas nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras possuem diferentes condições de exposição aos agentes associados à temperatura e à chuva dirigida. Estas afetam a durabilidade do edifício, uma vez que a sinergia dos agentes de degradação atuando nas fachadas acelera a degradação comprometendo o seu desempenho e afetando a sua vida útil. Além disso, como contribuição o estudo fornece um ranking relativo à gravidade da exposição à temperatura, portanto, com maior potencial para a degradação e diminuição da vida útil. Em ordem decrescente, as zonas mais expostas: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8, ou pelas cidades Goiânia-Santa Maria-Brasília-Picos-Curitiba-Florianópolis-Niterói-Belém.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PECC (Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil) da Universidade de Brasília, e ao DMMPROJECT (Degradação: Masurement and Modelling). Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Finanças 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e pela Pró-Reitoria Acadêmica de Pós-Graduação (DPG) da Universidade de Brasília (UnB).

6. REFERÊNCIAS

- Andrade, D., Kardec, T., Bauer, E.(2021). “*Sinergia dos agentes higrotérmicos na degradação de fachadas*”. In: XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das construções, 2021, Fortaleza.
- ASHRAE - American Society of Heating (2009), *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Inc. Handbook 2009 -Fundamentals. Atlanta, artigo 2SPPC1017, pp. 199–212, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, A. S. (2013), “*Estudo Numérico-Computacional e Analítico do Choque Térmico em Fachadas de Edificações*”. Dissertação (Mestrado). Masters Thesis, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Batista, G., Rufato, R., Miranda, D., Giordano, D. Medeiros, M. (2017), “*Análise do índice de chuva dirigida em cidades do Paraná e sua importância no projeto de fachadas de edifícios*”. IN: Simpósio Paranaense de Patologia das construções, 2017.
- Bauer, E., Aidar, L. A. G., Piña, A. B. S. (2018), “*Estudo do transporte de água oriunda da chuva dirigida em fachadas – aplicação com o emprego da simulação higrotérmica*”. IN: Construção, 2018, Brasília, Livro de Atas.
- Bauer, E., Castro, E. K., Silva, M. N. B. (2015), “*Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília*”. *Cerâmica*, v. 62, p. 151-159. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581786>
- Bauer, E., Mota, L., Souza, J. (2021). “*Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil*”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 23-43. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400557>
- Bauer, E., Nascimento, M. L. M., Castro, E. K.(2015), “*Parâmetros e ensaios físicos de materiais e componentes da fachada. Relatório interno*” – Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) – UnB/ENC.
- Bezerra, L. M., Uchôa, J. C., Araújo, J. A., Bonilla, J. (2018), “*Experimental and Numerical Investigation of Fatigue in Base-Rendering Mortar Used in Façades Undergoing Thermal Cycles*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 30. n. 8. pp.1-14. [https://doi.org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002319](https://doi.org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002319)
- Dornelles, K. A., Roriz, M. (2007), “*A ilusão das cores na identificação da absorvância solar de superfícies opacas*”. In: IX ENCAC E VII ELACAC, 2007, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: ANTAC.
- Freitas, A. S. S. L. A. (2011), “*Avaliação do comportamento hidrotérmico de revestimentos exteriores de fachadas devido à acção da chuva incidente*”, Masters Thesis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 170 p.
- Gaspar, P., Brito, J. (2005), “*Mapping Defect Sensitivity in External Mortar Renders*”. *Journal of Construction and Building Materials*, v. 19(8), p. 571-578, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.014>
- Giongo, M. (2007), “*Análise do nível de exposição das edificações à chuva dirigida para Florianópolis*”. Masters Thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- Giango, M., Padaratz, I. J., Lamberts, R. (2011), “*Determinação da exposição à chuva dirigida em Florianópolis, SC: índices de chuva dirigida e métodos semi-empíricos*”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 1, p. 7-23. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000100002>
- Lamberts, R (2011). “*Desempenho térmico de edificações. Apostila da disciplina ECV 5161 do LABEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*”. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

- Melo, C. M., Carasek, H. (2011), “Índices de chuva dirigida direcional e análise do nível de umedecimento em fachadas de edifício multipavimentos em Goiânia, GO”. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 3, p. 23-37. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000300003>
- Moscoso, Y. F. M. (2013), “Estudo numérico e experimental de tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica”. Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília. p. 142.
- Nascimento, M. (2016), “Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios”, Masters Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.p. 127
- Nascimento, M. L. M., Bauer, E., de Souza, J. S. (2016), “Wind-driven rain incidence parameters obtained by hygrothermal simulation”. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 1, 5. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0006-5>.
- Pacheco, C. P., Vieira, G. L. (2017), “Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico”. *Cerâmica*, v. 63, p. 432-445. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682156>
- Roriz, M. (2012), “Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC”. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP.
- Saraiva, A. G. (1998), “Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada”. Masters Thesis. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 164 p.
- Silva, A., Dias, J. L., Gaspar, P. L., Brito, J. (2011), “Service life prediction models for exterior stone cladding”. *Building Research and Information*, 39(6): 637-653, 2011. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.617095>
- Silva, M. N. B. (2000), “Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânicas em Sistemas de Revestimento de Fachadas”. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 218 p.
- Souza, J. (2019), “Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios”, Doctoral thesis, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, p. 101.
- Uchôa, J. C. B., Bezerra, L. M., Brito, M. A. N., Júnior, A. C. M., Silva, W. T. M. (2016), “análise de tensões internas em sistemas de revestimentos Cerâmicos de fachadas no distrito federal devido a Carregamentos térmicos utilizando modelagem MEF 3D”. IN: XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília, DF, Brazil, November 6-9.
- Zanoni, V. (2015), “Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília”. Doctorial Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. p. 253.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2014), “Chuva dirigida: um estudo da iso 15927-3 no contexto brasileiro. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, Maceió-AL.
- Zanoni, V., Sánchez, J., Bauer, E. (2018), “Avaliação de métodos para quantificação de chuva dirigida nas fachadas das edificações”. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 122-132, jun. 2018. ISSN 1980-6809. <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650260>