

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

A. L. Ramos^{1*} , E. Bauer² 

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

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

Recepción: 10/01/2022 | Aceptación: 01/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones de exposición a 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 higrotérmica 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.

Citar como: Ramos, A. L., Bauer, E. (2022), "Estudio de la acción de los agentes de degradación de fachadas asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas", 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.

Contribución de cada autor

En este trabajo, Ana Lin Ramos contribuyó a la actividad de estructuración y redacción del texto (100%), análisis y discusión de los resultados (100%). Elton Bauer contribuyó a la recopilación de datos de actividad (100%), supervisión (100%) y corrección del texto (100%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 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.

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

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 higratérmica 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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La fachada es un elemento constructivo para proteger el edificio del ambiente exterior, lo que provoca su mayor exposición a factores como la radiación solar, la lluvia dirigida y la temperatura. Dicha exposición permite un proceso de degradación complejo que involucra agentes de diferente naturaleza, que pueden actuar en sinergia, afectando el desempeño y la vida útil de los componentes y materiales a través de diferentes mecanismos de degradación (Bauer et al., 2021).

El uso de revestimientos cerámicos en fachadas es habitual y está asociado a un proceso de degradación específico caracterizado principalmente por el desprendimiento (Bauer et al., 2015; Pacheco y Vieira, 2017) además de fisuración, falta de adherencia del soporte cerámico y por la expansión de sustratos debido a la humedad o variaciones térmicas (Bezerra et al., 2018). En este caso, las capas que componen el sistema de revestimiento tienen diferentes propiedades (coeficientes de dilatación térmica, módulo de elasticidad, conductividad térmica, etc.) y es muy relevante la acción de agentes asociados a la temperatura (Gaspar y Brito, 2011).

La variación de la temperatura superficial del revestimiento puede provocar cambios físicos en el sistema de sellado de la fachada (Silva, 2000). Este mecanismo de degradación se da por efecto de la expansión y contracción por variaciones y aumentos no homogéneos de temperatura, lo que provoca esfuerzos cortantes, generando una tendencia a la separación en la interfase del sistema (Saraiva, 1998). Como resultado, se producen desprendimientos y fisuras en el revestimiento cerámico, que pueden intensificarse por la fatiga provocada por los esfuerzos termomecánicos derivados de las variaciones de temperatura, además de las restricciones a la deformación (Barbosa, 2013).

La amplitud térmica ponderada representada por el Índice de Intensidad de Temperatura (Iit), la radiación solar y los choques térmicos se utilizan como valor representativo de la amplitud térmica e indicativo de una mayor degradación. El IIT constituye un análisis de la amplitud térmica obteniendo una medida ponderada en relación con la frecuencia (Nascimento, 2016) y el choque térmico son eventos puntuales caracterizados por una alta diferencia de temperatura superficial en un corto intervalo de tiempo (Zanoni, 2015).

La acción de la lluvia dirigida bajo las fachadas se considera un agente de gran relevancia (Nascimento et al., 2016). Este tiene su origen en la asociación de la lluvia con el viento, y es una de las principales fuentes de agua en las fachadas de los edificios. Sin la acción del viento, la lluvia caería verticalmente y no mojaría significativamente las paredes (Zanoni, 2015). Por la acción del viento, la lluvia golpea principalmente la parte superior y los costados de los edificios. Así, aunque los revestimientos cerámicos sufren menos significativamente la incidencia de la precipitación en comparación con el sistema de mortero (Bauer et al., 2018), es importante considerarlo en las simulaciones higrótérmicas para comprender el proceso de degradación.

La degradación de los sistemas de revestimiento cerámico se caracteriza principalmente por el desprendimiento cerámico, aunque se consideran cambios en el proceso de degradación para diferentes ubicaciones geográficas de las edificaciones (Souza, 2019). Por lo tanto, es necesario estudiar las condiciones de exposición a la acción de los agentes climáticos para comprender las diferentes condiciones que desencadenan el proceso de degradación en diferentes regiones.

Brasil, como país continental, tiene variaciones climáticas en todo su territorio. Por eso, la ABNT NBR 15220-3 (2005) establece la zonificación bioclimática brasileña, clasificando 330 ciudades según su clima en ocho zonas bioclimáticas. Estas se definen como regiones geográficas homogéneas en términos de elementos climáticos que interfieren en la relación entre el entorno construido y el confort humano. Los edificios y sus elementos ubicados en diferentes zonas están sujetos a diferentes condiciones de exposición a los agentes climáticos que provocan el proceso de degradación.

El objetivo de la investigación propuesta es analizar la acción de los agentes de degradación

asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en las fachadas de edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. Por ello, se utiliza la simulación higrotérmica mediante el software WUFI Pro 6.5, como herramienta útil a efectos de estudiar la degradación (Bauer et al., 2018; Gonçalves et al., 2018) para obtener datos de radiación solar incidente, temperatura superficial y lluvia dirigida desde las fachadas norte de un edificio modelo sometido a las diferentes condiciones climáticas de cada zona.

2. MÉTODOS

2.1 Detalles de construcción de modelo

Se determina un edificio modelo de 20 metros de altura con un sistema de recubrimiento cerámico de absorbancia 63,5% (Dornelles, 2007) correspondiente al color rojo oscuro, elegido para resaltar los efectos de la temperatura, debido a que los colores oscuros presentan mayor temperatura superficial al ser expuestos. a la radiación (Uchôa et al, 2016). Este modelo se aplica a ciudades ubicadas en las ocho zonas bioclimáticas brasileñas establecidas en la ABNT NBR 15220-3 (2005). En la tabla 1 se muestran las ciudades elegidas y la zona bioclimática correspondiente.

Tabla 1. Ciudad, Estado y 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 Simulación

La simulación higrotérmica del programa WUFI Pro 6.5 se utiliza para evaluar la acción de los agentes climáticos en las fachadas de cada ciudad. El programa permite el ingreso de datos, tales como: período de simulación, configuración, orientación e inclinación del sistema constructivo, coeficientes de lluvias incidentes y transferencia a la superficie y condiciones iniciales de temperatura y humedad relativa y condiciones climáticas interiores y exteriores (Freitas, 2011).). A partir de ello se obtienen como datos horarios de salida los valores de radiación total incidente en las fachadas, temperatura superficial y precipitación.

El período de simulación cubre el año del 01/01/2019 al 01/01/2020. En cuanto a la definición de las condiciones climáticas exteriores, se utilizan los archivos de Año Meteorológico Típico (TMY) de la base de datos EPW/ANTAC (Roriz, 2012) referentes a cada ciudad. La Tabla 2 contiene los valores adoptados de los coeficientes de transferencia superficial.

Tabla 2. Coeficientes de transferencia a la superficie externa adoptados en la simulación.

Coeficiente	Unidad	Valor
Resistencia Térmica (lado izquierdo)	m ² K/W	0,058
Absorción (radiación de onda corta)	-	0,635
Reflectividad del suelo	-	0,2
Factor de reducción de lluvia incidente	-	0,7

En el estudio, optamos por analizar solo la orientación Norte de cada edificio, ya que es crítico para la incidencia de la radiación solar en las ciudades estudiadas, ubicadas debajo del ecuador. El sistema constructivo simulado está compuesto por: revestimiento cerámico, mortero de enlucido cementoso, bloque cerámico y mortero interior y el punto de control principal en la superficie del

revestimiento. La figura 1 muestra el sistema lanzado en el programa.

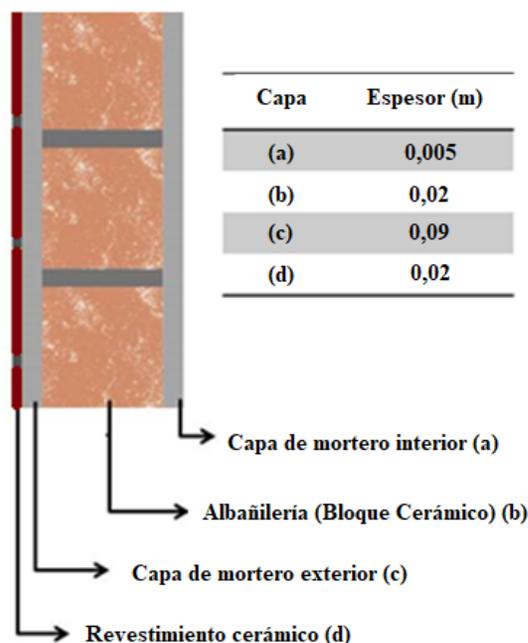


Figura 1. Sistema constructivo evaluado: (a) placa cerámica; (b) mortero externo; (c) bloque de cerámica; (d) mortero interior.

Las propiedades de los materiales componentes de las capas del sistema estudiado son de ensayos previos, realizados por otros investigadores. Tales pruebas son: masa específica aparente, porosidad, permeabilidad al vapor de agua para calcular el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua; coeficiente de absorción de agua o coeficiente de capilaridad; curva higroscópica. Estos ensayos y sus resultados están descritos en el Informe Interno LEM-UnB (Bauer et al., 2015), que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de propiedades del material.

Propiedades	Bloque de cerámica	Plato de cerámica	Mortero
Masa específica aparente (kg/m ³)	578	1730	1830
Porosidad (m ³ /m ³)	0,486	0,29	0,2604
Permeabilidad al vapor de agua (kg/(m.s.Pa))	8,38. 10 ⁻¹²	1,66. 10 ⁻¹²	7,9. 10 ⁻¹²
Coefficiente de absorción de agua (kg/m ² .√s)	0,09	0,001	0,089

2.3 Acción de los agentes asociados a la temperatura.

2.3.1 Radiación total, temperatura superficial máxima y mínima y amplitud térmica máxima.

A partir de los datos de temperatura superficial, se determinan las temperaturas máxima y mínima, así como las amplitudes térmicas diarias durante el período de simulación, calculadas como se muestra en (1). Con los datos de radiación solar se determinó la radiación solar acumulada en la fachada durante el periodo de simulación, sumando los valores diarios observados en cada fachada.

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

Donde ΔT es la amplitud térmica, t_{max} es la temperatura superficial máxima diaria de la fachada y t_{min} es la temperatura superficial mínima diaria de la fachada.

2.3.2 Choque térmico

Como parte del estudio de los efectos asociados a la temperatura, se analiza el choque térmico (Zanoni, 2015). Para ello se determina la frecuencia de ocurrencia de los eventos denominados choque térmico completo y choque térmico atenuado para un año de simulación en todas las fachadas. El primero se configura cuando existe una diferencia de temperatura superficial mayor a 8 °C en un intervalo de 1 hora, y el segundo cuando se verifica la misma diferencia de temperatura en un intervalo de 2 h. Las ecuaciones para choque térmico completo y choque térmico atenuado se muestran en (2) y (3), respectivamente.

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-1} \tag{2}$$

$$\Delta T_{ch} = t_n - t_{n-2} \tag{3}$$

Los resultados se presentan en gráficos de frecuencia anual de ocurrencia, dicha frecuencia se da en valores porcentuales y se calcula a partir de la relación entre el número total de ocurrencias de choques térmicos y el número de horas en un año.

2.3.3 Amplitud térmica ponderada

Para analizar los efectos asociados a la temperatura, se calcula la amplitud térmica ponderada expresada IIT para todas las fachadas, que tiene en cuenta los efectos de los ciclos y los valores alcanzados de temperatura superficial en los sistemas (Nascimento, 2016). El IIT se establece en base a las variaciones de temperatura y su frecuencia de ocurrencia en un cierto intervalo preestablecido. Para ello, el rango de variación de la amplitud térmica se divide en cuatro intervalos iguales, que se representan mediante valores medios de amplitud. El IIT se calcula como un promedio ponderado de los valores de las frecuencias verificadas para el clima de Brasilia en un intervalo de tiempo. Para presentar los resultados se calculó el IIT para un intervalo de 1 año.

La Tabla 4 muestra los cuatro intervalos iguales en los que se distribuyen los rangos de variación de la amplitud térmica (Nascimento, 2016), que consideran intervalos inferiores a 11,5°C (rango 1) hasta intervalos superiores a 27,7°C (pista 4). Finalmente, el Iit se calcula como se muestra en (4).

Tabla 4. Rangos de amplitud térmica considerados para el cálculo de Iit.

Rango	$\Delta T(^{\circ}C)$	ΔT medio($^{\circ}C$)
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

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

Donde I_{it} es el índice de intensidad de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), $[\Delta T]_{\text{mean}}$ es la amplitud de temperatura promedio del rango de ocurrencia ($^{\circ}\text{C}$), f_n es la frecuencia de ocurrencia del rango “n” de ΔT y f_{total} es la frecuencia de todas las ocurrencias de los cuatro rangos de estudio en el año, es decir, $f_{\text{total}}=365$.

2.3.4 Lluvia dirigida

El estudio de la lluvia dirigida se realiza mediante el método de cuantificación WUFI, en el que se obtienen datos horarios con un total de 8760 horas de precipitación, velocidad y dirección del viento para alimentar las simulaciones informáticas (Zanoni, 2015). A partir de esto, la intensidad de la lluvia dirigida se calcula en (5).

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

Donde R_{wdr} es la Intensidad de la lluvia dirigida (mm/h); R_h es la Precipitación sobre una superficie horizontal (mm); R_2 es el Coeficiente en función de la ubicación en la fachada (s/m); V es el promedio horario de la velocidad del viento a 10 m de altura (m/s); D es la dirección del viento (ángulo desde el norte); θ Orientación de la fachada: ángulo entre el Norte y la dirección normal al muro.

El valor de R_2 , en la metodología de cuantificación WUFI, depende de la altura del edificio y de la ubicación del área de estudio de la fachada como se muestra en la Tabla 5. En este caso, el valor adoptado es 0.2 correspondiente a edificios altos, parte superior mayor de 20 metros. Como datos de salida de la simulación se obtienen los valores de precipitación incidente en las fachadas y se calcula el valor acumulado anual en l/m^2 de lluvia dirigida

Tabla 5. Valores tabulados de R_2 en la metodología de cuantificación WUFI.

Altura	R2
Edificio pequeño, altura hasta 10 metros	0,07
Edificio alto, parte baja hasta 10 metros	0,05
Edificio alto, parte media de 10 a 20 metros	0,1
Edificio alto, parte alta mayor de 20 metros	0,2

3. RESULTADOS

3.1 Radiación total, temperatura superficial máxima y amplitud térmica máxima.

Los resultados de la radiación incidente total y las amplitudes térmicas superficiales máximas absolutas, calculadas como se muestra en (1), de las fachadas Norte de las ocho zonas se muestran en la Figura 2. Se observa que los valores más altos de amplitud térmica ocurren para la zona Z6 ($38,15^{\circ}\text{C}$) seguido de la zona Z2 ($37,5^{\circ}\text{C}$) y Z1 ($37,15^{\circ}\text{C}$), el valor más bajo se encuentra en Z8 ($22,64^{\circ}\text{C}$) y las demás zonas tienen valores intermedios. En cuanto a la incidencia de la radiación solar, Z4 presenta el valor más alto ($1.014.409 \text{ W/m}^2$) seguido de Z6 (995.347 W/m^2), mientras que

Z8 presenta el valor de incidencia de radiación más bajo (743.527 W/m²). Además, se observa que la incidencia de la radiación solar está asociada a la ganancia de temperatura en cada fachada, principalmente en las zonas Z8 y Z6, a excepción de la zona Z4, que presenta la mayor incidencia de radiación y la tercera menor térmica. amplitud.

En cuanto a la radiación total, las zonas Z4 y Z6 son críticas y la Z8 tiene condiciones de exposición más leves, a pesar de estar representada por la ciudad de Belém-Pa ubicada cerca del ecuador. Este resultado se obtiene porque la radiación solar que incide sobre la fachada es solo una parte de la radiación solar global horizontal (formada por las componentes directa, difusa y reflejada) (Silva, 2011) dependiente, por tanto, de la orientación y pendiente de la fachada.

La temperatura superficial y la amplitud térmica en la superficie, al ser el resultado de la interacción entre la radiación solar y el aumento de la temperatura del aire a lo largo del día, son mejores indicadores de las variaciones higrotérmicas que la radiación solar total incidente (Zanoni, 2015). En este caso, Z6 y Z7 son zonas críticas, ya que presentan mayor amplitud térmica (Figura 2) y mayor temperatura superficial (Figura 3) durante todo el año, respectivamente.

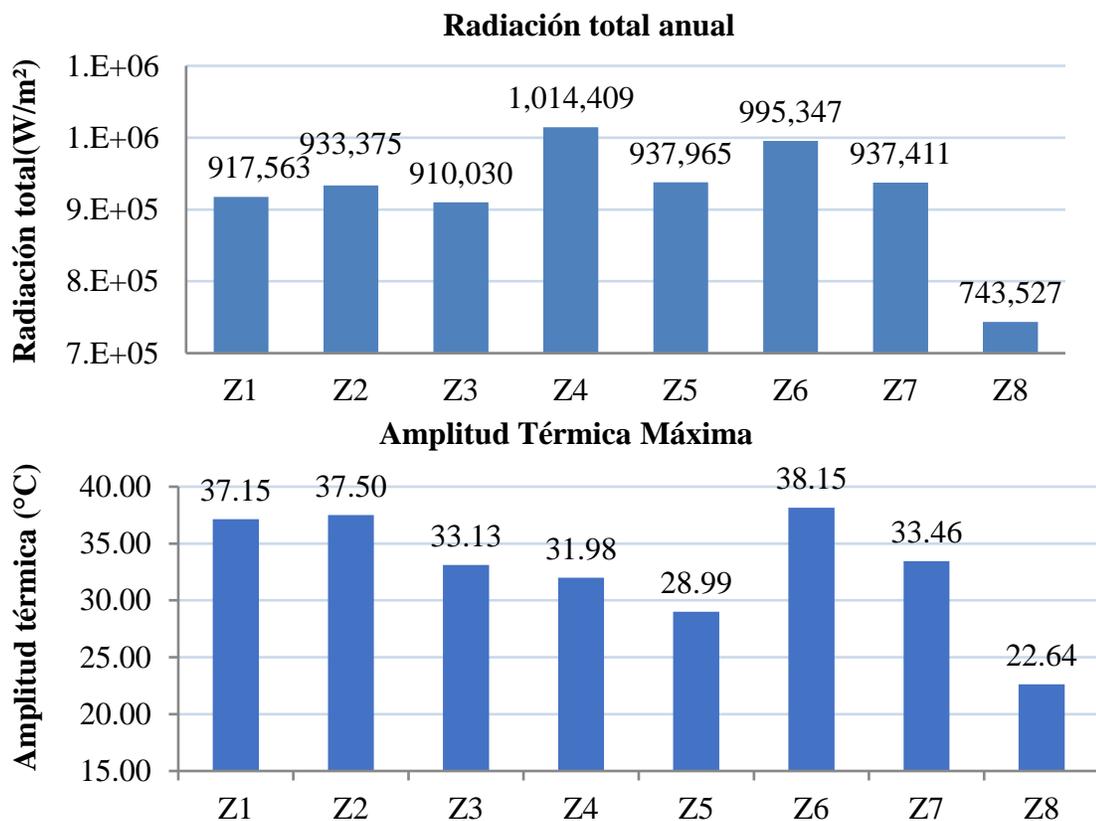


Figura 2. Radiación acumulada total y amplitud térmica máxima en un año de simulación.

Los resultados de temperaturas máximas y mínimas anuales para cada una de las fachadas se muestran en la Figura 3. Se observa que las temperaturas mínimas, que se dan cuando no hay incidencia de radiación en la fachada, presentan grandes diferencias entre ellas. Z2, Z1 y Z3 tienen los valores de temperatura más bajos 2,99°C, 5,48°C y 6,98°C, respectivamente. Por su parte, Z8, a pesar de tener una menor incidencia de radiación total en la fachada, tiene una temperatura mínima más alta (22,07°C) y un valor de temperatura máxima más bajo (46,16°C), lo que es consistente con amplitudes térmicas reducidas, como se muestra en la Figura 2. En este caso, se destaca que la temperatura superficial está ligada no solo a la incidencia de la radiación en la fachada, sino también a la temperatura del aire (ASHRAE, 2009; Lamberts et al., 2011).

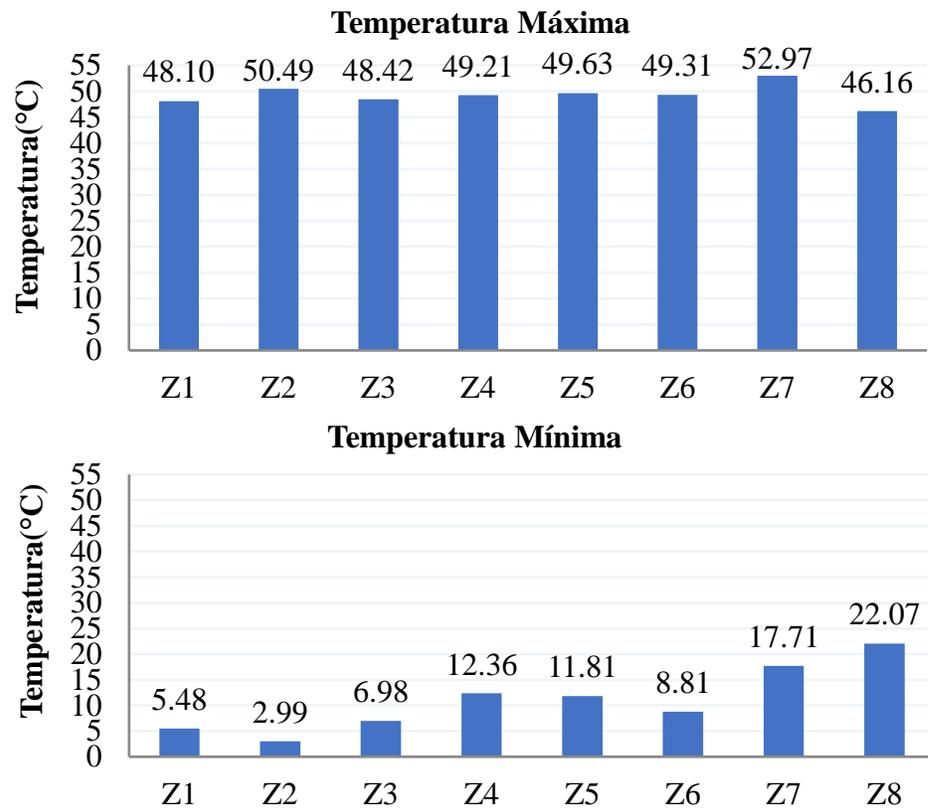


Figura 3. Temperatura superficial máxima y mínima absoluta en un año de simulación para cada zona bioclimática.

3.2 Choque térmico

En cuanto a los resultados de choque térmico, la Figura 4 muestra las frecuencias de ocurrencia de choques completos para todas las fachadas. La frecuencia más alta se destaca en la zona Z6, en la que el 1,59 % de las medidas se caracterizan como choques térmicos completos, seguida de Z1 (0,92 %) y Z4 (0,79 %). Las zonas Z5 y Z7 tuvieron las frecuencias más bajas 0,16% y 0,19%, respectivamente.

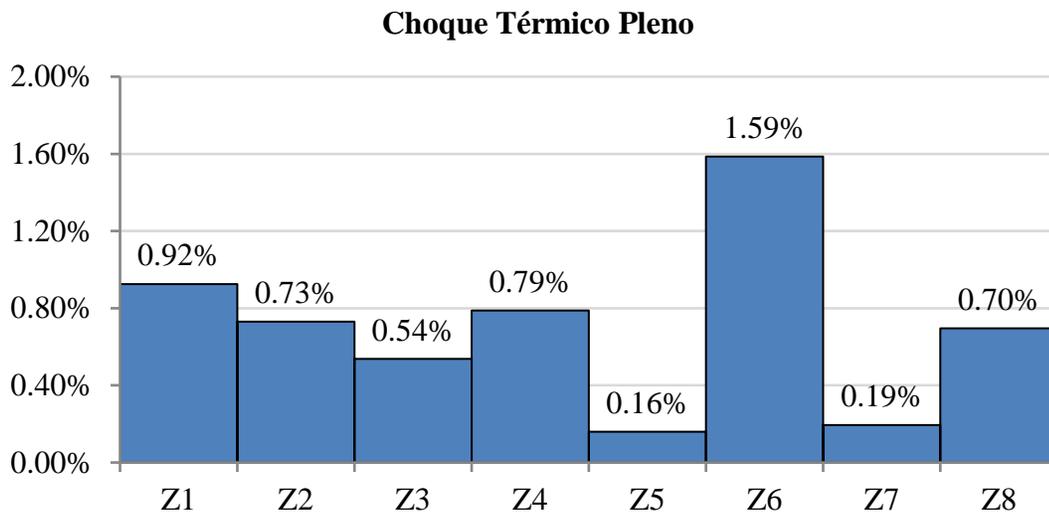


Figura 4. Frecuencia de ocurrencia de choque térmico completo para un año de simulación.

Los picos de choques completos se concentran en los meses de mayo a julio, según el Cuadro 6, que muestra la distribución mensual del número de choques. A lo largo de un año, es posible verificar en qué mes se presenta el mayor número de choques térmicos para cada zona aislada. Así, Z1 y Z5 tienen sus respectivos picos de choque térmico completo en julio, Z3, Z4, Z6 y Z7 en junio y Z2 y Z8 en mayo. En las zonas 1 a 7, los choques térmicos disminuyen de octubre a marzo, llegando a cero en uno o más meses de este período. Sin embargo, esto no ocurre en el Z8, que presenta los eventos de choque térmico mejor repartidos a lo largo del año.

Tabla 6. Número de eventos mensuales completos de choque térmico durante un año de simulación.

Choque Térmico Completo													
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	suma
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

La frecuencia de ocurrencia de choques atenuados se muestra en la Figura 5. Z6 presenta la mayor ocurrencia con 13.65%, seguida de Z4 con 10.88%. Z8, Z5 y Z2 presentan las frecuencias más bajas, siendo estas del 2,84%, 3,35% y 4,95%, respectivamente. Tenga en cuenta que en el Z6 hay aproximadamente 5 veces más golpes atenuados en comparación con el Z8. Z4 y Z1 también muestran valores de alta frecuencia (10,88% y 10,31%, respectivamente) seguidos de Z3 y Z7 (8,75% y 8,60%).

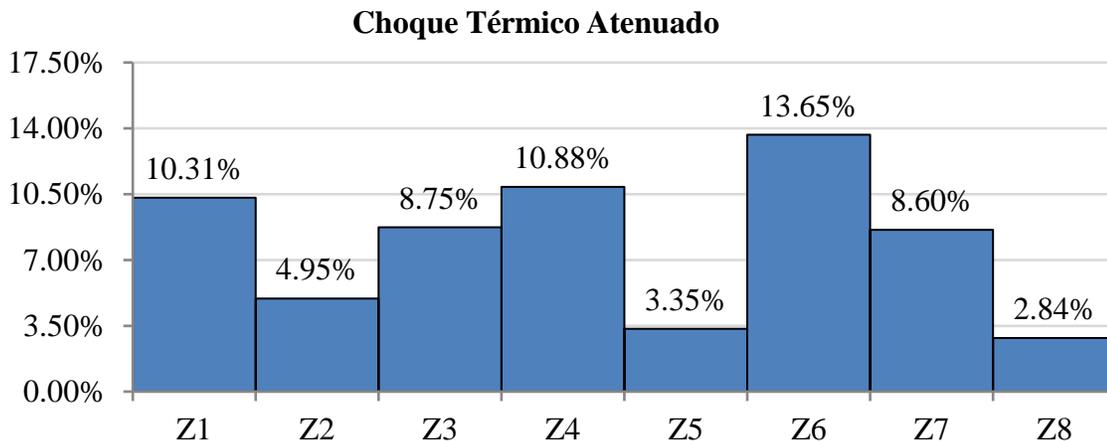


Figura 5. Frecuencia de ocurrencia de choque térmico atenuado para un año de simulación.

Al realizar la distribución de estos eventos en el año, se observa que ocurren de mayo a agosto, como se muestra en la Tabla 6. Solo Z5 presenta meses sin ocurrencia de choques térmicos (noviembre y diciembre). Z2 y Z8 tuvieron su pico en mayo, Z4 y Z6 en junio, Z1, Z5 y Z7 en julio y Z3 en agosto. Hay una mejor distribución de ocurrencias a lo largo del año en Z8, donde varía del 12 de septiembre al 32 de mayo, mientras que en otras áreas hay una mayor variación entre los meses de menor y mayor ocurrencia, como en Z6, que tiene menor ocurrencia en noviembre con 14 eventos y mayor en junio con 211.

Tabla 7. Número de eventos de choque térmico atenuados mensuales durante un año de simulación.

Choque térmico atenuado													
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	suma
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

Las zonas con mayor frecuencia de choque térmico tienen condiciones críticas de exposición y aquellas con menor frecuencia tienen condiciones más suaves. Se destaca la zona Z6, que presentó la frecuencia más alta tanto para choques térmicos completos como atenuados. Finalmente, la zona Z5 presentó frecuencias reducidas en los dos tipos de choques considerados y la Z8 menor frecuencia para choques atenuados.

3.3 Amplitud térmica ponderada

La Figura 6 muestra los resultados del IIT para todas las fachadas correspondientes a cada zona bioclimática. Los resultados tienen en cuenta los valores de variación de temperatura para un año de simulación. Como se observó en los resultados de máxima amplitud térmica y choque térmico, la zona Z6 presentó valores críticos (22,55) en cuanto a la acción de los agentes de temperatura. Asimismo, las zonas Z8 y Z5 presentaron los valores de IIT más bajos (16,53 y 16,55). Z2, Z4 y Z7 también presentaron valores altos con respecto a los demás y Z3 y Z1 presentaron valores intermedios.

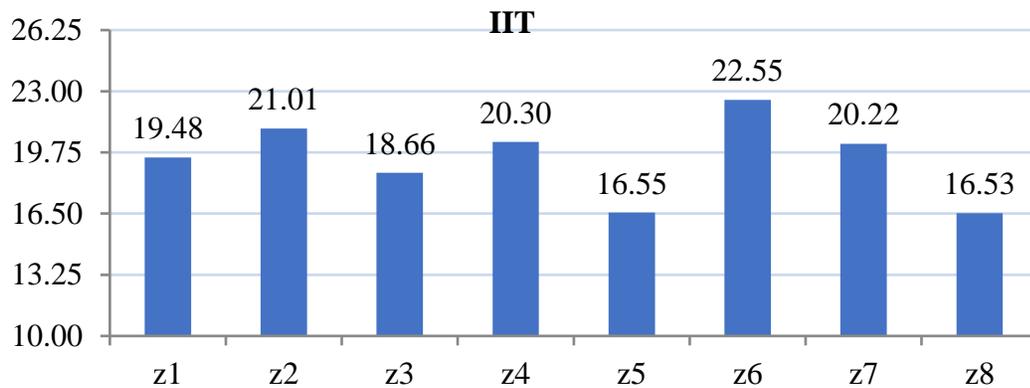


Figura 6. Valores de IIT para todas las zonas bioclimáticas.

Las variaciones térmicas en las fachadas son causantes de deformaciones en el sistema de revestimiento e inducen esfuerzos de fatiga como consecuencia de su característica cíclica. Así, las variaciones térmicas están relacionadas con anomalías en los revestimientos de fachada, especialmente en lo que se refiere al desprendimiento y agrietamiento de la cerámica (Silva, 2014; Souza, 2016). El IIT se muestra como un valor de referencia a nivel de comparación entre ciudades, y que demuestra la severidad de la exposición al agente de degradación térmica. Por lo tanto, valores más altos representan una mayor exposición y un mayor potencial de degradación y disminución de la vida útil.

Los valores de IIT se consideraron adecuados cuando se relacionaron con la degradación de las fachadas (Nascimento, 2016) y, con base en ellos, se estableció un Ranking sobre la exposición de las fachadas a la temperatura, clasificadas según su severidad. Entonces, en orden descendente, las áreas más graves fueron: Z6>Z2>Z4>Z7>Z1>Z3>Z5>Z8.

3.4 Lluvia dirigida:

Se analizó la precipitación dirigida en términos de incidencia de precipitación total anual (l/m^2), Figura 7, para las mismas fachadas norte, con el fin de completar el análisis de los agentes de degradación realizado. Obsérvese que la zona Z8 es crítica para este caso ($113,15 l/m^2$) con un valor unas 6 veces superior a la zona de menor incidencia Z5 ($18,2 l/m^2$), en contraste con los resultados anteriores. Las zonas Z4 ($100,12 l/m^2$) y Z3 ($71,72 l/m^2$) también muestran valores altos en comparación con las demás. Finalmente, Z1 ($52,19 l/m^2$) y Z6 ($59,67 l/m^2$) presentan valores intermedios mientras que Z2 ($35,57 l/m^2$) y Z7 ($30,57 l/m^2$) presentan valores de incidencia de lluvia inferiores.

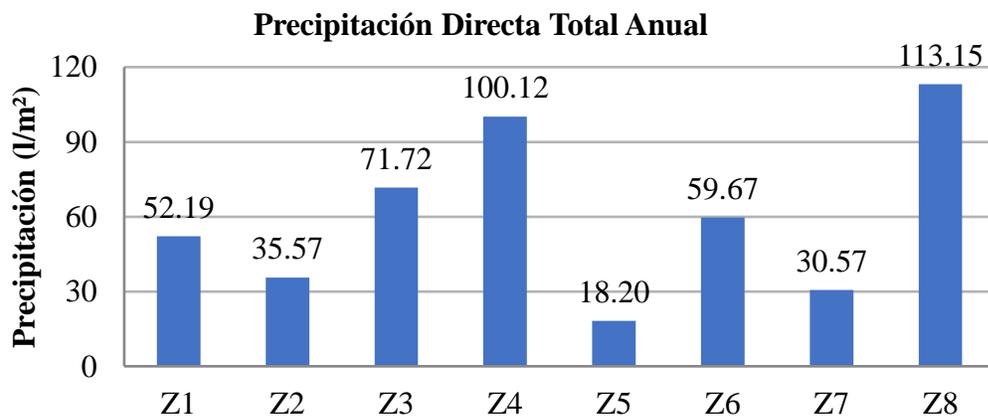


Figura 7. Valores acumulados de lluvia dirigida para una no simulación en todas las zonas bioclimáticas

Cabe destacar que la lluvia dirigida es el resultado de la acción de los vientos sobre la precipitación (Freitas, 2011; Zanoni, 2015), por tanto, está condicionada a la velocidad y dirección de los vientos. Para las ciudades de Brasilia y Goiania, la orientación con mayor precipitación es al Norte (Zanoni et al., 2014; Zanoni et al., 2018; Andrade et al., 2021; Melo y Carasek, 2011) mientras que para Curitiba es la orientación Este (Batista et al., 2017) y para Florianópolis es la orientación Sur (Giango et al., 2010; Giango, 2007). En este caso, los resultados presentados no representan necesariamente la orientación de exposición crítica a la humedad de la lluvia, sino la orientación adoptada como referencia, al Norte.

4. CONCLUSIÓN

Se propuso investigar la acción de los agentes de degradación asociados a la temperatura y la lluvia dirigida en las fachadas de edificios ubicados en diferentes zonas bioclimáticas brasileñas. En este contexto, es posible identificar áreas que presentan condiciones críticas de exposición a agentes de degradación como una forma de contribuir al conocimiento de las diferentes condiciones que desencadenan el proceso de degradación en Brasil. De esta forma, fue posible identificar los siguientes comportamientos:

- Zona Z6, representada por la ciudad de Goiânia-GO, proporciona condiciones críticas de exposición en relación a la amplitud térmica, choque térmico atenuado y completo e índice de intensidad de temperatura;
- La zona Z8, representada por la ciudad de Belém-PA, a pesar de presentar una condición de exposición más leve para los agentes asociados a la temperatura (radiación solar, amplitud térmica, choque térmico atenuado e índice de intensidad de temperatura) es crítica para la exposición al agua lluvia dirigida.
- Las zonas Z1, Z2, Z3, Z5 y Z7, representadas por las ciudades de Curitiba-PR, Santa Maria-RS, Florianópolis-SC, Niterói-RJ y Picos-PI, respectivamente, presentaron valores de incidencia de radiación total anual sobre la fachada Norte similar. Sin embargo, Z1 y Z2 presentan amplitudes térmicas altas en comparación con los demás.
- Con relación a la Lluvia Directa, las fachadas Norte de las zonas Z8 y Z4 (Brasília-DF) presentaron mayor exposición considerando los valores de precipitación anual y la Zona Z5 presentó la condición de exposición más leve.
- Se concluye que las fachadas norte analizadas en las 8 zonas bioclimáticas brasileñas tienen diferentes condiciones de exposición a agentes asociados a la temperatura y lluvia dirigida. Estos afectan a la durabilidad del edificio, ya que la sinergia de los agentes de degradación que actúan sobre las fachadas acelera la degradación, comprometiendo su rendimiento y afectando su vida útil. Además, como aporte, el estudio brinda un ranking relativo a la severidad de exposición a la temperatura, por lo tanto, con mayor potencial de degradación y disminución de la vida útil. En orden descendente, las áreas más expuestas: Z6-Z2-Z4-Z7-Z1-Z3-Z5-Z8, o por las ciudades de Goiânia-Santa Maria-Brasília-Picos-Curitiba-Florianópolis-Niterói-Belém.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al PECC (Programa de Postgrado en Estructuras y Construcción Civil) de la Universidad de Brasilia, y al DMMPROJECT (Degradación: Mesaurament and Modelling). Este estudio fue financiado en parte por la Coordinación para el Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior - Brasil (CAPES) - Código financiero 001, por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y por el Decano Académico de Estudios de Posgrado

(DPG) de la Universidad de Brasilia (UnB).

6. REFERENCIAS

- 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 absorção 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 ação 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 Phatology 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>