

Peixoto, R. S. ¹

Graduando, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

Oliveira Júnior, L. A. ²

Professor Dr., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

¹ renatostivalpeixoto@gmail.com; ² alvarojunior@pucgoias.edu.br.

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo analisar numericamente pelo método dos elementos finitos um modelo representativo de fachada envidraçada submetido à variação de temperatura, considerando não linearidade física e utilizando o programa Diana®, versão 9.3. O modelo é composto de uma placa de vidro de 6 mm de espessura travada em caixilhos de alumínio engastados em dois pilares de concreto armado. A análise de resultados consistiu em demonstrar a distribuição das deformações e das tensões do vidro por meio das deformações principais e das tensões principais e normais. As deformações principais apresentaram arqueamentos junto às bordas da placa de vidro, caracterizando flexão em duas direções. As tensões principais menores distribuíram-se de maneira uniforme no modelo, ao passo que as tensões principais intermediárias e maiores distribuíram-se formando regiões de pico com vales ao longo das bordas livres (tensão principal intermediária) e ao longo dos caixilhos (tensão principal maior) que, a depender dos valores, podem indicar regiões de eventual ruptura se excedida a resistência à tração do vidro.

Palavras-chaves: Fachada envidraçada, Análise numérica, Método dos Elementos Finitos, Vidro, Temperatura.

Área de Concentração: 02 – Estruturas

1 INTRODUÇÃO

A fachada envidraçada (ou pele de vidro), segundo reportagem publicada pelo site AECweb, evoluiu das estruturas em aço para o alumínio, e o sistema se tornou mais complexo até chegar ao *unitizado*, que pode receber painéis de alumínio composto (ACM), vidro ou mesmo pedra, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Fachada Envidraçada.



Fonte: LIFESTYLEAOMINUTO (2019)

As fachadas envidraçadas ganharam atenção especial nos últimos anos com a difusão do “retrofit” técnica de modernização das fachadas que significa renovar a arquitetura de um edifício já construído, não sendo permitida a demolição por completo, como mostra a Figura 2.

Figura 2: Antes e depois da execução de retrofit.



Fonte: VivaDecoraPRO (2019)

No decorrer do século XX, as fachadas de edifícios de múltiplos pavimentos passaram a ser elaboradas de maneiras diferentes, mudando de alvenaria convencional, para fachada envidraçada. No Brasil, atualmente nas regiões de edifícios comerciais nas grandes cidades, os arquitetos têm optado pela instalação da fachada envidraçada para que proporcionem mais conforto às pessoas que habitam o local, conforto térmico e visual (DUARTE, 2009).

Para a colocação de um vidro na fachada deve-se possuir conhecimento técnico para que sua aplicação seja a correta para a realidade climática do local. Nesse sentido, são variáveis intervenientes: o tipo de vidro, a espessura, a translucidez e a taxa de reflexão de luz, que dependem do ângulo de incidência da radiação e do comprimento da onda, além de sua composição (CASELLI, 2011). Vidro inserido erroneamente pode ocasionar problemas graves, como gerar ambientes extremamente quentes, forçando a elevação do consumo de energia com sistemas de condicionamento de ar para compensar o superaquecimento. Conforme explica Caselli (2011), com um ambiente superaquecido, acaba-se exigindo um condicionador de ar potente, o que acaba aumentando consideravelmente o consumo de energia.

A fachada envidraçada era um sistema de vedação que engenheiros e arquitetos tinham receio de especificar em seus projetos, pois garantir a estanqueidade da fachada, a resistência ao vento, a resistência à variação de temperatura e a resistência ao impacto, por exemplo, eram dificuldades onerosas de resolver.

A escolha de um vidro para a fachada é muito importante para que se garanta a segurança dos ambientes internos e externos, bem como das pessoas que os utilizam. Por exemplo, no caso de uma pessoa se deslocando perto da fachada, na área interna do edifício, se ocorrer a queda da pessoa sobre o vidro, este material deve ser suficientemente resistente para evitar a queda.

O projeto da fachada envidraçada tem papel essencial no desempenho do edifício, seja do ponto de vista do conforto térmico, da iluminação natural ou do ponto de vista estrutural. Explicar como cada um desses aspectos é afetado pela existência de um projeto bom ou ruim.

Não se tem conhecimento de muitos estudos sobre as deformações que os elementos da fachada envidraçada podem sofrer quanto à variação de temperatura, pois cada elemento possui uma dilatação térmica diferente, sendo assim cada material tem seu comportamento distinto um do outro. O vidro, por exemplo, é um material frágil, que ao cair ou ser comprimido, pode apresentar fissuras, trincas e até mesmo quebrar. Já os metais, que formam o suporte do vidro, são materiais dúcteis, possuindo uma grande capacidade de se modificar, como por exemplo, dobrar, deformar e

esticar sem perder sua qualidade. Com isto, em função de suas próprias deformações, os metais podem acabar induzindo esforços nos vidros que, a depender da magnitude, podem eventualmente levá-los à ruína completa.

Este trabalho pretende analisar o comportamento de um elemento da fachada envidraçada submetido à variação de temperatura, via análise numérica realizada pelo Método dos Elementos Finitos MEF, considerando não linearidade física.

As fachadas envidraçadas constituem uma estrutura à parte que deve ser adequadamente conectada à estrutura principal do edifício que a receberá, de modo que uma induz na outra esforços e deslocamentos provenientes das ações que solicitam cada uma delas (vento, sismo, variação de temperatura, etc.). Dessa forma, considerando que são estruturas que a cada dia são mais e mais especificadas pelos profissionais de arquitetura, é importante avaliar esse comportamento solidário entre elas para verificar se as duas estruturas colaborarão de maneira adequada em serviço, ou se o que uma induz na outra será causa de manifestações patológicas e/ou ruínas localizadas.

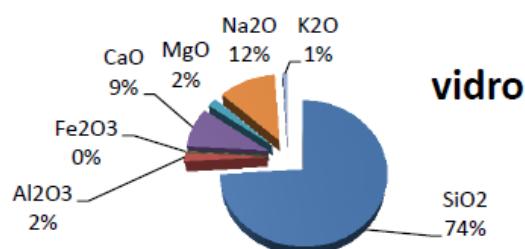
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico apresenta, para fins de contextualização, um panorama geral da tecnologia, discutindo-se a utilização do vidro estrutural nas fachadas, seu desenvolvimento enquanto material de construção e algumas normas utilizadas para inseri-lo na construção civil. Ao final, são apresentados alguns trabalhos sobre a modelagem computacional desse tipo de estrutura.

2.1 Vidro

Segundo Barros (2010), na construção são aplicados os vidros sílico-sodo-cálcicos que são compostos pelas seguintes características, conforme mostra Figura 3.

Figura 3: Composição do vidro.



Fonte: Barros (2010).

Segundo Barros (2010) exerce a função de vitrificante a sílica, introduzida sob a forma de areia (de 70% a 72%), enquanto a soda, inserida sob a forma de carbonato e sulfato (cerca de 14%) atua como fundente. Por sua

vez, utiliza-se o óxido de cálcio na forma de calcário (cerca de 10%) como estabilizante e vários outros óxidos, tais como o alumínio e o magnésio, são usados para melhorar as propriedades físicas do vidro, especialmente a resistência à ação dos agentes atmosféricos (BARROS, 2010).

Existem diferentes tipos de vidro: o vidro laminado, o qual é considerado como de segurança, pois *“consiste em duas ou mais lâminas de vidro fortemente interligadas, sob calor e pressão, por uma ou mais camadas de polivinil butiral-PVB”* (BARROS, 2010, p.11), conforme mostra a figura 4. Outro tipo de vidro é o temperado, que tem sua resistência aumentada pelo processo de têmpera, no qual se gera um sistema de tensões, aumentando assim a sua resistência (BARROS, 2010), conforme mostra figura 5.

Segundo Barros (2010), um grande acontecimento que levou o vidro ao revolucionamento, foi a técnica do sopro, onde colocavam o uma pequena quantidade do material em fusão na ponta de um tubo e assoprava a outra extremidade. Outra técnica que também ajudou na revolução do vidro foi a de gotas, obtidas nas pontas do tubo e assopradas, onde começou a produzir os vidros planos. Atualmente, o processo de fabricação de um vidro é muito mais rápido, de acordo com Libos (2017), um dos processos mais simples e comum dos vidros é o float, pois se baseia em alimentar uma fornalha com a matéria prima, fazendo assim derretê-la, e em sequência jogando-a em um banho de estanho.

A invenção do vidro semelhante ao disponível atualmente no mercado se deu aproximadamente na década de 1950 e o produto recebeu o nome de vidro “float”, cujas principais características eram transparência, boa resistência química, facilidade de manuseio, durabilidade e baixo custo (MENDONÇA, 2020). A inserção do vidro na construção civil ocorreu junto a sua evolução tecnológica, visto que quanto mais o seu uso se intensificava, mais o material precisaria de resistência para atender às necessidades de seus usuários, como afirma.

Figura 4: Vidro Laminado.



Fonte: Made-in-China (2020).

Figura 5: Vidro temperado.



Fonte: RIOPAIVA (2020).

Atualmente qualquer edifício possui vidro como parte integrante e/ou fundamental. Reduz custos com condicionadores de ar (economicamente), térmico (forte influência no conforto), vista externa (estético) e na segurança fechando uma fachada. (ARRUDA, 2010)

2.2 Normas

Não há no Brasil normas regulamentadoras cujo foco seja o vidro estrutural. Existem apenas exigências que o material deve cumprir para ser classificado como um elemento estrutural. Em uma entrevista para a AECweb, Margaritelli alega que *“No Brasil, ainda não existem normas técnicas para o vidro estrutural. Utilizamos a ABNT NBR 7199 – Projeto de Execução e Aplicações de Vidros na Construção Civil – e a ABNT NBR 11706 – Vidros na construção civil”*. Segundo Mendonça (2020) um projeto para ser construído de forma eficaz, requer a aplicação das seguintes normas:

- ABNT NBR 7199 – Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações;
- ABNT NBR 15737 – Perfis de alumínio e suas ligas com acabamento superficial – Colagem de vidros com selante estrutural;
- ABNT NBR 16259 – Sistemas de envidraçamento de sacadas – Requisitos e métodos de ensaio;
- ABNT NBR 14718 – Esquadrias – Guarda Corpo para edificações – Requisitos, procedimentos e métodos de ensaio;
- ABNT NBR NM 293 – Terminologia de vidros planos e dos componentes e acessórios a sua aplicação;
- ABNT NBR 14698 – Vidro temperado;
- ABNT NBR 9492 – Vidro de Segurança;
- ABNT NBR 16015 – Vidro Insulado;
- ABNT NBR 6120 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR 14697 – Vidro laminado;

- ABNT NBR 9607 – Prova de carga estática em estruturas de concreto – Requisitos e procedimentos;
- ABNT NBR 14125 – Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície – Requisitos para revestimento orgânico para fins arquitetônicos;
- ABNT NBR 10821 – Esquadrias para edificações;
- ABNT NBR 12613 – Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície – Determinação da selagem de camadas anódicas – Método de absorção de corantes;
- ABNT NBR 12609 – Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície – Requisitos para anodização para fins arquitetônicos.

Entre todas essas normas citadas, duas delas se destacam mais que as outras em questão da inserção do vidro como elemento estrutural em fachada, a ABNT NBR 10821 e a ABNT NBR 7199. Abaixo estão alguns requisitos retirados das duas normas mencionadas.

ABNT NBR 10821/2000 – Esquadrias externas – Requisitos e classificação – Parte 2: fornece as seguintes exigências que as esquadrias externas têm que apresentar relativamente aos seguintes fatores:

- Iluminação e ventilação;
- Manutenção da segurança durante os ensaios de resistência às operações de manuseio;
- Permeabilidade ao ar;
- Desempenho térmico;
- Resistência às operações de manuseio;
- Estandarização à água;
- Desempenho acústico;
- Resistência às cargas uniformemente distribuídas.

ABNT NBR 7199/2016 – Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações: esta norma fixa os requisitos mínimos para aplicação de vidro na construção civil, devendo ser atendidas as seguintes exigências:

- Tipologia e funcionamento do envidraçamento;
- Dimensões, inclusive subdivisões;
- Sua inclinação em relação à vertical;
- Posicionamento em relação ao piso e em relação ao solo;
- Localização na obra, indicando detalhes de construção que possam influir no envidraçamento;
- Esforços solicitantes considerados (carga de vento, peso próprio e cargas acidentais);
- Material utilizado na fixação;
- Vidro a ser usado.

A norma ABNT NBR 7199/2016 também oferece o método de cálculo para a espessura do vidro. Este cálculo é efetuado com base no tamanho da peça, pressão de vento, flecha admissível, inclinação do

vidro, número de apoios e tipo de vidro. Resistência a corrosão.

2.3 Fachadas Envidraçadas

A Norma ABNT NBR 10821-1/2017, estabelece que uma fachada envidraçada, também conhecida como fachada cortina são:

“Esquadrias interligadas e estruturadas, com função de vedação, que formam um sistema contínuo, desenvolvendo-se no sentido altura e/ou largura da fachada da edificação, sem interrupção, por meio de dois pavimentos”.

Uma fachada de vidro é construída basicamente com uma estrutura leve em alumínio, um suporte para a estrutura e uma pele de vidro que pode ter diferentes tamanhos e cores. Segundo Memari (2013, *apud* MONEGATTI, 2019, p.5) os vidros podem ser fixados aos painéis integrados com travessas e montantes de duas formas:

- “Com um sistema do tipo tampa, no qual o alumínio pressiona fisicamente o revestimento envidraçado em conjunto com um material elastomérico, tal como a borracha, que atua entre o vidro e os montantes/travessas” (MONEGATTI, 2019).
- “Através de colagem estrutural, que pode ser feita com silicone estrutural ou fita dupla face, os quais, usam propriedades químicas para promover a junção entre vidro e alumínio” (MONEGATTI, 2019).

De acordo com Monegatti (2019), o processo de evolução na montagem de uma fachada envidraçada progrediu muito, saindo de um processo de montagem totalmente manual (peça por peça), para um sistema mais rápido de ser construído, no qual a estrutura da fachada é montada com peças pré-moldadas de concreto nas quais o vidro é apenas inserido ou inserindo as ancoragens na estrutura de concreto moldada no local para posterior instalação das placas de vidro, constituindo uma forma de montagem totalmente unitizada.

Cada tipologia de fachada requer um projeto específico que considere a forma de execução da fachada, pois cada uma tem sua peculiaridade e ajustes realizados no projeto no momento da execução seguramente vão comprometer o funcionamento adequado da fachada. Segundo Mendonça (2020) os fatores mais importantes que podem influenciar na seleção técnica de uma tipologia de fachada envidraçada são:

- Porte do projeto;
- Compatibilidade entre o sistema de fixação das esquadrias e o sistema construtivo estrutural da edificação, ou seja, a fachada deve ser pensada

desde o início do projeto da obra como um todo, isto é, os projetos das diversas disciplinas precisam ser elaborados considerando que a estrutura terá uma fachada envidraçada. Em caso de retrofit, o projeto da fachada envidraçada emprega uma filosofia diferente, pois inclui nas premissas de projeto a adequação da estrutura já existente para que seja possível construir a fachada envidraçada;

- Tempo para execução;
- Espaço de trabalho no canteiro de obras.

Segundo Arruda (2010), os sistemas que mais evoluíram tecnologicamente no quesito de sistema de fechamento de edifício foram os sistemas Stick (Pele de vidro – simples ou duplo e Structural glazing) e sistema unitizado.

Na pele de vidro simples ou dupla, os quadros de vidros passaram a ser parafusados com presilhas, colocado sobre as colunas e travessas. Esta estratégia foi criada para diminuir a visibilidade dos perfis de alumínio na fachada. Sendo assim, elas passam a destacar os painéis de vidro, mesmo mantendo o traçado de linhas verticais e horizontais da caixilharia, conforme explica Arruda (2010).

Segundo Arruda (2010), no sistema *Structural glazing* passou-se a colocar silicone estrutural para fixar os painéis de vidro. A espessura e quantidade que se utiliza é definida a partir das pressões de vento positivas e negativas do local e também pela linha do perfil utilizado e altura do edifício. As travessas e colunas continuam presas e contínuas à estrutura, se utilizam andaimes externos para realizar a montagem manualmente (ARRUDA, 2010).

Por fim, no sistema unitizado os painéis já vem de fábrica independentes e estruturados com o vidro para apenas ser fixado por ancoragens reguláveis. “A fixação pode ser mecânica ou utilizar silicone. O sistema de montagem é mecanizado” (ARRUDA, 2010, p.3). Este sistema dispensa a subestrutura para conter o vidro, pois forma-se por coluna e travessas. “Como os painéis já vem de fábrica totalmente montados, faz com que garanta um aumento no controle tecnológico e uma maior qualidade de fechamento da fachada” (ARRUDA, 2010).

2.3.1 Sistema Stick

O sistema stick recebe colunas verticais e horizontais (montantes e travessas) as quais são fixadas nas vigas pelo lado interno, enquanto o vidro permanece encaixilhado (ARRUDA, 2010). Dessa forma mesmo tendo a marcação de linhas horizontais e verticais da caixilharia, o vidro continua mostrando um aspecto de pele única. A figura 4 mostra um exemplo de fachada stick.

Os perfis têm seção transversal em U e a fixação do vidro é interna no perfil com aplicação, normalmente, de uma pressão branda no interior do perfil (ARRUDA, 2010). A figura 5 ilustra de forma esquemática como ocorre a instalação do vidro.

Figura 4: Fachada Stick



Fonte: VITRINE&ARTETECH (2020)

Figura 5: Detalhe de ligação entre elemento metálico e vidro na Fachada Stick



Fonte: VITRINE&ARTETECH (2020)

De acordo com MONEGATTI (2019, p.8), a vantagem da utilização desse sistema é a facilidade de manuseio e transporte gerando baixo custo, graças ao fato de permitir algum grau de ajuste dimensional na colocação e ao volume mínimo. Porém, não se tem um controle de fábrica na montagem abrindo assim oportunidades para a ocorrência de falhas.

Tem-se um custo maior de manutenção e de instalação em comparação com as outras tipologias de fachadas, então são mais utilizados em obras de grande ou médio porte. Segundo Arruda (2010), oferecem uma excelente estanqueidade ao vento e a água.

Um dos métodos para conseguir reduzir a utilização de condicionadores de ar e garantir um bom conforto acústico utiliza-se da dupla pele. Com isso reduz-se o calor, pois o ar quente acesa o espaço entre as duas camadas de vidro, sobe em função da sua densidade, que é menor que a do ar frio, e na sequência se dissipa

no meio externo, permitindo ainda a utilização mais eficiente da luz dia (ARRUDA, 2010).

Na tipologia de fachada conhecida como *Structural Glazing*, a instalação do vidro é feita por meio de silicone aplicado nos perfis dos quadros de alumínio, tornando-se uma estrutura oculta. “O selante torna-se elemento estrutural, aderindo aos suportes e transferindo à estrutura metálica as cargas aplicadas sobre a fachada” (ARRUDA, 2010).

Para ter bom desempenho, boa durabilidade, bom funcionamento e segurança, este sistema necessita de cuidados na elaboração dos projetos, de tal forma a garantir que a instalação siga à rigorosamente as recomendações dos fabricantes dos materiais envolvidos e do projetista.

2.3.2 Sistema unitizado

De acordo com Arruda (2010) “o sistema unitizado chegou ao Brasil no final da década de 1990. O conceito foi desenvolvido por projetistas norte-americanos, consistindo, basicamente em unir vários elementos (gaxeta, borrachas, acessórios e vidros) em um módulo produzido na indústria.”

Dentre os outros sistemas apresentados, o unitizado é aquele em que se tem mais controle do processo de instalação, pois o sistema é modular e cada módulo é fabricado por completo e então inserido na estrutura do edifício. Com isso, esta tipologia de fachada apresenta uma melhor relação custo x benefício. A figura 7, mostra a instalação de uma placa pré-moldada do sistema unitizado. A figura 8 mostra uma fachada pronta com o sistema unitizado.

O sistema unitizado deu à obra uma grande velocidade de execução e assegurou uma excelente vedação. Com isto, esse sistema é considerado um importante avanço na área de fachada envidraçada. Os perfis são fixados praticamente por encaixes, garantindo com segurança a facilidade na etapa de montagem e grande rapidez na sua colocação. (ARRUDA, 2010). Por outro lado, o sistema necessita de equipamentos pesados a muitos pesos dependendo da altura do edifício, como por exemplo guindastes para içar as peças, requer mais espaço no canteiro para o posicionamento de tais equipamentos, bem como controle maior da logística prevendo acessos para entrada e saída dos mesmos, espaços adequados e posicionados estrategicamente para a armazenagem de insumos e mão de obra especializada na instalação desse sistema de fachadas.

Por serem elementos de fachada, consequentemente expostos diretamente à incidência solar direta e às intempéries, sob altas temperaturas o sistema unitizado pode perder a estanqueidade, pois cada material dilata de forma diferente um do outro criando espaços entre

eles pelos quais a água pode acessar ao interior da estrutura da fachada ou do edifício (ARRUDA, 2010).

Figura 7: Placa pré-moldada.



Fonte: WALLFrame (2016)

Figura 8: Fachada Envidraça Sistema Unitizado.



Fonte: ABRAVIDRO (2020)

A instalação se dá pela fixação de módulos, colocando as ancoragens na parte da frente da viga, em seguida os módulos são levantados, e inseridos de baixo para cima, e então fixados em ancoragem em pontos estratégicos da laje, finalizando com o encaixe dos perfis.

Arruda (2010) explica que o sistema unitizado pode ser descrito como um sistema modular composto de uma coluna desmembrada em macho e fêmea, e a altura do módulo alcança o pé-direito da obra. A produção desse módulo já contempla a fixação da travessa horizontal na coluna tipo macho e fêmea, sendo que o vidro é colado diretamente nessa estrutura, formando o painel modular, o qual é içado a partir da base da obra e levado mecanicamente até o vão, onde é instalado.

2.4 Modelagem de fachada envidraçada

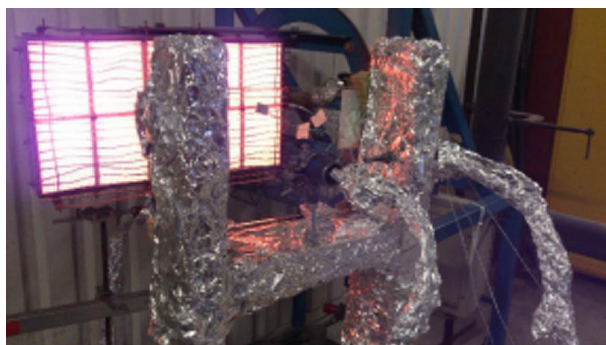
Bedon, Koztowski e Honfi (2018) fizeram simulação numérica e experimentos nos quais aqueceram amostras de vidro monolítico e laminado por radiação de calor, como mostra a figura 9. De acordo com

Bedon, Koztowski e Honfi (2018), a carga térmica que o vidro recebe é absorvida e conduzida por entre as camadas do vidro laminado e através do vidro monolítico, provocando aumento das temperaturas nos materiais. Assim a modelagem buscou representar no modelo computacional tanto a superfície exposta quanto a superfície oposta a ela.

“A radiação para o ambiente requer a emissividade da superfície como entrada e é assumida como sendo agrupada nas superfícies de interesse. A convecção é então calculada em função do coeficiente de transferência de calor por convecção. Como o coeficiente de calor convectivo depende das temperaturas nodais calculadas dentro do modelo EF, é necessária uma sub-rotina do usuário para descrever sua evolução” (BEDON, KOZTOWSKI e HONFI, 2018).

De acordo com esses autores, amostras de vidro com várias características geométricas e mecânicas foram expostas a aquecimento por radiação de calor resultando, em alguns casos, na quebra dos painéis.

Figura 9: Teste de uma amostra.



Fonte: BEDON, KOZTOWSKI e HONFI (2018)

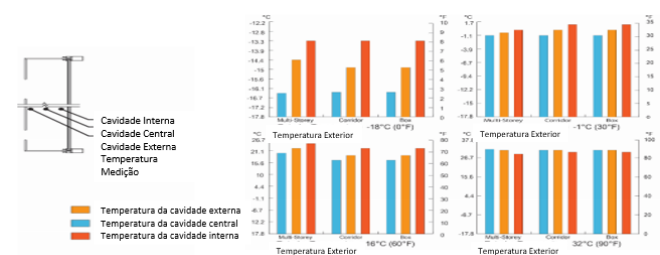
Por sua vez, Aksamija (2018), em uma de suas pesquisas, investigou o desempenho térmico e energético de fachadas duplas em todos os climas utilizando os programas THERM e WINDOW para a análise pelo método dos elementos finitos em duas dimensões. Segundo Aksamija (2018), as fachadas analisadas foram primeiramente esboçadas em 2D no CAD e depois introduzida no programa THERM para realizar modelos de análise térmica. Aksamija (2018) colocou todas as unidades de envidraçamento com isolamento duplo e baixo de 2,5 cm. O interior da fachada possuía preenchimento de gás argônio e vidros temperados simples de 1,25 cm. No exterior Aksamija (2018) supôs que o vão entre uma fachada e a outra possuía apenas ventilação natural, deixando apenas abertura na parte superior e inferior, para a entrada e saída de ar.

“Os resultados da pesquisa conduzida por Aksamija (2018) indicam que, para temperaturas externas mais baixas que -1°C e -18°C , há uma diferença maior de

temperatura nas partes inferior e superior da cavidade do ar. À medida que a temperatura externa aumenta, como 16°C e 32°C , há menos diferença entre as temperaturas das partes inferior e superior da cavidade do ar. Outra observação é que há uma pequena variação nos resultados com base na tipologia da Fachada Dupla. Por exemplo, a fachada de vários andares mostra discrepâncias menores do que o fachada dupla do tipo corredor ou janela da caixa” (AKSAMIIJA, 2018).

A figura 10, mostra as temperaturas externas, internas e central no vão para as quatro temperaturas do ar externo investigado.

Figura 10: Temperatura na parte superior e inferior das cavidades de ar.



Fonte: AKSAMIIJA (2018).

Aksamija (2018) simulou quatro diferentes temperaturas externas (-18°C , -1°C , 16°C , 32°C), com a temperatura interna mantida a todo o momento nos 20°C , e obteve resultados que mostraram que as fachadas duplas possuem melhor desempenho térmico que uma fachada padrão. Sendo assim, as respostas indicaram que as fachadas duplas diminuiriam os níveis de luz do dia e que quanto mais longe da fachada a pessoa estiver, menos nível de luz terá.

3 METODOLOGIA

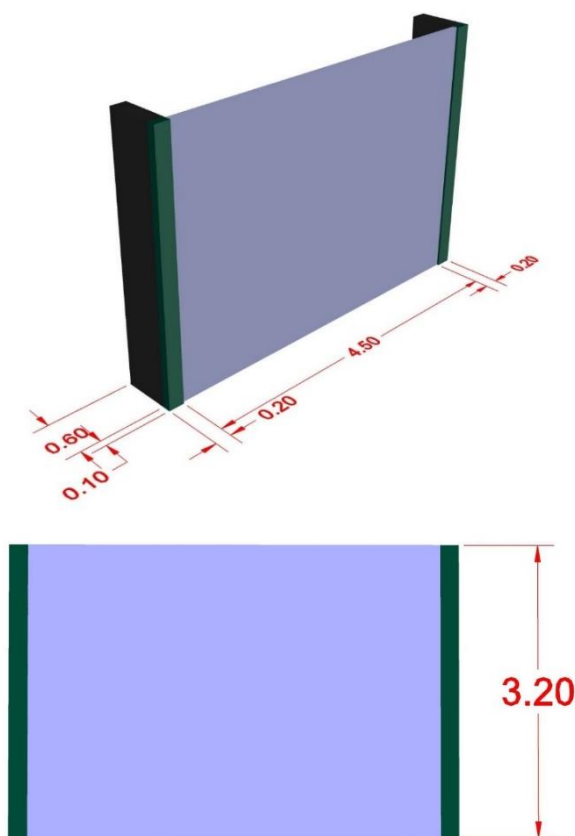
O trabalho consiste na modelagem computacional de um elemento modular representativo de fachada envidraçada executada pelo sistema unitizado. A análise será não-linear envolvendo as interações com comportamento estrutural e térmico dos elementos componentes da fachada. Os itens a seguir explicam melhor as etapas da modelagem deste trabalho.

É importante destacar que a modelagem apresentada neste trabalho pretendeu analisar apenas a estrutura secundária da edificação (a fachada envidraçada) em detrimento da estrutura principal (a estrutura de concreto armado na qual a fachada envidraçada está apoiada).

3.1 Geometria

O modelo computacional desenvolvido no programa Diana®, versão 9.3, consta na figura 12, sendo a cor azul representativa do vidro, e a cor verde representativa do perfil em alumínio, ficando a preta para representar o concreto. No modelo, as placas de vidro foram consideradas como uma peça única para simplificação do modelo computacional, já que a representação geométrica das diferentes placas implicaria na possível inviabilização da modelagem em razão da limitação de número de elementos da versão educacional do programa Diana® 9.4. Nessa abordagem foram desprezados eventuais deslocamentos relativos entre peças de vidro adjacentes, bem como efeitos dos conectores dessas peças.

Figura 12: Fachada vista em perspectiva e vista frontal.



Fonte: Próprio Autor (2020)

3.2 Malha e condições de contorno

representar os caixilhos e o concreto foram empregados elementos finitos sólidos prismáticos isoparamétricos HX24L com 8 nós, cada um com 3 graus de liberdade nodais representativos das três translações no espaço. Para representar o vidro foi empregado o elemento finito isoparamétrico de placa Q12PL, que obedece à Teoria de Reissner-Mindlin e possui três graus de liberdade nodais representativos da translação na direção z e das rotações em torno dos eixos x e y.

Ambos os elementos finitos empregam função de interpolação linear para o campo de deslocamentos.

O modelo teve seus pilares e caixilharia restritos no topo e na base para simular a rigidez oferecida pelos trechos de pilar acima e abaixo deste, bem como das lajes e vigas. Ainda a folha de vidro, devido à pequena espessura, foi considerada engastada nas bordas conectadas à caixilharia, de forma a simular a rígida conexão entre o vidro e os caixilhos, e entre estes e os pilares de concreto por meio das ancoragens de alumínio.

3.3 Propriedade dos materiais

O concreto foi considerado como material isotrópico cujo comportamento em regime elástico linear fica definido pelo seu módulo de elasticidade de 24 GPa e coeficiente de Poisson de 0,2. Em regime não-linear, o concreto foi tratado como material frágil, adotando-se lei de amolecimento linear na tração e comportamento ideal na compressão, tendo como parâmetros do regime não linear a resistência à tração de 2,31 MPa, energia de fraturamento elástico linear de 74 Nm/m e resistência à compressão de 30 MPa (valor adotado para reproduzir uma classe de resistência comum em Goiânia). A análise considerou o modelo de fissuras fixas baseado em deformações totais (Total Strain Fixed Crack). Entre as propriedades térmicas, foram informados o coeficiente de dilatação térmica linear do concreto ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$) conforme sugere a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Por sua vez, o alumínio foi considerado como material isotrópico cujo comportamento em regime elástico linear fica definido pelo seu módulo de elasticidade de 69 GPa e coeficiente de Poisson de 0,33. Em regime não-linear, o alumínio foi tratado como metal cuja superfície de ruptura é governada pelo critério de von Mises, admitindo comportamento elastoplástico perfeito. Para o comportamento térmico, o alumínio foi tratado como material de coeficiente elástico linear de $2,5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, o vidro foi considerado como material isotrópico em regime elástico linear com comportamento definido pelo módulo de elasticidade 75 GPa e coeficiente de Poisson 0,2. Em regime não-linear, o vidro foi tratado como material frágil de amolecimento frágil na tração e comportamento ideal na compressão, com resistências à tração e à compressão de 700 MPa e 1000 MPa, respectivamente. Para descrição do comportamento térmico, o vidro foi tratado como material de coeficiente elástico linear de $9,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

3.4 Solicitações climáticas

À placa de vidro foi aplicado um campo térmico formado apenas pela maior temperatura averiguada no centro de Goiânia nos últimos 10 anos, a qual foi de 42°C, com temperatura média de 18°C (supondo condicionamento de ar no interior do edifício) aplicada somente na folha de vidro para simular o gradiente térmico existente do ambiente externo para o interno da edificação no período mais quente do ano. Demais efeitos, como o próprio gradiente térmico externo, não foram considerados para fins de simplificação da modelagem. O valor da máxima temperatura dos últimos 10 anos foi extraído de reportagem publicada no site Mais Goiás (2020) no dia 06 de outubro de 2020.

Ainda, foi imposta uma pressão de 0,42 kN/m² sobre a folha de vidro a fim de simular a pressão que o vento exerce sobre a placa. Para fins de simplificação e estando a favor da segurança, essa pressão foi considerada uniformemente distribuída ao longo de toda a área da folha de vidro. A pressão de vento foi calculada através do programa VisualVentos, que fornece um gráfico a partir do qual se pode inferir a máxima velocidade média do vento, sendo adotado o valor de 35 m/s, que é comum na cidade de Goiânia. Os fatores relacionados ao terreno e às características de urbanização da região foram definidos considerando terreno plano ou fracamente acidentado (para obter o fator S1), coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados (para obter o fator S2) e com presença de edificações comerciais e industriais com alto fator de ocupação (para obter o fator S3), buscando reproduzir as condições da região central e bairros circunvizinhos, onde há grande concentração de edifícios.

3.5 Análise e processamento

A análise realizada consiste em um módulo *Structural Nonlinear* (análise não-linear) no programa Diana, sendo, por definição, uma análise não linear. Desta maneira, foi usado o método de Newton-Raphson convencional para solucionar o sistema de equações gerado para representar o modelo computacional, considerando fracionamento do carregamento em 100 passos de carga, 100 interações por passo de carga e 50 buscas lineares para acelerar a convergência das interações a fim de resolver o sistema não linear de equações utilizando a estratégia da análise incremental iterativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As avaliações realizadas neste trabalho são qualitativas e consistem em demonstrar como a variação de temperatura e a pressão de vento podem influenciar a distribuição das deformações e das tensões no vidro através das deformações principais, tensões normais e

principais, já que não se dispõe de dados experimentais para validação dos resultados da modelagem.

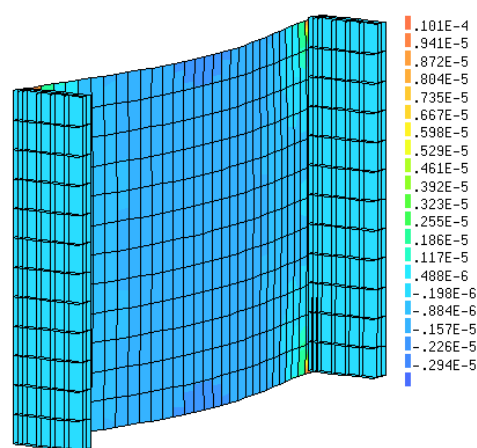
4.1 Deformações

Ao se analisarem as figuras 13, 14 e 15 observa-se que a pressão de vento provoca flexão da placa de vidro, que apresenta deformações muito concentradas na região da caixilharia junto aos cantos da folha de vidro, regiões de perturbação do campo de tensões em que este comportamento é típico. Observa-se ainda pequena região na porção central da folha de vidro, nas bordas superior e inferior, nas quais as deformações são superiores às demais observadas no vidro, no alumínio e no concreto. Notam-se concentração de deformações nos cantos da folha de vidro junto ao topo e à base do pilar. Ainda, as deformações principais menores arqueiam-se junto aos caixilhos, do centro em direção às bordas superior e inferior da folha de vidro.

A distribuição das deformações principais médias mostra o arqueamento dessas deformações em direção aos pilares ao longo de toda a caixilharia, abrangendo a maior porção da folha de vidro aproximadamente à meia altura desta, com presença de dois picos junto às bordas livres da folha de vidro com uma região de vale entre eles.

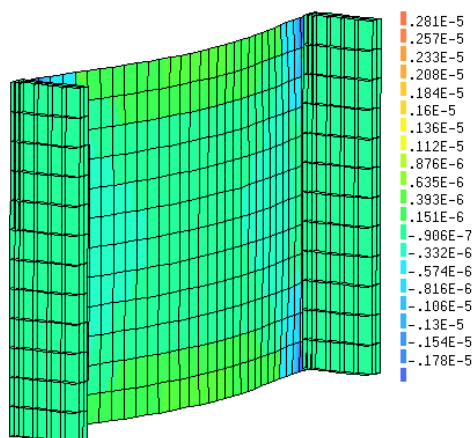
Por sua vez, as deformações principais maiores mostram uma distribuição de deformações em formato de pico na porção central da folha de vidro, formando vales junto aos pilares na região de toda a caixilharia.

Figura 13: Deformação principal menor



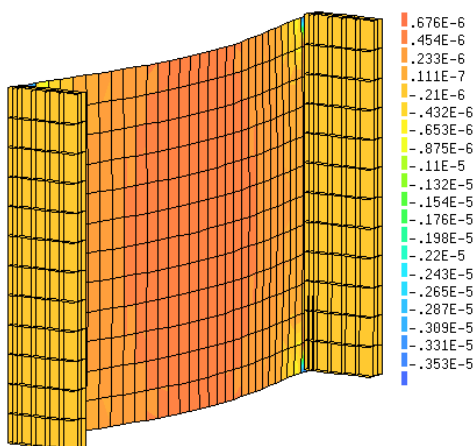
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 14: Deformação Média



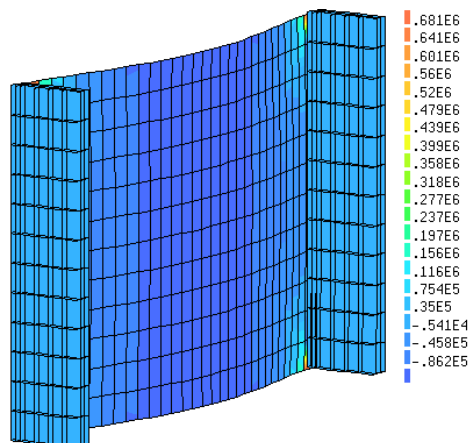
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 15: Deformação Maior



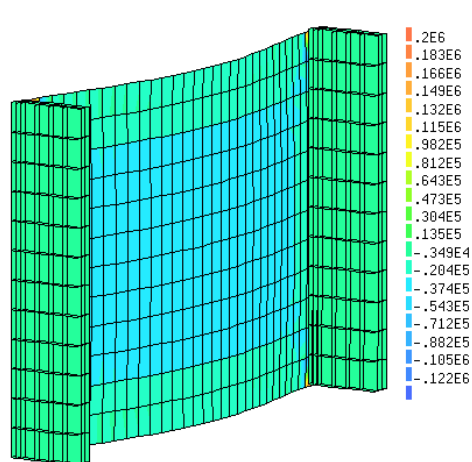
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 19: Tensão em X (em Pa)



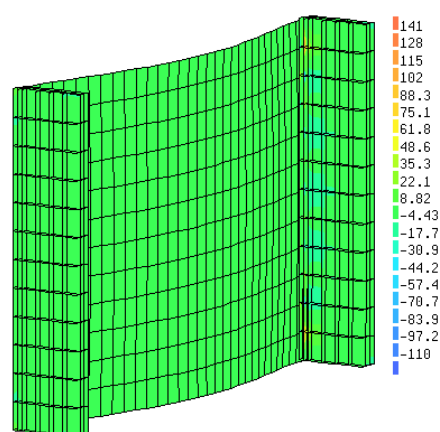
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 20: Tensão em Y (em Pa)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 21: Tensão em Z (em Pa)



Fonte: Próprio Autor (2020)

4.2 Tensão Normal

Nas figuras 19 a 21, apresentam-se as tensões normais atuantes nas direções X, Y e Z globais, respectivamente. Observa-se que na direção X, a maior tensão observada, da ordem de 0,7 MPa atinge os cantos superior e inferior do pilar, na ligação com a caixilharia. Esta tensão é pequena se comparada às tensões nas quais o material se rompe. Apesar disto, na porção central do modelo as tensões na direção X são de compressão (tensões negativas).

Na figura 20, onde a tensão está no eixo Y, as regiões mais afetadas estão localizadas nos pilares e nos caixilhos e nas partes superior e inferior do vidro. Nota-se que a distribuição das tensões na direção Y concentra as menores tensões junto às bordas livres, ao longo de todo o vão da folha de vidro.

Na direção Z (figura 21), as tensões normais são insignificantes, mas não nulas, o que se deve ao fato de as solicitações serem tão pequenas a ponto de não serem suficientes para causar rupturas.

4.3 Tensão principal maior

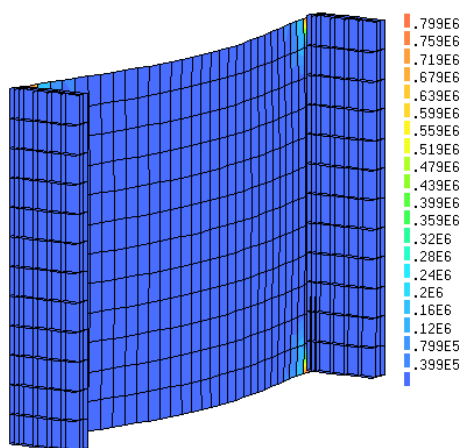
Na figura 22 apresenta-se a tensão principal menor, que apresentou distribuição uniforme ao longo de praticamente a totalidade do modelo, apresentando

pequenos pontos de concentração de tensão nos cantos da folha de vidro junto à caixilharia.

Por sua vez, a figura 23 apresenta as tensões principais intermediárias, que mostram distribuição com aspecto de pico no centro da folha de vidro, apresentando regiões de vale na medida em que se aproxima das bordas da folha de vidro. Nesta figura também se notam pontos discretos de concentração de tensões, novamente nos cantos da folha de vidro, junto aos caixilhos.

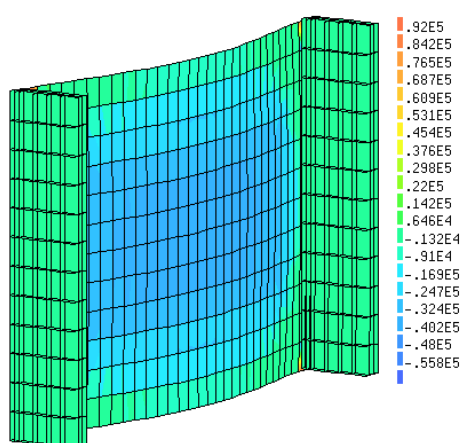
Por fim, a figura 24 apresenta as tensões principais prioritariamente de compressão, com os maiores valores atuantes sobre os pilares e caixilhos, e os menores atuantes sobre a porção central da folha de vidro.

Figura 22: Tensão em S1 (em Pa)



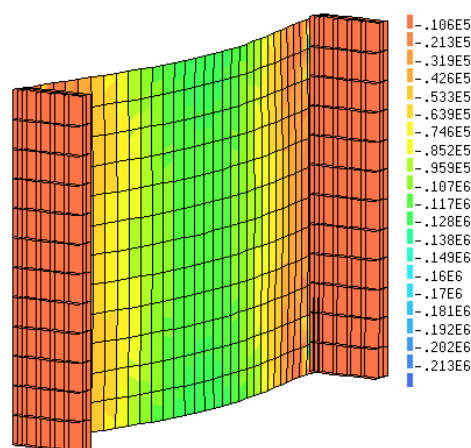
Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 23: Tensão em S2 (em Pa)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 24: Tensão em S3 (em Pa)



Fonte: Próprio Autor (2020)

5 CONCLUSÕES

A modelagem apresentada neste trabalho considerou modelo simplificado de uma fachada envidraçada composto de dois pilares de concreto armado aos quais estavam engastados os caixilhos de alumínio nos quais as chapas de vidro foram instaladas. Em virtude da limitação do número de elementos na versão educacional do programa em 100 elementos, algumas considerações simplificadoras foram necessárias para viabilizar a análise:

- Desprezar efeitos dos gradientes térmicos externo à edificação e interno a ela;
- Desprezar a ocorrência da radiação térmica;
- Desprezar efeitos de temperatura variáveis no tempo (transientes);
- Considerar os elementos de vidro como peça monolítica, desconsiderando eventuais deslocamentos relativos entre peças adjacentes;
- Desconsiderar outros elementos da estrutura principal, como vigas e lajes.

A partir dos resultados encontrados, pode-se concluir que:

- As deformações principais apresentaram arqueamentos junto às bordas da placa de vidro, caracterizando flexão em duas direções, o que poderia ocasionar de o vidro se desprender do caixilho e quebrar. A distribuição das deformações observada apresentou aspecto de pico aproximadamente circular para as deformações principais menores, aproximadamente elíptico para as deformações principais maiores e com duplo pico circular para as deformações principais intermediárias, com região de vale entre eles.
- As tensões principais menores distribuíram-se de maneira uniforme no modelo, ao passo que as tensões principais intermediárias e maiores distribuíram-se

formando regiões de pico com vales ao longo das bordas livres (tensão principal intermediária) e com vales ao longo dos caixilhos (tensão principal maior).

▪ As tensões normais em X seguiram tendências semelhantes às da tensão principal maior, enquanto as tensões normais em Y exibiram comportamento semelhante ao observado na distribuição das tensões principais intermediárias, enquanto na direção Z as tensões normais foram uniformes ao longo de todo o modelo, apesar de terem sido notados em todas elas, pequenos focos de concentração de tensões, sobretudo nos cantos da folha de vidro, junto aos caixilhos.

Os autores sugerem a construção de protótipos do modelo para realização de ensaios mecânicos e/ou fotoelásticos a fim de se determinarem as tensões para validação das modelagens deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAVIDROS.** Os segredos por trás das fachadas, 2020. Disponível em: < <https://abravidro.org.br/os-segredos-por-tras-das-fachadas/>>. Acesso em: 20/05/2020.
- AECweb**, 2020. 'Unitizing', a evolução das fachadas cortinas. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/unitizing-a-evolucao-das-fachadas-cortinas/2291>>. Acesso em: 20/04/2020.
- AECweb**, 2020. Vidro estrutural confere transparência e resistência a fachadas. Disponível em: < <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/vidro-estrutural-confere-transparencia-e-resistencia-a-fachadas/10538>>. Acesso em: 10/05/2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118/2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7199 / 2016 – Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro. 2014. p. 9-10.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10821 / 2000 – Esquadrias para edificações. Rio de Janeiro. 2000. p. 5-10.
- AKSAMİJA, Aija. **Thermal, energy and daylight analysis of different types of double skin façades in various climates**. Journal of Facade Design & Engineering, Volume 6, Number 1, p. 2-38.
- ARRUDA, T. S.. **Estudos de modalidades para a execução de fachada cortina**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010, p. 1-38.
- BEDON, C.; KOZTOWSKI, M.; HONFI, D.. **Thermal Assessment of Glass Façade Panels under Radiant Heating - Experimental and Preliminary Numerical Studies**. Journal of Facade Design & Engineering, Volume 6, Number 3, p. 50-62.
- BERGAMO, A. P. R. H.; MOTTER, C. B.. **A origem do vidro e seu uso na arquitetura**. 12º Encontro Científico Cultural Interinstitucional, 2014.
- BARROS, Carolina. **Apostila de vidros: Materiais de Construção: Edificações**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Sul, Pelotas, 2010, p. 2-11.
- CASELLI, C. K.. **Fachada de edifício residencial em vidro no século XXI: clima, conforto e conservação**. Tese de Doutorado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2011, p. 9-11.
- DUARTE, T. M. A.. **Verificação Experimental do Comportamento Térmico de uma Fachada de Dupla Pele com Ventilação Natural**. Tese de Doutorado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009, p. 1-2.
- LIFESTYLEAOMINUTO**. Edifícios com fachadas de vidro geram alto impacto ambiental, 2019. Disponível em: <<https://www.noticiasaominuto.com.br/lifestyle/964767/edificios-com-fachadas-de-vidro-geram-alto-impacto-ambiental>>. Acesso em: 30/04/2020.
- LIBOS, Iarley Loan Sampaio. **Análise estrutural e de viabilidade de fachada em vidro estrutural**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- Made-in-China**, 2020. Disponível em: < https://pt.made-in-china.com/co_rockytechnical/product_Swimming-Pool-Laminated-Glass-Fence-Fiberglass-Fencing_ersohuhug.html>. Acesso em: 22/05/2020.
- Mais Goiás**. Goiânia atinge 41°C, maior temperatura registrada em 83 anos. Goiás, 2020. Disponível em: <https://www.emaisgoias.com.br/goiania-atinge-41oc-maior-temperatura-registrada-em-83-anos/>>. Acesso em: 10/10/2020.
- MENDONÇA, Othon Bruno Miranda. **Utilização de vidro como parte estrutural de fachadas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2020.
- MONEGATTI, Matheus de Cezaro. **Gestão da produção de sistema fachada cortina**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- RIOPAIVA**. Vidro temperado: tudo o que você precisa saber. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <https://www.riopaivavidros.com.br/vidro-temperado/>>. Acesso em: 22/05/2020.
- SANCHES, José Maria Cardoso Pinto de Noronha. **Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2013.
- VITRINE&ARTETECH**. Fachada stick. Fortaleza, 2020. Disponível em: < <http://www.vitrineearte.com.br/fachada-stick>>. Acesso em: 14/05/2020.
- VIVADECORAPRO**. Fachada Ventilada: 4 Modelos que Vão Deixar seu Projeto Mais Sustentável, 2020. Disponível em: < https://www.vivadecora.com.br/pro/curiosidades/fachada-ventilada/?utm_medium=&utm_source=&utm_campaign=&utm_content=>. Acesso em: 30/04/2020.
- WALLFrame**. Catálogo de perfis, 2016. Disponível em: < <https://www.perfilm.com.br/wp-content/uploads/2017/11/catalogo-wallframe-1a-atualizacao-nov16-r01.pdf>>. Acesso em: 20/05/2020.