



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**IARLEY LOAN SAMPAIO LIBOS**

**ANÁLISE ESTRUTURAL E DE VIABILIDADE DE FACHADA EM VIDRO**  
**ESTRUTURAL**

**FORTALEZA**

**2017**

IARLEY LOAN SAMPAIO LIBOS

ANÁLISE ESTRUTURAL E DE VIABILIDADE DE FACHADA EM VIDRO  
ESTRUTURAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L671a Libos, Iarley Loan Sampaio.  
Análise estrutural e de viabilidade de fachada em vidro estrutural / Iarley Loan Sampaio Libos. – 2017.  
114 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.
1. Vidro estrutural. 2. Colunas aletas de vidro. 3. Teoria da Flexão de Placas. 4. Método dos Elementos Finitos. I. Título.

CDD 620

---

IARLEY LOAN SAMPAIO LIBOS

ANÁLISE ESTRUTURAL E DE VIABILIDADE DE FACHADA EM VIDRO  
ESTRUTURAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 25/10/2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. D. Sc. Augusto Teixeira de Albuquerque (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. M. Sc. Raimundo Calixto de Melo Neto  
RCM Estruturas Metálicas

---

Prof. D. Sc. Evandro Parente Junior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Fabio e Tais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais pelo amor incondicional e por sempre colaborarem e incentivarem meus estudos.

À Renatinha, minha namorada, por sempre estar ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque pela excelente orientação e por me confiar esse desafio.

Aos membros participantes da banca examinadora D.Sc. Augusto Teixeira de Albuquerque, M.Sc. Raimundo Calixto de Melo Neto e D.Sc. Evandro Parente Junior pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos amigos Vitor Jucá, Israel Martins e Pedro Ignácio pelo companheirismo nesse ano de trabalho.

Ao amigo Gabriel Ferreira pelos momentos excelentes de discussão e ensinamentos sobre BIM.

Aos colegas da turma de Projeto de Graduação I e II pelas reflexões, críticas e sugestões propostas.

“Não importa tanto o tema da tese quanto a experiência de trabalho que ela comporta. ”

(Umberto Eco)

## RESUMO

O presente trabalho traz o estudo de uma opção de fachada com aproximadamente 154m<sup>2</sup> de área que utilizará o vidro estrutural como material executivo, sendo baseada nas características de vão, 10m de altura por 15,44m de largura, encontradas em uma fachada presente em um shopping da cidade de Fortaleza. No mesmo também há a apresentação das características e propriedades dos diferentes tipos de vidro, bem como algumas considerações que devem ser contabilizadas ao se trabalhar com esse tipo de material. Inicialmente, foi feito um levantamento dos vidros disponíveis no mercado e alguns limitadores técnicos intrínsecos a ele para, então, expor os parâmetros que seriam utilizados nos cálculos. Em seguida, foram calculadas as solicitações às quais os elementos componentes da estrutura estariam submetidos, aplicando a Teoria da Flexão de Placas e o Método dos Elementos Finitos sobre eles por meio do software RFEM 5 e do seu módulo adicional, RF-GLASS, sobre eles para validá-los quanto às suas resistências. Foram feitos testes utilizando o software para validar as deformações e tensões internas nos painéis de vedação da fachada. Então, os valores das reações de apoio encontradas para o painel validado foram aplicados sobre uma coluna aleta de vidro (*glass fin*) que suporta as solicitações da estrutura como um todo, testando-a também quanto a deformações e tensões internas para também validá-la. Por fim, com os resultados obtidos e dentro das hipóteses assumidas, foi feito um aperfeiçoamento da coluna de vidro buscando opções que geram menor desperdício de material, entregam um resultado estético mais atraente e passam segurança para os usuários que a apreciam. A partir das análises entendeu-se que o projeto da fachada em vidro estrutural é viável e pode ser aplicado, recomendando alguns testes laboratoriais para o aprimoramento das ligações presentes na coluna de vidro e alguns parâmetros do software para garantir um resultado mais econômico para o projeto.

**Palavras-chave:** Vidro Estrutural. Teoria da Flexão de Placas. Método dos Elementos Finitos. Software RFEM 5. RF-GLASS. Colunas Aletas de Vidro (*Glass fin*).



## ABSTRACT

The present work presents the study of a facade option with approximately 154m<sup>2</sup> of area that uses structural glass as its executive material based on the characteristics of a span, 10m high by 15.44m wide, found in an existing facade present in a mall at the city of Fortaleza. In addition, this work depicts the characteristics and properties of the different types of glass, as well as some considerations that must be accounted when working with this kind of material. Initially, a data survey was executed about the glass availability within the intern market and some technical limiters intrinsic to it, in a way that would justify the parameters that were used in the calculations. Then, the calculations to identify the loading to which the elements of the structure were going to be submitted took place, using the Plate Theory and the Finite Element Methods through the RFEM 5 software and its additional module, RF-GLASS, on them to validate its resistance. Tests were realized using the software to validate deformations and internal stresses in the facade in terms of its panels in contact with the exterior. Then, the values of the support reactions found for the validated panel were applied to the glass fin that endures the loading of the structure, testing it for deformations and internal stresses to validate it. Finally, with the results obtained and within the hypotheses assumed, the enhancement of the glass fin was made searching for options that generated minor waste of material, delivered a more attractive aesthetic result and passed security to the users who saw it. Based on the analysis, it was understood that the structural glass facade design is feasible and can be applied, recommending some laboratory tests to improve the connections of the glass fin and some parameters of the software to guarantee a more economic result for the project.

**Keywords:** Structural Glass. Theory of Plates. Finite Element Method. Software RFEM 5. RF-GLASS. Glass Fin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre a solicitação do vidro recozido e o temperado. ....	21
Figura 2 – Relação entre a resistência ao impacto e a capacidade pós-ruptura.....	22
Figura 3 – Ação da temperatura sobre o Módulo de Elasticidade (E) do PVB e do SGP.....	24
Figura 4 – Ação de cargas e deformações causadas ao variar as membranas intermediárias. .	24
Figura 5 – Sistema de uma fixação mecânica aparafusada. ....	26
Figura 6 – Sistemas estruturais de fachada.....	27
Figura 7 – Gráficos de Griffith.....	28
Figura 8 - Flambagem de uma coluna. ....	32
Figura 9 – Tela de trabalho do <i>software</i> RFEM 5. ....	35
Figura 10 – Tela de trabalho do módulo adicional RF-GLASS.....	36
Figura 11 – Indicação da convenção de sinais referentes às respectivas tensões básicas. ....	37
Figura 12 – Processo de criação da malha de elementos finitos. ....	39
Figura 13 – Resultado da aplicação do MEF.....	40
Figura 14 – Mecanismo de suporte entre painéis e spiders. ....	44
Figura 15 – Coeficiente de pressão externa.....	47
Figura 16 – Ângulo de chegada da rajada de vento.....	47
Figura 17 – Procedimentos referentes à modelagem.....	49
Figura 18 – Definições das tensões internas básicas com seus respectivos sentidos. ....	50
Figura 19 – Equações referentes às forças internas básicas utilizadas pelo programa. ....	51
Figura 20 – Cálculo da variação entre os coeficientes de pressão interna e externa. ....	56
Figura 21 – Deflexão painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm.....	57
Figura 22 – Ilustração o preenchimento das brechas entre coluna de vidro e painéis.....	58
Figura 23 – Deflexão do painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm considerando mobilizada 5% da resistência do silicone de vedação. ....	58
Figura 24 – Deflexão do painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm considerando mobilizada 10% da resistência do silicone de vedação. ....	59
Figura 25 – Deflexão painel 3,21 por 2,4 metros com espessura de 19 mm.....	60
Figura 26 – Painéis da fachada posicionados na vertical (medidas em cm).....	61
Figura 27 – Painéis da fachada posicionados na horizontal (medidas em cm). ....	61
Figura 28 – Relações entre tensões presentes no painel 3,21 por 2,4 metros (vertical e horizontal).....	63

Figura 29 – Gráfico do local de tensão máxima normal devido à flexão na direção X (região inferior do painel). .....	63
Figura 30 – Distribuição das tensões normais devido à flexão na direção X (região inferior do painel). .....	64
Figura 31 – Reações de apoio para painéis na vertical e horizontal.....	65
Figura 32 – Especificações do <i>Spider WX 154 VU</i> . .....	66
Figura 33 - Ilustração das cargas utilizadas nas colunas. ....	67
Figura 34 – Detalhe de como ficou modelada a ligação entre os vidros componentes da coluna. ....	68
Figura 35 – Deflexão relativa ao eixo X (Painel Vertical). .....	69
Figura 36 – Deflexão relativa ao eixo X (Painel Horizontal). .....	70
Figura 37 – Mecanismo de aço para redução de deflexões. ....	71
Figura 38 – Laminação do vidro empregado nas colunas. ....	72
Figura 39 - Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro (posicionamento vertical). ....	73
Figura 40 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro (posicionamento horizontal). .....	73
Figura 41 – Camadas utilizadas na nova opção de laminação. ....	74
Figura 42 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro utilizando nova opção de laminação (posicionamento horizontal). ....	75
Figura 43 – Deflexão em X da coluna com 40cm de largura. ....	75
Figura 44 – Laminação melhorada (posicionamento horizontal). .....	76
Figura 45 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro ao variar sua largura e laminação (posicionamento horizontal). .....	76
Figura 46 - Identificação dos componentes da fachada para levantamento de quantitativo ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição básica do vidro.....	19
Tabela 2 – Propriedades físicas do vidro.....	20
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do vidro (resistência à tração e a flexão).....	21
Tabela 4 – Quadro comparativo entre propriedade do PVB e do SGP. ....	23
Tabela 5 – Propriedades do vidro temperado utilizadas para alimentar o <i>software</i> .....	42
Tabela 6 – Propriedades do silicone estrutural utilizadas para alimentar o <i>software</i> .....	43
Tabela 7 – Parâmetros usados no cálculo da carga de vento.....	45
Tabela 8 – Possíveis valores para o coeficiente S2. ....	46
Tabela 9 – Parâmetros sugeridos pela norma prEN13474-1:1999.....	48
Tabela 10 - Especificações das análises executadas.....	52
Tabela 11 - Resumo dos resultados das deformações e tensões internas para as diferentes análises executadas. ....	53
Tabela 12 – Parâmetros utilizados na NBR 6123.....	55
Tabela 13 - Cálculo do preço da fachada. ....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PVB	Polivinil Butiral
SGP	SentryGlas® Plus
BIM	Building Information Modeling
SLSG	Vidro Sílica-Soda-Cálcio
BSG	Vidro Borosilicatado
$\tau$	Módulo de Resistência ao Cisalhamento
E	Módulo de Elasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TFP	Teoria da Flexão de Placas
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
MEF	Método dos Elementos Finitos
G	Ação Permanente referente ao Peso Próprio
Q	Ação Variável referente ao Vento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Problema de Pesquisa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Questões Motivadoras</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3 Justificativa</b> .....	<b>17</b>
<b>1.4 Objetivos</b> .....	<b>18</b>
<i>1.4.1 Objetivo Geral</i> .....	<b>18</b>
<i>1.4.2 Objetivos Específicos</i> .....	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 Composição e fabricação do vidro</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Propriedades do vidro</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3 Vidros</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4 Materiais usados como camada intermediária do vidro laminado</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5 Fixações no sistema de vidro estrutural</b> .....	<b>25</b>
<b>2.6 Sistemas estruturais usuais utilizados em fachada</b> .....	<b>26</b>
<b>2.7 Fissuras de Griffith</b> .....	<b>28</b>
<b>2.8 Considerações de projeto ao se trabalhar com o vidro</b> .....	<b>29</b>
<b>2.9 Espessura efetiva</b> .....	<b>30</b>
<b>2.10 Equações para cálculo da flambagem em elementos esbeltos de vidro</b> .....	<b>32</b>
<b>2.11 Teoria da Flexão de Placas (TFP)</b> .....	<b>33</b>
<b>2.12 Software RFEM 5</b> .....	<b>34</b>
<b>2.13 Módulo adicional RF-GLASS</b> .....	<b>35</b>
<b>2.14 Análise estrutural</b> .....	<b>37</b>
<b>2.15 Método dos Elementos Finitos (MEF)</b> .....	<b>38</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1 Revisão dos parâmetros utilizados</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2 Cálculo da carga de vento</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3 Cálculo do Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS)</b> .....	<b>47</b>
<b>3.4 Modelagem e análise estrutural</b> .....	<b>48</b>
<b>3.5 Verificação do custo da estrutura</b> .....	<b>52</b>
<b>3.6 Resumo das análises executadas</b> .....	<b>52</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>4.1 Produtos disponíveis no mercado</b> .....	<b>54</b>

4.2 Cálculo da carga de vento .....	54
4.3 Verificação dos painéis de vidro.....	56
4.4 Verificação das colunas aletas de vidro .....	64
4.5 Quantitativo e orçamento da opção final encontrada .....	77
5 CONCLUSÃO.....	80
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	82
REFERÊNCIAS .....	83
APÊNDICE A – FOTOS DA FACHADA DO <i>SHOPPING</i> IGUATEMI FORTALEZA- CE VISTA POR FORA E POR DENTRO .....	86
APÊNDICE B – FACHADA PROPOSTA EM MODELO 3D .....	87
APÊNDICE C – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA AS DEFLEXÕES RELATIVAS AOS PAINÉIS DE 4 POR 2,8 METROS VARIANDO SUA ESPESSURA .....	88
APÊNDICE D – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA AS DEFLEXÕES RELATIVAS AOS PAINÉIS DE 3,21 POR 2,4 METROS VARIANDO SUA ESPESSURA .....	90
APÊNDICE E – GRÁFICOS DAS TENSÕES REFERENTES ÀS SUAS RESPECTIVAS CAMADAS DE APARECIMENTO PARA PAINEL 3,21 x 2,4 m .....	92
APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO DE CADA TIPO DE TENSÃO INTERNA EM RELAÇÃO À REGIÃO DO PAINEL 3,21 x 2,4 m.....	94
APÊNDICE G – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA VERTICAL COM LAMINAÇÃO 121212.1,54(2).....	96
APÊNDICE H – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO 121212.1,54(2) .....	98
APÊNDICE I – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO 151515.1,54(2) .....	100
APÊNDICE J – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO MELHORADA E LARGURA DE 40cm .....	102
ANEXO A – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO VIDRO EM ESTRUTURAS.....	104
ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS <i>SPIDERS</i> (WALMETAL) .....	109

## 1 INTRODUÇÃO

O descobrimento do vidro pode ter se dado até 5000 a.C quando mercadores fenícios usaram blocos de nitrato de sódio para apoiar suas “panelas” sobre uma fogueira feita na areia da praia. O calor possibilitou a reação entre a areia e o nitrato de sódio por acaso, espantando os mercadores ao notarem que no final da fogueira não havia apenas cinzas. A descoberta era um material viscoso à altas temperaturas e transparente ao esfriar (BARROS,2010).

Como material construtivo o vidro apresentava desvantagens por ser frágil e, ao quebrar, gerar pedaços cortantes. No entanto, com o desenvolvimento de técnicas na sua produção, principalmente a invenção do processo *float* para sua fabricação, e com o advento de novas tecnologias usadas em conjunto com o vidro, o material passou a desempenhar papéis diferenciados dos esperados inicialmente. Descobriu-se que as peças de vidro poderiam ser tratadas térmica ou quimicamente para garantir uma maior resistência a elas, induzindo tensões de tração na parte central e tensões de compressão nas extremidades da peça. Essas tensões ajudam no fechamento de micro fendas presentes na superfície do vidro, garantindo maior resistência e possibilitando aplicações interessantes ao material. Algumas dessas e várias outras informações interessantes podem ser encontradas nos portais eletrônicos das empresas Pilkington e Enclos.

O vidro comum que passa pelo processo de têmpera e ganha mais resistência é chamado de vidro temperado, suas propriedades resistentes melhoram consideravelmente e ao quebrar ele gera pequenos fragmentos, trazendo uma ótima vantagem no quesito segurança. Outro tipo de vidro de segurança é o vidro laminado que é formado a partir da junção de duas peças de vidro, temperadas ou não, com uma camada intermediária de material selante entre elas. Esse material selante serve, não somente para segurar os fragmentos quando o vidro quebrar, mas também garantir comportamento de auto sustentação após a ruptura da peça de vidro. O Polivinil Butiral ou PVB, como é mais conhecido comercialmente, é bastante usado como camada intermediária do vidro laminado, mas com o desenvolvimento de pesquisas criou-se um novo polímero ionômero cujo nome comercial mais conhecido é SentryGlas® Plus (SGP), produzido pela DuPont, que possibilitou melhores e novas aplicações ao vidro, principalmente estruturais.

Atualmente o vidro, juntamente com materiais poliméricos e o aço são utilizados em conjunto com a finalidade de compor estrutura e elementos estruturais, após os avanços obtidos na utilização de vidro estrutural na construção civil. Alguns exemplos interessantes das



aplicações do vidro em estruturas foram ilustrados no Anexo A do presente trabalho. Uma dessas aplicações está diretamente relacionada com fachadas de edificações e o vidro veio trazer soluções inovadoras para as mesmas, proporcionando estruturas de estética e design sofisticados, bem como, desafiando os engenheiros do ramo.

A empresa RCM Estruturas Metálicas enfrentou esse desafio ao ser contratada para elaborar o projeto estrutural da fachada do *Shopping Iguatemi Fortaleza-CE* (ver Apêndice A). A fachada existente é em vidro e seu projeto adota malha metálica com fixações de caixilhos. Nesse tipo de estrutura os painéis de vidro são colocados em seus respectivos caixilhos, estando apoiados linearmente em todo seu perímetro, para então serem instalados na malha metálica e formarem a fachada.

O presente trabalho se utilizou da mesma geometria espacial encontrada na fachada já existente no *Shopping Iguatemi Fortaleza-CE*, mas buscou propor uma alternativa que utilizasse um sistema estrutural diferente de modo a garantir maior leveza e transparência à fachada (ver Apêndice B). Assim, o trabalho focou na aplicação do sistema de colunas aletas de vidro (*glass fins*) que se utiliza de apoios pontuais para sustentar seus painéis, buscando avaliar o impacto causado ao aplicar mudanças na orientação dos mesmos, checando quanto ao custo e à estética.

## 1.1 Problema de Pesquisa

Com o aperfeiçoamento nas tecnologias de produção, tratamento e montagem dos vidros na construção civil, muitas alterações em seu uso ocorreram nos últimos anos. Antes usado apenas na fabricação de pequenos ornamentos e enfeites para casa, passou a ser empregado em janelas e portas. Quando os profissionais do ramo da construção notaram seu potencial de transformação na estética do produto final, passaram a empregá-lo em guarda-corpos, fachadas, piscinas e escadas de edificações como um diferencial competitivo no mercado.

Hoje, novas técnicas vêm sendo estudadas e testadas para ampliar mais ainda o potencial de utilização do vidro, empregando-o não somente em elementos construtivos da edificação, mas como o sistema estrutural da mesma. Ao pensarem assim, os profissionais objetivam cada vez mais diminuir o impacto visual gerado pela presença de elementos construtivos, evidenciando, assim, a importância da propriedade de transparência do vidro para a construção civil.

Ao pensar sobre os desafios que os profissionais da construção estão dispostos a enfrentar utilizando um material frágil e que ainda precisa de muitos estudos e validações para ser consolidado como material estrutural, fica bastante claro a importância de buscar alternativas para a minimizar o problema do impacto visual referente aos elementos construtivos e estruturais de uma edificação. Além disso, é possível citar aspectos referentes ao melhor aproveitamento da luminosidade natural, a utilização de uma estrutura mais esbelta, o emprego de tecnologia sofisticada e resultado estético diferenciado como potenciais do vidro para agregar valor a um empreendimento.

## 1.2 Questões Motivadoras

As seguintes questões motivadoras regem o interesse por trás da concepção deste trabalho:

- Quais opções de painéis de vidro laminado podem ser levadas em consideração para a fachada?
- Quais tipos de juntas devem ser considerados para estruturar a fachada e como caracterizar seus respectivos comportamentos durante a análise estrutural?
- Qual será o impacto visual obtido ao empregar o vidro estrutural à nova opção de fachada e como checar esse impacto?
- Existe viabilidade estrutural para a opção de fachada proposta?
- A opção de fachada proposta é competitiva financeiramente?

## 1.3 Justificativa

O crescimento do mercado do vidro estrutural é um fenômeno mundial que vem ganhando muita força nos últimos anos e trazendo cada vez mais aplicações inovadoras, bem como, designs diferenciados para os empreendimentos.

O Brasil não fica atrás e também já é possível notar o aumento do interesse por parte dos clientes e construtores na utilização do vidro estrutural. Algo que começou com portas de pele de vidro, passou para guarda-corpos, escadas e fachadas, chegou ao patamar em que estruturas inteiras, com pilares, vigas, lajes e paredes em vidro são construídas.

No entanto, o Brasil ainda não possui uma norma específica para regulamentar o uso do vidro estrutural, forçando os engenheiros a consultarem normas internacionais para embasar seus cálculos quando demandados por seus clientes. Normas estas que também

precisam de mais estudos para que o material seja completamente consolidado. Estes pontos não só evidenciam o desafio intrínseco ao trabalho com o vidro, mas também mostram a sua importância para o aperfeiçoamento do impacto visual aplicado às construções que é cada vez mais levado em consideração por clientes do ramo da construção civil. Dessa forma, buscou-se avaliar aspectos referentes à estética e ao custo de uma maneira simples no emprego de um sistema estrutural de fachada baseado em colunas aletas de vidro (*glass fins*) propondo-o sobre a geometria de uma fachada existente que utiliza encaixilhamentos em malha metálica (pele de vidro) como sistema de suporte, olhar Apêndices A e B.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo a análise estrutural e de viabilidade de uma opção diferente de fachada proposta para o *Shopping Iguatemi Fortaleza-CE*. A alternativa proposta substituiria a fachada existente em vidro com malha metálica e encaixilhamentos que apoiam os painéis vidro linearmente em suas extremidades por uma fachada em colunas aletas de vidro (*glass fins*) com apoios pontuais para os painéis. O Apêndice A e B ilustram de forma clara a situação existente e a situação proposta.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

(a) Estabelecer a espessura dos painéis de vidro laminado que garanta uma boa trabalhabilidade e resistência do material.

(b) Aplicar um software de cálculo estrutural que integra o BIM ao projeto, dando maior visibilidade a esse tipo de aplicação e despertar interesse por esse tipo de iniciativa.

(c) Verificar o funcionamento e a aplicação do Método dos Elementos Finitos utilizando o programa RFEM 5.

(d) Checar a flambagem dos laminados componentes das colunas aletas de vidro para solicitação de compressão pura no programa RFEM 5.

(e) Avaliar o impacto visual ao utilizar o vidro estrutural como opção.

(f) Estimar o custo do material utilizado na estrutura proposta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Composição e fabricação do vidro

O vidro sempre foi um material presente no cotidiano das pessoas. Inicialmente usado na fabricação de armas rudimentares, ornamentos para casas, janelas e enfeites, possuía um processo de fabricação muito artesanal e isso fazia com que seu preço fosse bem mais elevado. Com o desenvolvimento das tecnologias e da ciência, pôde-se determinar os materiais que participavam da composição do vidro, bem como alterá-los para dar novas características e propriedades ao material. As composições de vidro mais utilizadas no mercado são: o vidro sílica-soda-cálcio (SLSG) e o vidro borosilicatado (BSG) (BARROS, 2010).

Tabela 1 – Composição básica do vidro.

Componente	simbolo	SLSG	BSG
Sílica	SiO <sub>2</sub>	69-74%	70-87%
Cal	CaO	5-14%	-
Soda	Na <sub>2</sub> O	10-16%	0-8%
Óxido de Boro	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7-15%
Óxido de Potássio	K <sub>2</sub> O	-	0-8%
Magnésio	MgO	0-6%	-
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-3%	0-8%
Outros		0-5%	0-8%

FONTE: Adaptado de Sanches (2013).

William Pilkington, baseando-se em processos de produção em massa oriundos da revolução industrial, criou o processo *float* de fabricação de vidro e isso revolucionou a indústria, reduzindo drasticamente o preço do material no mercado. O processo *float* de fabricação do vidro consiste em alimentar uma fornalha com a matéria prima, derretendo-a, e em seguida derramando-a em um banho de estanho. Os líquidos de densidade diferente se separam, o vidro ficando por cima, e então percorrem a linha de produção bem lentamente para permitir o esfriamento da camada de vidro.

A velocidade da esteira na linha de produção está diretamente relacionada com a espessura desejada da placa de vidro a ser produzida. Após o esfriamento, o vidro é cortado nas dimensões desejadas e então embalado para transporte ou armazenado. Esse processo resulta na fabricação do vidro *float* ou vidro recozido, que é o mais simples e comum dos vidros (SANCHES,2013).

## 2.2 Propriedades do vidro

Ao utilizar qualquer tipo de material é de fundamental importância conhecer suas propriedades físicas e mecânicas para conseguir prever seu tipo de comportamento e empregá-lo em funções que utilizem da melhor forma possível suas qualidades. Outro aspecto muito importante é conhecer sobre os pontos negativos do material para que se possa fazer intervenções ou ajustes na hora de utilizá-lo, antecipando algum comportamento inesperado e evitando problemas futuros.

Como o vidro é um material frágil e está sendo utilizado para compor elementos estruturais é essencial conhecer suas características e propriedades para utilizá-lo de forma correta, garantindo, assim, a segurança das pessoas e a integridade da estrutura. Algumas das suas propriedades foram listadas na Tabela 2 e suas propriedades mecânicas de resistência à tração e à flexão foram listadas na Tabela 3, especificando-as pelo tipo de vidro.

Tabela 2 – Propriedades físicas do vidro.

Módulo de Young E (GPa)	70 – 75
Coefficiente de Poisson $\nu$	0,2-0,25
Módulo de Distorção G (GPa)	26 – 33
Resistência à compressão (MPa)	400 – 1000
Resistência à tração (MPa)	20 – 100
Resistência à flexão (MPa)	45
Condutividade térmica (W/m.K)	1
Calor específico C (J/Kg.K)	720
Coefficiente de expansão térmica $\alpha$ (1/K)	$9 \times 10^{-6}$
Resistência ao choque térmico $\Delta T$ (K)	40

FONTE: Adaptado de Pereira (2012).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do vidro (resistência à tração e a flexão).

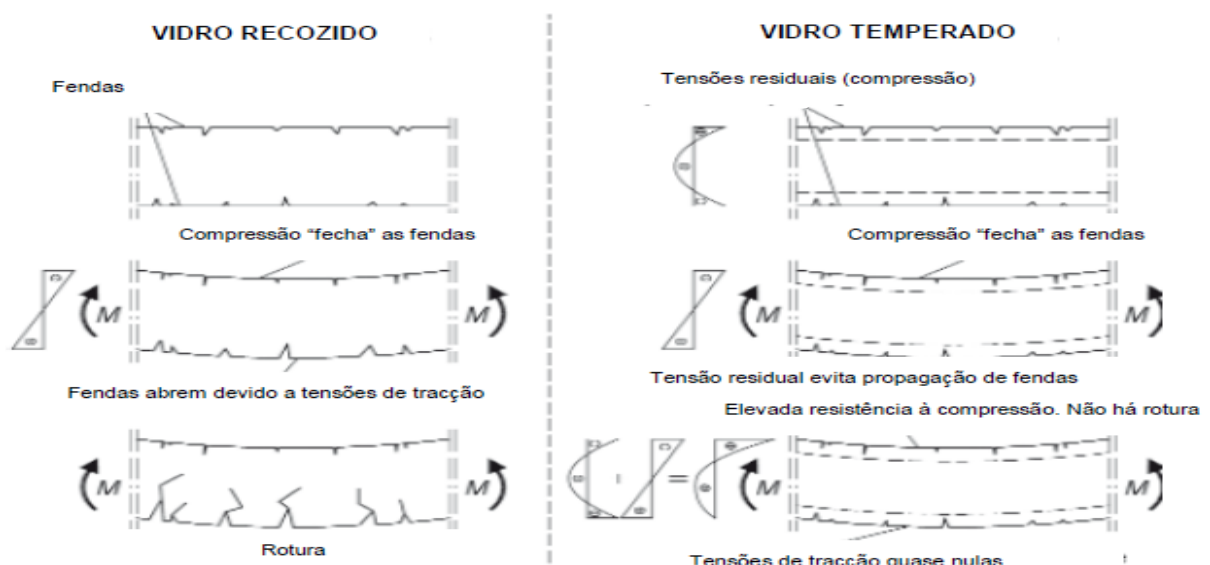
Vidro	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
Recozido	50	40
Termo Endurecido	110	70
Temperado	250	120

FONTE: Adaptado de Pereira (2012).

## 2.3 Vidros

O **vidro recozido** possui ruptura frágil (se fratura com poucas deformações) e gera cacos grandes que podem causar ferimentos graves. Quando o vidro recozido passa por um processo de aquecimento e depois esfriamento rápido para garantir um ganho de resistência ele recebe o nome de **vidro temperado**. Ele é considerado como um vidro de segurança devido sua quebra gerar pedaços bem pequenos, mas sua ruptura continua sendo frágil. O esfriamento rápido gera acúmulo de tensões de compressão na superfície e de tração no interior da peça. Após o processo de têmpera não é possível modificar a mesma, então é necessário planejar o formato antes de passá-la pelo processo, por isso que os detalhes de orifícios e recortes precisam ser feitos ainda na fase em que o vidro é recozido (SANCHES, 2013). A Figura 1 é usada para mostrar e comparar os mecanismos de solicitação respectivos a ambos os tipos de vidro abordados anteriormente.

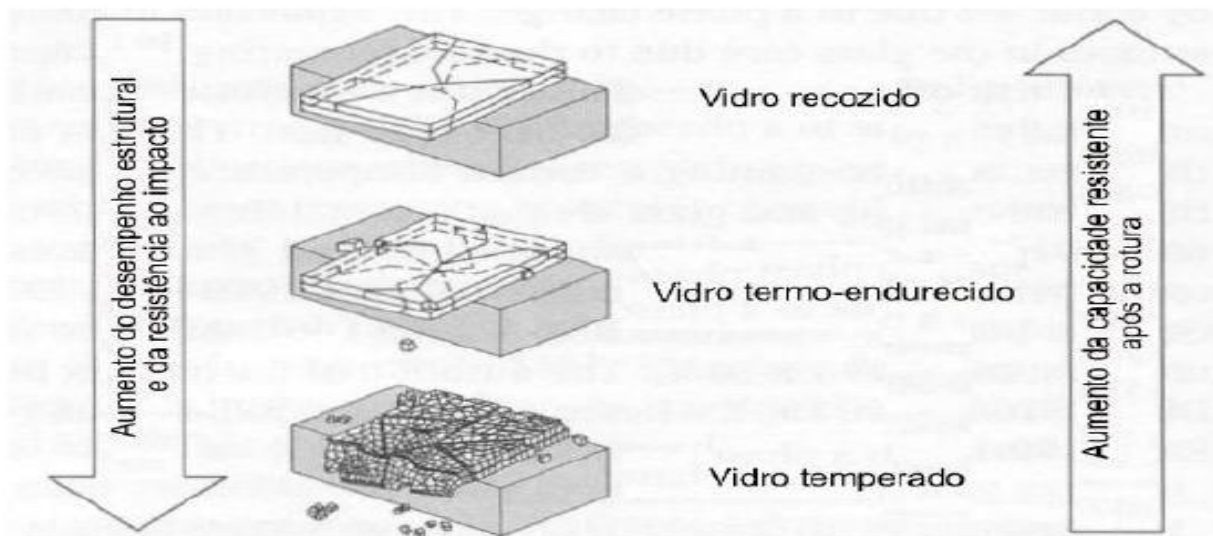
Figura 1 – Diferença entre a solicitação do vidro recozido e o temperado.



FONTE: Adaptado de Overend (2009).

Devido à necessidade de tornar a ruptura do vidro mais plástica, criou-se o **vidro laminado**. Esse vidro é gerado a partir da adesão de duas placas de vidro a uma membrana intermediária de material polimérico. Essa membrana fica responsável por manter presos os cacos das placas de vidro em caso de quebra, garantindo um comportamento de pós-ruptura bastante eficiente quanto for a rigidez do material usado como membrana intermediária (intercalar). A pós-ruptura do vidro laminado diz respeito ao comportamento da peça após uma ou todas suas placas de vidro constituintes quebrarem e a mesma passar a sustentar-se pelo material intercalar e o contato entre os cacos. O vidro laminado é um vidro de segurança e com a evolução das aplicações do vidro estrutural, este material vem sendo amplamente modificado e melhorado. Testes mostram que quanto maior o tamanho dos cacos, melhor será para a resistência pós-ruptura da peça já que haverá uma maior área de contato entre os cacos, como ilustrado na Figura 2 (SANCHES, 2013).

Figura 2 – Relação entre a resistência ao impacto e a capacidade pós-ruptura.



FONTE: Adaptado de Sanches (2013).

#### 2.4 Materiais usados como camada intermediária do vidro laminado

Os materiais usados na camada intermediária possuem papel fundamental no projeto de estruturas em vidro. Quanto mais rígido for esse material e quanto melhor ele ligar às folhas de vidro, mais vantajoso será seu uso para a estrutura em relação à diminuição da espessura do vidro laminado e em relação à possibilidade de ousar no projeto da estrutura.

Por se tratarem de materiais poliméricos, é necessário destacar que eles são suscetíveis a variações térmicas, trabalham de forma diferente quando submetidos a cargas de curta e longa duração e podem apresentar três formas de deformações: deformação elástica espontânea, deformação elástica devido ao tempo e deformação visco elástica devido ao tempo. Como materiais mais usados em camadas intermediárias destacam-se o Polivinil Butiral (PVB) e o SentryGlass Plus (SGP), (UNGUREANU, 2011).

O PVB é um material que vem sendo usado a bastante tempo, mas ele é suscetível à variação de temperatura e à variação do tempo de ação das cargas. Isso gera algumas dificuldades e limitações em sua aplicação, além de ter que se trabalhar com coeficientes de segurança maiores para evitar problemas devido ao grau de incerteza relacionado a ele. Outro ponto importante que deve ser levantado quanto ao PVB é o baixo módulo de resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) que o mesmo garante à peça laminada, o que leva os projetistas a adotarem um parâmetro ' $\tau$ ' nulo (favorável à segurança) para os cálculos algumas vezes, assumindo, assim, que as placas trabalham sem interação uma com a outra, havendo escorregamento entre elas. Analisando o SGP, que é um material mais recente, ele também é suscetível à variação de temperatura e à variação do tempo de ação das cargas (ambos são materiais poliméricos), mas os efeitos dessas variações são bem minimizados nesse material. É um material bastante rígido, com propriedades superiores ao PVB e possibilita tratar o vidro laminado que o utiliza como sendo uma peça monolítica de vidro, no entanto é um material mais caro (BENNISON; QIN ; DAVIES, 2008). A Tabela 4 mostra uma comparação entre algumas propriedades do PVB e do SGP, já as Figuras 3 e 4 evidenciam a suscetibilidade dos materiais quanto à variação de temperatura e à ação de cargas, respectivamente:

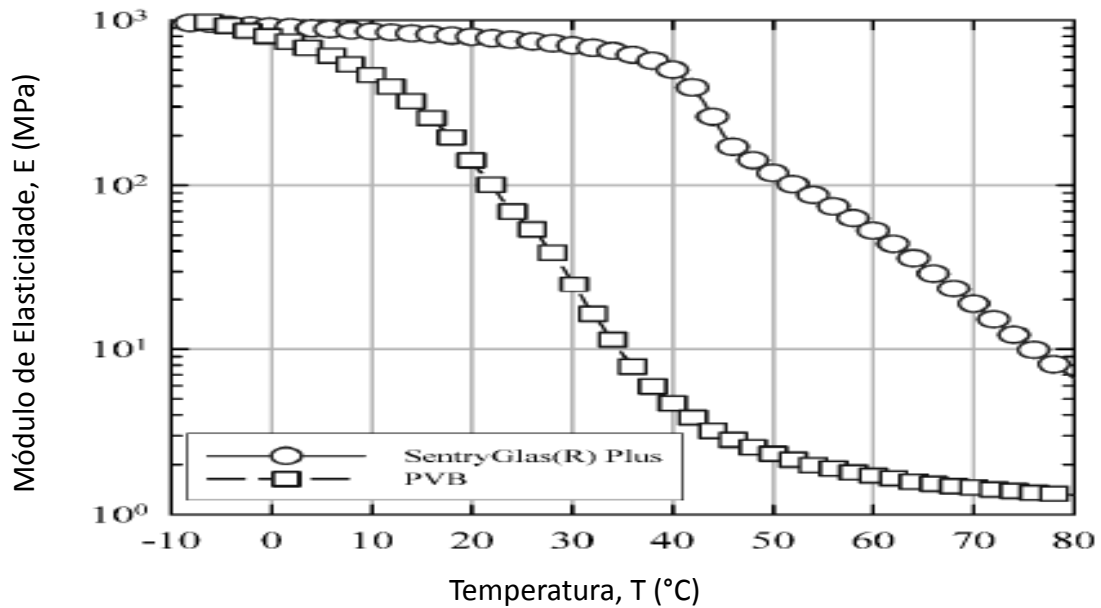
Tabela 4 – Quadro comparativo entre propriedade do PVB e do SGP.

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR		ASTM Test
		PVB	SGP	
Módulo de Young	MPa	11	300	D5026
Tensão de tração	MPa	28,1	34,5	D638
Alongamento	%	275	400	D638
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,07	0,95	D792
Coefficiente de dilatação térmico	10 <sup>-5</sup>	41,2	10 a 15	D696

FONTE: Adaptado de Sanches (2013).

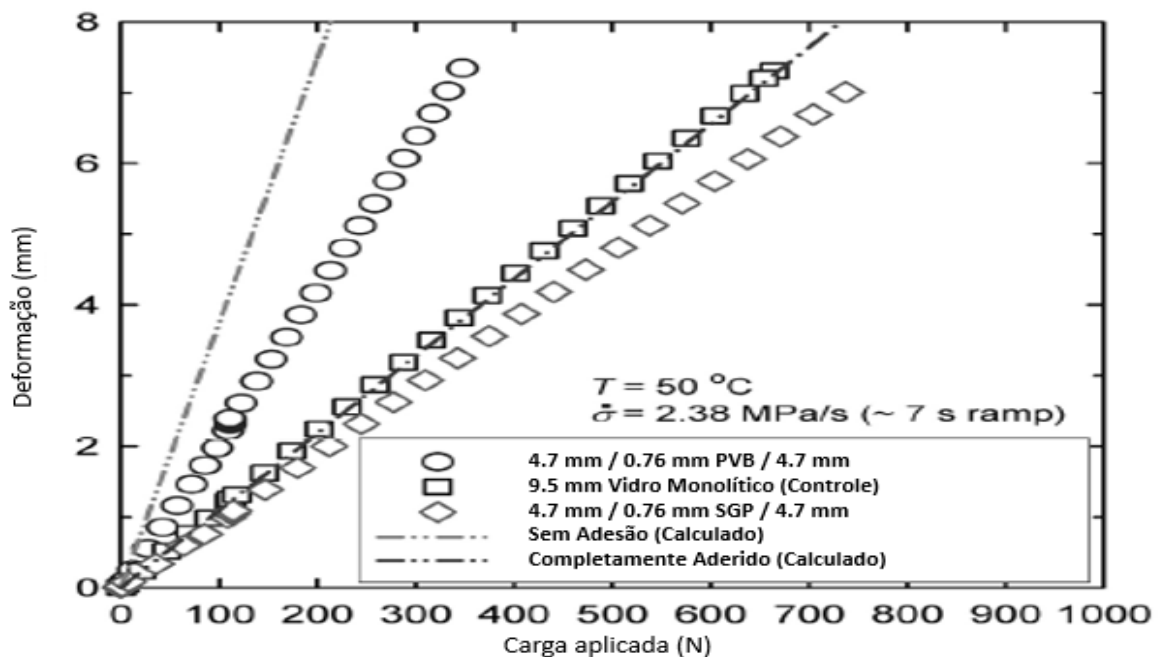


Figura 3 – Ação da temperatura sobre o Módulo de Elasticidade (E) do PVB e do SGP.



FONTE: Adaptado de Bennison, Qin e Davies (2008).

Figura 4 – Ação de cargas e deformações causadas ao variar as membranas intermediárias.



FONTE: Adaptado de Bennison, Qin e Davies (2008).

Ao avaliar os dados presentes na Figura 3 fica claro a variabilidade quanto ao módulo de elasticidade (E) do PVB e do SGP em relação a temperatura. Por exemplo, quando se observa as curvas do PVB e do SGP para 0°C, nota-se que há uma pequena diferença entre o módulo de elasticidade de ambos. No entanto, ao checá-las para uma temperatura de 40°C,

observa-se uma variação bem maior e uma perda significativa da propriedade resistente por parte do PVB.

Quando se avalia a Figura 4, nota-se que o PVB garante alguma redução de deformação quando comparado ao caso em que não se considera acoplamento entre os componentes do laminado, mas, como o PVB é bastante afetado pela temperatura, justifica-se o fato de alguns calculistas considerarem o caso de não acoplamento no momento de efetuar os cálculos envolvendo peças de vidro laminado com intercalar composto por PVB. Já, ao comparar a situação em que o SGP é utilizado, nota-se que a coesão entre as placas é grande o suficiente para gerar deformações menores do que as observadas e calculadas para peças monolíticas.

Bennison, Qin e Davies (2008) aborda sobre as vantagens de utilizar uma camada intermediária de material Ionoplástico (SentryGlass Plus) para o vidro laminado quando se pensa em obter economia de material, melhor desempenho da estrutura e fuga dos padrões convencionais de designs possíveis ao utilizar o PVB. Para tanto, também é reconhecido no trabalho o papel fundamental dos métodos de cálculo computacionais que utilizam elementos finitos quando se busca potencializar a empregabilidade dos materiais, minimizando gastos e utilizando eficientemente todo o seu potencial.

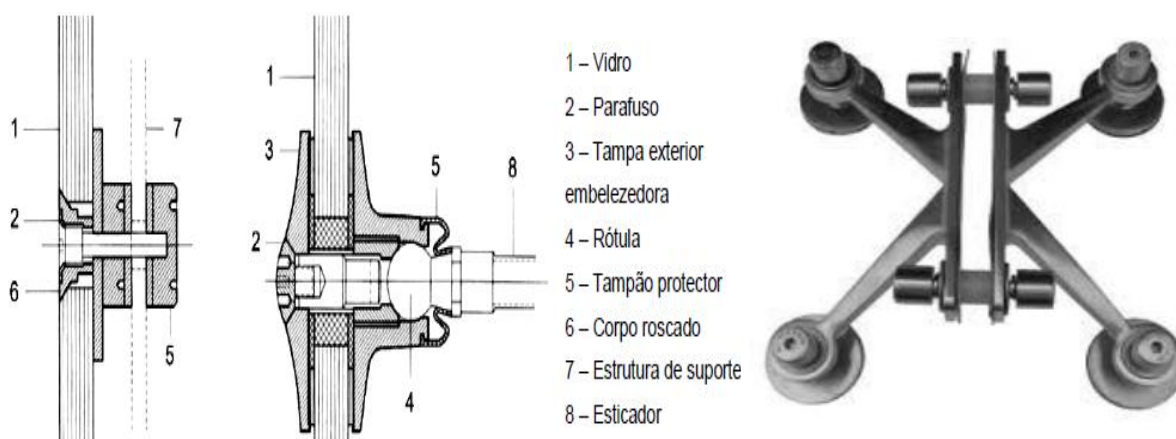
## **2.5 Fixações no sistema de vidro estrutural**

A transferência de esforços em qualquer tipo de estrutura é fundamental e as estruturas em vidro não ficam para trás, ao contrário, o cuidado tem que ser redobrado. Como o vidro e o aço trabalham de forma diferente ao serem solicitados, não deve haver o contato direto entre eles ao se executar uma junta e ainda é necessário levar em consideração o efeito de dilatação ou contração das peças quando há variação de temperatura.

Para tanto existem os diferentes mecanismos de fixação que são aplicados conforme a necessidade da situação. As fixações aderentes rígidas permitem uma espessura de junta menor, 5mm para adesivos epóxi e 1mm para adesivos de contato, mas é necessário tomar alguns cuidados com possíveis imperfeições entre os materiais da junta para não gerar zonas de acúmulo de tensões. Já as fixações aderentes flexíveis, como o próprio nome sugere, criam juntas mais flexíveis com abertura entre 6 e 20 mm que possibilitam uma trabalhabilidade melhor entre os materiais, sendo o material usado para tanto o silicone estrutural. Outro tipo de fixação é a mecânica que é subdividida em contínua e pontual. A pontual ainda é subdividida em pontual por aperto e pontual aparafusada (PEREIRA, 2012).

As fixações mecânicas contínuas são normalmente usadas em janelas, com o sistema convencional de encaixilhamento. Já as fixações mecânicas pontuais por aperto são aplicadas em uma gama enorme de situações (fachadas, escadas, pele de vidro, guarda-corpo) e consistem na fixação do vidro em um dispositivo por meio da pressão entre o dispositivo de aço (revestido com neoprene) e o vidro. Enquanto isso, as fixações mecânicas aparafusadas, popularmente conhecidas como *spiders*, são muito usadas em fachadas por diminuírem o impacto visual causado pelas peças de aço na estética da estrutura e a fixação se dá pelo aparafusamento, conforme ilustrado na Figura 5. O parafuso entra pelo orifício da placa de vidro e se fixa à peça de aço, ancorando os dois.

Figura 5 – Sistema de uma fixação mecânica aparafusada.



FONTE: Adaptado de Bennison, Qin e Davies (2008).

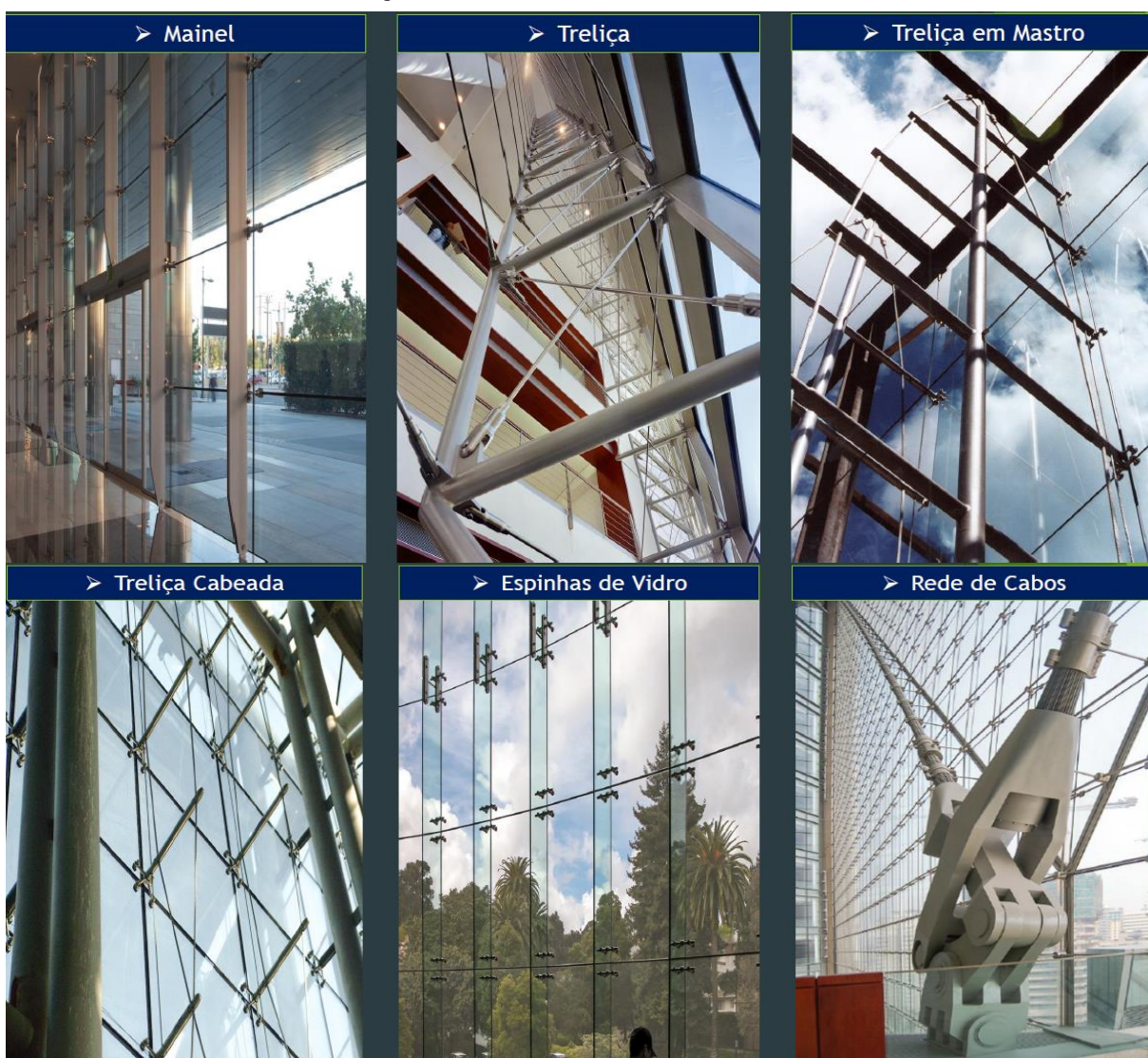
## 2.6 Sistemas estruturais usuais utilizados em fachada

Existem vários tipos de sistemas usados em fachadas para suportar as solicitações provenientes de cargas permanentes (peso próprio do sistema) e cargas variáveis (vento, neve e sismos). Por exemplo, sistema de mainéis, de treliças, de treliças em mastro, de treliça cabeada, de colunas aletas de vidro (*glass fins*) e de rede de cabos.

O sistema de mainéis utiliza montantes em aço presos na extremidade superior e inferior da fachada, modularizadamente espaçados ao longo da extensão da mesma para garantir o travamento vertical da estrutura e receber a solicitação dos esforços de forma mais uniforme. Já no sistema de treliças, os mainéis são substituídos por treliças verticais que desempenham o mesmo papel. O sistema de treliças em mastro, recebe esse nome devido à construção do elemento principal ser uma treliça com um mastro central e seus elementos menores serem substituídos por cabos e chapas de aço. No sistema de treliças cabeadas os elementos principais

são treliças construídas por cabos tensionados ligados à montantes menores em aço. Quando se fala no sistema de colunas aletas de vidro ou *glass fins* (nome mais utilizado internacionalmente) remete-se à utilização de montantes projetados em vidro laminado com fixações em aço que desempenham a função dos elementos estruturais principais da fachada, recebendo todas as solicitações das ações externas. Por fim, o sistema de rede de cabos utiliza uma malha de cabos de aço tensionada que recebe painéis de vidro de forma a dar estanqueidade ao sistema da fachada. Essas informações e mais detalhes podem ser encontradas no portal eletrônico da empresa Enclos. Todos os dados apresentados acima foram colocados como um compilado de informações presentes no portal da empresa norte americana especializada em fachadas de nome Enclos. Para melhor ilustrar os sistemas citados anteriormente, a Figura 6 foi disponibilizada.

Figura 6 – Sistemas estruturais de fachada.

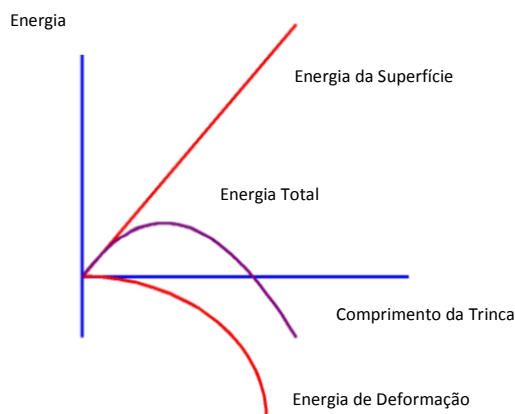


FONTE: Adaptado do portal da empresa Enclos.

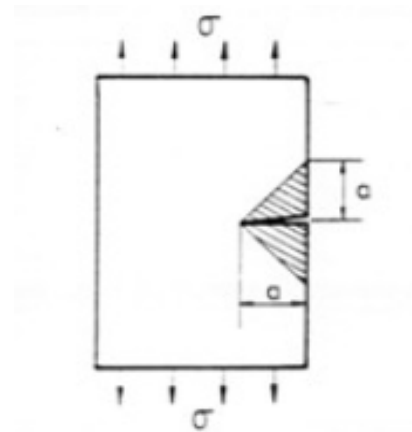
## 2.7 Fissuras de Griffith

Ao estudar o comportamento da ruptura de materiais frágeis, o cientista Alan Arnold Griffith notou que havia uma variação muito grande entre a tensão necessária para quebrar um elemento de vidro (100 MPa) e a tensão teórica necessária para romper as ligações químicas entre os átomos do mesmo material (10000 MPa). Então, buscando explicar esse fenômeno, Griffith fez muitos experimentos até chegar à conclusão da existência de microfissuras presentes na superfície dos materiais. Essas pequenas fissuras contribuíam para a diminuição de resistência do material e traziam uma certa incerteza quanto a verdadeira resistência dos mesmos. O estudioso considerou que os materiais possuem sua própria energia de deformação para situações em que são elasticamente deformados, no entanto a fissura libera essa energia de deformação e, conforme a trinca vai aumentando, há o incremento na energia superficial do material de forma a levá-lo ao colapso mais facilmente. Assim, a propagação de uma fissura quando solicitada acaba tendo uma velocidade elevada de abertura, o que diminui a resistência do material (GRIFFITH, 1921).

Figura 7 – Gráficos de Griffith



FONTE: Adaptado de Griffith, 1921.



Kamarudin, Disney e Parke (2016) descreve testes feitos em diferentes tipos de colunas tubulares de vidro, os resultados obtidos e as comparações pertinentes entre elas. O trabalho deles mostra que a falha das colunas está diretamente ligada a esbeltez do elemento, concluindo que os elementos de menor esbeltez manifestam sua ruptura ao serem esmagados e os elementos de maior esbeltez apresentam ruptura por meio da flambagem. Outro ponto interessante é evidenciar a perda de resistência em elementos que deveriam possuir resistências

parecidas como resultado da presença mais expressiva de micro falhas em alguns deles (consequência de manuseio, transporte ou estocagem deficientes de cuidados mais rigorosos), verificando a teoria das falhas de Griffith.

## **2.8 Considerações de projeto ao se trabalhar com o vidro**

Durante o processo de concepção de um projeto é necessário levantar todas as restrições que podem haver. Para as construções que utilizam o vidro não é diferente, por isso é imperativo conhecer sobre o material e as diferentes opções disponíveis que possibilitam superar as restrições presentes em norma.

A utilização do tipo correto de vidro e seus materiais auxiliares nas diferentes situações que possam aparecer é fundamental para garantir uma boa trabalhabilidade entre os componentes, segurança dos usuários, redução de manutenções e maior vida útil da estrutura. Por exemplo, buscando na NBR 7199 — Vidros na construção civil: Projeto, execução e aplicações, encontra-se que ao se trabalhar com alturas superiores a 1,5m deve-se utilizar vidro laminado como peça de composição da fachada.

Outro ponto importante refere-se às colunas executadas em vidro, cuja composição necessita da aplicação de um material mais resistente ao fogo (vidro borossilicato) para prover maior segurança aos usuários em caso de incêndio. Após a determinação de qual tipo de material será aplicado para atender as diferentes situações que possam aparecer, é necessário se preocupar com a geometria que os elementos devem ter, como esses elementos serão fixados uns aos outros, como as fixações e juntas do sistema irão trabalhar e criar caminhos alternativos de distribuição de tensões para o caso de algum elemento estrutural sofrer colapso devido a atuação de uma ação rara (choque de um carro na estrutura) (PARIAFSAI, 2016).

Para Chan (2006) há a preocupação de apontar algumas peculiaridades em estruturas leves que utilizam vidro e alumínio como suportes para fachada. Ele faz um resumo de pontos que devem ser considerados já que o vidro não pode sofrer fissuras como acontece no concreto e lembra do cuidado que se deve ter ao calcular a flambagem para os elementos de suporte, principalmente se esses forem feitos de alumínio devido ao fato do material possuir um terço do Módulo de Elasticidade (E) do aço. Ele também menciona a importância da escolha correta para o tipo de análise estrutural a ser empregada nas estruturas ao buscar garantir maior economia ao construtor sem esquecer a segurança dos usuários, objetivando o compromisso com resultados mais próximos da realidade.

## 2.9 Espessura efetiva

O conceito da Espessura Efetiva é um assunto bastante polêmico que vem sendo debatido entre os profissionais que trabalham com o material. A espessura efetiva nada mais é do que a compatibilização da espessura de uma peça de vidro laminado caso fosse usado uma peça monolítica de vidro, buscando assim uma aproximação entre suas propriedades. Essa compatibilização facilita bastante os cálculos, mas alguns estudiosos dizem que essa aproximação não poderia ser levada em conta para alguns casos por ser muito simplista, (GALUPPI e ROYER-CARFAGNI, 2013). No entanto, não se entrará no âmbito dessa discussão já que esse não é o foco deste trabalho, apresentando-a apenas a título de curiosidade como um dos métodos para o cálculo do vidro laminado.

As equações referentes à espessura efetiva de materiais compostos por dois ou mais constituintes (compósitos sanduíches) foram desenvolvidas primeiramente por Wölfel e hoje em dia sofreram algumas modificações para serem aplicadas ao vidro laminado. Apresentadas por Bennison, Qin e Davies (2008), as equações foram listadas para mostrar a existência desse tipo de consideração quando se trata do cálculo de estruturas e elementos que utilizam o vidro laminado.

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{h_1^3 + h_2^3 + 12\Gamma I_s} \quad (1)$$

Sendo:

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{EI_s h_v}{\tau h_s^2 a^2}} \quad (2)$$

$$I_s = h_1 h_{s;2}^2 + h_2 h_{s;1}^2 \quad (3)$$

$$h_{s;1} = \frac{h_s h_1}{h_1 + h_2} \quad (4)$$

$$h_{s;2} = \frac{h_s h_2}{h_1 + h_2} \quad (5)$$

$$h_s = 0.5(h_1 + h_2) + h_v \quad (6)$$

Onde:

$h_{ef;w}$  – Espessura efetiva do vidro laminado;

$\Gamma$  – Coeficiente de transferência de força cortante;

$h_v$  – Espessura da camada intermediária;

$h_1$  – Menor espessura da primeira lâmina;

$h_2$  – Menor espessura da segunda lâmina;

$E$  – Módulo de elasticidade do vidro;

$a$  – Escala do comprimento;

$\tau$  – Módulo de cisalhamento da camada intermediária;

Havendo o uso de tipos de vidro diferentes na composição do vidro laminado, há diferentes tensões admissíveis para os respectivos tipos de vidro empregados. Assim, para o cálculo da espessura efetiva, há uma variação nas equações que passam a ser as seguintes:

$$h_{1;ef;\sigma} = \sqrt{\frac{(h_{ef;w})^3}{h_1 + 2\Gamma h_{s;2}}} \quad (7)$$

$$h_{2;ef;\sigma} = \sqrt{\frac{(h_{ef;w})^3}{h_2 + 2\Gamma h_{s;1}}} \quad (8)$$

Onde:

$h_{1;ef;\sigma}$  – Espessura efetiva da primeira lâmina para a tensão máxima de flexão do tipo de vidro empregado;

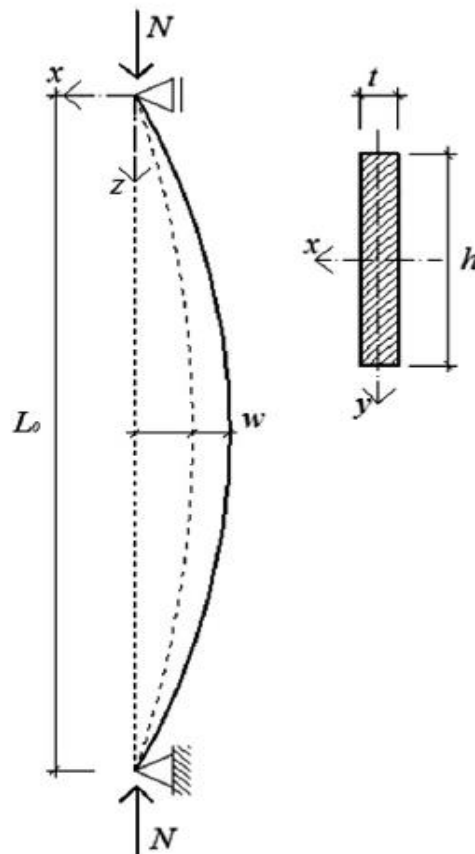
$h_{2;ef;\sigma}$  – Espessura efetiva da segunda lâmina para a tensão máxima de flexão do tipo de vidro empregado;



## 2.10 Equações para cálculo da flambagem em elementos esbeltos de vidro

As colunas aletas de vidro são compostas por elementos esbeltos que podem sofrer com o fenômeno da flambagem. Por isso, a importância da verificação da flambagem é indiscutível e está descrita nessa sessão do trabalho. A formulação foi retirada de Amadio e Bedon (2013), mas foi originalmente criada por Ayrton-Perry para aplicações em colunas de aço monolíticas. A Figura 8 ilustra uma deformada para exemplificar e guiar melhor a aplicação das equações que seguem:

Figura 8 - Flambagem de uma coluna.



FONTE: Adaptado de Amadio e Bedon (2013).

As equações foram listadas a seguir:

$$N_{b,Rd} = \chi A \sigma_{Rd} \quad (9)$$

Sendo:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad (10)$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha_{imp}(\lambda - \alpha_0) + \lambda^2] \quad (11)$$

$$\lambda = \sqrt{A\sigma_{Rk}/N_{cr}^{(E)}} \quad (12)$$

$$N_{cr}^{(E)} = \pi^2 EJ_y/L_0^2 \quad (13)$$

$$J_y = ht^3/12 \quad (14)$$

$$\sigma_{Rd} = \sigma_{Rk}/\gamma_M \quad (15)$$

Onde:

$\chi$  – Fator redutor de flambagem;

$\lambda$  – Esbeltez da peça;

$\sigma_{Rk}$  – Resistência característica à compressão;

$N_{cr}^{(E)}$  – Carregamento crítico de Euler referente à coluna (Figura 8);

$J_y$  – Momento de inércia a flexão e relação ao eixo y;

$\sigma_{Rd}$  – Resistência de projeto;

$\alpha_{imp}$  e  $\alpha_0$  – Fatores de imperfeição;

Como recomendado por Amadio e Bedon (2013), para validar as equações acima em relação ao vidro, os fatores de imperfeição citados na referida formulação devem ser adotados como 0,71 e 0,60, respectivamente.

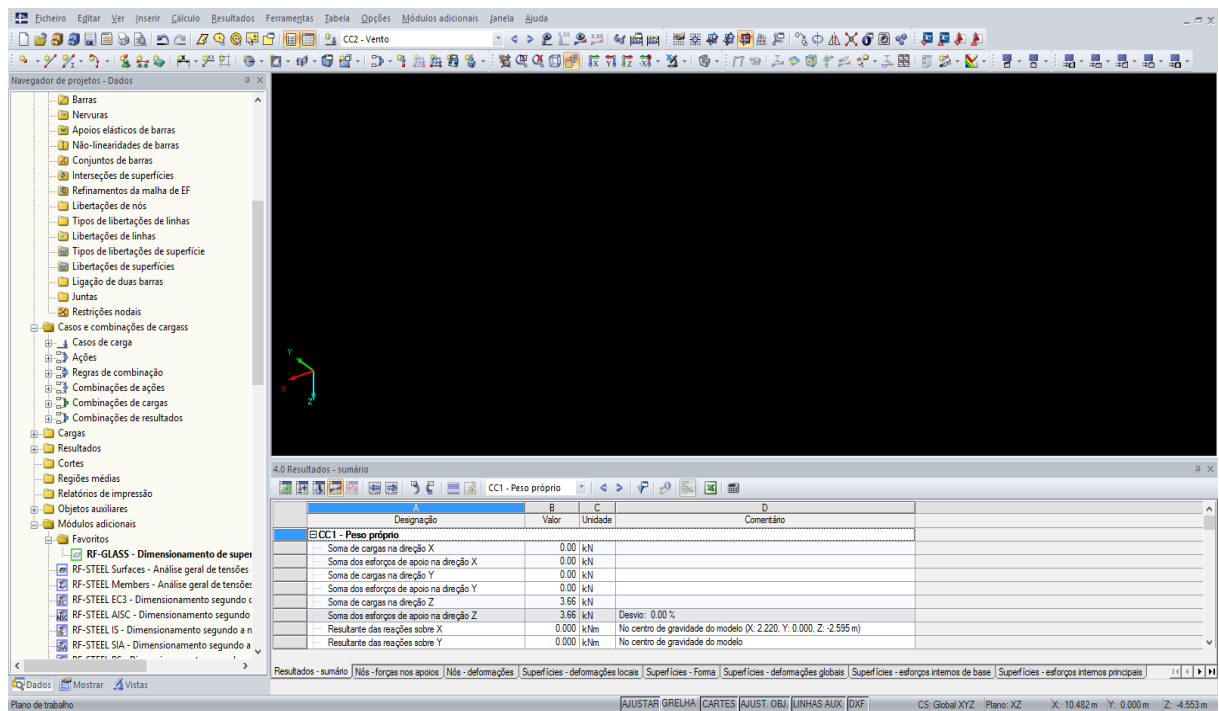
## 2.11 Teoria da Flexão de Placas (TFP)

Uma placa é caracterizada como um elemento que possui duas dimensões maiores que definem um plano em que a dimensão menor é perpendicular. A TFP se beneficia dessas características quando possibilita o cálculo de um elemento que tem três dimensões, aplicando

as solicitações de carga perpendicularmente ao plano formado pelas dimensões maiores. As placas trabalham ao momento torçor e a flexão nas duas direções em que as maiores dimensões se encontram, possibilitando o cálculo das tensões internas e das deformações impostas ao elemento devido ao carregamento externo. A TFP possui vertentes diferentes como, por exemplo, uma específica para placas espessas e a específica para placas delgadas. Para o cálculo de placas é necessário encontrar primeiramente a relação entre a espessura e a largura da placa. Se essa relação for menor que 0,1 e o resultado para a flecha de deformação for de um décimo da espessura, então pode-se dizer que a placa é delgada e indica-se o método de Kirchhoff para o cálculo do elemento. Já, para placas que não satisfaçam as hipóteses anteriormente mencionadas, deve-se aplicar a Teoria de Mindling, que considera o efeito do cisalhamento sobre a placa (REDDY, 2007).

## **2.12 Software RFEM 5**

O software RFEM 5 é um programa criado pela empresa Dlubal Software G<sub>MBH</sub> e utilizado para o cálculo estrutural, abrangendo elementos de parede, armações, placas, sólidos e cascas. Ele traz uma interface bastante intuitiva e permite a integração BIM entre projetos. Seu manual descritivo é muito didático e seu time de desenvolvedores está sempre disponibilizando cursos de graça utilizando o Youtube, buscando não só dar maior visibilidade ao software, mas demonstrar como estudantes e profissionais podem solucionar problemas complexos ao entender os fundamentos da ferramenta que tem a sua disposição. Sua biblioteca de normas é muito vasta e outra característica muito boa do software é o fato dele disponibilizar módulos adicionais para o cálculo dos mais variados tipos de estruturas, trazendo módulos específicos para cálculo de estruturas em madeira, aço, concreto, vidro e também possibilitando estudos do comportamento das mesmas com módulos referentes a estabilidade ou verificação de fundações. A Figura 9 ilustra a área de trabalho do programa, onde o usuário pode modelar e efetuar as análises estruturais dos seus modelos.

Figura 9 – Tela de trabalho do *software* RFEM 5.

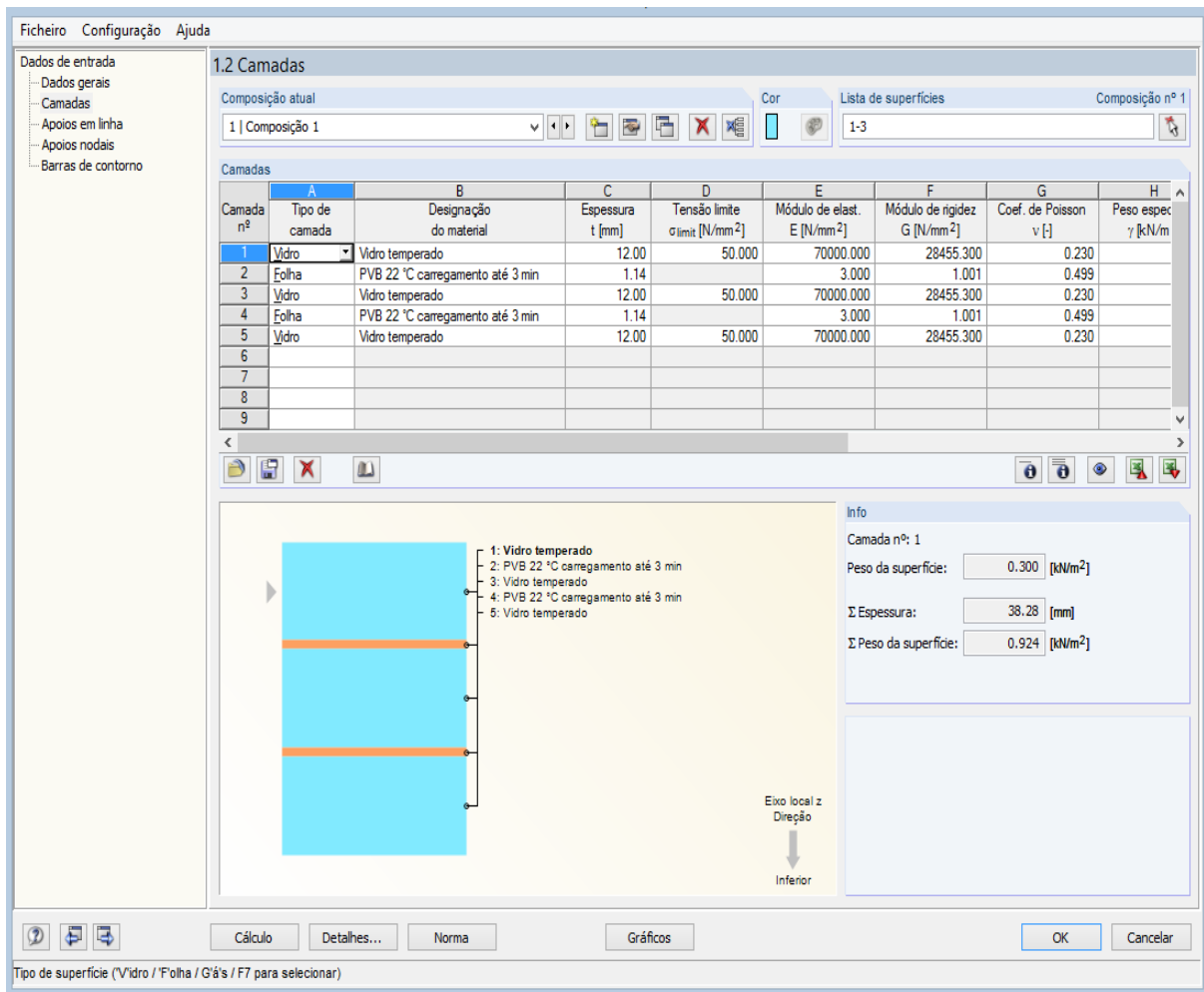
FONTE: Software de análise estrutural RFEM 5.

Como exposto por Serra (2012), em seu trabalho foram analisadas 37 vigas metálicas com a ferramenta computacional RFEM e pôde-se constatar alta confiabilidade no software devido aos resultados encontrados terem sido bastante aproximados dos resultados numéricos e experimentais obtidos por outros autores.

### 2.13 Módulo adicional RF-GLASS

Buscando facilitar o projeto de estruturas ou peças de vidro, cada vez mais presentes no mercado, os desenvolvedores do programa RFEM 5 disponibilizaram o módulo adicional RF-GLASS. Seu grande diferencial é possibilitar, de maneira simples, a modelagem de elementos de vidro, principalmente quando se trata da utilização de vidro laminado e duplo (isolante) em que o usuário precisa especificar quais camadas devem ser contabilizadas como vidro, folha ou ar. Esse módulo automatiza todo esse processo de especificação de materiais para as diferentes camadas e ainda considera a interação entre os mesmos, tornando o cálculo mais preciso, podendo reduzir desperdício de material devido à incertezas sem prejudicar a segurança. A Figura 10 mostra a tela de trabalho do referido módulo adicional do RFEM 5.

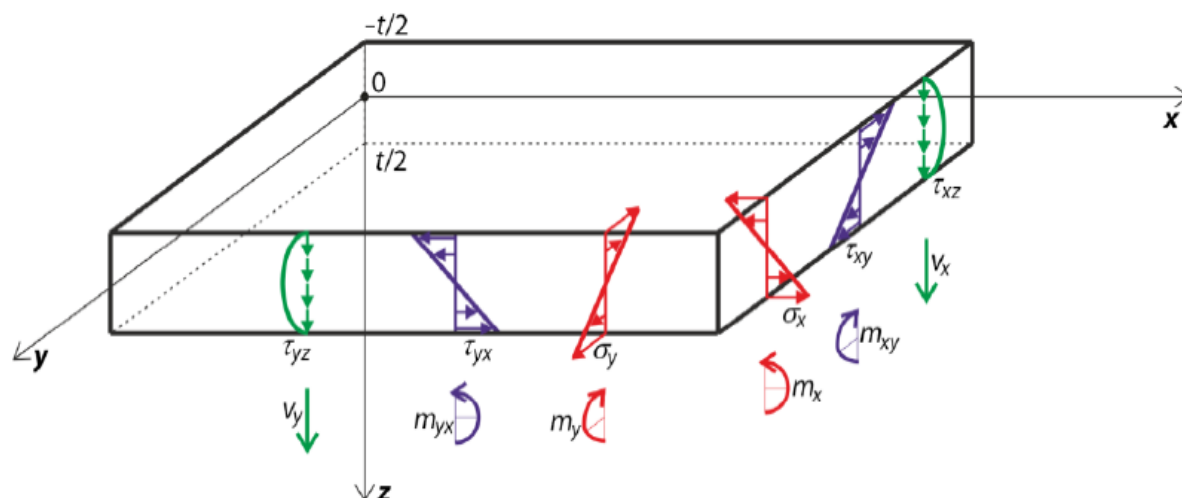
Figura 10 – Tela de trabalho do módulo adicional RF-GLASS.



FONTE: Módulo adicional RF-GLASS presente no software de análise estrutural RFEM 5.

Ao buscar informações sobre o funcionamento do módulo adicional em seu manual descritivo, encontram-se informações expostas de maneira bastante didática sobre a convenção de sinais que o programa utiliza referente às respectivas tensões básicas, como mostrado na Figura 11, por exemplo.

Figura 11 – Indicação da convenção de sinais referentes às respectivas tensões básicas.



FONTE: Manual descritivo do módulo adicional RG-GLASS presente no software de análise estrutural RFEM 5.

De acordo com Horčíčková, Netušil e Eliášová (200-), ao serem comparados resultados obtidos para painéis de vidro monolítico e laminado utilizando métodos analíticos indicados pela norma prEN 13474-2:2000 e métodos numéricos aplicando modelagem computacional no software RFEM 5 por meio do módulo RF-GLASS, pôde-se verificar variabilidade de resultados encontrados quanto aos tipos de métodos. O método analítico foi utilizado para verificar os resultados obtidos no método numérico quando ambos são aplicados em painéis monolíticos de vidro. No entanto, quando se trata de painéis de vidro laminado, o método analítico gera resultados mais conservadores devido ao fato da não consideração das forças de interação entre as camadas componentes do laminado, podendo-se concluir que o cálculo numérico é importante na obtenção de projetos mais ousados e enxutos.

## 2.14 Análise estrutural

Segundo Martha (2011), em seu livro *Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos*, a análise estrutural utiliza-se de quatro tipos de abstrações para prever o comportamento da estrutura a ser estudada. A primeira é referente à estrutura real que traz os aspectos presentes exatamente ao modo como foi concebida, sua existência no mundo. Em seguida, vem o modelo estrutural que obriga o engenheiro a criar um modelo da realidade e aplicar sobre ele hipóteses que o faça se aproximar do real por meio das ações da lei da física e matemática. Como terceira abstração tem-se o modelo discreto em que são incorporadas as individualizações dos elementos que formam a estrutura, tornando algo que era contínuo (geral)

em discreto (particionado). Um dos métodos mais famosos de executar essa discretização da estrutura é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Por fim, o modelo computacional é descrito como quarta abstração e vem auxiliar nos casos em que a discretização precisa ser tão detalhada que demoraria muitos anos para uma pessoa fazer todos os cálculos à mão. Como se trata de um processo repetitivo foram programadas algumas ferramentas computacionais que não apenas realizam os cálculos dessas discretizações de forma precisa e rápida, mas também possibilitam aos engenheiros modelar suas estruturas dentro de uma plataforma digital.

Devido a essa agilidade e precisão presentes nas ferramentas computacionais mais atuais, o MEF passou a ser mais utilizado no cotidiano dos engenheiros que constantemente aperfeiçoam suas ferramentas e o próprio método. Devido a isso, o MEF desempenha um papel fundamental no aperfeiçoamento de estruturas, trazendo ganhos financeiros, de desempenho, de confiabilidade, de inovação e possibilitando os engenheiros calculistas ousarem mais em seus projetos (GOMES; VELHO, 1998).

### **2.15 Método dos Elementos Finitos (MEF)**

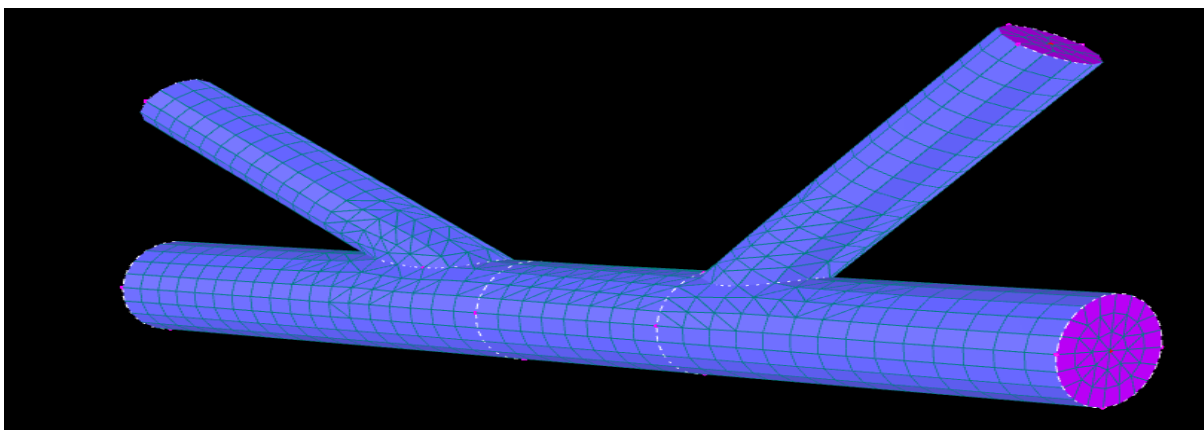
O MEF possui como um de seus objetivos a determinação do estado de tensões e deformações de um objeto de formato qualquer ao particioná-lo em uma malha de elementos de tamanho conhecido, aplicando os cálculos para cada região limite gerada por cada elemento da malha ao impor ao objeto às ações solicitantes. Ele é uma parte da análise estrutural e surgiu do aperfeiçoamento de programações computacionais que permitiram a resolução de forma mais rápida e precisa de cálculos integrais complexos, deixando o método das derivadas parciais e o método das diferenças finitas obsoletos. Ao utilizar o MEF deve ser recordado que sua base conceitual está relacionada à modelos de equilíbrio, ao método dos deslocamentos ou a uma mistura dos dois e que não só o tipo de análise, mas também as hipóteses assumidas para efetuar a execução do modelo e o tipo de estrutura a ser calculada são de fundamental importância (AZEVEDO, 2003).

Uma estrutura pode ser considerada reticulada quando uma de suas dimensões é muito menor que a outra, pode ser considerada laminar quando suas duas dimensões são aparentes e pode ser considerada sólida quando o objeto manifesta uma terceira dimensão aparente que precisa ser considerada nos cálculos. Sabendo da geometria da estrutura a ser calculada, o engenheiro tem o papel de escolher qual tipo de modelo ele deve usar para representar os elementos da estrutura, levando em consideração a influência das diferentes dimensões dos mesmos em relação às solicitações externas à estrutura.

Também é papel do engenheiro optar pelo tipo de análise à qual irá aplicar sua estrutura, sendo ela estática ou dinâmica e linear ou não-linear. Uma análise estática não considera a inércia inerente aos corpos, já uma análise dinâmica considera a aceleração dos corpos quando sujeitos a carregamentos, tornando-a uma análise mais complexa de se executar. No caso de uma análise linear, assume-se que tanto o material quanto a forma da estrutura sofrem deformações desprezíveis ao serem aplicadas solicitações externas. Já a análise não-linear é feita considerando os efeitos de não-linearidade física e não-linearidade geométrica, resultando em uma análise mais complexa. Esses efeitos são comumente chamados de efeitos de segunda ordem e estão cada vez mais presentes nos cálculos de estruturas devido ao fato delas estarem cada vez mais esbeltas, originando, muitas vezes, um acréscimo de 10% da carga total apenas pelo aparecimento desses efeitos. Dependendo da norma, por exemplo, ao se trabalhar com concreto, quando há esse acréscimo de 10% ou mais devido aos efeitos de segunda ordem, a análise precisa ser não-linear (MONCAYO, 2011).

Colocando de forma bem simples, ao se aplicar o MEF cria-se uma malha de pequenos elementos de forma conhecida, normalmente quadriláteros ou hexaedros, sobre um domínio complexo (modelo), aplicando as equações para o cálculo das tensões internas e das deformações em cada um dos pequenos elementos e, ao fim, há a compilação dos resultados de cada uma das pequenas partes para formar o resultado geral referente ao modelo como um todo. No entanto, é muito importante especificar o tipo de material aplicado ao objeto e suas características para assim prever o comportamento do mesmo ao ser solicitado. A Figura 12 ajuda a ilustrar melhor o processo de partição do domínio em pequenos elementos, malha de elementos finitos, para análise aplicando o MEF e a Figura 13 ilustra como os resultados são apresentados após os cálculos efetuados pelo software RFEM 5.

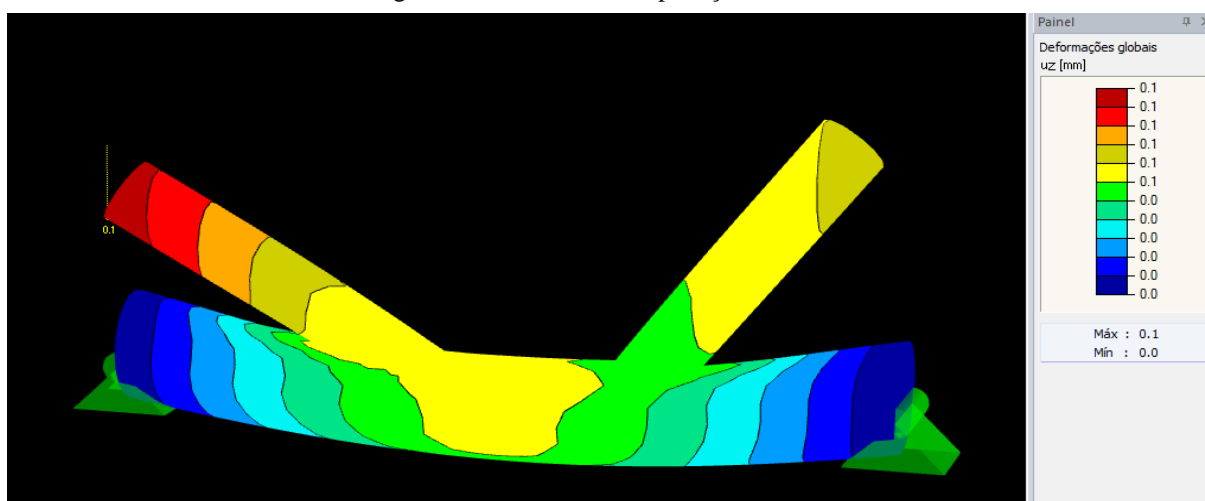
Figura 12 – Processo de criação da malha de elementos finitos.



FONTE: Elaborado pelo autor utilizando o software RFEM 5.



Figura 13 – Resultado da aplicação do MEF.



FONTE: Elaborado pelo autor utilizando o software RFEM 5.

A aplicação de métodos numéricos possibilita calcular soluções que anteriormente seriam impensadas somente utilizando métodos analíticos. Conhecer bem o MEF é imprescindível para engenheiros dispostos a enfrentar problemas complexos de engenharia estrutural. A realidade é muito mais desafiadora do que os exercícios presentes nos livros, nela há interações complexas entre materiais diferentes presentes em elementos de forma completamente assimétrica e imprevisível, dificultando imensamente o cálculo por métodos analíticos.

Assim, quem sabe utilizar métodos numéricos sai na frente não somente por conseguir uma resposta aproximada do comportamento real de estruturas desafiadoras, mas também por conseguir economizar tempo e dinheiro ao simular as situações e materiais de forma virtual, contribuindo com um bom ponto de início para testes físicos. A utilização de testes físicos é necessária para calibração de parâmetros do software e na verificação de resultados iniciais. Além disso, testes físicos ajudam na melhoria de resultados futuros.

Conforme Reddy & Gartling (2001), o MEF é uma das ferramentas mais poderosas aplicadas na análise de problemas de engenharia estrutural atualmente. Com ele é possível discretizar estruturas inteiras em nós e elementos de barra, chapa, grelha e outros que recebem as propriedades do material componente desejado. Esses elementos são solicitados de acordo com as combinações de ações externas pré-estabelecidas para obtenção do comportamento global da estrutura. Ao obter o comportamento da estrutura é possível avaliar os pontos positivos e negativos das hipóteses anteriormente levantadas e, dessa forma, buscar hipóteses diferentes para o aperfeiçoamento dos parâmetros, características e propriedades da estrutura.

Torres (2015) evidencia a importância de saber quais hipóteses devem ser utilizadas na hora de modelar uma estrutura utilizando o MEF para garantir que o modelo esteja condizente com a realidade. Ela justifica a diferença de resultados obtidos por ela e o engenheiro calculista responsável pelo projeto argumentando que foram feitas considerações diferentes para os cálculos, não significando necessariamente um erro, mas a escolha dela em optar por uma abordagem mais conservadora e, provavelmente, mais cara. No mesmo trabalho ela sugere que o cálculo estrutural não deve levar em consideração uma camada a mais de vidro colocada como segurança, indicando que a estrutura não deve depender dessa camada para ser estável. Além disso, ela sugere utilizar essa camada a mais como precaução para casos em que possa haver algum infortúnio ou falha de execução devido se estar trabalhando com um material frágil como o vidro.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Entende-se que o presente trabalho busca verificar conceitos previamente estabelecidos de forma objetiva e por meio da comparação de dados. Situado o tipo de pesquisa que será realizada, pode-se dar o próximo passo referente à composição da sessão de materiais e métodos deste trabalho, lembrando que a fachada existente está ilustrada no Apêndice A e a proposta em colunas aletas de vidro (*glass fins*) está no Apêndice B desse trabalho.

#### 3.1 Revisão dos parâmetros utilizados

Como mencionado anteriormente no presente trabalho, o vidro borosilicatado é mais resistente ao fogo, o que torna sua consideração fundamental durante o processo de concepção de colunas de vidro. No entanto, durante uma rápida pesquisa de mercado com três das maiores indústrias de vidro presentes no país (CEBRACE, VIVIX e AGC) pôde-se obter alguns detalhes importantes sobre o mercado de vidro no país. Um dos que chamaram mais atenção foi saber que não há tanta disponibilidade do vidro borosilicatado no mercado devido ao fato das indústrias não trabalharem com ele. Então, o material a ser considerado será o vidro temperado e suas propriedades estão listadas na Tabela 5 abaixo. Essas propriedades são de fundamental importância para as modelagens computacionais que serão abordadas posteriormente.

Tabela 5 – Propriedades do vidro temperado utilizadas para alimentar o *software*.

Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,2	
Módulo de Elasticidade (E)	70	Gpa
Densidade	2500	Kg/m <sup>3</sup>
Resistência à Compressão	800	MPa
Resistência à Tração	250	MPa
Resistência à Flexão	120	MPa

FONTE: Elaborado pelo autor.

É importante lembrar da necessidade de utilização dos vidros de segurança quando peças desse material precisarem ser instaladas a mais de 1,5m de altura, então deve-se levar em consideração o uso de painéis de vidro laminado. Mesmo o vidro laminado com chapas em vidro temperado possuindo preço mais elevado que o laminado com chapas em vidro recozido, optou-se por utilizar painéis de vidro laminado com chapas em vidro temperado devido ao

emprego do fator de minoração da resistência do vidro ser 2,5 como indicado pela norma prEN 13474-1:1999 (norma à qual se teve acesso).

Para garantir a estanqueidade da estrutura de fachada, optou-se por utilizar silicone estrutural entre os espaçamentos de 1 centímetros deixados entre os painéis, permitindo a retração e expansão dos mesmos devido à variação de temperatura. O material escolhido foi o *Dow Corning® 995* da empresa *Dow Corning*. Esse silicone também deve ser utilizado nos encaixes dos furos nos painéis de vidro onde há a transição do suporte entre o vidro e o aço dos *spiders* que irão sustentar os painéis, garantindo a trabalhabilidade correta entre os materiais. A Tabela 6 traz as propriedades do silicone estrutural que foram aplicadas ao *software* para obtenção dos resultados presentes na sessão de Resultados e Discussões do presente trabalho.

Tabela 6 – Propriedades do silicone estrutural utilizadas para alimentar o *software*.

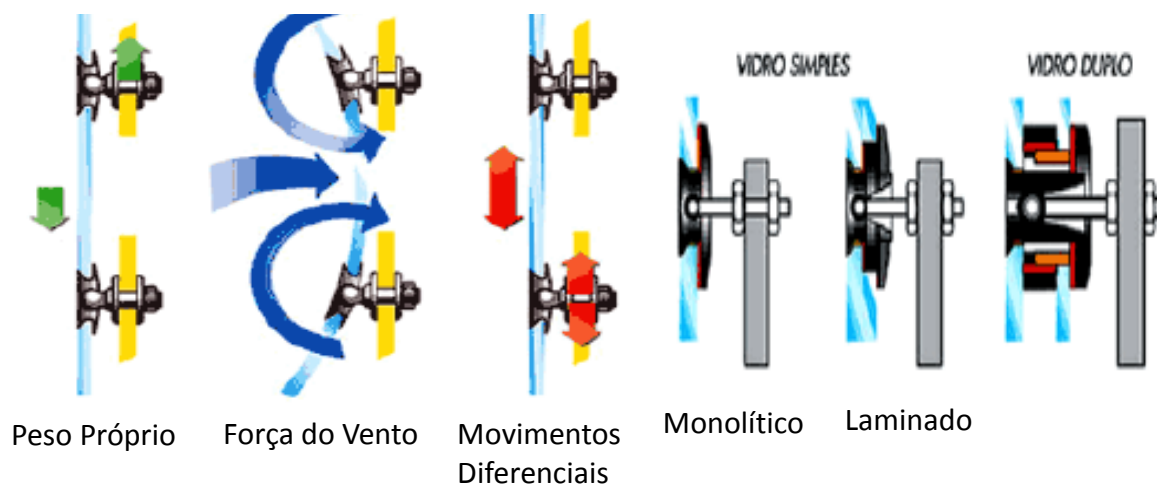
Resistência de adesão à tração após 2 horas	0,43	MPa
Resistência de adesão à tração após 4 horas	0,72	MPa
Densidade	1,38	Kg/m <sup>3</sup>
Resistência ao Rasgamento	11,2	N/mm
Resistência ao Cisalhamento	0,85	MPa
Recuperação elástica	99	%

FONTE: Elaborado pelo autor.

Apenas os furos superiores presentes nos painéis ficam responsáveis pela transmissão do peso próprio dos painéis para seus respectivos *spiders*, o que justifica utilização de diâmetros menores para os furos superiores e maiores para os inferiores. Além disso, utiliza-se um mecanismo de rótula no travamento da haste do *spider* com o painel de vidro para dar uma certa flexibilidade do conjunto ao ser solicitado pelo vento. Buscando ilustrar melhor como funciona o mecanismo de suporte entre painéis e *spiders*, evidencia-se a Figura 14 que foi adaptada de Pinheiro (2007), que se utilizou do Manual do Vidro (2000) para ter acesso às figuras.

Importante lembrar que para o presente trabalho não será verificado a integridade das ligações, assumindo que todas sejam elementos indeformáveis e que já foram dimensionadas de forma satisfatória.

Figura 14 – Mecanismo de suporte entre painéis e spiders.



FONTE: Adaptado de Pinheiro (2007).

Sabendo da necessidade de utilização do vidro laminado na concepção dos painéis e das colunas aletas de vidro que irão receber as solicitações dos painéis oriundas da força do vento, é de grande importância ter em mente o tipo de material intercalar que deve ser aplicado ao laminado. O SGP foi escolhido para modelar os painéis e as colunas de vidro tendo em vista que o material garante um comportamento superior ao de uma peça monolítica quando utilizado (vide Revisão Bibliográfica). Assim, devido ao fato do operador ainda estar se familiarizando com o *software* de cálculo empregado e buscando gerar resultados de referência para verificações futuras, modelou-se os painéis como elementos monolíticos no módulo adicional RF-GLASS.

É interessante abordar também as considerações de apoio tomadas para os painéis e colunas de vidro. Dentre os painéis que compõem a fachada, existem três formas de suporte para os mesmos. A primeira seria engastada e apoiada em dois cantos, a segunda seria engastada em duas faces e suportada em um bordo e, por fim, há os painéis apoiados em seus quatro cantos. Sabendo que a última forma de suporte mencionada é a mais desfavorável e mais presente na opção de fachada em estudo, fez-se uso da opção apoiada nos quatro cantos para modelar o comportamento de um painel no *software* de elementos finitos RFEM 5 e, assim, poder aplicar os resultados para os demais de forma favorável a segurança. A estratégia de levar em consideração a situação mais desfavorável e aplicá-la aos demais elementos foi utilizada.

As ligações foram consideradas indeformáveis, como mencionado anteriormente, mas as extremidades das colunas que receberam as solicitações provenientes dos painéis foram consideradas engastadas em um primeiro momento, mesmo sabendo que engastes aumentam o

custo do projeto. Conforme foram sendo efetuadas modelagens e análises as considerações de apoio foram modificadas buscando uma economia de gastos sobre o projeto o que resultou em um engaste para a base e um apoio de segundo gênero para o topo como opção final.

### 3.2 Cálculo da carga de vento

Utilizou-se o procedimento para o cálculo da pressão dinâmica de vento presente na NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações juntamente com os coeficientes de pressão externa ( $C_{pe}$ ) e interna ( $C_{pi}$ ) para obter o carregamento gerado pelo vento sobre a edificação. A Tabela 7 não só ilustra todos os parâmetros presentes em norma que foram utilizados para o cálculo da força de vento do presente trabalho, como também indica que o relevo foi considerado como terreno plano ou fracamente acidentado ao se utilizar S1 igual a 1 (conforme norma) e indica a categoria e a classe escolhidas para reger o coeficiente S2 em relação à altura da fachada, além de apresentar a formulação adotada no cálculo.

Sabe-se que o coeficiente S2 varia conforme a altura da edificação ou parte componente da mesma em que se deseje calcular a força do vento atuante, então a norma NBR 6123:1988 também fornece os valores desse coeficiente para diferentes alturas e de acordo com a categoria e classe em que o entorno da estrutura se enquadra referente a mesma.

Tabela 7 – Parâmetros usados no cálculo da carga de vento.

$V_0$ (m/s)	30	
S1	1	
S2	Categoria	III
	Classe	C
S3	1	
$V_k$	$V_0 \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3$	
$q_v$	$0,613 \cdot V_k^2$	

FONTE: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 vem ilustrar os diferentes valores do coeficiente S2 relacionando-o com as diferentes categorias, classes e alturas, bem como apontar os valores utilizados para o cálculo da força de vento atuante na fachada do presente trabalho que possui 10 metros de altura (valores de S2 usados dentro do retângulo vermelho).

Tabela 8 – Possíveis valores para o coeficiente S2.


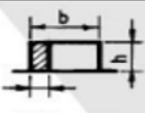
z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89

FONTE: Adaptado da NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações.

Em relação aos coeficientes de pressão interna, foi utilizada a opção correspondente a duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis (item 6.2.5, letra “a” da NBR 6123:1988). Assim, adotou-se  $C_{pi}$  como sendo +0,2 e -0,3.

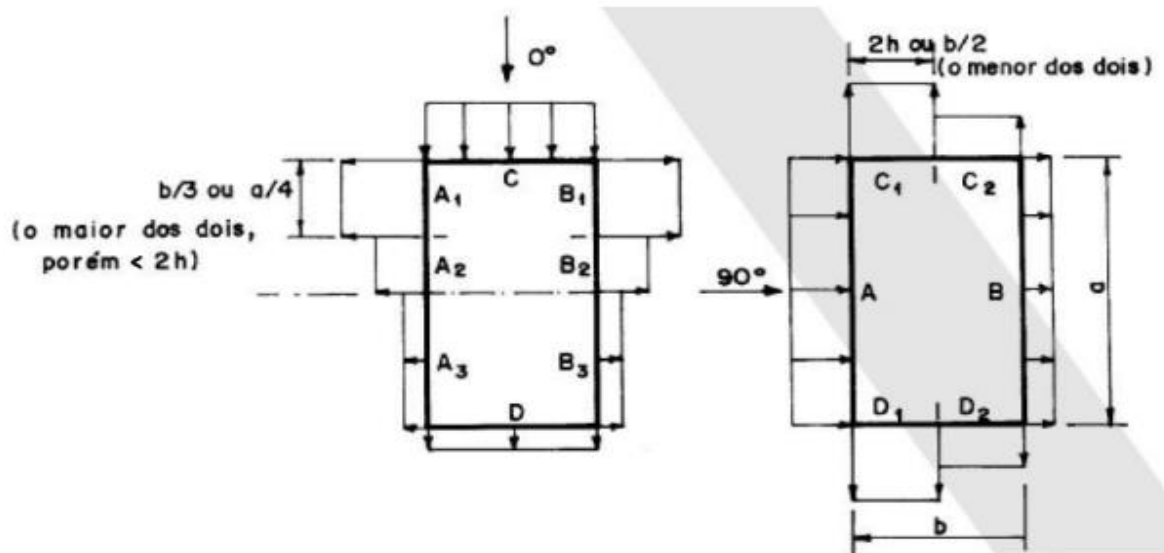
No caso dos coeficientes de pressão externa, fez-se necessário a verificação das dimensões da edificação onde a estrutura da fachada deve ser inserida (*Shopping Iguatemi*) e, para tanto, utilizou-se a ferramenta *Google Earth*. Dessa forma, pôde-se encontrar “a” como sendo 412,35 metros, “b” como sendo 158,45 metros e “h” como sendo aproximadamente 20 metros. A NBR 6123 traz em sua Tabela 4 os valores para  $C_{pe}$  correspondentes às dimensões da edificação. Sabendo que “h” dividido por “b” será menor ou igual a 0,5 e “a” dividido por “b” está entre 2 e 4, obteve-se um  $C_{pe}$  de -0,8 para vento a 0° e  $C_{pe}$  de 0,7 e -0,5 para vento a 90°. As Figuras 15 e 16 vem ilustrar de onde foram retirados os coeficientes de pressão externa ( $C_{pe}$ ). Os resultados obtidos referentes a variação entre os coeficientes de pressão interna e externa, bem como a pressão efetiva gerada pelo vento foram apresentados na sessão de Resultados e Discussões deste mesmo trabalho.

Figura 15 – Coeficiente de pressão externa.

Altura relativa		Valores de $C_{pe}$ para								$C_{pe}$ médio 
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		$A_1$ e $B_1$	$A_2$ e $B_2$	C	D	A	B	$C_1$ e $D_1$	$C_2$ e $D_2$	
	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0

FONTE: Adaptado da NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações.

Figura 16 – Ângulo de chegada da rajada de vento.



FONTE: NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações.

### 3.3 Cálculo do Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS)

Para o cálculo do Estado Limite Último (ELU) e do Estado Limite de Serviço (ELS), fez-se uso da equação presente na norma prEN13474-1:1999 combinando-a com os respectivos coeficientes parciais referentes às ações atuantes presentes na Tabela 9. A referida equação segue abaixo:

$$\sum_j \gamma_{Gj} \cdot G_{Kj} + \gamma_{Qi} \cdot Q_{Ki} + \sum_i \gamma_{Qi} \cdot \psi_{oi} \cdot Q_{Ki} \tag{16}$$



Tabela 9 – Parâmetros sugeridos pela norma prEN13474-1:1999.

AÇÕES		ESTADO LIMITE ÚLTIMO		ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	
		Ações permanentes	Ações variáveis	Ações permanentes	Ações variáveis
		$\gamma_{Gj}$	$\gamma_{Qi}$	$\gamma_{Gj}$	$\gamma_{Qi}$
DESFAVORÁVEIS	Peso próprio, vento, neve	1,35	1,5	1,13	1,00
	Clima	1,35	1,2	1,13	0,92
FAVORÁVEIS	Todas	1,00	0	1,00	0

COEFICIENTES DE COMBINAÇÃO $\psi_{0i}$		
AÇÕES VARIÁVEIS	ESTADO LIMITE ÚLTIMO	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO
Curta duração: Vento	0,15	0,15
Neve	0,82	0,96

FONTE: Adaptado da norma prEN13474-1:1999.

As equações finais utilizadas para cada Estado Limite foram:

$$ELU \Rightarrow Fd = 1,35. G + 1,5. Q \quad (17)$$

$$ELS \Rightarrow Fd = 1,13. G + Q \quad (18)$$

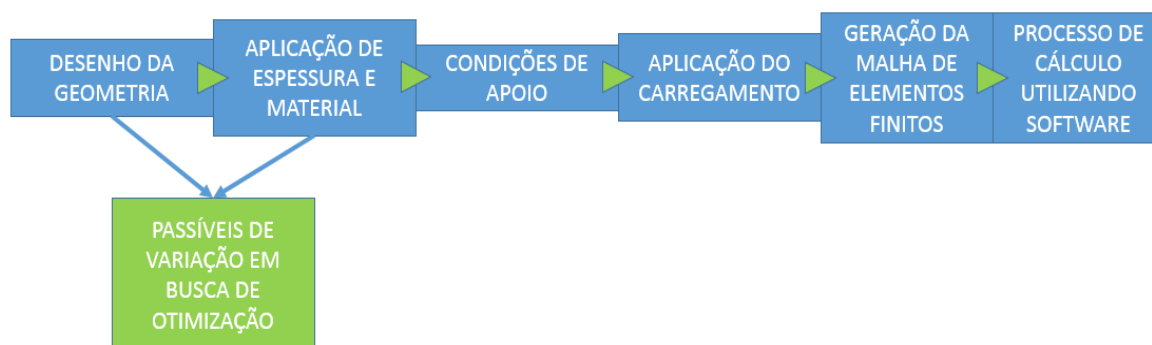
O valor adotado para a ação permanente referente ao peso próprio ( $G$ ) é calculado automaticamente pelo *software* RFEM 5, já o valor adotado para a ação variável referente ao vento foi calculado e ambos serão apresentados na sessão de Resultados e Discussões do presente trabalho. Importante mencionar que não será computada nenhuma sobrecarga devido a manutenção pelo fato dos equipamentos usados para o serviço serem fixados a estrutura do *shopping* como um todo e não a estrutura da fachada.

### 3.4 Modelagem e análise estrutural

Após a obtenção dos esforços de projeto providos pelas normas NBR 6123:1988 e prEN 13474-1:1999, pôde-se iniciar com o processo de modelagem e posterior análise estrutural da estrutura no *software*, RFEM 5, escolhido para esse fim. Para tanto, utilizou-se as ferramentas de desenho disponibilizadas pelo *software* para conceber a geometria das placas de vidro e os demais elementos da fachada, em seguida aplicou-se uma espessura e o material para a superfície criada conforme as condições de contorno geradas pela geometria resultante. Seguindo, é necessário especificar as condições de apoio da estrutura modelada e aplicar o

carregamento proveniente dos resultados referentes às ações permanentes e variáveis. Por fim, é gerada a malha de elementos finitos sobre a superfície. Após proceder com os passos citados anteriormente, pode-se dar início ao processo de cálculo da estrutura utilizando o *software*. A Figura 17 mostra um esquema prático do processo de modelagem abordado.

Figura 17 – Procedimentos referentes à modelagem.

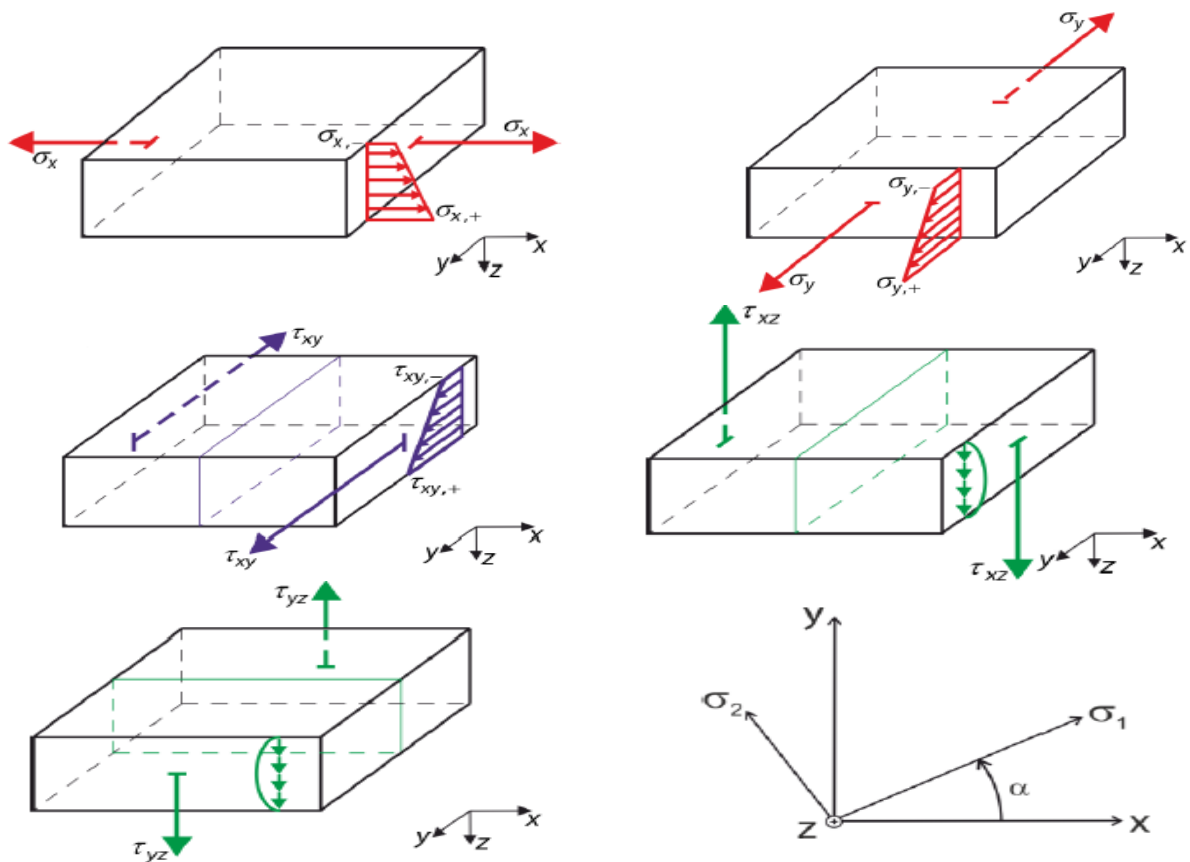


FONTE: Elaborado pelo autor.

A malha de elementos finitos é de grande importância para a análise computacional da estrutura devido ao fato dela dividir a superfície em pequenos elementos de geometria estabelecida. O mecanismo “solver” do *software* é acionado quando o usuário manda executar os cálculos da estrutura, então, levando em consideração as características da superfície, do material e da situação de apoios previamente estabelecidos, o *software* gera os resultados referentes aos parâmetros especificados. No entanto, é de fundamental importância testar os resultados obtidos, buscando resultados que sejam condizentes com a realidade. Possuir experiência com a ferramenta também é muito importante.

O solver do programa irá gerar como resultado as forças internas, as tensões internas e as deformações para cada elemento e expor os resultados graficamente para o usuário poder avaliar de forma mais fácil e precisa, possibilitando o aprimoramento da estrutura analisada. De forma a ilustrar melhor sobre as equações citadas anteriormente, a Figuras 18 traz, para uma superfície, a definição previamente estabelecida como forças internas básicas aplicada ao *software* e a Figura 19 vem exemplificando as equações de onde se determinam as forças internas básicas quando o eixo Z estiver posicionado para baixo adotadas pelo RFEM 5. As demais equações podem ser encontradas no manual de descrição do *software*, juntamente com suas respectivas formas de aplicação (DLUBAL SOFTWARE G<sub>MBH</sub>).

Figura 18 – Definições das tensões internas básicas com seus respectivos sentidos.



FONTE: Adaptado do manual descritivo do programa RFEM 5 da empresa Dlubal Software GmbH.

O manual de descrição do programa RFEM 5 traz de forma muito didática e ilustrativa todas as informações referentes aos métodos de cálculo que podem ser aplicados ao utilizar o programa e explica como o usuário deve proceder ao aplicar os diferentes métodos possíveis. Como os cálculos foram efetuados utilizando o *software* RFEM 5 como ferramenta, é importante informar quais parâmetros de cálculo foram empregados na obtenção dos resultados do presente trabalho. Assim, dentro do *software* foram usados como parâmetros de cálculo para os casos de carga o método de análise por meio da análise geométrica linear, para as combinações de carga foi selecionado o método de análise por meio da análise não-linear (segunda ordem), escolhendo o método de Picard para solucionar o sistema de equações não lineares e, para o cálculo dos esforços presentes nas superfícies modeladas, selecionou-se no programa a Teoria da Flexão de Placas de Mindlin. Todas essas opções e mais algumas são disponibilizadas pelo *software* e podem ser escolhidas a critério do operador. Para mais informações buscar no manual descritivo do programa.

Figura 19 – Equações referentes às forças internas básicas utilizadas pelo programa.

$m_x$	$m_x = \int_{-d/2}^{+d/2} \sigma_x z dz$	Momento fletor que gera tensões na direção do eixo X local.
$m_y$	$m_y = \int_{-d/2}^{+d/2} \sigma_y z dz$	Momento fletor que gera tensões na direção do eixo Y local.
$m_{xy}$	$m_{xy} = m_{yx} = \int_{-d/2}^{+d/2} \tau_{xy} z dz$	Momento torsor.
$v_x$	$v_x = \int_{-d/2}^{+d/2} \tau_{xz} dz$	Força cortante $v_x$ .
$v_y$	$v_y = \int_{-d/2}^{+d/2} \tau_{yz} dz$	Força cortante $v_y$ .
$n_x$	$n_x = \int_{-d/2}^{+d/2} \sigma_x dz$	Força normal na direção do eixo X local.
$n_y$	$n_y = \int_{-d/2}^{+d/2} \sigma_y dz$	Força normal na direção do eixo Y local.
$n_{xy}$	$n_{xy} = \int_{-d/2}^{+d/2} \tau_{xy} dz$	Fluxo de cisalhamento.

FONTE: Adaptado do manual descritivo do programa RFEM 5 da empresa Dlubal *Software* GmbH.

Os métodos e a teoria citados anteriormente estão melhor descritos no manual descritivo do *software* RFEM 5. Como parâmetros de cálculo globais utilizados no programa foi especificado um número máximo de 100 iterações, com 1 incremento de carga para os casos de carga e combinações de carga, escolheu-se uma malha quadrangular com elementos de 50x50 milímetros e optou-se pelo método direto para solucionar o sistema de equações na versão 64 bits.

Embora o programa RFEM 5 encontre as tensões internas impostas à estrutura, o resultado proveniente dele que foi usado apenas na obtenção da deflexão geradas pelas ações de carga, os dados sobre tensões internas foram obtidos por meio do módulo adicional do programa chamado RF-GLASS, que permite modelar de forma mais simples o vidro laminado. Esse módulo adicional é uma ferramenta bastante potente para se projetar estruturas de vidro, visto que nele é possível considerar o valor da resistência ao cisalhamento das peças de vidro laminado e efetuar cálculos tanto para vidros monolíticos e laminados quanto para vidros duplos isolantes.

### 3.5 Verificação do custo da estrutura

Buscando levantar de forma mais precisa o valor da estrutura de fachada em questão, pesquisou-se nos sites dos fabricantes e fornecedores de vidro que atendem o mercado cearense, bem como conversou-se com algumas pessoas do setor de vendas de algumas das empresas para encontrar valores mais próximos do real. Calculou-se a média dos valores encontrados para então serem utilizados aqui. Dessa forma, levantou-se o valor de 250 R\$/m<sup>2</sup> para o vidro com laminação dupla, 300 R\$/m<sup>2</sup> para o vidro com laminação tripla, 55 R\$/litro de silicone estrutural e 493 reais por cada conjunto de *spider glass*. O quantitativo das peças, juntamente com o valor final encontrado, está presente na sessão referente a Resultados e Métodos que compõe este trabalho.

### 3.6 Resumo das análises executadas

De forma a organizar melhor e facilitar o entendimento do leitor quanto às situações de cálculo que estão presentes no trabalho, criou-se a Tabela 10 com as especificações referentes às análises empregadas.

Tabela 10 - Especificações das análises executadas.

ANÁLISES EXECUTADAS		Descrição
	ANÁLISE 01	<u>Painel 4m x 2,8m</u> (espessuras: 10, 12, 15 e 19 mm)
	ANÁLISE 02	<u>Painel 4m x 2,8m</u> considerando o <u>silicone estrutural</u> (espessura: 19mm)
	ANÁLISE 03	<u>Painel 3,21m x 2,4m</u> (espessuras: 10, 12, 15 e 19 mm)
	ANÁLISE 04	Espinha de vidro c/ painéis na <u>vertical</u> e largura de 30cm (laminação 121212.1,52[2])
	ANÁLISE 05	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 30cm (laminação 121212.1,52[2])
	ANÁLISE 06	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 30cm (laminação 151515.1,52[2])
	ANÁLISE 07	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 40cm (laminação 121012.1,52[2])

FONTE: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse das especificações de cada análise executada no presente trabalho (Tabela 10), preferiu-se trazer um resumo com todos os resultados encontrados referentes a cada uma delas no início desta sessão. Assim, a Tabela 11 correlaciona a situação de análise com seus respectivos resultados encontrados para deformações e tensões internas e já prepara o leitor para as discussões no decorrer dos tópicos desta mesma sessão.

Tabela 11 - Resumo dos resultados das deformações e tensões internas para as diferentes análises executadas.

	Descrição	Menor Deflexão Encontrada (mm) / Flambagem (mm)	Esforços Internos ( $\sigma_x$ )	Esforços Internos ( $\sigma_y$ )	Esforços Internos ( $\tau_{xy}$ )	Esforços Internos ( $\sigma_1$ )
ANÁLISE 01	<u>Painel 4m x 2,8m</u> (espessuras: 10, 12, 15 e 19 mm)	34,9 / -	-	-	-	-
ANÁLISE 02	<u>Painel 4m x 2,8m</u> considerando o <u>silicone estrutural</u> (espessura: 19mm)	11,5 / -	-	-	-	-
ANÁLISE 03	<u>Painel 3,21m x 2,4m</u> (espessuras: 10, 12, 15 e 19 mm)	14,5 / -	13,83	14,03	5,11	14,03
ANÁLISE 04	Espinha de vidro c/ painéis na <u>vertical</u> e largura de 30cm (laminação 121212.1,52(2))	14,4 / 4,4	24,34	39,40	9,91	42,94
ANÁLISE 05	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 30cm (laminação 121212.1,52(2))	19,4 / 6,1	34,27	52,86	13,51	57,70
ANÁLISE 06	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 30cm (laminação 151515.1,52(2))	-	27,45	42,34	10,82	46,26
ANÁLISE 07	Espinha de vidro c/ painéis na <u>horizontal</u> e largura de 40cm (laminação 121012.1,52(2))	8 / 2,6	25,83	39,88	11,93	43,81

FONTE: Elaborado pelo autor.

#### **4.1 Produtos disponíveis no mercado**

Após contatar três das maiores indústrias de vidro do Brasil, CEBRACE, VIVIX e AGC, pôde-se obter alguns detalhes importantes sobre o mercado de vidro no país, incluindo tipos de produtos disponíveis e limitadores técnicos que afetam as opções de material que os engenheiros têm acesso para trabalhar.

Os tamanhos de placas padrão que a indústria nacional trabalha é a de 3,21 metros por 2,2 metros ou a de 3,21 metros por 2,4 metros. Há disponibilidade de outros tamanhos, mas sob encomenda, o que pode levar ao aumento do valor da peça, algumas vezes. Quanto às espessuras disponíveis para as placas de vidro, o mercado trabalha com 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 e 19 milímetros para o vidro recozido que pode ser temperado posteriormente e passar pelo processo de laminação, utilizando composições com as espessuras de chapas anteriormente citadas. Em relação ao material intercalar da camada intermediária utilizado no processo de laminação do vidro laminado, o PVB é o material utilizado como padrão pela indústria, mas caso haja necessidade de utilização do SentryGlass no projeto existem beneficiadores que executam esse serviço de laminação, no entanto o valor do produto final pode ficar mais caro.

Ao tentar encontrar soluções interessantes para os clientes, deve-se levar em consideração alguns limitadores técnicos que a indústria e os fornecedores impõem. A utilização de painéis maiores é interessante quando se deseja cobrir áreas maiores diminuindo o número de juntas a serem criadas, no entanto só há disponibilidade de chapas jumbo (por exemplo, com 6 metros de comprimento e 3,21 metros de largura) nas regiões Sul e Sudeste devido a questões de logística. Logo, para a realidade atual do Nordeste, esse tipo de placa não se aplica ou elevaria muito o preço do projeto. Outro fator que limita algumas aplicações do vidro no estado é o tamanho dos fornos de têmpera dos beneficiadores, já que o processo de têmpera é feito na peça inteira e precisa do maquinário adequado. No Rio de Janeiro há um dos maiores fornos de têmpera da América do Sul, com capacidade para peças com dimensões entre 3,2 e 7,0 metros e pertencendo a empresa New Temper: Vidros Temperados, mas todo o gasto com transporte e logística poderiam culminar na inviabilidade do projeto. Na América do Norte e na Europa existem fornos com capacidade para peças de 10 até 12 metros de comprimento.

#### **4.2 Cálculo da carga de vento**

Aplicando-se a NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações, obteve-se os valores presentes na Tabela 12 como resultados.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados na NBR 6123.

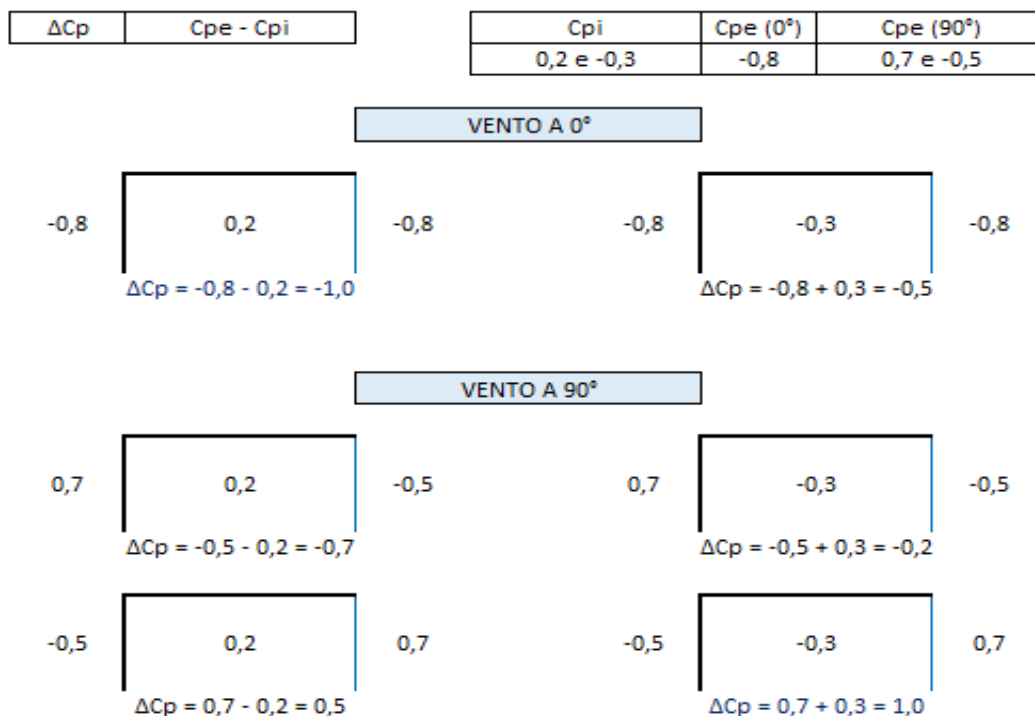
Vo (m/s)		30		
S1		1		
S2		Categoria		III
		Classe		C
S3		1		
Vk		Vo . S1 . S2 . S3		
qv		0,613 . Vk <sup>2</sup>		
h (m)	S2	Vk (m/s)	qv (N/m <sup>2</sup> )	qv (KN/m <sup>2</sup> )
5	0,82	24,6	370,96	0,37
10	0,88	26,4	427,24	0,43

FONTE: Elaborado pelo autor.

Consequentemente, a pressão dinâmica de 0,43 KN/m<sup>2</sup> encontrada será utilizada como a solicitação do vento. Conforme indicado na sessão de Metodologia, tem-se valores de C<sub>pi</sub> como sendo +0,2 e -0,3, bem como valores de C<sub>pe</sub> para vento a 0° como sendo -0,8 e para vento a 90 ° como sendo 0,7 e -0,5. Estando em posse dos valores de C<sub>pi</sub> e C<sub>pe</sub> pode-se calcular a variação entre os coeficientes de pressão interna e externa de forma a encontrar a pressão efetiva de sucção e sobrepressão do vento como resultado. A Figura 20 foi pensada para ajudar no entendimento do processo de cálculo e ilustrar de forma didática como o mesmo foi executado, evidenciando a linha em azul como sendo o lado da edificação em que está localizada a fachada. Em posse da pressão dinâmica, anteriormente calculada, e obtendo -1,0 e 1,0 como valores máximos das variações de pressão, pôde-se calcular a pressão efetiva como sendo a multiplicação da pressão dinâmica pelos máximos das variações e pressão. Assim, obteve-se a pressão efetiva de sucção como sendo -0,43 KN/m<sup>2</sup> e a de sobrepressão como sendo 0,43 KN/m<sup>2</sup>.



Figura 20 – Cálculo da variação entre os coeficientes de pressão interna e externa.



FONTE: Elaborado pelo autor.

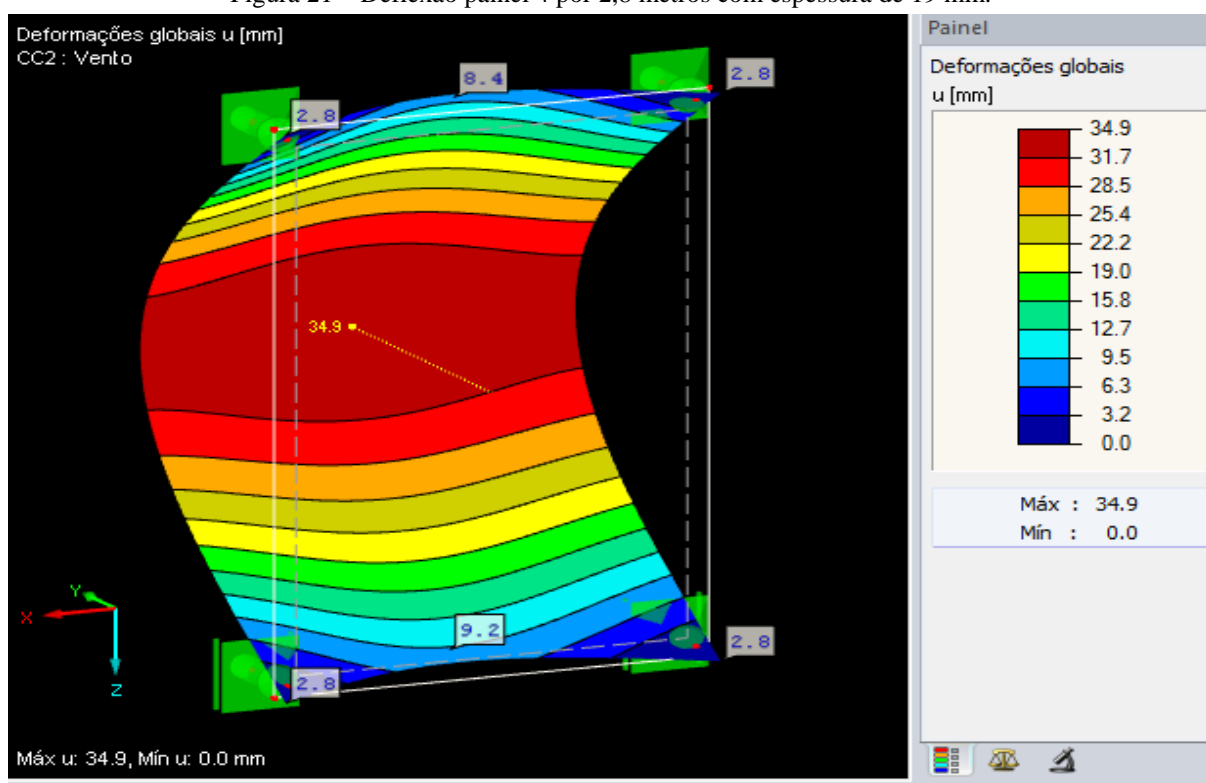
### 4.3 Verificação dos painéis de vidro

De início, buscou-se utilizar um painel com dimensões maiores para gerar menos juntas e conexões, cobrindo a fachada com a utilização de menos peças. Dessa forma, foram efetuados testes em um modelo de painel com 4 metros de comprimento por 2,8 metros de largura (dimensões escolhidas por serem múltiplas das existentes na fachada do shopping) e 10 milímetros de espessura com a ajuda do *software* RFEM 5, aplicando a teoria da flexão de placas sobre o modelo. No entanto, obteve-se resultados bastante elevados para as deflexões encontradas para o painel. Então, foram feitas modificações na espessura do painel de vidro e calculados os resultados das deflexões para as espessuras de 12, 15 e 19 milímetros, buscando encontrar um valor de deflexão menor que a espessura do painel conforme indicado pela norma prEN13474-2:2000. É importante relembrar que os painéis foram modelados como monolíticos conforme condições descritas na parte de Materiais e Métodos. Os resultados encontrados para as deflexões foram expostos de forma gráfica no Apêndice C deste trabalho.

Para o painel de 4 por 2,8 metros não foi possível encontrar deflexão menor que sua espessura levando em consideração a ação do vento de 0,43 KN/m<sup>2</sup>. Dessa forma, gerou-se curiosidade na obtenção de resultados para uma modelagem global da estrutura em que seria

avaliado o comportamento da mesma considerando o ganho de rigidez ao adicionar a interação entre os componentes ligados pelo silicone estrutural usado na vedação das juntas da fachada. Mesmo que esse tipo de modelagem pudesse trazer resultados que viabilizassem uma alternativa de projeto com painéis maiores, ela ainda precisaria ser testada em relação ao silicone escolhido e, devido a quantidade de detalhes necessários para aplicá-la, seria necessário mais tempo para sua finalização. Como a situação de cálculo para painéis apoiados nos quatro cantos foi assumida, ver Metodologia, então seguiu-se com os cálculos do mesmo, deixando a verificação global para uma próxima oportunidade. A Figura 21 ilustra a deflexão do painel 4 por 2,8 metros para uma espessura de 19mm.

Figura 21 – Deflexão painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm.

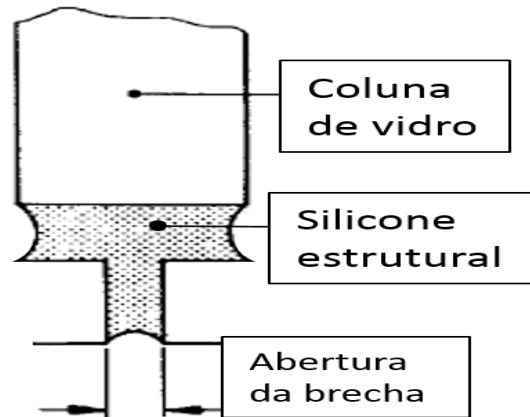


FONTE: Elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente sobre a curiosidade por uma análise global da estrutura e sabendo que a fachada precisa ser estanque ao vento e à água para cumprir sua função, optou-se por utilizar o silicone *Dow Corning® 995* da *Dow Corning*, cujas propriedades foram evidenciadas na Tabela 6 deste trabalho. De posse da sua rigidez, aproximadamente 0,50 MPa ou 500 kN/m<sup>2</sup>, decidiu-se verificar como esse material poderia ajudar na diminuição da deflexão do modelo de painel citado acima, considerando uma situação hipotética em que

haveria o preenchimento das brechas entre as colunas e os painéis. Essa consideração foi ilustrada na Figura 22.

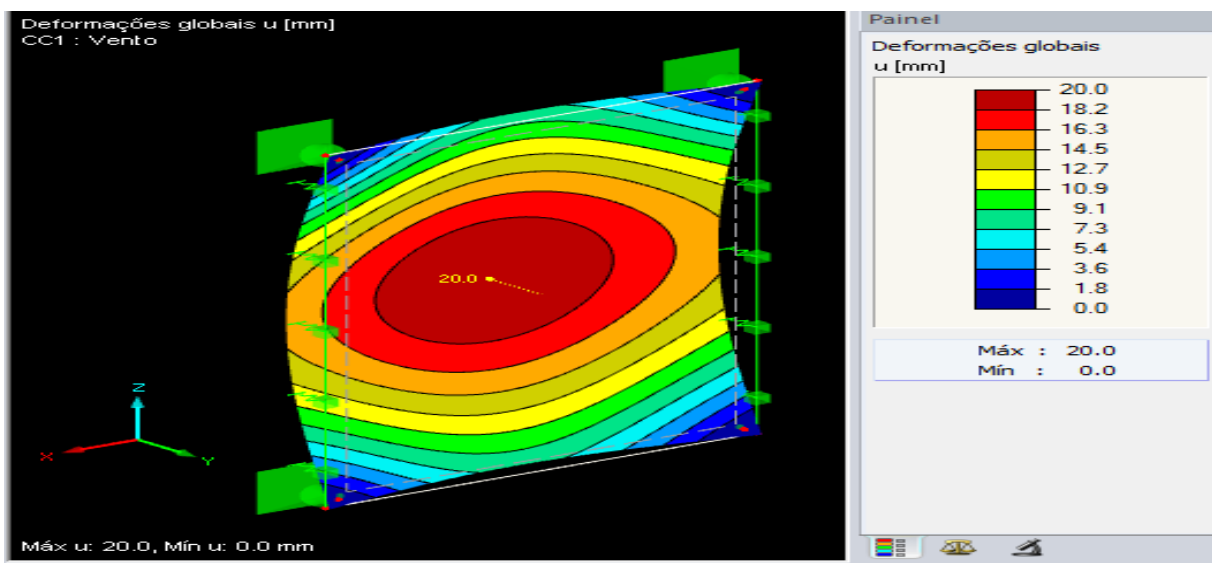
Figura 22 - Ilustração o preenchimento das brechas entre coluna de vidro e painéis.



FONTE: Adaptado da norma BS 6262:1982.

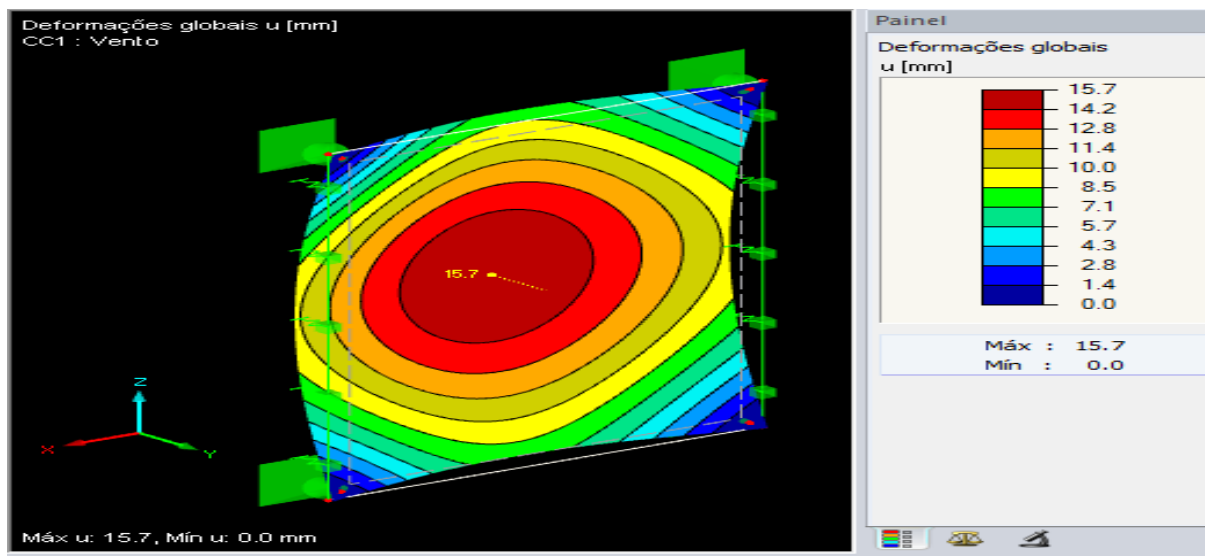
Para tanto, foram aplicados apoios contínuos nas bordas laterais do painel para simular a presença do silicone de vedação, mas considerou-se apenas a situação em que 5% (25 kN/m<sup>2</sup>) e 10% (10kN/m<sup>2</sup>) da rigidez do material seria mobilizada, aplicando esses percentuais como as constantes das molas dos apoios. Assim, a Figura 23 e a Figura 24 foram usadas para ilustrar melhor os resultados obtidos ao calcular os modelos considerando a presença do material de vedação.

Figura 23 – Deflexão do painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm considerando mobilizada 5% da resistência do silicone de vedação.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Deflexão do painel 4 por 2,8 metros com espessura de 19 mm considerando mobilizada 10% da resistência do silicone de vedação.

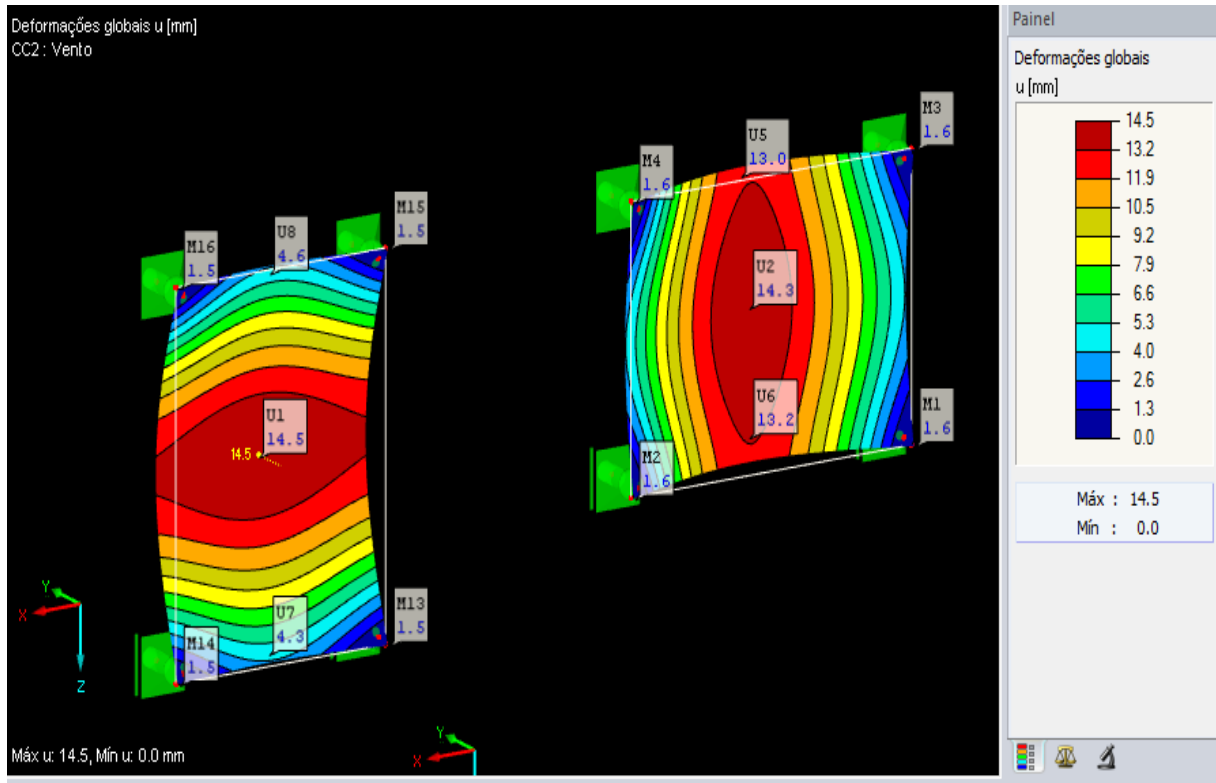


FONTE: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados gerados pelo programa, pôde-se perceber que a influência do material de vedação pode ajudar a restringir bastante as deformações dos painéis e, conseqüentemente, da estrutura como um todo, possibilitando a utilização de um painel maior. No entanto, ao considerar essa hipótese deve-se lembrar de checar quais solicitações serão geradas a mais ao calcular as colunas de vidro e realizar testes físicos em laboratório para obtenção de resultados mais conclusivos e detalhados sobre a influência do material de vedação em relação ao comportamento de deformação da estrutura como um todo.

Assim, como o painel de 4 por 2,8 metros não teve um resultado de deflexão menor que sua espessura utilizando a teoria da flexão de placas para as espessuras especificadas pelos fabricantes brasileiros (desconsiderando as situações que foram testadas quanto à influência do silicone estrutural para vedação na deformação do painel) decidiu-se verificar um modelo baseado no painel padrão de 3,21 por 2,4 metros indicado pelos fabricantes. Para tanto, buscou-se encontrar uma espessura desse painel que satisfizesse a hipótese de deflexão menor que a própria espessura, achando-a para uma especificação de 19mm de espessura como ilustrado na Figura 25. Os demais resultados encontrados para as espessuras menores foram expostos no Apêndice D. Modelou-se os painéis como peças monolíticas, vide Materiais e Métodos.

Figura 25 – Deflexão painel 3,21 por 2,4 metros com espessura de 19 mm.



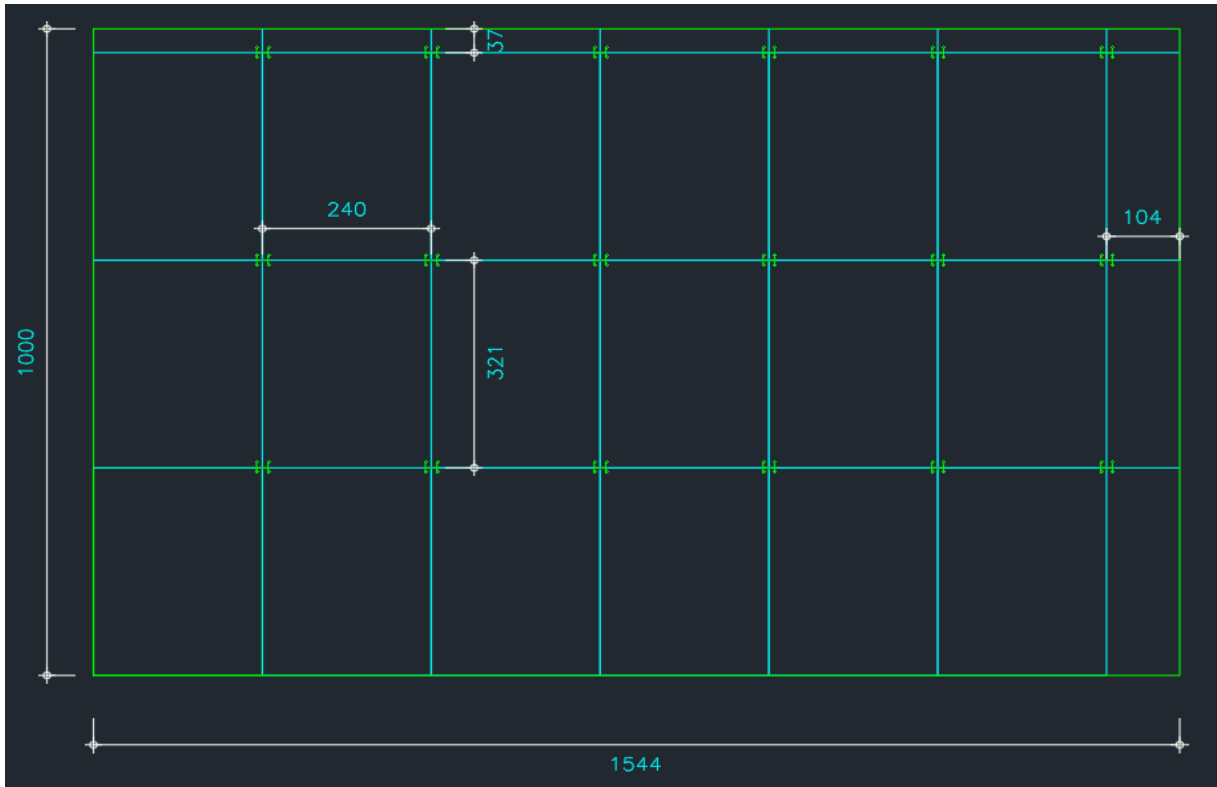
FONTE: Elaborado pelo autor.

Utilizando a teoria da flexão de placas, o painel de 3,21 por 2,4 metros e 19 milímetros de espessura obteve deflexões menores que o valor da sua espessura, então as especificações deste painel serão utilizadas para os cálculos futuros referente a fachada, mas não será levado em consideração a influência do silicone de vedação para os cálculos.

Pode-se notar que na figura acima, foram desenhados dois modelos do painel, um na horizontal e um na vertical para, além de validar os valores das reações nos apoios e possibilitar a percepção de como ficariam distribuídas as juntas referentes às colunas aletas de vidro que irão receber os esforços provenientes dos painéis, também conduzir ao modelo que deveria ser utilizado durante a validação das tensões solicitantes do painel.

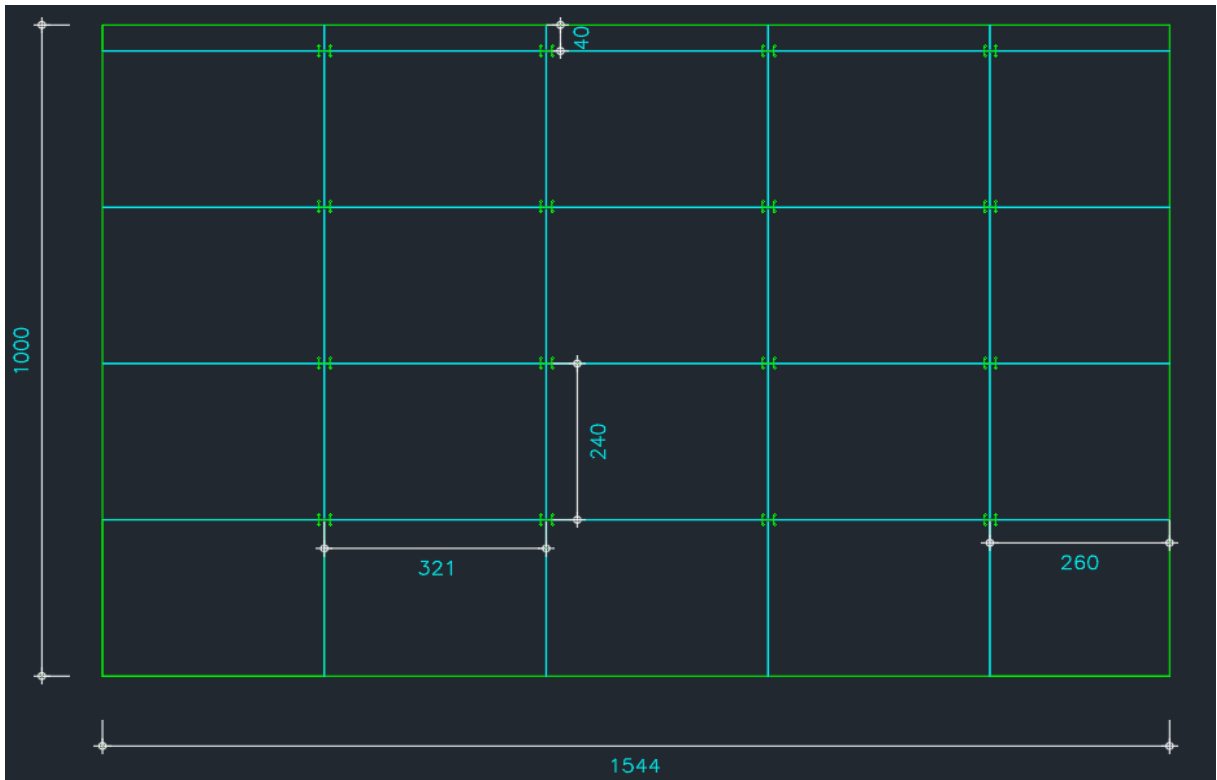
Entendendo a importância do posicionamento dos painéis para o produto final da fachada e visando despertar a questão do estudo de alternativas ao se avaliar diferentes situações de projeto, foram desenhados no AutoCAD dois esquemas simples para ilustrar melhor as situações impostas. A Figura 26 mostra a fachada caso os painéis fossem instalados na vertical e a Figura 27 caso os mesmos o fossem na horizontal, ressaltando que os detalhes em verde são as bordas da fachada e os *spiders*.

Figura 26 – Painéis da fachada posicionados na vertical (medidas em cm).



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Painéis da fachada posicionados na horizontal (medidas em cm).



FONTE: Elaborado pelo autor.

Aqui cabe um breve comentário quanto à arquitetura das situações expostas por entender que a paginação não entregou uma composição tão agradável aos olhos e, por isso, pensou-se em comentar esse fato como um lembrete sobre a importância da integração entre estrutura e arquitetura ao se projetar. Utilizando os desenhos, pôde-se avaliar mais facilmente os pontos positivos e negativos de cada situação. Por exemplo, ao se colocar os painéis na vertical, observa-se como ponto negativo que será necessário a utilização de 6 colunas de vidro para suportar a fachada, já que as colunas são instaladas nas juntas verticais entre os painéis que vão do piso ao teto. As colunas de vidro são um dos componentes mais caros da fachada e gerar um número maior delas pode elevar bastante o preço do projeto, podendo inviabilizá-lo. Por outro lado, com os painéis na vertical geram-se menos juntas de ligação, 3 ao todo, entre as partes que formam a coluna de vidro e reduz o valor a ser gasto com ligações. Ao utilizar os painéis na horizontal o número de colunas cai para 4, mas as juntas de ligação que formam as colunas passariam a ser 4 o que demandaria uma atenção maior referente ao dimensionamento e comportamento dessas ligações. Assim, decidiu-se testar os painéis da fachada posicionando-os tanto na vertical quanto na horizontal.

Validada a deflexão do painel a ser utilizado na fachada e decidido verificar os dois posicionamentos que o mesmo pode ter, iniciou-se a validação das tensões internas resistidas pelo painel devido às solicitações de vento. Para tanto, fez-se uso do módulo adicional RF-GLASS presente no *software* RFEM 5, módulo este que foi especificamente desenvolvido para cálculo de componentes e estruturas de vidro. Nele é possível obter análises de forma global ou local da estrutura, montar de forma mais prática modelos computacionais para vidros monolíticos, laminados e vidros duplos isolantes, além de possibilitar a análise dos componentes de vidro por meio das tensões presentes em cada uma de suas camadas.

Durante a verificação das tensões presentes no modelo do painel de vidro foram aplicadas as propriedades do vidro temperado ao material componente da superfície do painel. O vidro temperado possui uma tensão admissível à flexão de 120 MPa, mas foi aplicado um fator de segurança ao material de 2,5 sugerido pela norma prEN 13474-1:1999 e a tensão utilizada como admissível foi 48 MPa. O carregamento considerado foi o referente ao ELU (o *software* o denomina de CR1) e pôde-se obter as tensões referentes a três regiões do painel, a superior, a média e a inferior. As tensões obtidas foram relacionadas com a tensão estabelecida como sendo a admissível do painel e obteve-se um resultado satisfatório em que todas as relações entre tensões mencionadas foram menores que 1. Os resultados são referentes aos painéis de vidro laminado posicionados tanto na vertical quanto na horizontal.

Assim, para ilustrar de forma mais didática, a Figura 28 mostra a relação entre as tensões internas e a tensão admissível para o painel de vidro laminado posicionado tanto na vertical quanto na horizontal.

Figura 28 – Relações entre tensões presentes no painel 3,21 por 2,4 metros (vertical e horizontal).

2.1 Relação de tensões máx. por carregamento

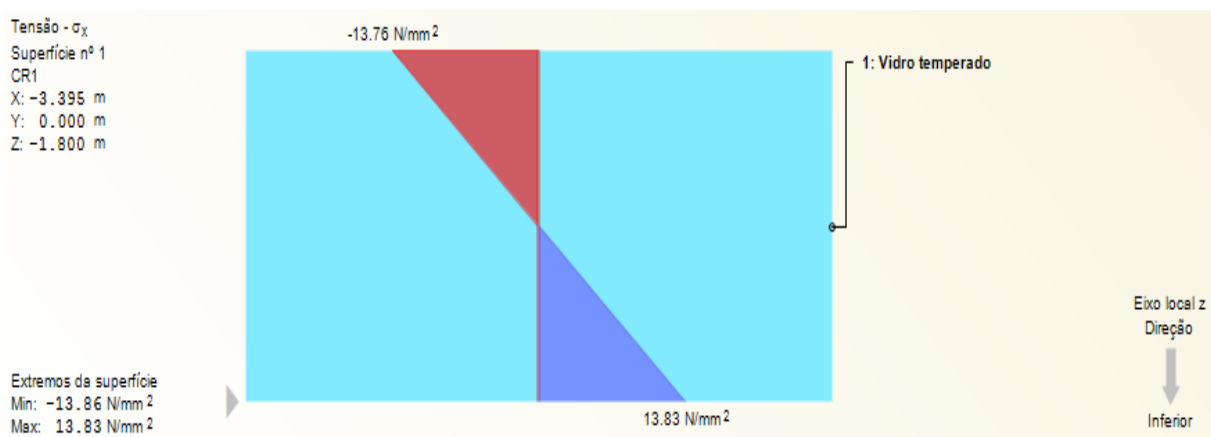
Car- ga	Superf. n°		Coordenadas dos pontos [m]			n°	Camada		Tensões [N/mm <sup>2</sup> ]			Relação [.]	Gráfico no relatório	
	A	B	C	D	E		F	G	H	I	J			K
	Superf. n°	Ponto n°	X	Y	Z		n°	z [mm]	Lado	Símbolo	Existente	Limite		
CR1	ULS - Normal													
	1	145	-3.395	0.000	-1.800	1	19.00	Inferior	$\sigma_x$	13.83	48.00	0.29	<input type="checkbox"/>	
	2	3266	3.420	0.000	-2.595	1	19.00	Inferior	$\sigma_y$	14.03	48.00	0.29	<input type="checkbox"/>	
	2	3239	3.420	0.000	-3.949	1	9.50	Médio	$\tau_{yz}$	-1.40			<input type="checkbox"/>	
	1	59	-2.091	0.000	-4.200	1	9.50	Médio	$\tau_{xz}$	-1.43			<input type="checkbox"/>	
	1	233	-4.700	0.000	-4.149	1	19.00	Inferior	$\tau_{xy}$	-5.11			<input type="checkbox"/>	
	2	3266	3.420	0.000	-2.595	1	19.00	Inferior	$\sigma_1$	14.03	48.00	0.29	<input type="checkbox"/>	
	1	2338	-2.442	0.000	-3.000	1	19.00	Inferior	$\sigma_2$	6.91	48.00	0.14	<input type="checkbox"/>	

Relação de tensões máx.    
 Valor da tensão máx.    
Relação máx.: 0.29 ≤ 1    
    
    
    

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Já a Figura 29 mostra o gráfico da tensão máxima normal devido à flexão na direção X (Apêndice E evidencia o gráfico das demais tensões) e a Figura 30 ilustra melhor a distribuição da tensão máxima normal em relação ao painel como um todo (Apêndice F evidencia a distribuição das demais tensões em relação ao painel).

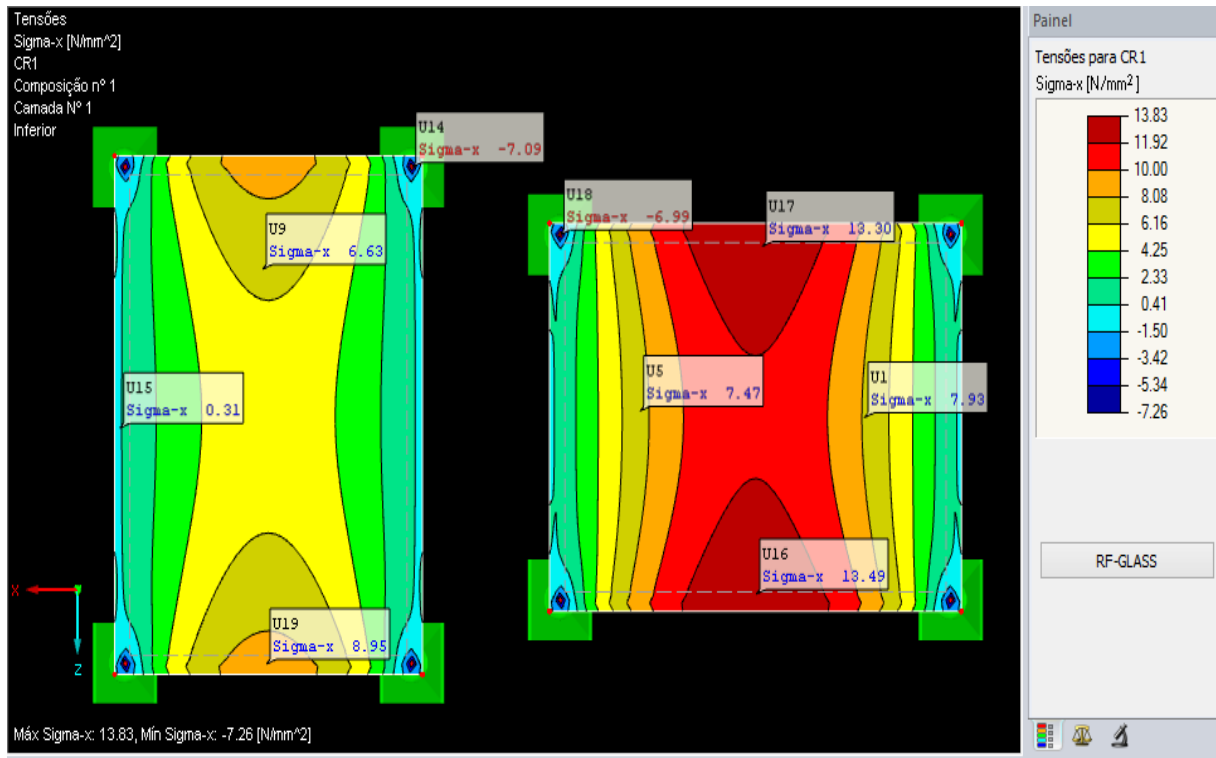
Figura 29 – Gráfico do local de tensão máxima normal devido à flexão na direção X (região inferior do painel).



FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.



Figura 30 – Distribuição das tensões normais devido à flexão na direção X (região inferior do painel).



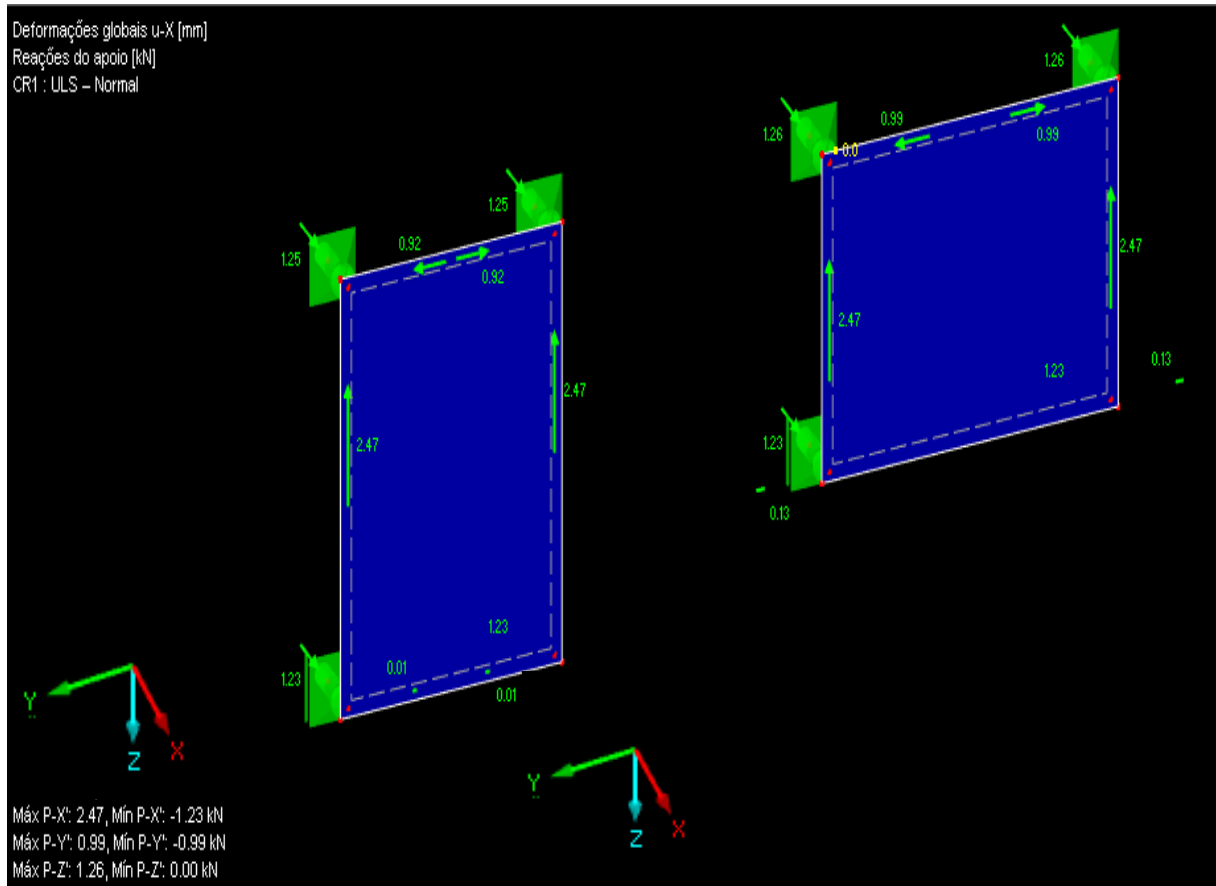
FONTE: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados referentes às tensões atuantes sobre o painel, pôde-se validar sua integridade quanto ao suporte das cargas de projeto a que foi submetido. No entanto, fica evidente a possibilidade de otimizá-lo quando se verifica que a relação entre as tensões solicitantes e a tensão admissível utilizada culminou em 0,53 podendo chegar até 1. Optou-se por seguir com essa opção de painel que gasta um pouco mais de material, porque mesmo as tensões internas passando com folga, os critérios de deformação só passaram para a espessura de 19mm.

#### 4.4 Verificação das colunas aletas de vidro

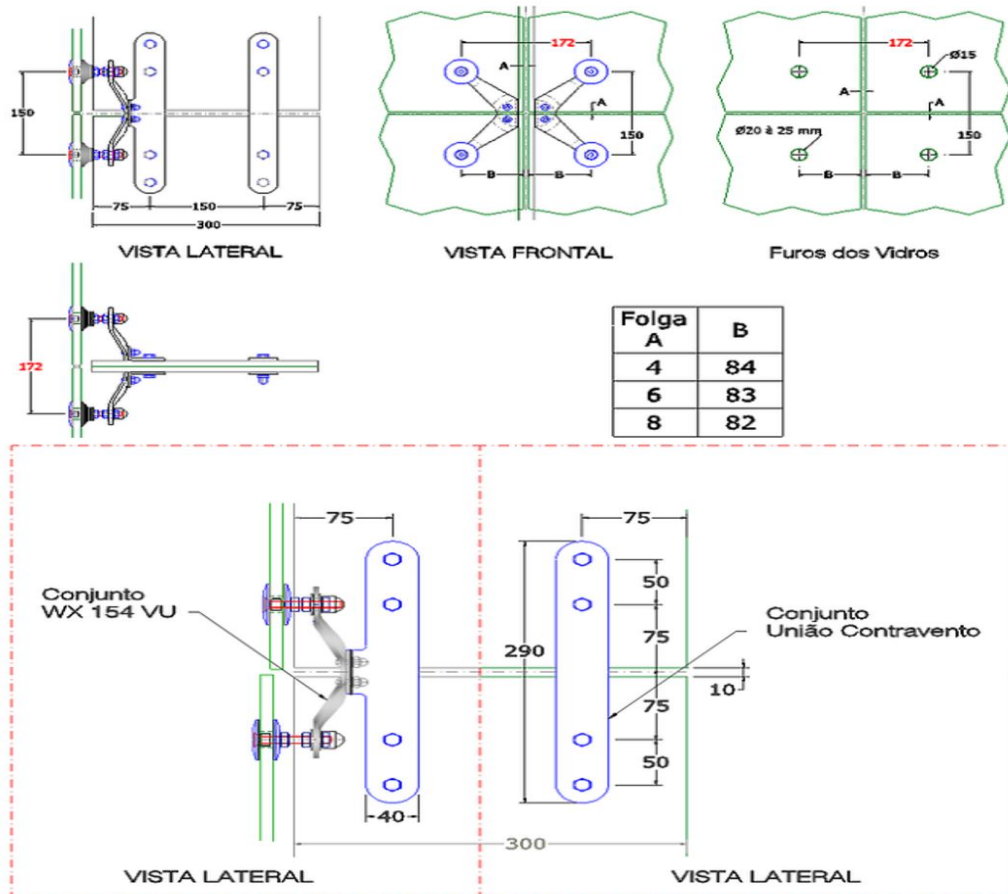
Após a validação do painel de 3,21 por 2,4 metros com 19 milímetros de espessura como sendo a opção a ser colocada na fachada, agora é possível verificar o comportamento da coluna aleta de vidro quanto às solicitações provenientes dos painéis. Para tanto, utilizou-se as reações de apoio obtidas conforme o carregamento do vento e peso próprio da estrutura. Na Figura 31 ilustra-se as reações de apoio consideradas nas situações de painéis na vertical e horizontal.

Figura 31 – Reações de apoio para painéis na vertical e horizontal.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Os elementos responsáveis por transferir as cargas dos painéis para a coluna de vidro são os *spiders*. Esses elementos serão modelados como indeformáveis na concepção do modelo da coluna de vidro e a validação de qual tipo de *spider* seria melhor utilizar devido ao carregamento deve ficar para uma abordagem posterior. O modelo WX 154 VU foi empregado apenas como base para o desenho da ligação entre os componentes da coluna de vidro e para estabelecer o local onde estariam situados os furos nos painéis, mostrando as distâncias em que os apoios pontuais foram aplicados durante a modelagem. A Figura 32 vem ilustrar os parâmetros usados na modelagem das ligações entre as partes componentes da coluna e ilustrar o *spider* utilizado de forma mais clara. A folga A assumida para a modelagem foi a de 8mm.

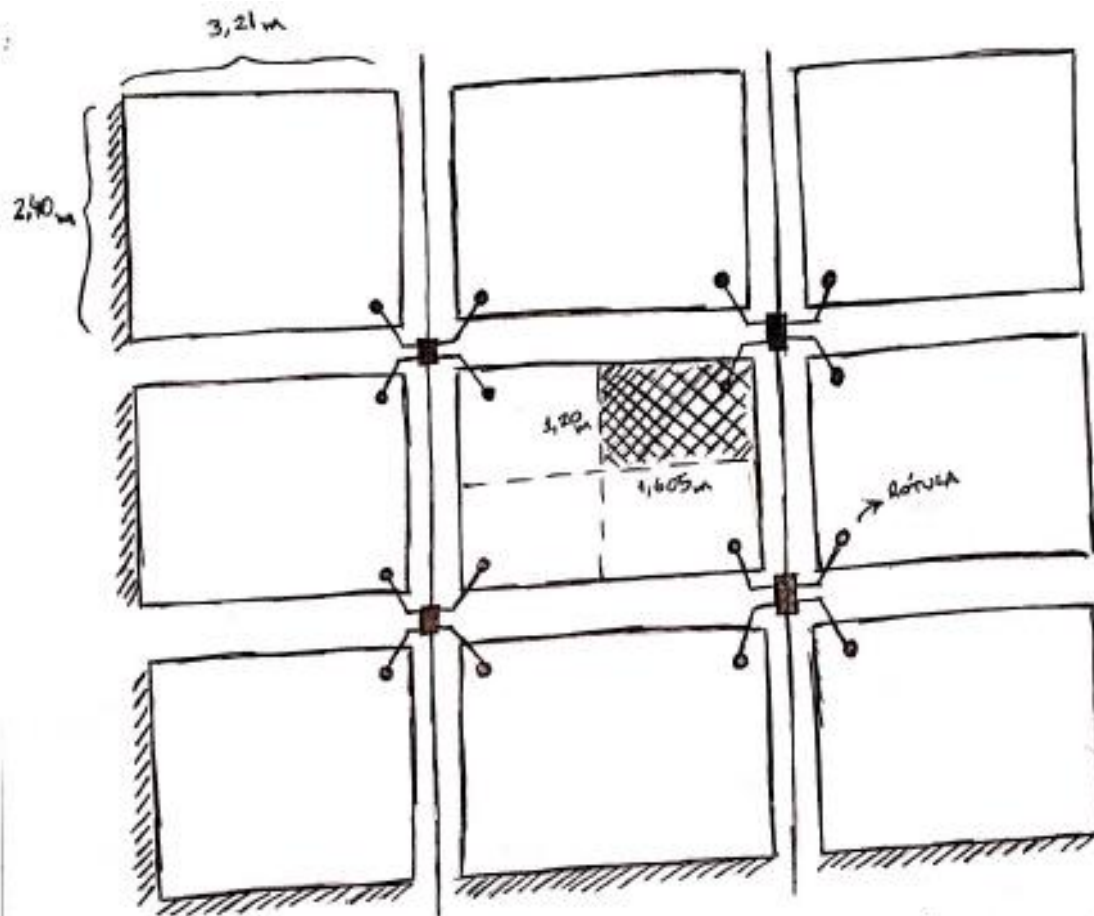
Figura 32 – Especificações do *Spider* WX 154 VU.

FONTE: Adaptado do catálogo da empresa Walmetal.

Admitiu-se que todos os *spiders* eram compostos por 4 hastes para a fachada em questão e adotou-se como referencial do sentido positivo as direções do eixo de coordenadas presente na Figura 31. Dessa forma, as reações de apoio resultantes do modelo do painel escolhido foram aplicadas como ações solicitantes da coluna de vidro para cada haste correspondente, tomando o cuidado de aplicá-las com o sentido contrário para que entrassem como solicitações do elemento. Com o objetivo de indicar de forma mais clara as solicitações atribuídas aos *spiders* e repassadas às colunas de vidro, foi concebida a Figura 33.

É importante salientar que buscou-se encontrar a carga resistida pelo *spider* escolhido em ensaios para avaliar a possibilidade de usá-lo como opção definitiva. No entanto, encontrou-se que para alguns sentidos de aplicação das solicitações a opção de *spider* não resistiria conforme averiguado no relatório de ensaios do mesmo que foi disponibilizado pela empresa Walmetal e presente no Anexo B deste trabalho. Como o mesmo foi considerado sendo elemento indeformável na modelagem da coluna e apenas para fins de desenho, optou-se por continuar utilizando as características dessa opção de *spider*.

Figura 33 - Ilustração das cargas utilizadas nas colunas.



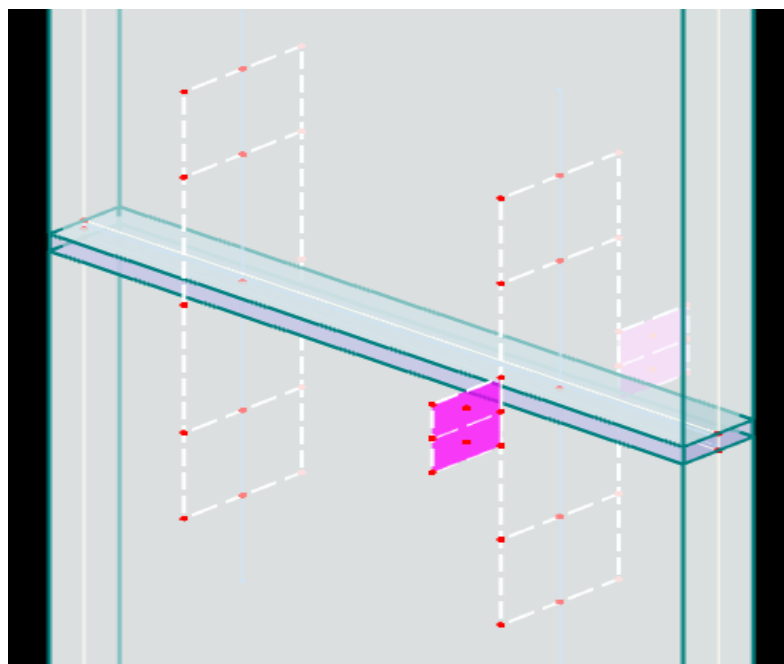
- ÁREA DOS PAINÉIS:  $A_p = 3,21 \cdot 2,4 = 7,704 \text{ m}^2$  (ESPESURA:  $19 \text{ mm} = 0,019 \text{ m}$ )
- VENTO:  $q_v = 0,43 \text{ kN/m}^2 = 430 \text{ N/m}^2$
- PARA O RETÂNGULO HACHURADO:  $A = 1,2 \cdot 1,405 = 1,686 \text{ m}^2$   
 $F = 430 \cdot 1,686 \Rightarrow F = 725,58 \text{ N}$  (POR FURO)
- PESO ESPECÍFICO DO VIDRO:  $\rho_v = 25.000 \text{ N/m}^3$
- VOLUME DE VIDRO POR PAINEL:  $V_v = A_p \cdot e_p = 7,704 \cdot 0,019$   
 $V_v = 0,1464 \text{ m}^3$
- PESO PRÓPRIO PARA CADA FURO SUPERIOR ( $P_f$ )  
 $= \frac{25.000 \cdot 0,1464}{2} = 1830 \text{ N}$
- AÇÕES COM SEUS RESPECTIVOS FATORES DE MAJORAÇÃO:
- $F = 725,58 \cdot \textcircled{1,5} = 1088,37 = 1,09 \text{ kN} \cdot \boxed{1,4} = 1,53 \text{ kN}$
- $P_f = 1830 \cdot \textcircled{1,35} = 2470,5 = 2,47 \text{ kN} \cdot \boxed{1,4} = 3,46 \text{ kN}$
- → FATOR APLICADO AO PAINEL / □ → FATOR APLICADO À COLUNA



É interessante colocar que a escolha da ligação utilizada entre as partes componentes da coluna pode ser aperfeiçoada em uma abordagem futura. As ligações entre os componentes da coluna de vidro recebem uma camada de silicone estrutural para permitir uma melhor trabalhabilidade entre as partes, bem como a expansão e retração térmica. Objetivando ilustrar de forma mais clara como ficou modelada a ligação entre os elementos componentes da coluna, a Figura 34 foi concebida. A parte cinza claro representa o vidro, a parte mais cinza escuro representa o silicone estrutural, as linhas brancas pontilhadas representam a parte em aço da união de contravento da ligação entre os vidros como denominado na Figura 32 e as partes em rosa representam o encontro da haste do *spider* com a união de contravento, sendo estas partes em rosa o local onde as solicitações provenientes dos painéis são transferidas para a colunas de vidro.

Foram modeladas duas colunas de vidro, uma considerando os painéis de vedação na vertical e a outra os considerando na horizontal. Cada uma delas com 10m de altura e 30cm de largura. Com espessuras totalizando 39mm de vidro laminado composto por três lâminas de vidro temperado com 12mm cada e duas camadas de intercalar composto por SGP com 1,52mm cada. Para os cálculos da coluna de vidro foi considerado um fator de 1,5 para as cargas permanentes e de 1,4 para as cargas variáveis. Quando se observa o fator geral aplicado às ações que solicitam a coluna, tem-se 2,0 (1,35x1,5) para as ações permanentes e 2,0 (1,5x1,35) para as ações variáveis ao considerar os fatores anteriormente aplicados para os painéis.

Figura 34 – Detalhe de como ficou modelada a ligação entre os vidros componentes da coluna.



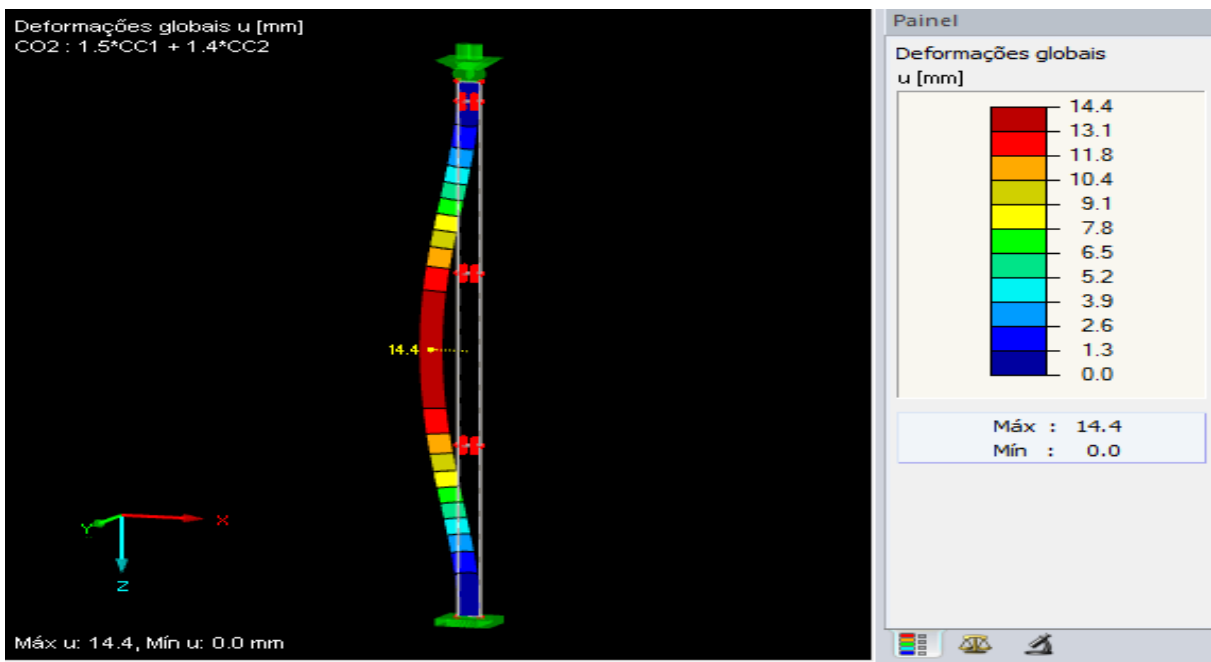
FONTE: Elaborado pelo autor.

Esse fator geral de 2,0 aplicado no cálculo da coluna foi baseado na entrevista do engenheiro Maurício Margaritelli, nome forte no mercado de vidros nacional, para uma das revistas digitais mais lidas no ramo da construção civil, a AECweb. De acordo com Margaritelli (20--, p.1):

Em uma obra de piscina em vidro, onde há grande pressão sobre o material, trabalha-se com fator de segurança 4, ou seja, há uma resistência quatro vezes maior à tensão a que está submetido. Para fachada convencional, é possível pensar em fator de segurança de 60%. Já para as colunas, o mínimo tem que ser 100% e estarão submetidas à metade da força a que resiste. Já nas vigas, o mínimo é 3, segurança que está acima das cargas estipuladas por normas técnicas.

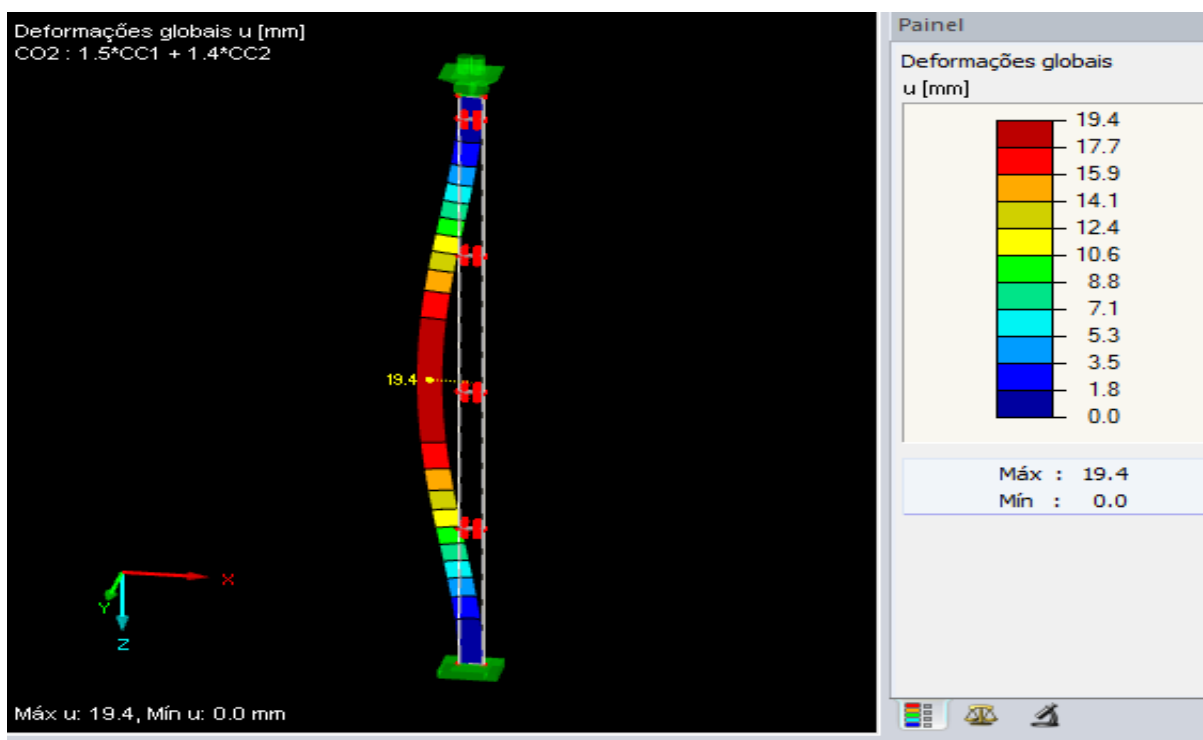
É importante salientar quanto ao rigor perante às tolerâncias dentro do processo de instalação das peças, visto que, em se tratando de vidro, erros desse tipo podem transformar qualquer fator de segurança em zero de forma imediata. Assim, iniciou-se calculando as deformações para a coluna de vidro que considera os painéis na vertical e obteve-se os resultados da deflexão relativa ao eixo X como evidenciado na Figura 35. Já a Figura 36 mostra a deformada referente a deflexão da coluna com os painéis posicionados na horizontal.

Figura 35 – Deflexão relativa ao eixo X (Painel Vertical).



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Deflexão relativa ao eixo X (Painel Horizontal).



FONTE: Elaborado pelo autor.

Posicionando os painéis na vertical gera-se uma deflexão no eixo X de 14,4mm. Admitindo que a deformação limite é a dimensão longitudinal do painel (3210mm) sobre 200, conforme norma prEN 13474-2:2000, tem-se um limite de 16,05mm. Como 14,4mm é menor que 16,05mm, a deflexão imposta à coluna de vidro atende a esse requisito. No entanto, ao posicionar os painéis na horizontal observa-se uma deflexão maior (19,4mm) para uma dimensão longitudinal menor (2400mm) que gera um limite de deflexão de 12mm. Como 19,4mm é maior que 12mm, entende-se que a utilização do painel na horizontal não atende ao critério de deformações estabelecido. Como forma de contornar esse valor mais elevado de deflexão ao utilizar os painéis na horizontal, pode-se empregar um mecanismo que utiliza cabos tensionados para dar maior suporte a estrutura e, conseqüentemente, reduzir bastante as deformações sofridas por ela. No entanto, é de grande importância realizar estudos mais aprofundados para o dimensionamento do referido mecanismo de forma a obter resultados precisos. Estudos estes que podem ser realizados em trabalhos futuros. A Figura 37 vem ilustrar a empregabilidade do mecanismo.

Figura 37 – Mecanismo de aço para redução de deflexões.



FONTE: Portal da empresa Enclos.

Como mencionado anteriormente, modelou-se as camadas do vidro laminado utilizando o módulo adicional RF-GLASS de forma a obter uma laminação com as especificações ilustradas na Figura 38, aplicando-a inicialmente para os componentes das colunas em que os painéis foram posicionados na vertical e na horizontal.



Figura 38 – Laminação do vidro empregado nas colunas.

Camada nº	A	B	C	D	E	F	G	H
	Tipo de camada	Designação do material	Espessura t [mm]	Tensão limite $\sigma_{\text{limit}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de elast. E [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de rigidez G [N/mm <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson v [-]	Peso espec $\gamma$ [kN/m]
1	Vidro	Vidro temperado	12.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
2	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
3	Vidro	Vidro temperado	12.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
4	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
5	Vidro	Vidro temperado	12.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
6								
7								
8								
9								

1: Vidro temperado  
 2: Polímero Intercalar\_SentryGlass Plus  
 3: Vidro temperado  
 4: Polímero Intercalar\_SentryGlass Plus  
 5: Vidro temperado

Eixo local z  
 Direção  
 Inferior

Info  
 Camada nº: 0  
 Peso da superfície: - [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\Sigma$  Espessura: 39.04 [mm]  
 $\Sigma$  Peso da superfície: 0.933 [kN/m<sup>2</sup>]

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Ao iniciar, executou-se os cálculos utilizando o programa sobre a coluna concebida com os painéis posicionados na vertical. Nela também se obteve um resultado satisfatório quanto aos limites de tensões resistidas pelo material como verificado na Figura 39, ilustrando os gráficos de tensões da coluna no Apêndice G do presente trabalho. No entanto, com os painéis na vertical necessita-se de uma quantidade maior de colunas para suportar a fachada, o que torna o projeto mais caro, e, além disso, utilizar mais colunas diminui o impacto visual que se quer dar a fachada devido a presença de tantos elementos compondo o conjunto estrutural da mesma.

Figura 39 - Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro (posicionamento vertical).

2.1 Relação de tensões máx. por carregamento

Car- ga	A	B	C			D	E	F	G	H	Tensões [N/mm <sup>2</sup> ]		K	L	M
	Superf. n <sup>o</sup>	Ponto n <sup>o</sup>	Coordenadas dos pontos [m]			X	Y	Z	n <sup>o</sup>	z [mm]	Lado	Símbolo	Existente	Limite	Relação [.]
CR1	ULS - Normal														
	9	37	22.075	0.000	-11.730	5	39.04	Inferior	$\sigma_x$		24.34	48.00	0.51	<input type="checkbox"/>	
	9	37	22.075	0.000	-11.730	5	39.04	Inferior	$\sigma_y$		39.40	48.00	0.82	<input type="checkbox"/>	
	9	31	21.775	0.000	-11.730	3	19.52	Médio	$\tau_{yz}$		0.00			<input type="checkbox"/>	
	9	1402	21.925	0.000	-11.730	3	19.52	Médio	$\tau_{xz}$		0.00			<input type="checkbox"/>	
	9	120	22.000	0.000	-11.480	1	0.00	Superior	$\tau_{xy}$		9.91			<input type="checkbox"/>	
	9	37	22.075	0.000	-11.730	5	39.04	Inferior	$\sigma_1$		42.94	48.00	0.89	<input type="checkbox"/>	
	9	37	22.075	0.000	-11.730	5	39.04	Inferior	$\sigma_2$		20.81	48.00	0.43	<input type="checkbox"/>	

Relação de tensões máx.   
 Valor da tensão máx.   
Relação máx.: 0.89 ≤ 1   
   
   
   

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Já, ao se testar a coluna gerada posicionando os painéis de vedação na horizontal, obteve-se um resultado desfavorável quanto aos limites de tensões resistido pelos componentes da coluna como mostrado na Figura 40, ilustrou-se os gráficos de tensões da coluna no Apêndice H do presente trabalho. Contudo, como essa forma de posicionamento dos painéis acaba gerando menos colunas para suportar a fachada e traz um efeito estético e visual melhor, optou-se por buscar modificações que possibilitassem a aplicação dessa mesma opção.

Figura 40 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro (posicionamento horizontal).

2.1 Relação de tensões máx. por carregamento

Car- ga	A	B	C			D	E	F	G	H	Tensões [N/mm <sup>2</sup> ]		K	L	M
	Superf. n <sup>o</sup>	Ponto n <sup>o</sup>	Coordenadas dos pontos [m]			X	Y	Z	n <sup>o</sup>	z [mm]	Lado	Símbolo	Existente	Limite	Relação [.]
CR1	ULS - Normal														
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_x$		34.27	48.00	0.71	<input type="checkbox"/>	
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_y$		52.86	48.00	1.10	<input type="checkbox"/>	
	1	107	35.850	-0.047	-7.015	3	19.52	Médio	$\tau_{yz}$		0.00			<input type="checkbox"/>	
	50	1482	36.000	-0.047	-16.955	3	19.52	Médio	$\tau_{xz}$		0.00			<input type="checkbox"/>	
	50	199	36.075	-0.047	-16.675	5	39.04	Inferior	$\tau_{xy}$		13.51			<input type="checkbox"/>	
	50	43	35.850	-0.047	-16.955	3	13.52	Superior	$\tau_{max}$		0.00			<input type="checkbox"/>	
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_1$		57.70	48.00	1.20	<input type="checkbox"/>	
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_2$		29.42	48.00	0.61	<input type="checkbox"/>	

Relação de tensões máx.   
 Valor da tensão máx.   
Relação máx.: 1.20 > 1   
   
   
   

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Assim, testou-se aumentar a espessura das camadas de vidro temperado que compõe o laminado para achar uma opção que satisfizesse os limites de tensões pré-estabelecidos. O programa foi executado algumas vezes para verificar se as modificações aplicadas geravam resultados satisfatórios, mas só se obteve resposta positiva quando se aplicou uma espessura de 15mm para as três camadas de vidro temperado que compõem o laminado, resultando em uma laminação conforme ilustrada na Figura 41.

Figura 41 – Camadas utilizadas na nova opção de laminação.

Camada n°	A	B	C	D	E	F	G	H
Camada n°	Tipo de camada	Designação do material	Espessura t [mm]	Tensão limite $\sigma_{limit}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de elast. E [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de rigidez G [N/mm <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson $\nu$ [-]	Peso espec $\gamma$ [kN/m]
1	Vidro	Vidro temperado	15.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
2	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
3	Vidro	Vidro temperado	15.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
4	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
5	Vidro	Vidro temperado	15.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
6								
7								
8								
9								

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Os resultados gerados ao utilizar a nova opção de laminação foram expostos na Figura 42. Os gráficos referentes aos esforços internos para a nova opção de laminação foram disponibilizados no Apêndice I deste trabalho. Os resultados foram bastante satisfatórios em relação aos esforços internos, mas ainda deixaram a desejar no critério de deformação.

Buscando validar uma opção mais otimizada quanto ao posicionamento dos painéis na horizontal, testou-se o efeito das deformações e tensões na coluna ao variar sua largura de 30cm para 40cm, mantendo a espessura de 15mm para as camadas de vidro temperado na laminação. O resultado obtido foi muito conservador e notou-se que muito material estaria sendo desperdiçado, então iniciou-se uma sessão de novos testes para encontrar resultados seguros e mais econômicos.

Figura 42 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro utilizando nova opção de laminação (posicionamento horizontal).

2.1 Relação de tensões máx. por carregamento

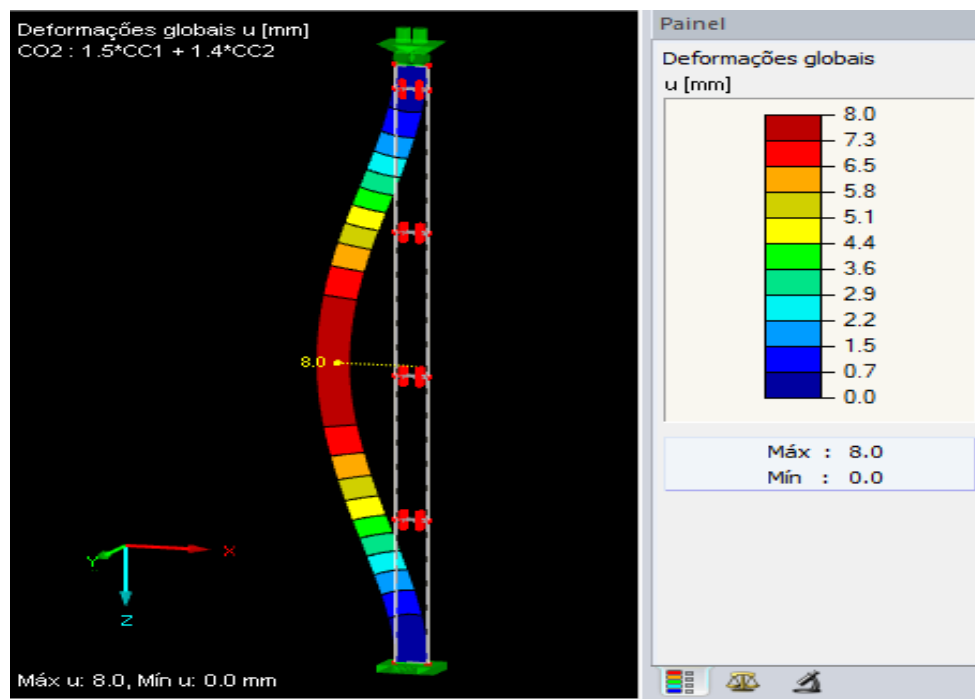
Car-ga	A	B	C			D	E	F	G	H	I		J	K	L	M
	Superf. n°	Ponto n°	Coordenadas dos pontos [m]			X	Y	Z	n°	z [mm]	Lado	Símbolo	Tensões [N/mm <sup>2</sup> ]	Existente	Limite	Relação [-]
CR1	ULS - Normal															
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_x$			27.45	48.00		0.57	<input type="checkbox"/>
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_y$			42.34	48.00		0.88	<input type="checkbox"/>
	50	43	35.850	-0.047	-16.955	3	24.02	Médio	$\tau_{yz}$			0.00				<input type="checkbox"/>
	50	1482	36.000	-0.047	-16.955	3	24.02	Médio	$\tau_{xz}$			0.00				<input type="checkbox"/>
	50	199	36.075	-0.047	-16.675	5	48.04	Inferior	$\tau_{xy}$			10.82				<input type="checkbox"/>
	50	43	35.850	-0.047	-16.955	3	16.52	Superior	$\tau_{max}$			0.00				<input type="checkbox"/>
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_1$			46.22	48.00		0.96	<input type="checkbox"/>
	50	44	36.150	-0.047	-16.955	1	0.00	Superior	$\sigma_2$			23.57	48.00		0.49	<input type="checkbox"/>

Relação de tensões máx.   
 Valor da tensão máx.   
Relação máx: 0.96 ≤ 1   
   
   
   

FONTE: Adaptado do software RFEM 5.

Partindo da bateria de novos testes, pôde-se chegar ao resultado de deflexão ilustrado na Figura 43, utilizando a opção de laminação melhorada indicada na Figura 44 e encontrando os resultados de esforços internos dispostos na Figura 45. Os gráficos referentes aos esforços internos para a essa opção de coluna de largura maior foram disponibilizados no Apêndice J deste trabalho.

Figura 43 – Deflexão em X da coluna com 40cm de largura.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Laminação melhorada (posicionamento horizontal).

Camada n°	A	B	C	D	E	F	G	H
Camada n°	Tipo de camada	Designação do material	Espessura t [mm]	Tensão limite $\sigma_{limit}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de elast. E [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de rigidez G [N/mm <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson $\nu$ [-]	Peso espec $\gamma$ [kN/m]
1	Vidro	Vidro temperado	10.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
2	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
3	Vidro	Vidro temperado	8.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
4	Folha	Polímero Intercalar_SentryGlass Plus	1.52		324.000	110.000	0.473	
5	Vidro	Vidro temperado	10.00	120.000	70000.000	28455.300	0.230	
6								
7								
8								
9								

1: Vidro temperado  
2: Polímero Intercalar\_SentryGlass Plus  
3: Vidro temperado  
4: Polímero Intercalar\_SentryGlass Plus  
5: Vidro temperado

Eixo local z  
Direção  
Inferior

Info  
Camada n°: 1  
Peso da superfície: 0.250 [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\Sigma$  Espessura: 31.04 [mm]  
 $\Sigma$  Peso da superfície: 0.733 [kN/m<sup>2</sup>]

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

Figura 45 – Tensões internas aos elementos utilizados na composição da coluna de vidro ao variar sua largura e laminação (posicionamento horizontal).

2.1 Relação de tensões máx. por carregamento

Car- ga <sup>a</sup>	A Superf. n°	B Ponto n°	C			E	F	G	H	I	J		K	L	M
			D Coordenadas dos pontos [m]								Tensões [N/mm <sup>2</sup> ]				
			X	Y	Z	n°	Camada z [mm]	Lado	Símbolo	Existente	Limite				
CR1	ULS - Normal														
	30	560	51.075	0.000	-19.960	5	31.04	Inferior	$\sigma_x$	25.83	48.00	0.54			
	30	560	51.075	0.000	-19.960	5	31.04	Inferior	$\sigma_y$	39.88	48.00	0.83			
	4	112	50.675	0.000	-9.970	3	15.52	Médio	$\tau_{yz}$	0.00					
	30	1785	50.875	0.000	-19.960	3	15.52	Médio	$\tau_{xz}$	0.00					
	30	443	50.975	0.000	-19.680	1	0.00	Superior	$\tau_{xy}$	11.93					
	30	558	50.675	0.000	-19.960	3	11.52	Superior	$\tau_{max}$	0.00					
	30	560	51.075	0.000	-19.960	5	31.04	Inferior	$\sigma_1$	43.81	48.00	0.91			
	30	560	51.075	0.000	-19.960	5	31.04	Inferior	$\sigma_2$	21.90	48.00	0.46			

Relação de tensões máx.   
 Valor da tensão máx.   
Relação máx.: 0.91  $\leq$  1

FONTE: Adaptado do *software* RFEM 5.

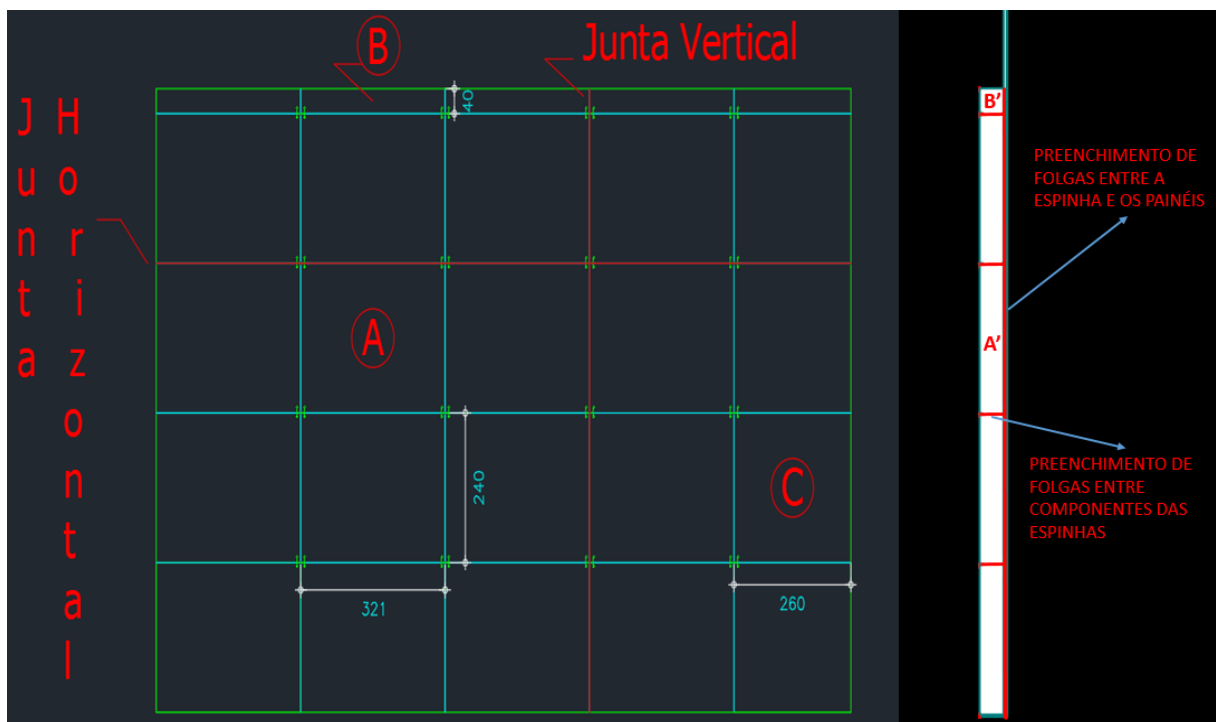
Levando em consideração os resultados apresentados até o presente momento e até onde se testou a coluna com o posicionamento dos painéis de vedação na horizontal, justifica-se a preferência de escolha no posicionamento trazer como consequências para o projeto a execução de menos colunas de vidro para suportar a fachada e um melhor impacto visual devido a presença de menos elementos construtivos. Devido a essa constatação em relação às vantagens

de posicionar os painéis na horizontal, procurou-se encontrar uma opção de coluna aleta de vidro melhorada que viabilizasse o uso dos painéis na horizontal como mostrado anteriormente, não apenas pensando em economia de material, mas também na obtenção de um resultado estético mais interessante. Dessa forma, conseguiu-se encontrar e validar a opção final proposta para a fachada em vidro estrutural de forma satisfatória.

#### 4.5 Quantitativo e orçamento da opção final encontrada

De posse da opção final de fachada a ser sugerida e tendo-a validado, pôde-se levantar de forma definitiva o quantitativo da mesma, combinando-o com o orçamento de preços previamente encontrados para calcular o custo aproximado em material de uma estrutura desse porte. Assim, para os painéis foram identificados três tipos referentes às suas dimensões, identificando-os como A, B e C. Os componentes das colunas de vidro também foram identificados quanto às suas dimensões como A' e B'. As juntas onde se deve aplicar o silicone estrutural para vedar a fachada também foram identificadas e levantadas. A Figura 46 vem mostrar de forma mais clara como cada elemento foi identificado.

Figura 46 - Identificação dos componentes da fachada para levantamento de quantitativo



FONTE: Elaborado pelo autor.

Após identificar e quantificar os elementos componentes, bem como os materiais empregados na fachada, iniciou-se o cálculo do preço da mesma. Assim, a Tabela 13 vem ilustrar os parâmetros usados no processo de cálculo, como foram organizados durante o processo de cálculo e mostrar o valor final encontrado.

Sabendo que a fachada possui 154,44 m<sup>2</sup> de área a serem cobertos, encontrou-se um valor de 345 reais por m<sup>2</sup> de fachada construída considerando apenas o material. Com o acréscimo da mão de obra esse preço irá aumentar, estimando-se algo em torno de R\$ 15.000,00 para tanto.

É importante ser colocado que os comentários referentes aos custos são apenas uma referência básica de valor, já que para se obter um valor final realmente preciso necessita-se considerar alguns fatores como: preço de projetos, preço do transporte, possíveis dificuldades durante a montagem, produtividade da equipe de montagem e outros.

Tabela 13 - Cálculo do preço da fachada.

	Dimensões (m x m) ou (m x m x m) ou Modelo	Área de vidro (m <sup>2</sup> )	Volume de Silicone estrutural (m <sup>3</sup> )	Quantidade empregada (unid.)	Total de área (m <sup>2</sup> ) ou volume (m <sup>3</sup> ) empregados	Valor por área(R\$/m <sup>2</sup> ) ou por peça (R\$) ou por volume (R\$/m <sup>3</sup> )	Valor total (R\$)
Painéis A - Laminação Dupla	3,21 x 2,4	7,70	-	16	123,264	R\$ 250,00	R\$ 30.816,00
Painéis B - Laminação Dupla	3,21 x 0,4	1,28	-	5	6,42	R\$ 250,00	R\$ 1.605,00
Painéis C - Laminação Dupla	2,6 X 2,4	6,24	-	4	24,96	R\$ 250,00	R\$ 6.240,00
<i>Spiders</i>	WX 154 VU	-	-	16	-	R\$ 493,00	R\$ 7.888,00
Juntas Verticais	0,01 X 0,02 x 10	-	0,002	4	0,008	R\$ 55.000,00	R\$ 440,00
Juntas Horizontais	0,01 x 0,02 x 15,44	-	0,003	4	0,012352	R\$ 55.000,00	R\$ 679,36
Preenchimento de folgas entre espinhas e painéis	0,03 x 0,01 x 10	-	0,003	4	0,012	R\$ 55.000,00	R\$ 660,00
Preenchimento de folgas entre componentes das espinhas	0,030 x 0,4 x 0,01	-	0,00012	16	0,00192	R\$ 55.000,00	R\$ 105,60
Componente da espinha A' - Laminação Tripla	0,4 x 2,4	0,96		16	15,36	R\$ 300,00	R\$ 4.608,00
Componente da espinha B' - Laminação Tripla	0,4 x 0,4	0,16		5	0,8	R\$ 300,00	R\$ 240,00
<b>TOTAL</b>							<b>R\$ 53.281,96</b>

FONTE: Elaborado pelo autor.



## 5 CONCLUSÃO

O vidro é um material que evoluiu muito desde a sua descoberta. Anteriormente usado apenas para criar adornos domésticos, passando a integrar tecnologia inovadora nas construções ao possibilitar melhor aproveitamento da luz natural por meio das primeiras janelas e, hoje em dia, sendo aplicado como material estrutural mesmo apresentando ruptura frágil. A tecnologia empregada ao vidro sempre buscou encontrar maneiras que pudessem reduzir sua fragilidade, desenvolvendo o processo de têmpera para aumento da resistência do mesmo e o processo de laminação para dar a ele maior ductilidade.

Conforme os projetos arquitetônicos estão se tornando mais desafiadores e cada vez mais há uma crescente demanda pela utilização do vidro estrutural, nota-se a importância e a necessidade do domínio por parte do corpo técnico responsável sobre a aplicação desse material. Além disso, é importante levantar a necessidade de melhorias e fomentar o desenvolvimento de normas que regulamentem de forma mais sólida o emprego do vidro para fins estruturais no nosso país e no mundo.

Ao propor uma alternativa de fachada em vidro estrutural, buscou-se não apenas expor uma opção diferenciada de fachada com todos os seus pontos positivos, mas também mostrar peculiaridades presentes em um projeto desse tipo. Ao analisar os painéis de vedação que separam o interior do exterior da estrutura, pôde-se perceber que para painéis maiores (4m x 2,8m) do que o padrão (3,21m x 2,4m) é interessante considerar a presença do material de vedação (Ex.: silicone estrutural) entre eles nos cálculos, visto que há uma redução das deflexões impostas devido ao carregamento, podendo viabilizar uma alternativa interessante que utiliza painéis maiores. No entanto, é necessário validar de forma mais precisa com ensaios laboratoriais o quanto as deflexões verdadeiramente reduzem.

Para as considerações de carregamento e apoio empregadas, o painel maior não apresentou resultado satisfatório de viabilidade para nenhuma alternativa de espessura testada, obtendo resultados satisfatórios quanto às deformações apenas quando foi considerada a presença do silicone estrutural. No caso dos painéis padrão, apenas a espessura de 19mm obteve resultado satisfatório quanto às deformações geradas admitindo-se às especificações de carregamento e apoios.

Mostrou-se que o posicionamento dos painéis precisa ser levado em consideração no momento que se deseja verificar a viabilidade das colunas de vidro que resistirão aos esforços da estrutura, visto que os elementos que a compõem obedecem a modularização gerada pelos painéis. Encontrou-se que os colocando na vertical possibilita resultados mais

conservadores, mas geram mais gastos e traz maior impacto negativo na estética da fachada devido ao aparecimento de mais elementos construtivos. Por outro lado, ao posicionar os painéis na horizontal aparecem empecilhos quanto a viabilidade de execução da estrutura, obrigando o emprego de mecanismos que auxiliem na sustentação do carregamento ou necessitando fazer alterações na largura e/ou laminação dos elementos que compõem a coluna de vidro. Sempre se buscou a viabilidade da fachada para o posicionamento horizontal dos painéis não apenas devido à diminuição da quantidade de elementos construtivos, mas também pela consequente economia de material e melhor impacto visual.

Assim, ao se executar os testes necessários pôde-se ir avaliando alternativas diferentes e construindo aos poucos os resultados de forma a convergi-los para uma alternativa mais otimizada. Ao final, encontrou-se um resultado viável e bastante satisfatório para ser indicado como alternativa para uma nova fachada, porém sabe-se que testes mais aprofundados precisam ser feitos para validar as ligações entre os componentes das colunas de vidro. Além disso, reconhece-se que os resultados encontrados precisam ser verificados em laboratório não apenas para calibrar de forma mais precisa o *software* em questão, mas também para atestar de forma concreta os cálculos executados por ele e validar as simulações que foram realizadas.

Um último ponto interessante que deve ser mencionado diz respeito ao valor da estrutura da fachada. Mesmo a fachada executada em vidro estrutural trazendo pontos bastante positivos para a edificação em que é empregada, constatou-se que é uma alternativa que possui preço um pouco mais elevado. O fator preço pode diminuir sua competitividade em relação às demais alternativas, mas acaba sendo algo bastante relativo visto que é uma opção considerada como investimento por muitos e entrega um resultado estético sem igual para os clientes que procuram agregar esse diferencial em suas edificações.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao fator tempo e limitadores técnicos e/ou financeiros alguns pontos não puderam ser testados, gerando as sugestões para trabalhos futuros que seguem:

- Testar em laboratório quanto o material de vedação entre painéis (silicone estrutural) pode verdadeiramente reduzir as deflexões geradas para a opção de silicone estrutural sugerida.
- Validar experimentalmente ou computacionalmente qual deveria ser uma opção melhorada de ligação entre os elementos componentes da coluna de vidro para o carregamento utilizado.
- Validar experimentalmente ou computacionalmente o mecanismo que utiliza cabos tensionados para reduzir a torção e a flambagem lateral para a opção de coluna de vidro em que foi sugerida a aplicação do mesmo conforme o carregamento utilizado.
- Levantar a diferença de valor do projeto ao utilizar o PVB e o SGP na laminação, considerando as individualidades e limitações de cada um desses materiais.
- Modelar e analisar globalmente a estrutura para levantamento do quanto de economia uma análise desse tipo poderia trazer para uma estrutura em vidro estrutural.

## REFERÊNCIAS

AMADIO, C.; BEDON, C. **A buckling verification approach for monolithic and laminated glass elements under combined in-plane compression and bending**. 2013. ELSEVIER jornal, Engineering Structures, v. 52, 0141-0296/\$, March 2013. p. 220-229.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, nov. 1988.

\_\_\_\_\_. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas: Procedimento. Rio de Janeiro, mar. 2003.

AZEVEDO, Álvaro F.M. **Método dos Elementos Finitos**. Portugal, 1ª Edição, <http://www.fe.up.pt/~alvaro>, 2003.

BARROS, Carolina. **Apostila de Vidros: Materiais de Construção: Edificações**. 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Sul, Pelotas, 2010.

BEHR, R.A.; MINOR, J.E.; NORVILLE, H.S. **The Structural Behavior of Architectural laminated Glass**. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 119, n. 1, January 1993. p. 202-222.

\_\_\_\_\_. **Load Duration and Interlayer Thickness Effects on Laminated Glass**. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 112, n. 6, Proc. Paper 20703, June 1986. p. 1441-1453.

BENNISON, Stephen J.; QIN, Maria H. X.; DAVIES, Phillip S. **High Performance Laminated Glass for Structural Efficient Glazing**. Innovative Light-weight Structures and Sustainable Facades, Hong Kong, 2008.

CHAN, Siu Lai. **Basic structural design considerations and properties of glass and aluminum structures**. 2006. Research Center for Advanced Technology in Structural Engineering (RCATISE), Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, 2006.

CHRIS, Hoar. **The Future of Glass in Buildings – An Overview of Advanced Glazing Technology**. Saint-Gobain Solaglas, Herald Way, Binley, Coventry, CV3 2ND, [200-?]. 6 p.

DE SOUZA, José J.T. **Análise e Dimensionamento com Vidro Estrutural**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 72., 2015, Fortaleza. Centro de Eventos do Ceará, 2015. 4f.

GOMES, J.; VELHO, L. **Computação Gráfica**. Vol. 1, Série de Computação e Matemática. Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, Rio de Janeiro, 1998

GRIFFITH, A. A. **The Phenomena of Rupture and Flow in Solids**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 221, p. 582–593: 163, 1921.

HORČIČKOVÁ, I.; NETUŠIL, M.; ELIÁŠOVÁ, M. **Comparison of Analytical and Numerical Calculation of Load-Bearing Glass Structure**. [200-?]. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, [200-?].

HUGHES, T. (2012). **Finite Element Method**. Dover Publications, 2012.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2010.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **Análise de Segunda Ordem Global em Edifícios com estrutura de concreto Armado**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OVEREND, M. **Recent developments in design methods for glass structures**. Cambridge University, [s.n], 2009.

PARIAFSAI, F. **A review of design considerations in glass buildings**. 2016. Department of Sheikh Sadough, Islamic Azad University of Shahr Rey, Tehran, Iran, 2016.

PEREIRA, Sónia Marisa M. **Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro**. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

PINHEIRO, Fabio Carlos. **Evolução do Uso do Vidro como Material de Construção Civil**. Universidade São Francisco, Itatiba, 2007. 64f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil).

PORTAL AECWEB. **Vidro estrutural, jóia transparente**. Disponível em: [https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/vidro-estrutural-joa-transparente\\_3952\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/vidro-estrutural-joa-transparente_3952_10_0). Acesso em: 8 julho 2017.

PORTAL DA EMPRESA ENCLOS. Disponível em: <http://www.enclos.com/service-and-technology/technology/structural-glass-facades/facade-structures>. Acesso em: 8 julho 2017.

PORTAL DA EMPRESA DLUBAL. **Structural Engineering Software for Analysis and Design**. Disponível em: <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem>. Acesso em: 8 julho 2017.

PORTAL DA EMPRESA PILKINGTON. Disponível em: <https://www.pilkington.com/en/br>. Acesso em: 8 julho 2017.

prEN 13474-1:1999. **Glass in Building - Design of glass panes - Part 1: General basis of design**. Janeiro, 1999.

prEN 13474-2:2000. **Glass in Building - Design of glass panes - Part 2: Design for uniformly distributed loads**. Fevereiro, 2000.

REDDY, J.; GARTLING, D. **The finite element method in heat transfer and fluid dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

REDDY, J. N. **Theory and analysis of elastic plates and shells**, CRC Press, Taylor and Francis, 2007.

RFEM. **The Finite Element Program for Analysis and Design of Spatial Structures**. Version 5.10, Produced by Dlubal Engineering Software, 2009.

SAINT-GOBAIN, GLASS. **Manual do vidro**. Paris, França: 2000.

SANCHES, José Maria C. P de Noronha. **Análise e Dimensionamento de Sistemas Estruturais de Vidro**. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2013. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

SERRA, João Pedro X. **Estudo Numérico do Comportamento Estrutural de Vigas Metálicas Aligeiradas**. Departamento de Engenharia Civil – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2012. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

TOMAS, S.; KVEDARAS, A. K. **Review of Study on Structural Glass and Structures. 2010**. In: THE 10<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE OF MODERN BUILDING MATERIALS, STRUCTURES AND TECHNIQUES, 2010, Vilnius. Lituânia: Vilnius Gediminas Technical University. p. 787-792.

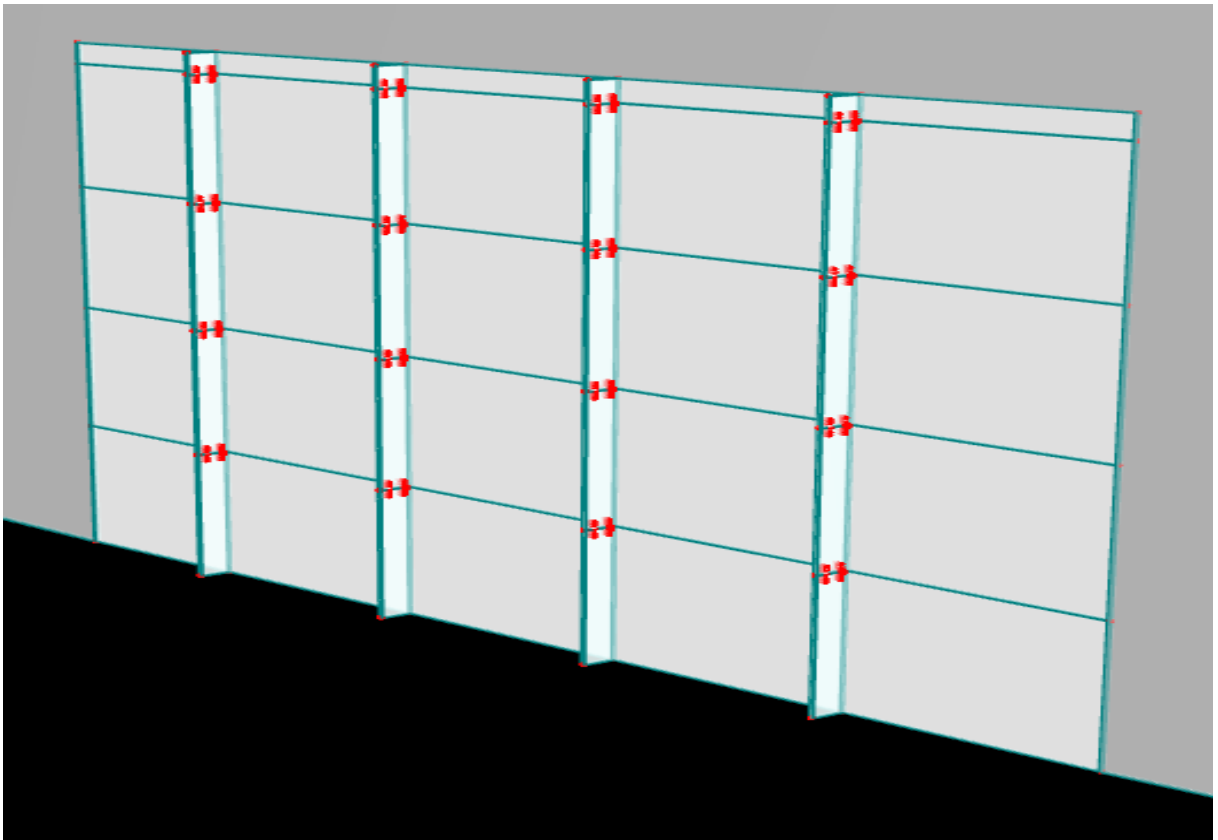
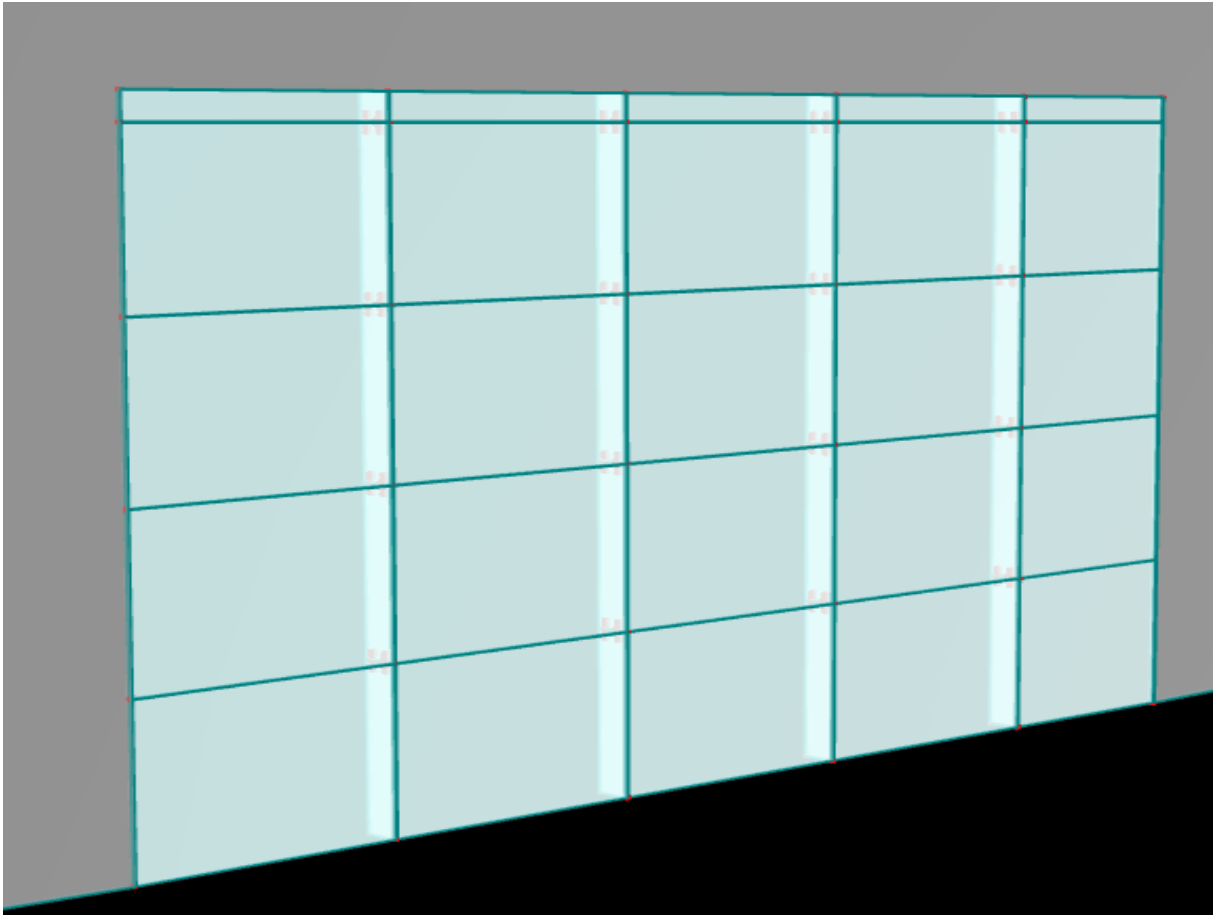
TORRES, Livia Maria Osterne. **Estudo de Caso de Projeto com Utilização de Vidro Estrutural**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

UNGUREANU, Viorel. **Advanced Design of Glass Structures: Lecture 3: Laminated Glass and Interlayers**. Sustainable Constructions Under Natural Hazards and Catastrophic Events – European Erasmus Mundus Master Course. 520121-1-2011-1-CZ-ERA MUNDUS-EMMC. 2011.

WOLFEN, E. **Nachgiebiger Verbund Eine Naherungslosung und deren Anwendungsmoglichkeiten**. In: Stahlbau 6/1987, p. 173-180, 1987.

**APÊNDICE A – FOTOS DA FACHADA DO *SHOPPING IGUATEMI* FORTALEZA-  
CE VISTA POR FORA E POR DENTRO**

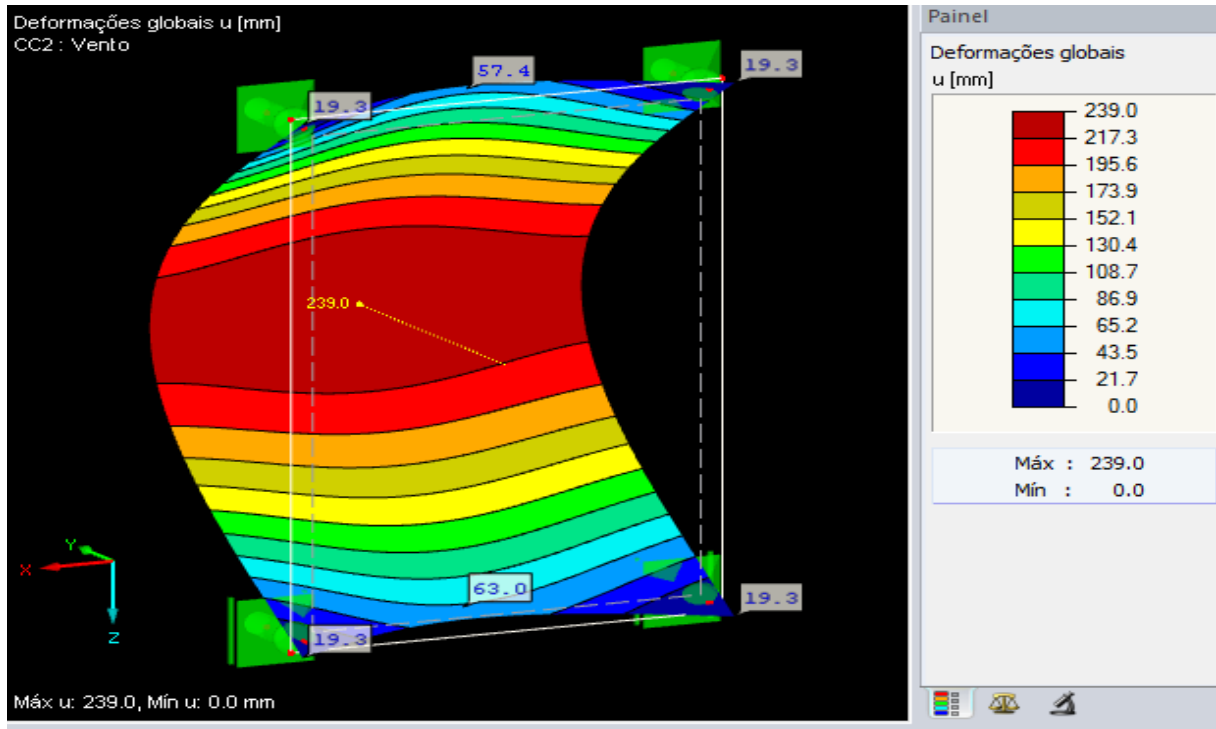


**APÊNDICE B – FACHADA PROPOSTA EM MODELO 3D**

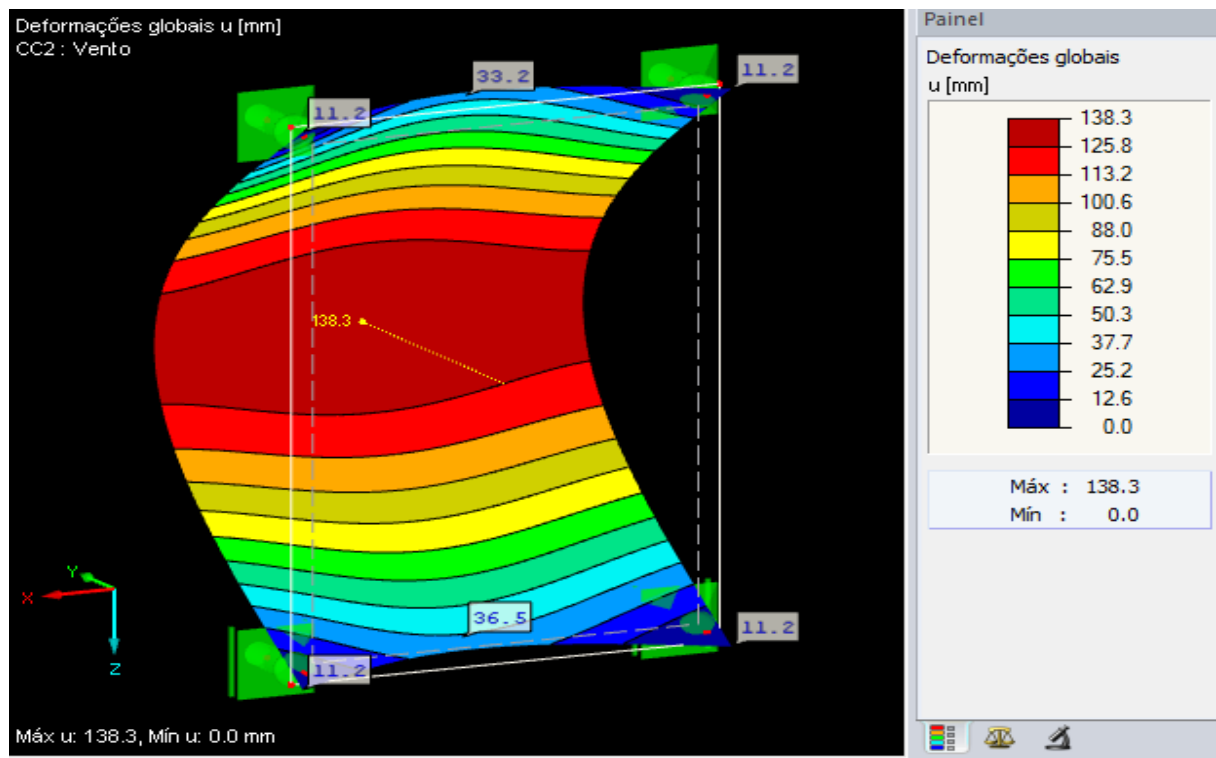


**APÊNDICE C – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA AS DEFLEXÕES  
RELATIVAS AOS PAINÉIS DE 4 POR 2,8 METROS VARIANDO SUA ESPESSURA**

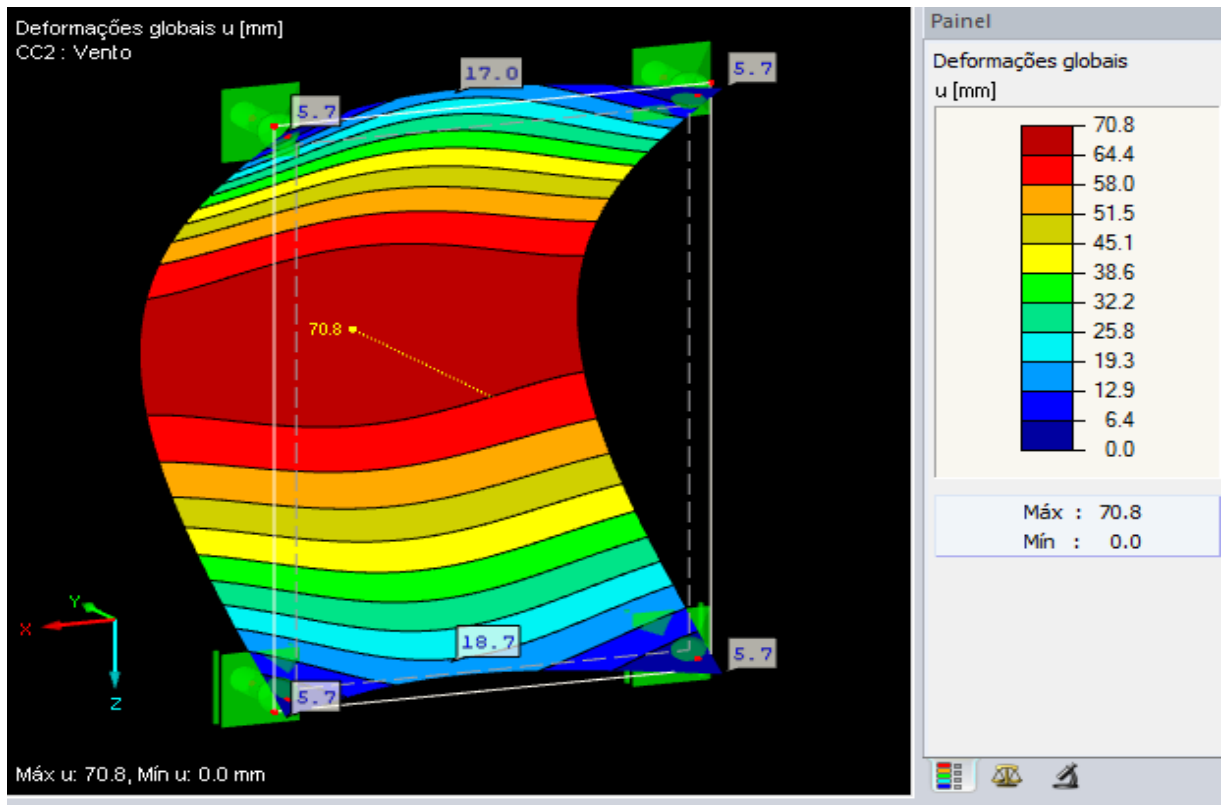
Deflexão painel 4 por 2,8 metros com espessura de 10 mm.



Deflexão painel 4 por 2,8 metros com espessura de 12 mm.

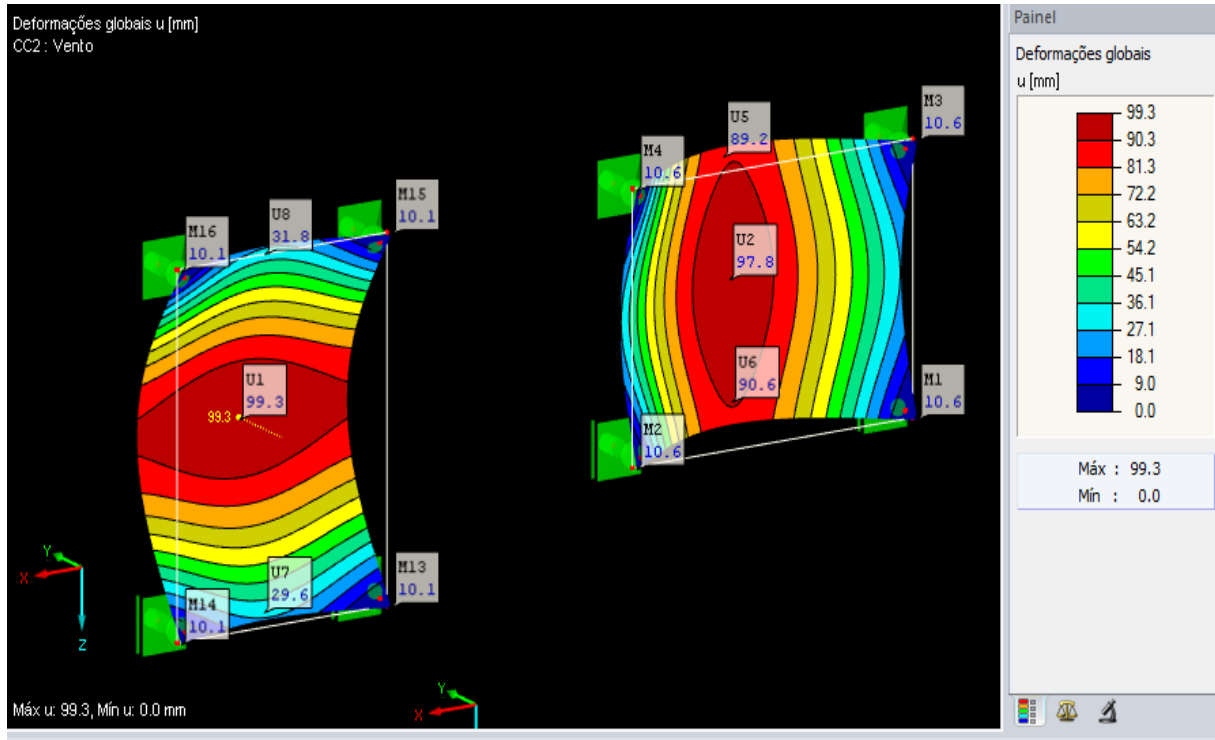


Deflexão painel 4 por 2,8 metros com espessura de 15 mm.

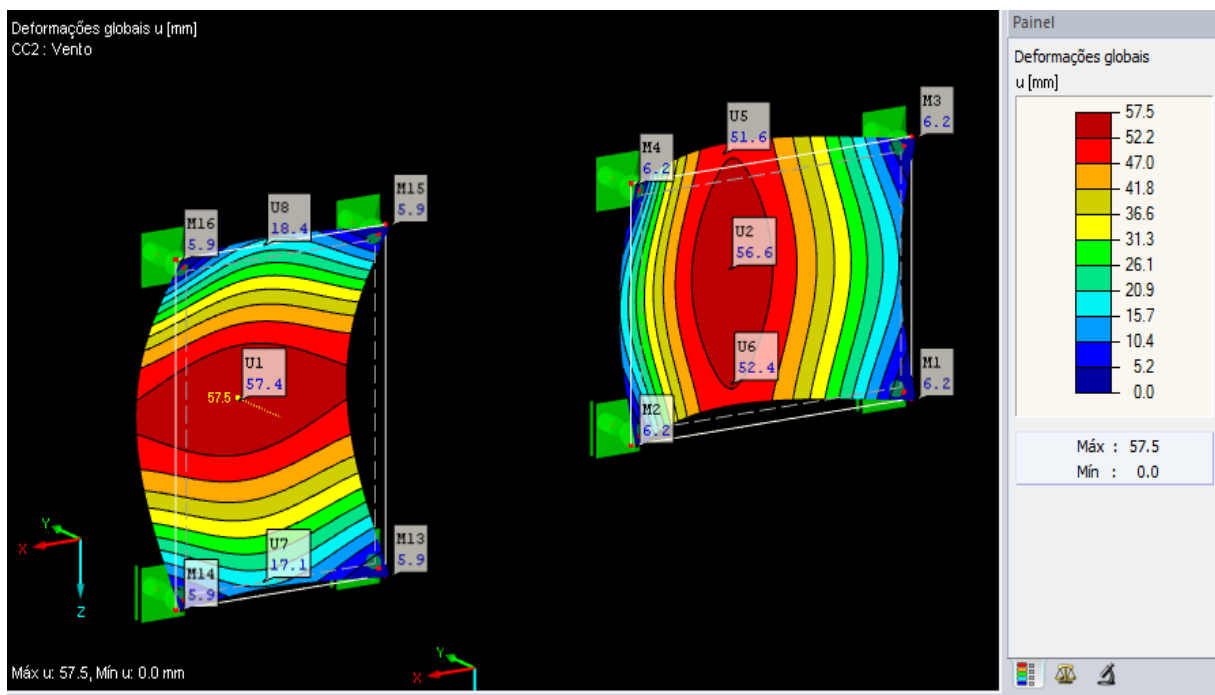


## APÊNDICE D – RESULTADOS ENCONTRADOS PARA AS DEFLEXÕES RELATIVAS AOS PAINÉIS DE 3,21 POR 2,4 METROS VARIANDO SUA ESPESSURA

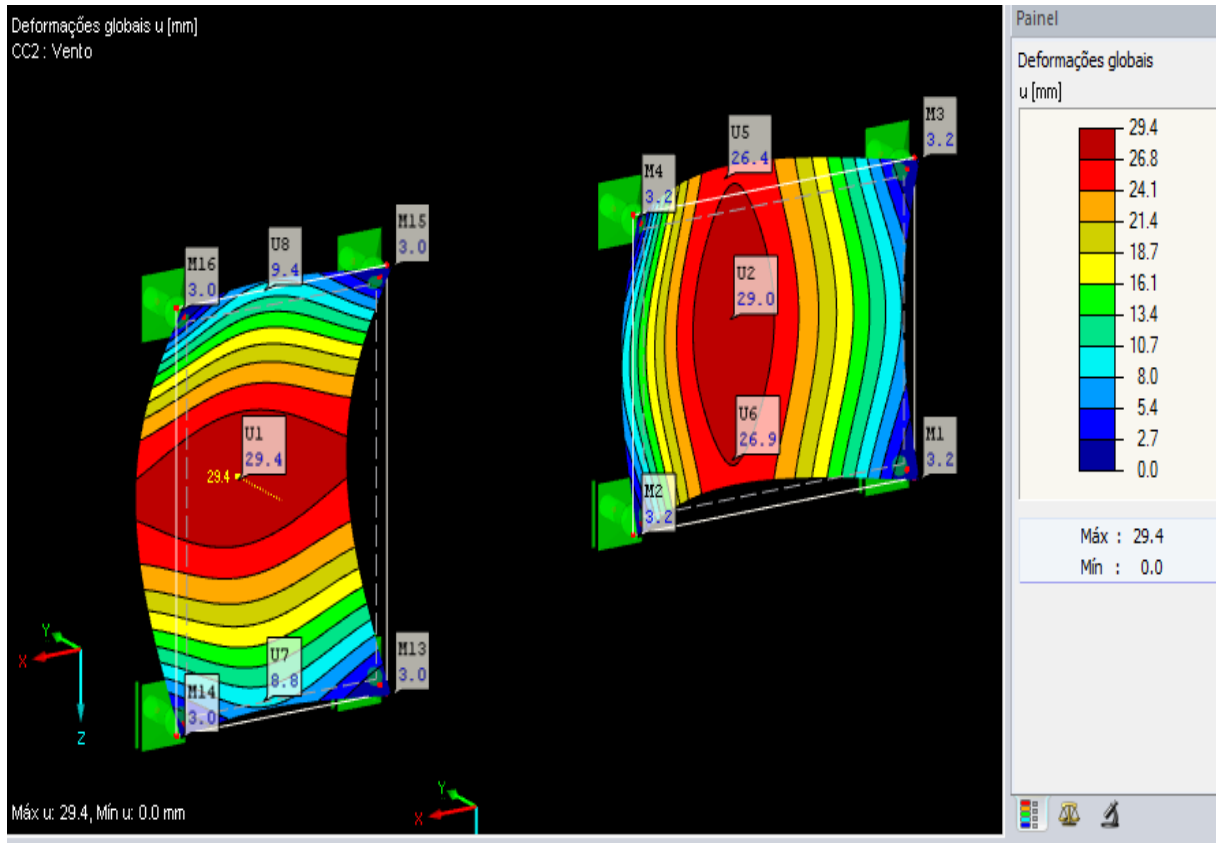
Deflexão painel 3,21 por 2,4 metros com espessura de 10 mm.



Deflexão painel 3,21 por 2,4 metros com espessura de 12 mm.



Deflexão painel 3,21 por 2,4 metros com espessura de 15 mm.



**APÊNDICE E – GRÁFICOS DAS TENSÕES REFERENTES ÀS SUAS  
RESPECTIVAS CAMADAS DE APARECIMENTO PARA PAINEL 3,21 x 2,4 m**

Gráfico do local de tensão máxima normal devido à flexão na direção Y (região inferior do painel).

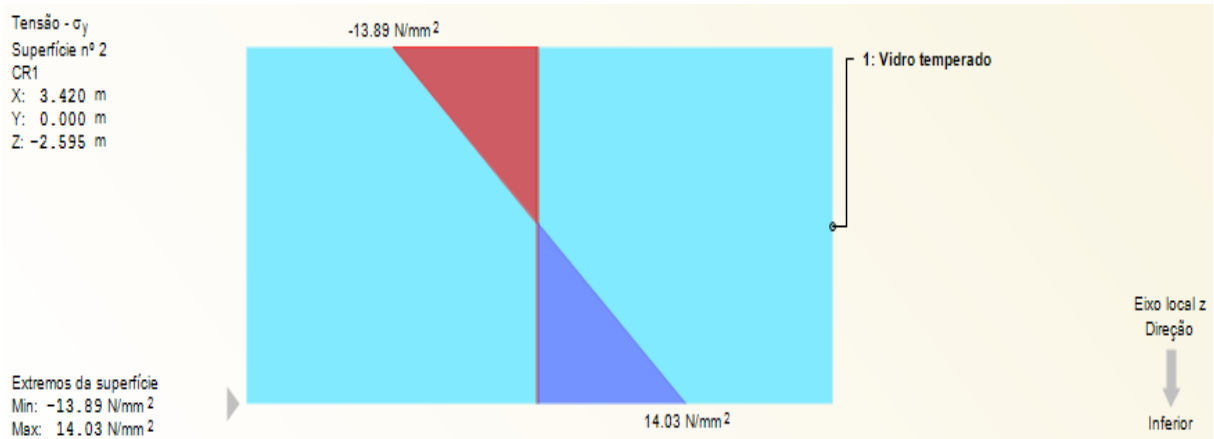


Gráfico do local de tensão máxima de cisalhamento no plano Y-Z (região média do painel).

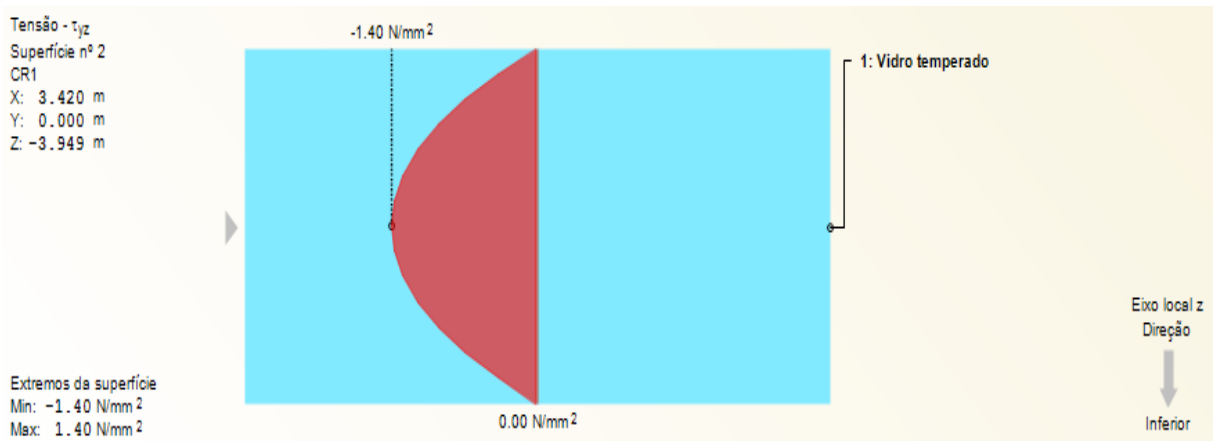


Gráfico do local de tensão máxima de cisalhamento no plano X-Z (região média do painel).

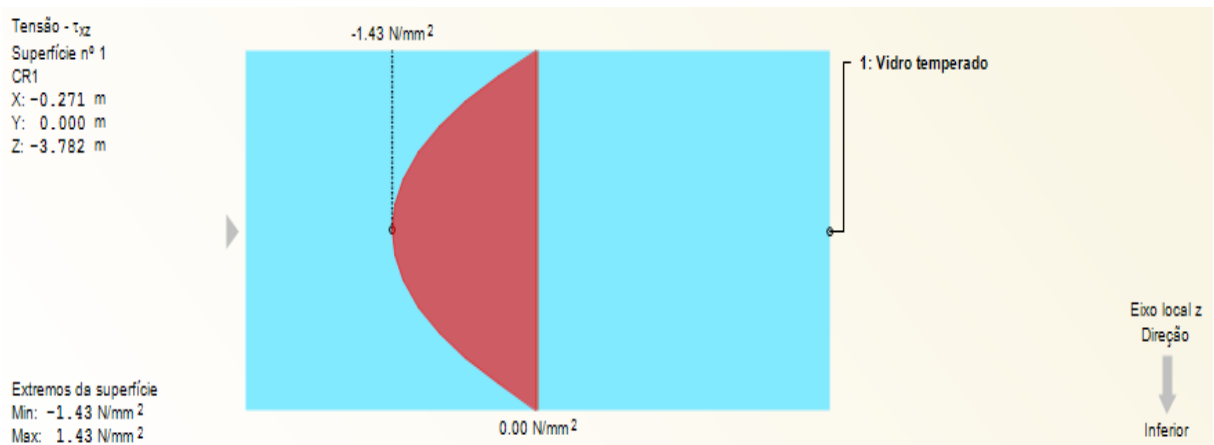


Gráfico do local de tensão máxima de cisalhamento no plano X-Y (região inferior do painel).

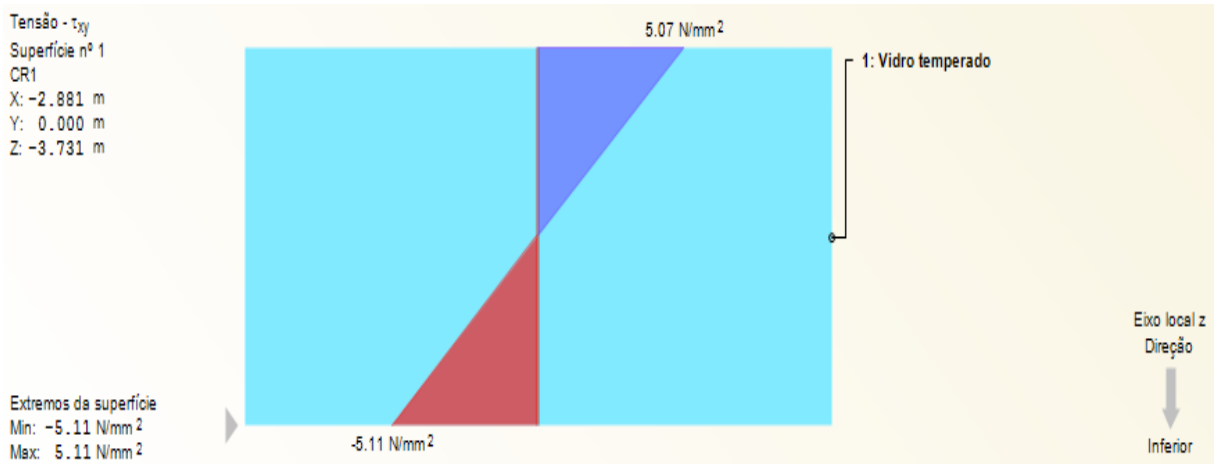


Gráfico da tensão principal  $\sigma_1$  em relação ao ângulo  $\alpha = -90^\circ$  com o eixo X local (região inferior do painel).

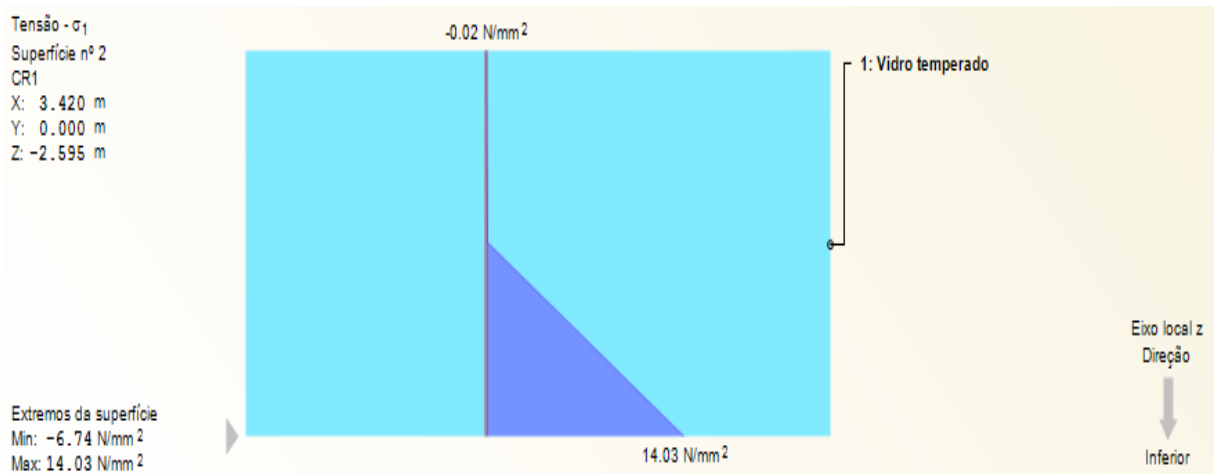
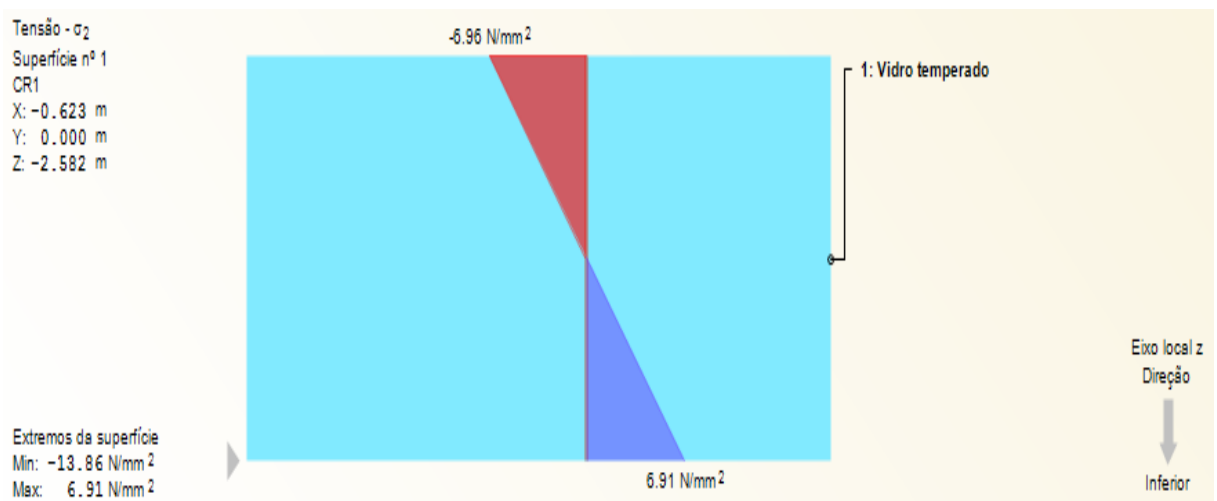
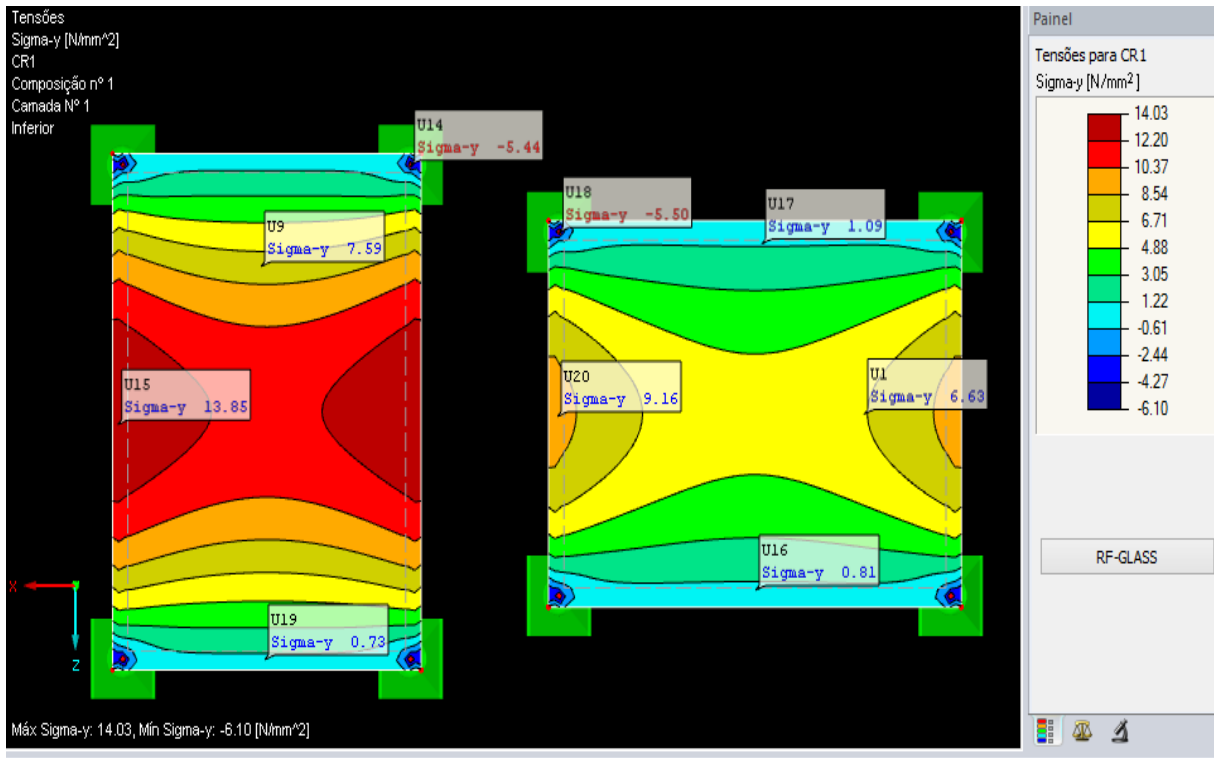


Gráfico da tensão principal  $\sigma_2$  em relação ao ângulo  $\alpha = -90^\circ$  com o eixo X local (região inferior do painel).

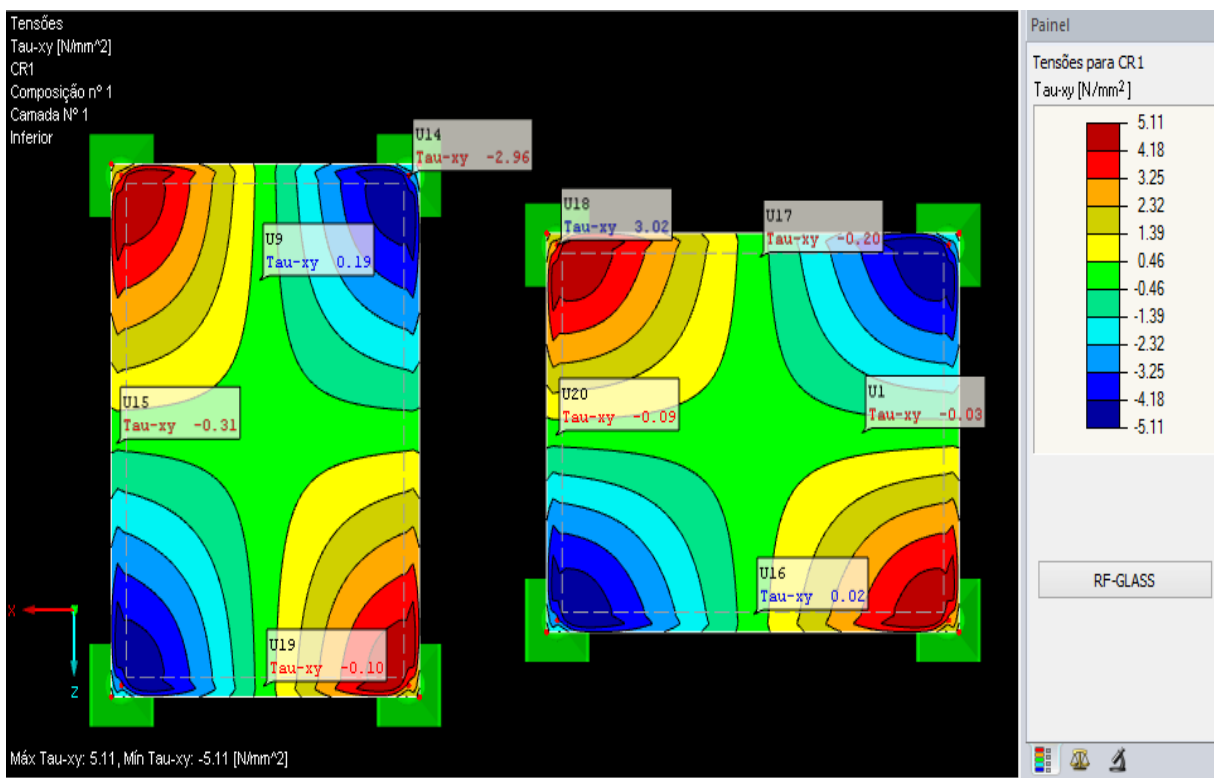


## APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO DE CADA TIPO DE TENSÃO INTERNA EM RELAÇÃO À REGIÃO DO PAINEL 3,21 x 2,4 m

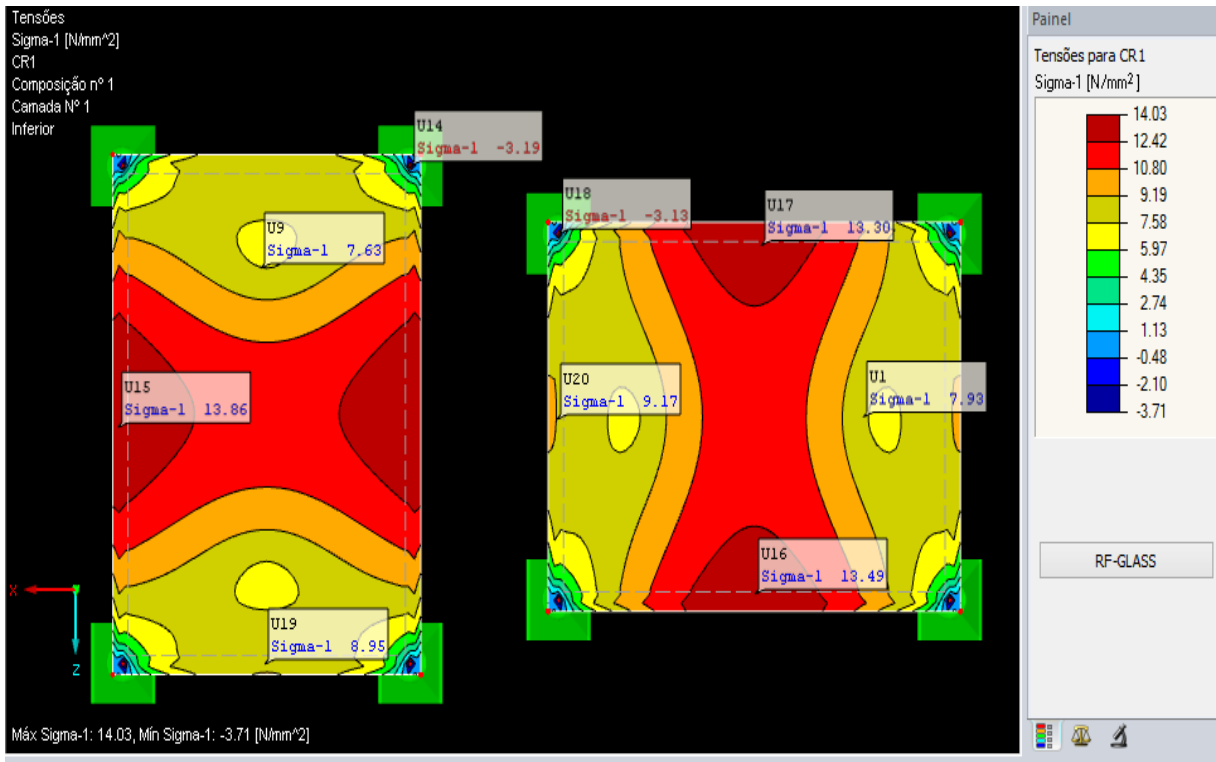
Distribuição das tensões normais devido à flexão na direção Y (região inferior do painel).



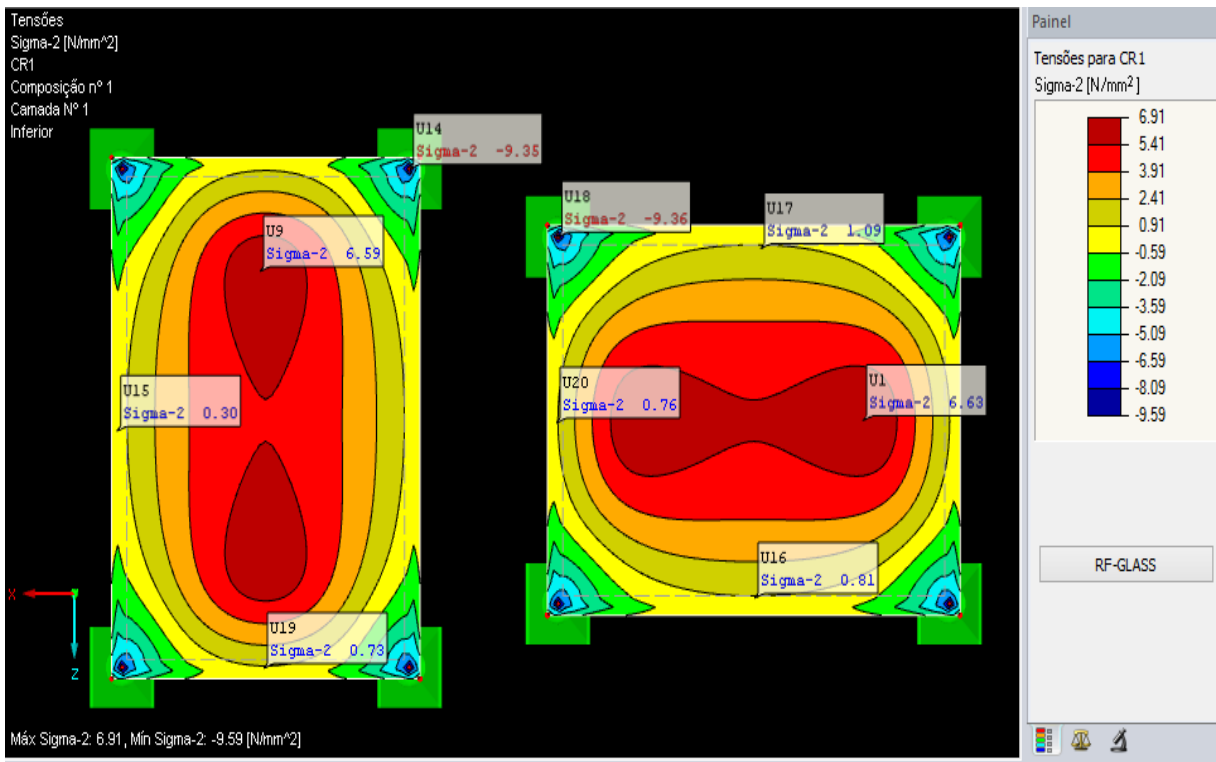
Distribuição das tensões de cisalhamento no plano X-Y (região inferior do painel).



Distribuição da tensão principal  $\sigma_1$  em relação ao ângulo  $\alpha = -90^\circ$  com o eixo X local (região inferior do painel).



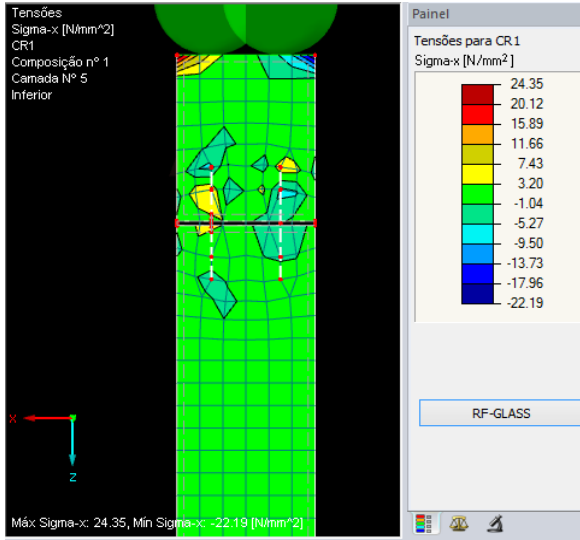
Distribuição da tensão principal  $\sigma_2$  em relação ao ângulo  $\alpha = -90^\circ$  com o eixo X local (região inferior do painel).



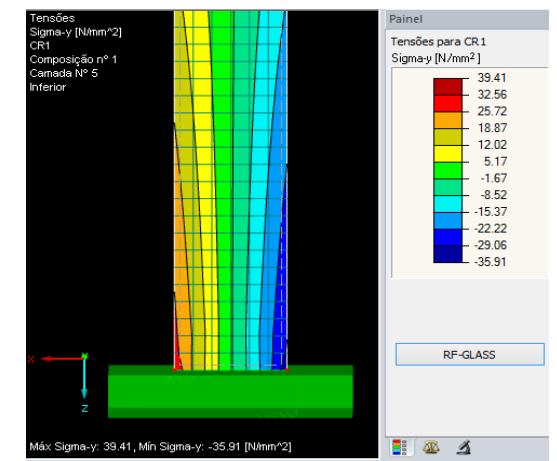
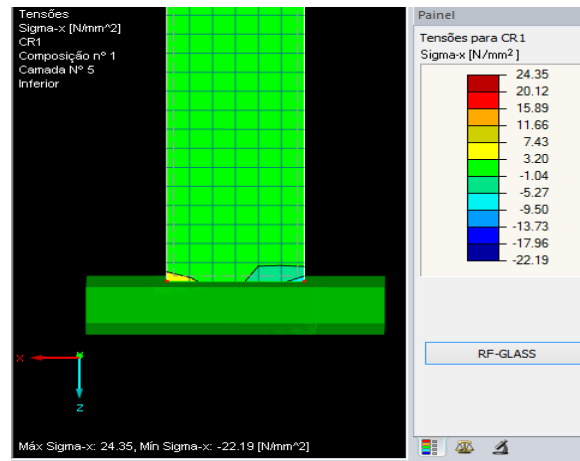
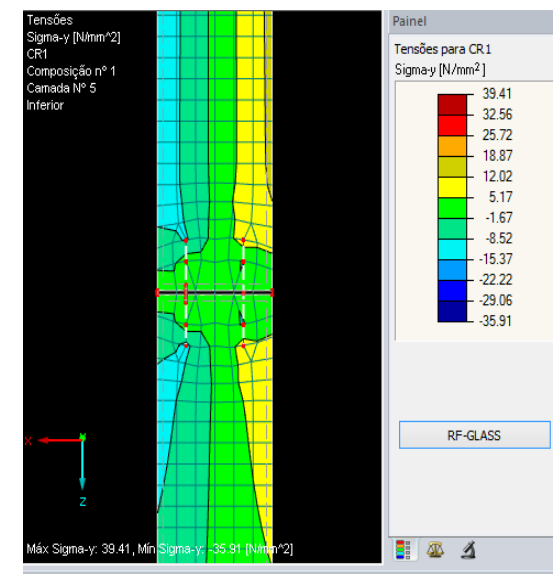
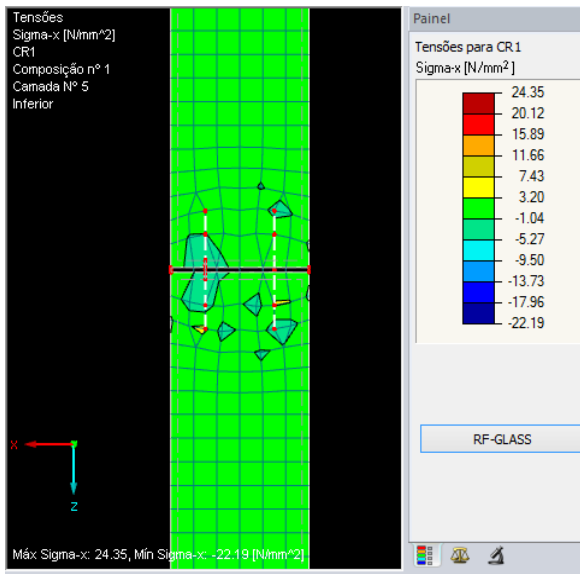
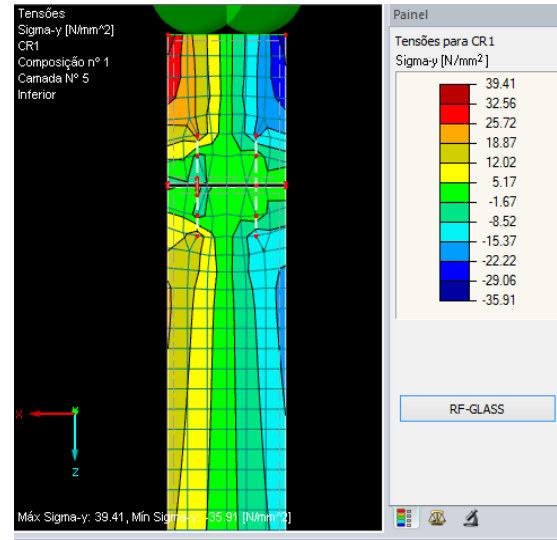


## APÊNDICE G – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA VERTICAL COM LAMINAÇÃO 121212.1,54(2)

Sigma-x

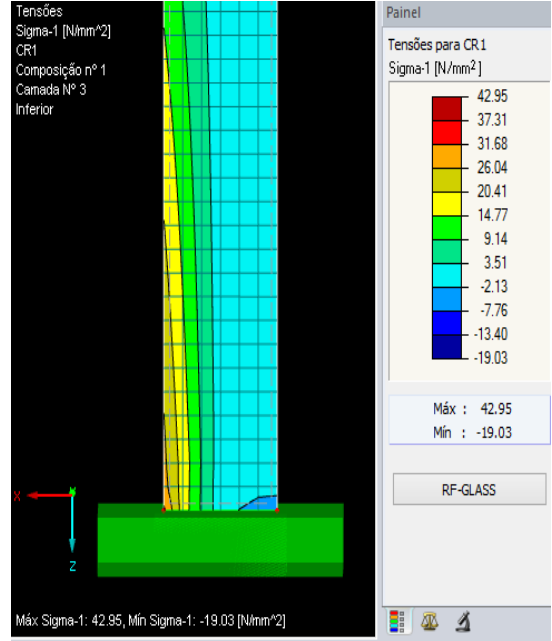
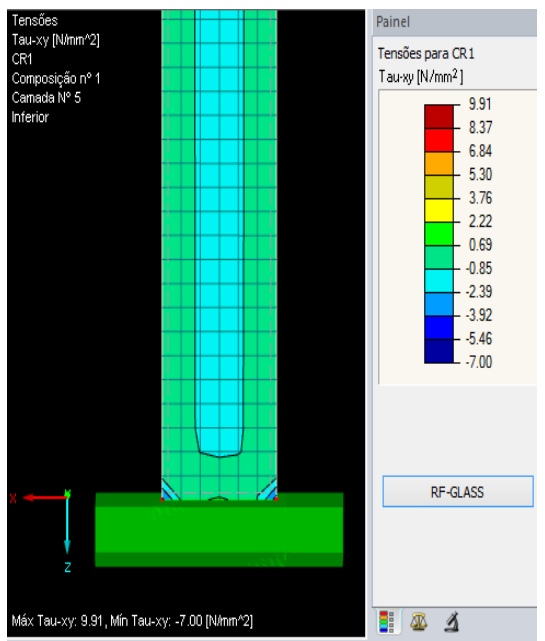
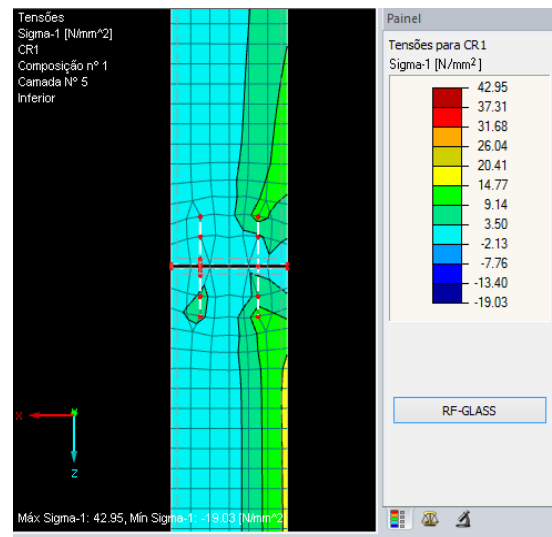
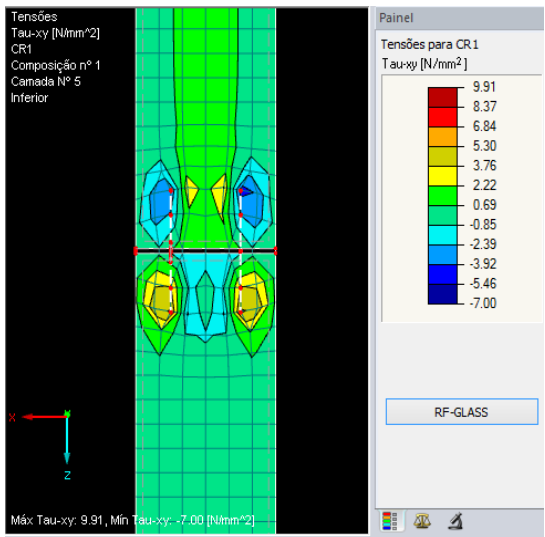
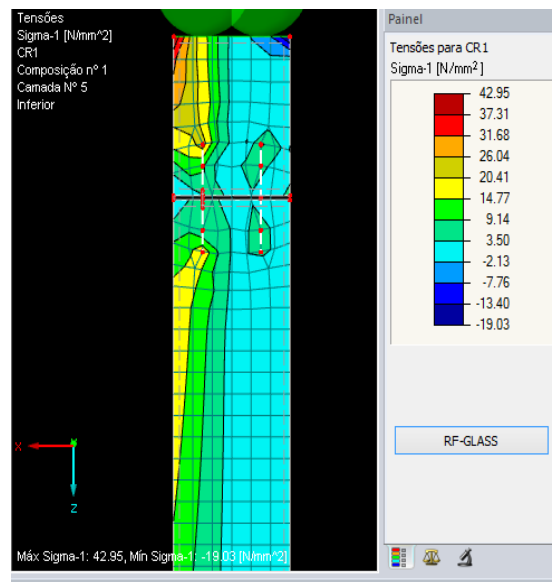
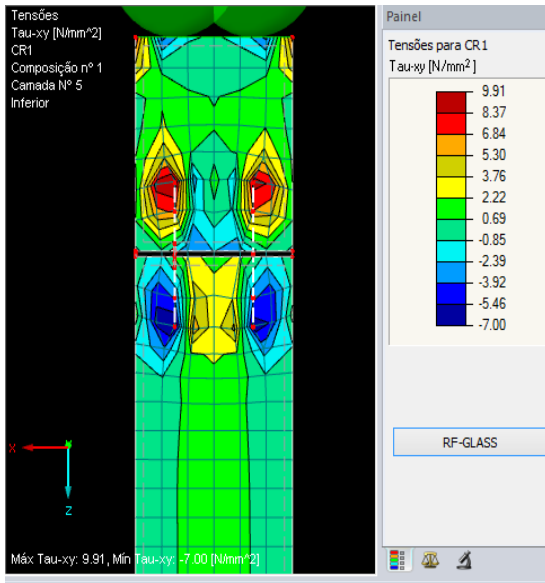


Sigma-y



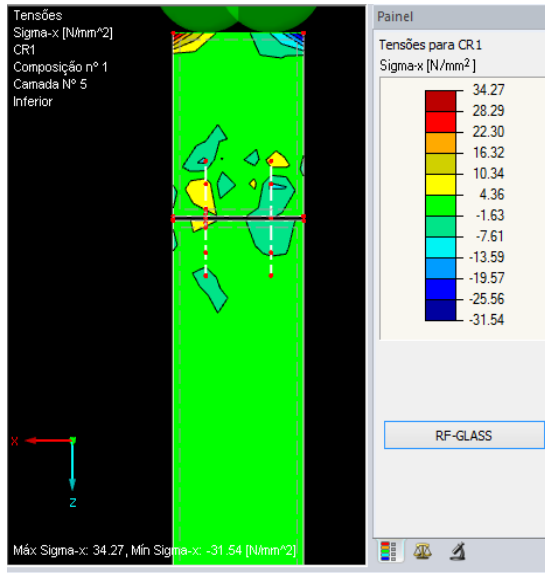
Cisalhamento xy

Sigma 1

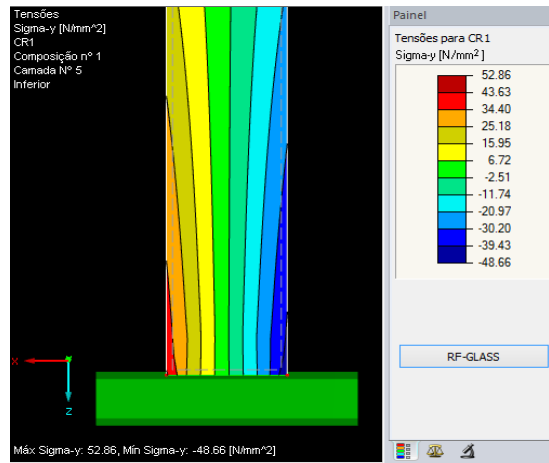
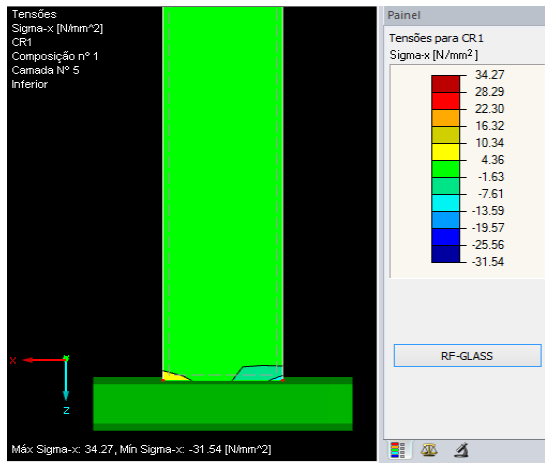
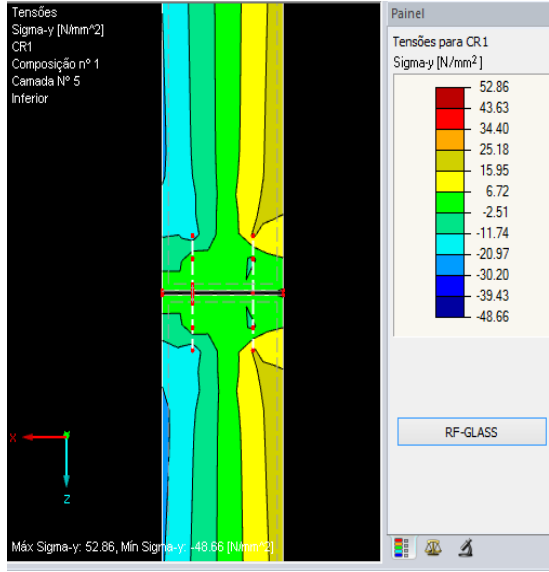
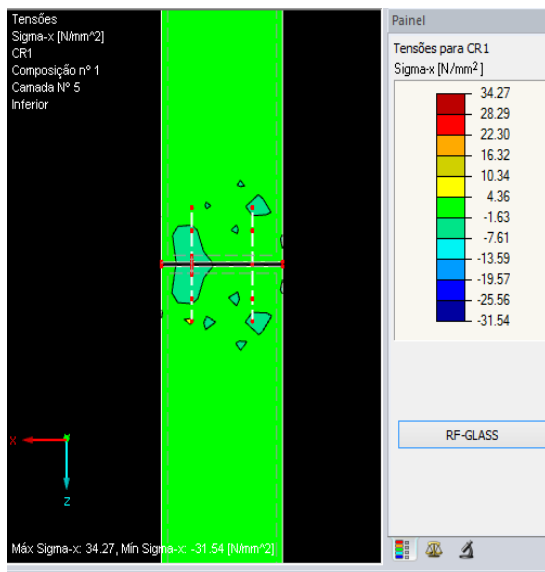
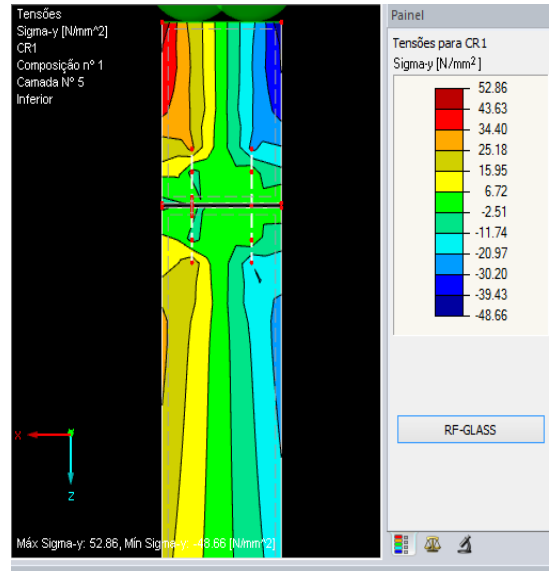


## APÊNDICE H – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO 121212.1,54(2)

Sigma-X

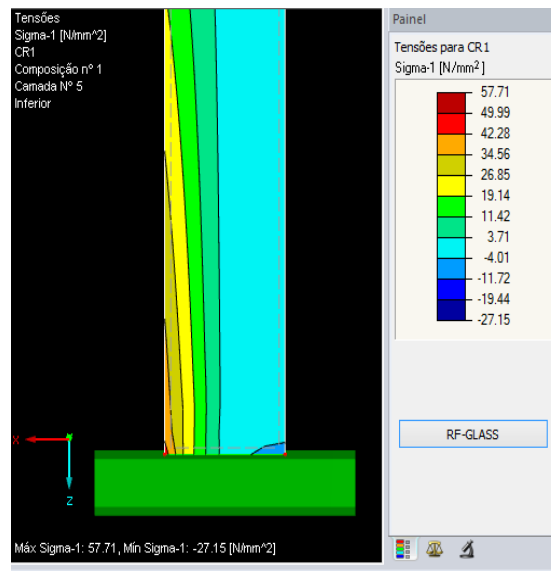
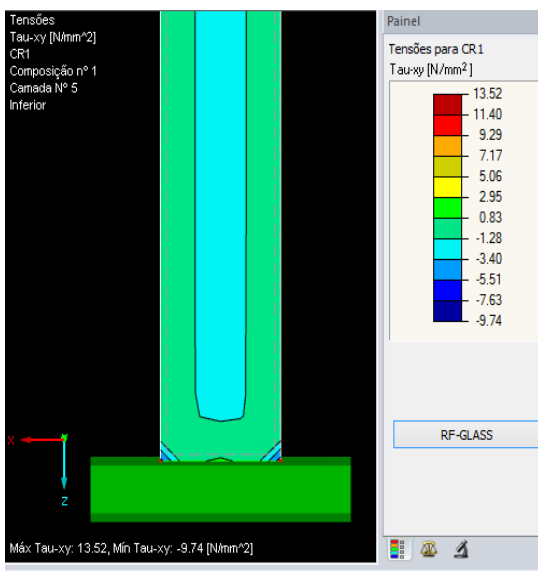
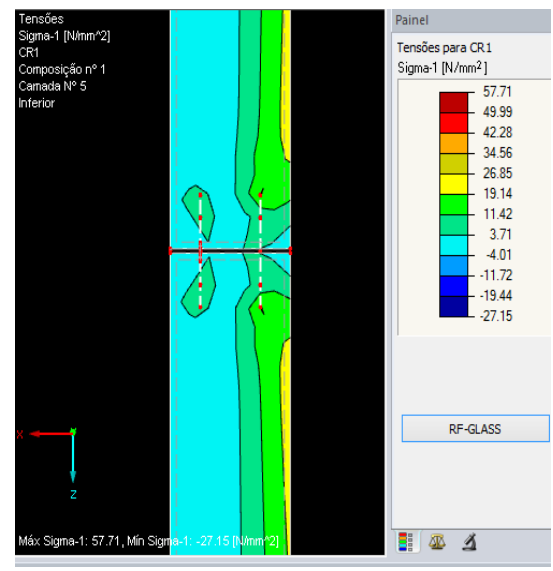
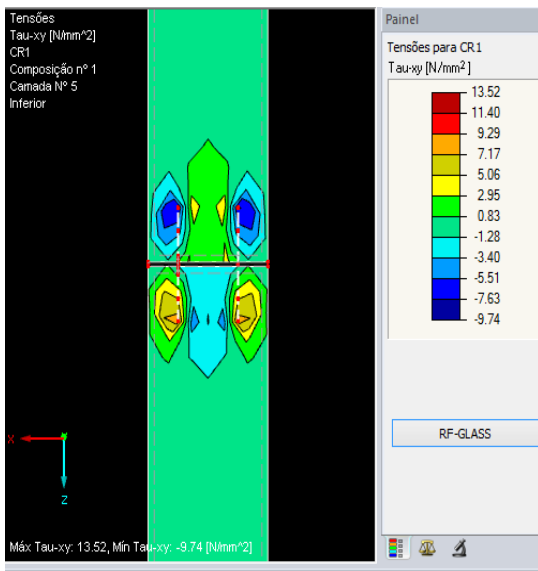
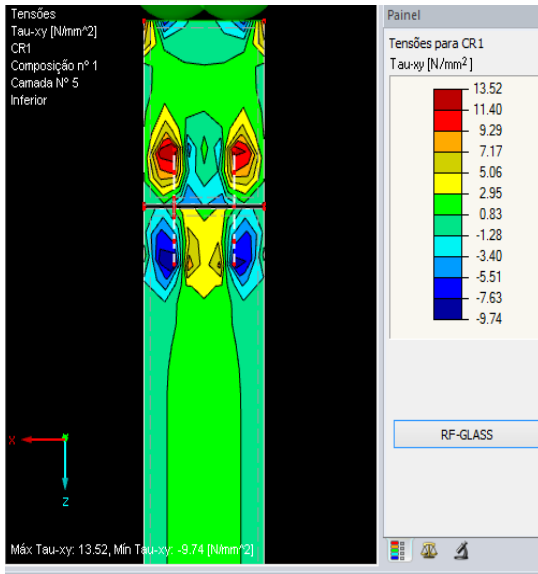


Sigma-Y



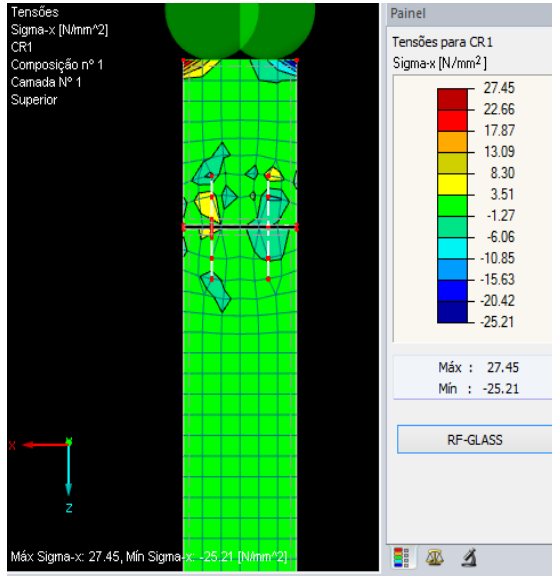
Cisalhamento xy

Sigma 1

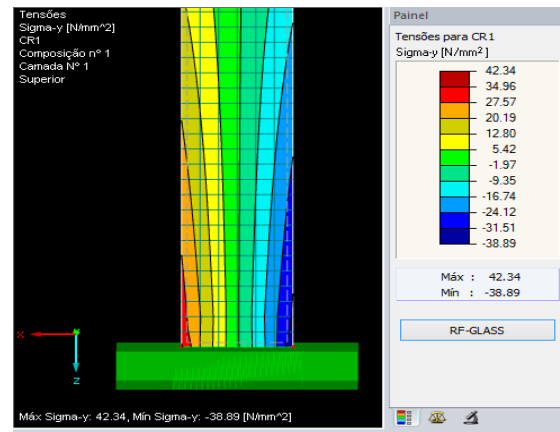
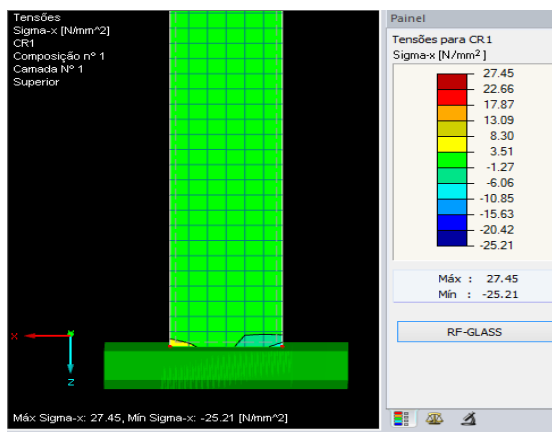
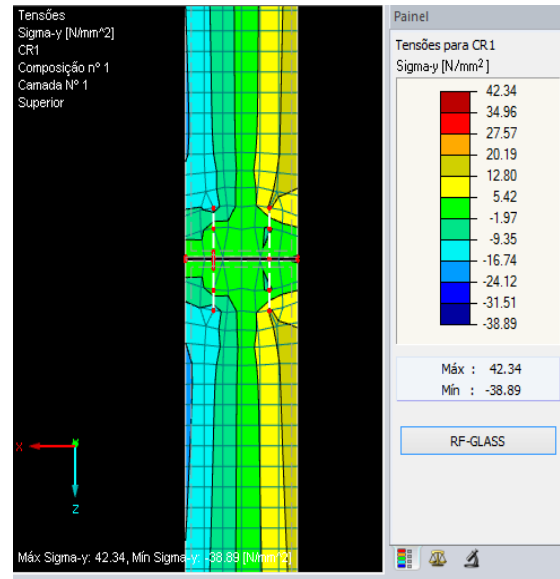
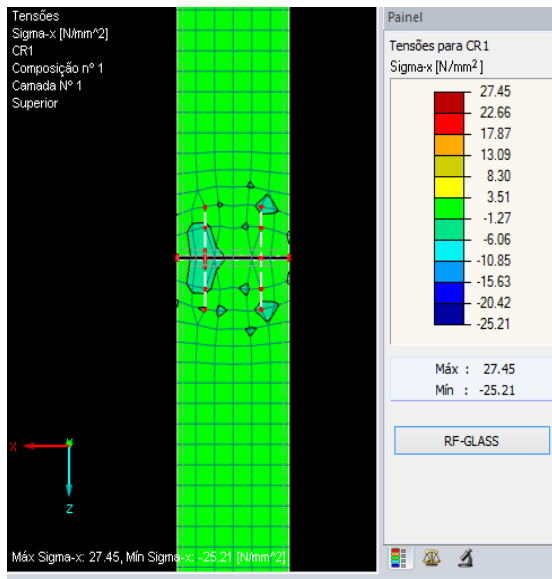
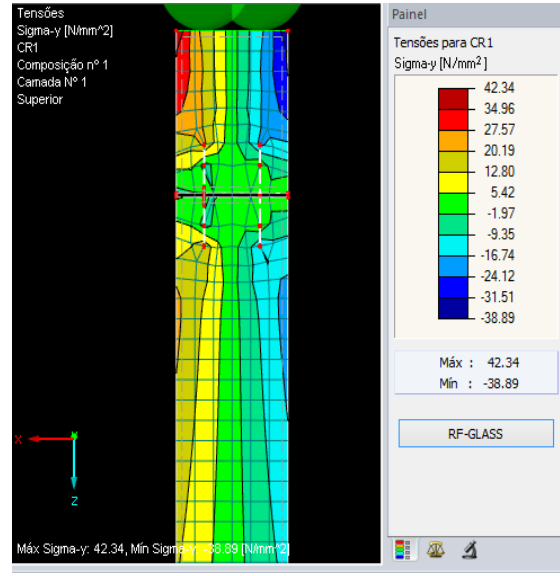


## APÊNDICE I – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO 151515.1,54(2)

Sigma-x

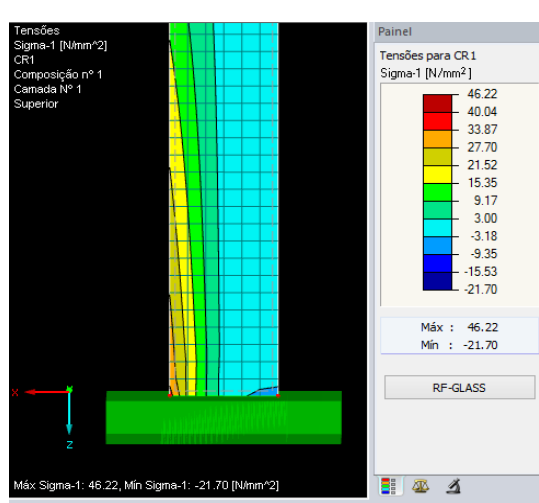
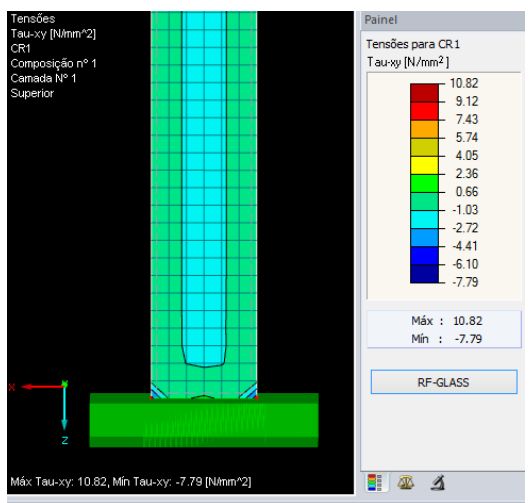
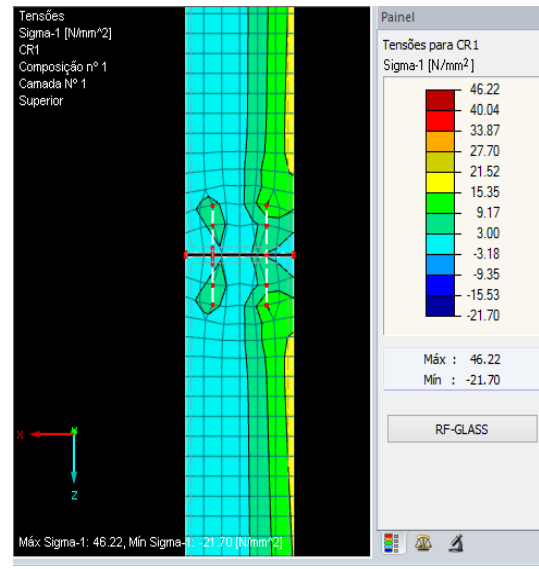
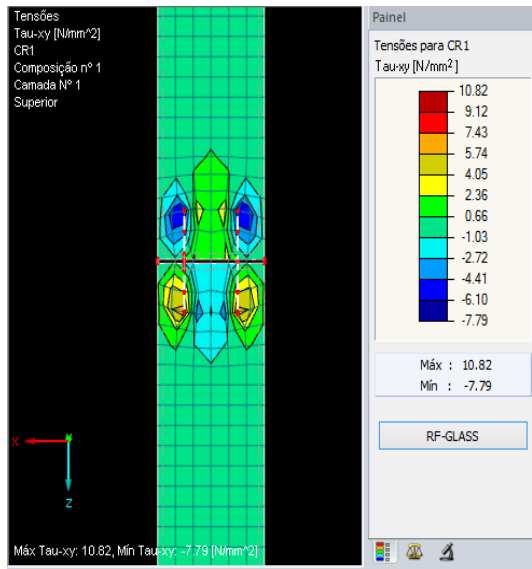
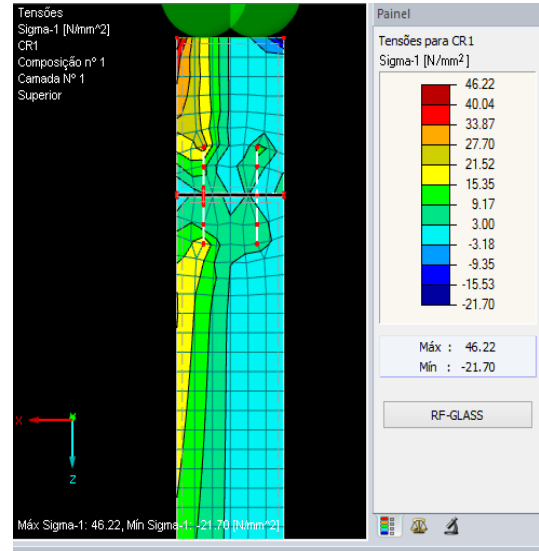
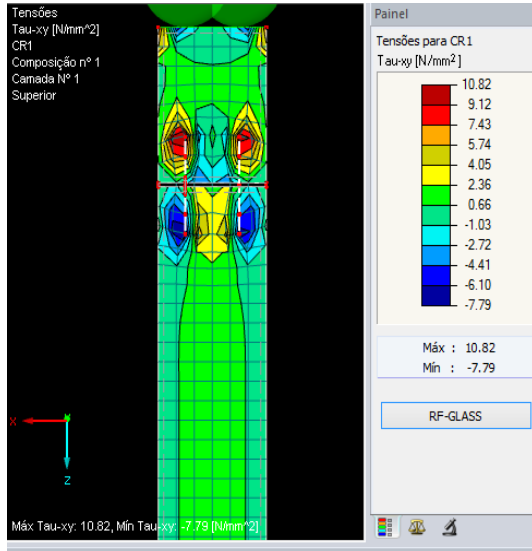


Sigma-y



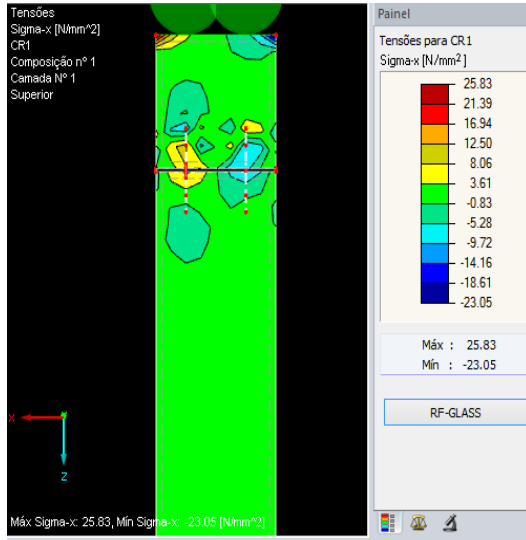
Cisalhamento xy

Sigma 1

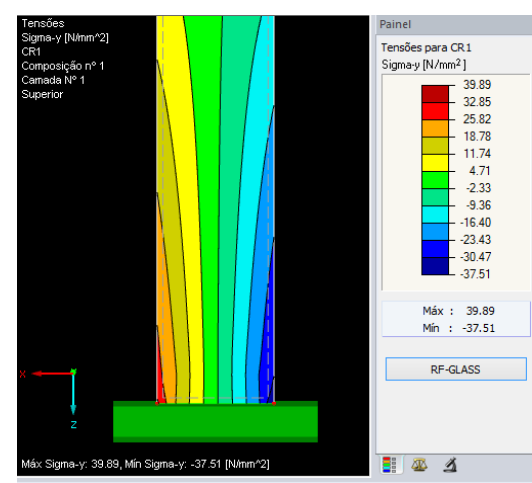
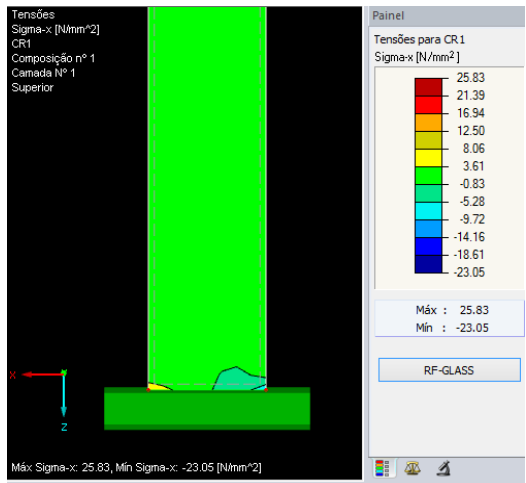
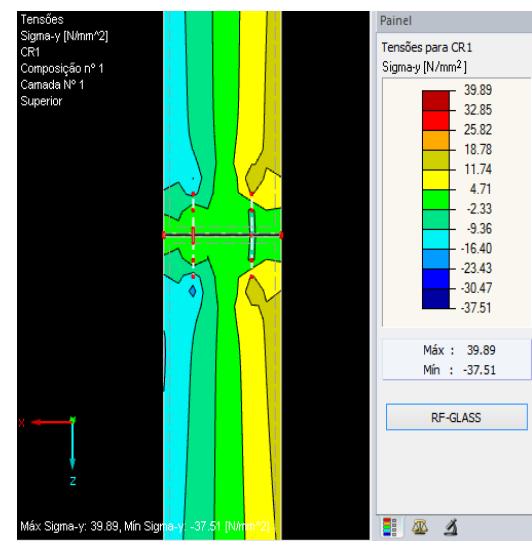
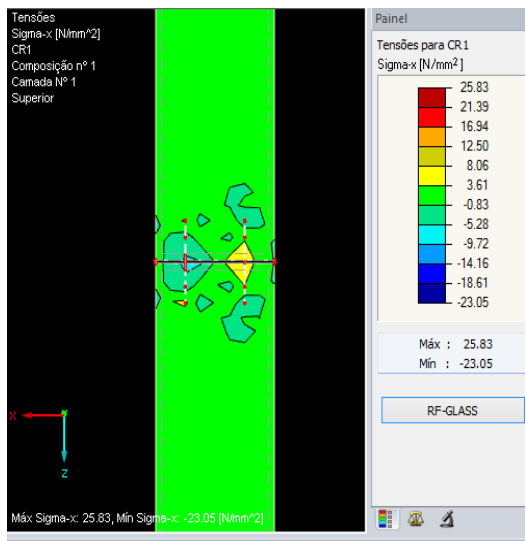
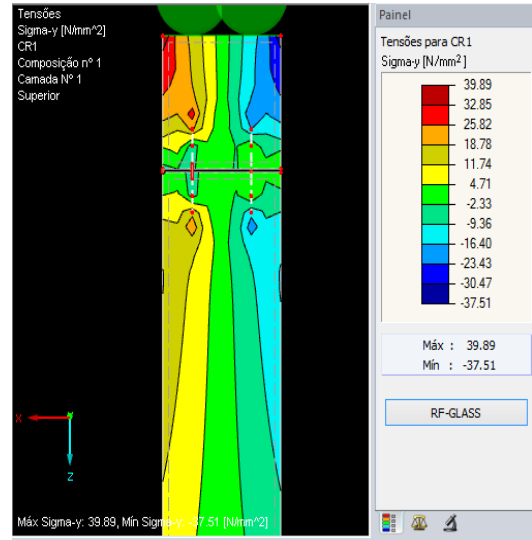


## APÊNDICE J – TENSÕES INTERNAS REFERENTES AO PAINEL PADRÃO POSICIONADO NA HORIZONTAL COM LAMINAÇÃO MELHORADA E LARGURA DE 40cm

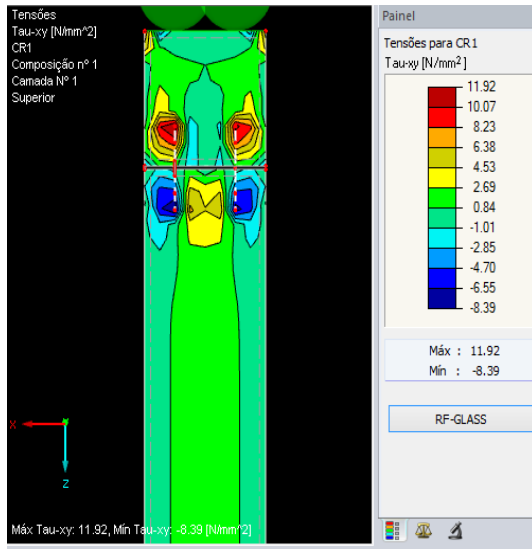
Sigma-x



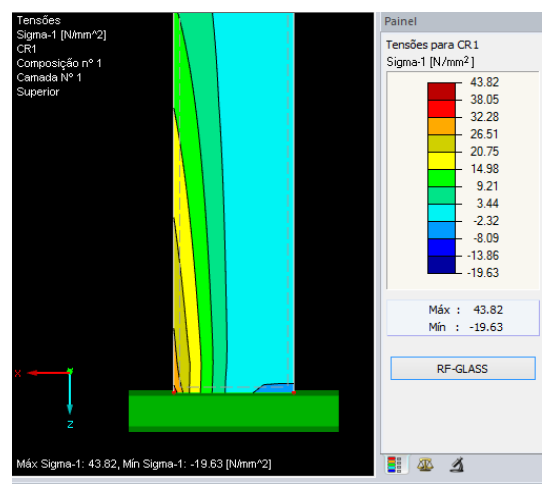
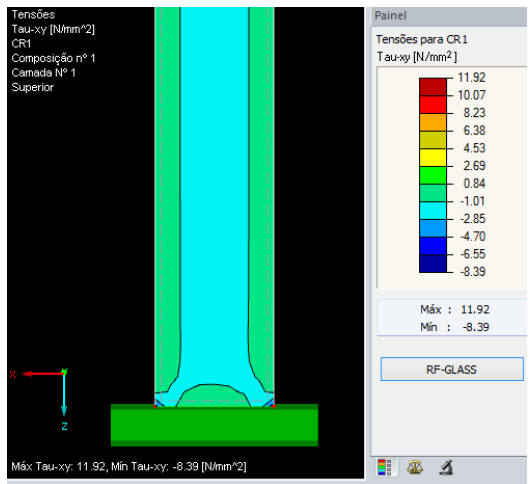
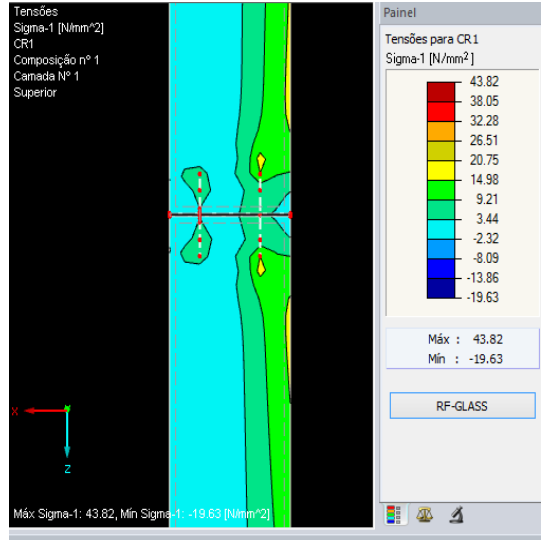
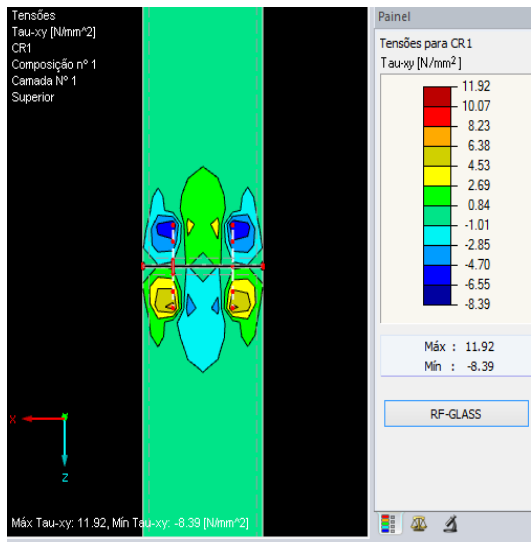
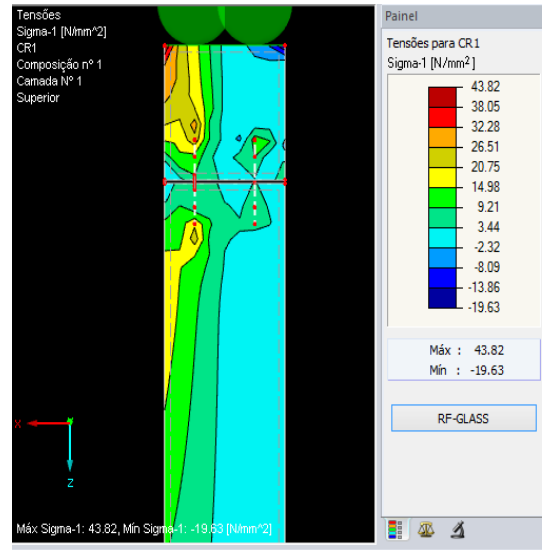
sigma-y



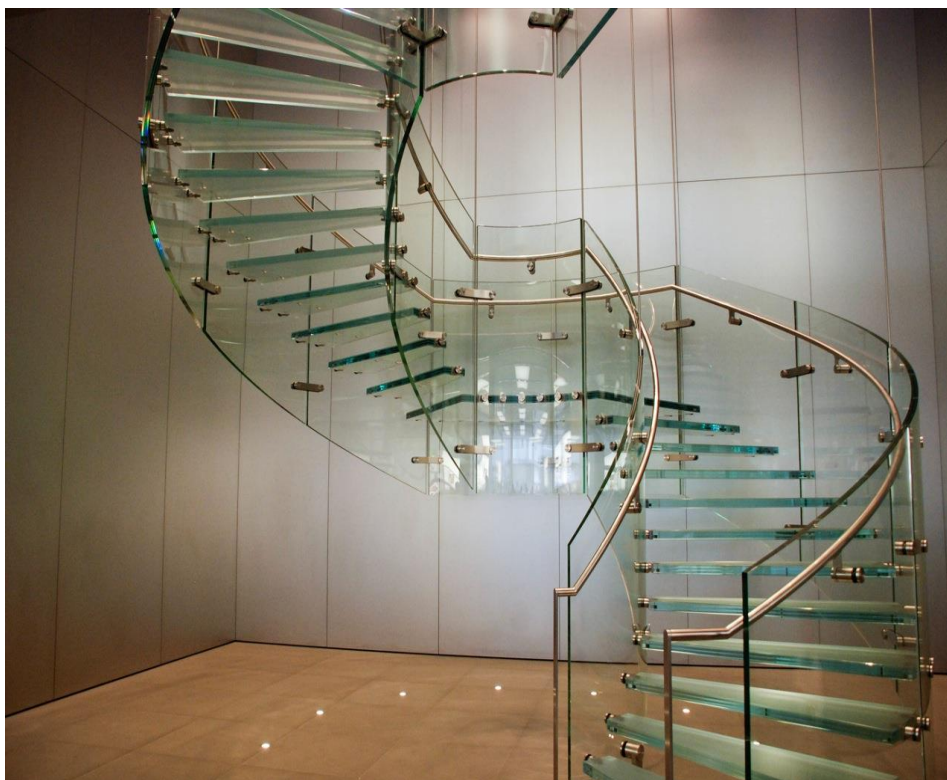
### Cisalhamento xy



### Sigma 1





**ANEXO A – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO VIDRO EM ESTRUTURAS**

FONTE: <http://reformafacil.com.br/produtos/escadas-produtos/escada-de-vidro-conheca-vantagens/>



FONTE: <https://loving-newyork.com/uk/apple-stores-in-new-york/>



FONTE: <http://www.brewster.ca/attractions-sightseeing/glacier-skywalk/>



FONTE: <http://www.brewster.ca/attractions-sightseeing/glacier-skywalk/>



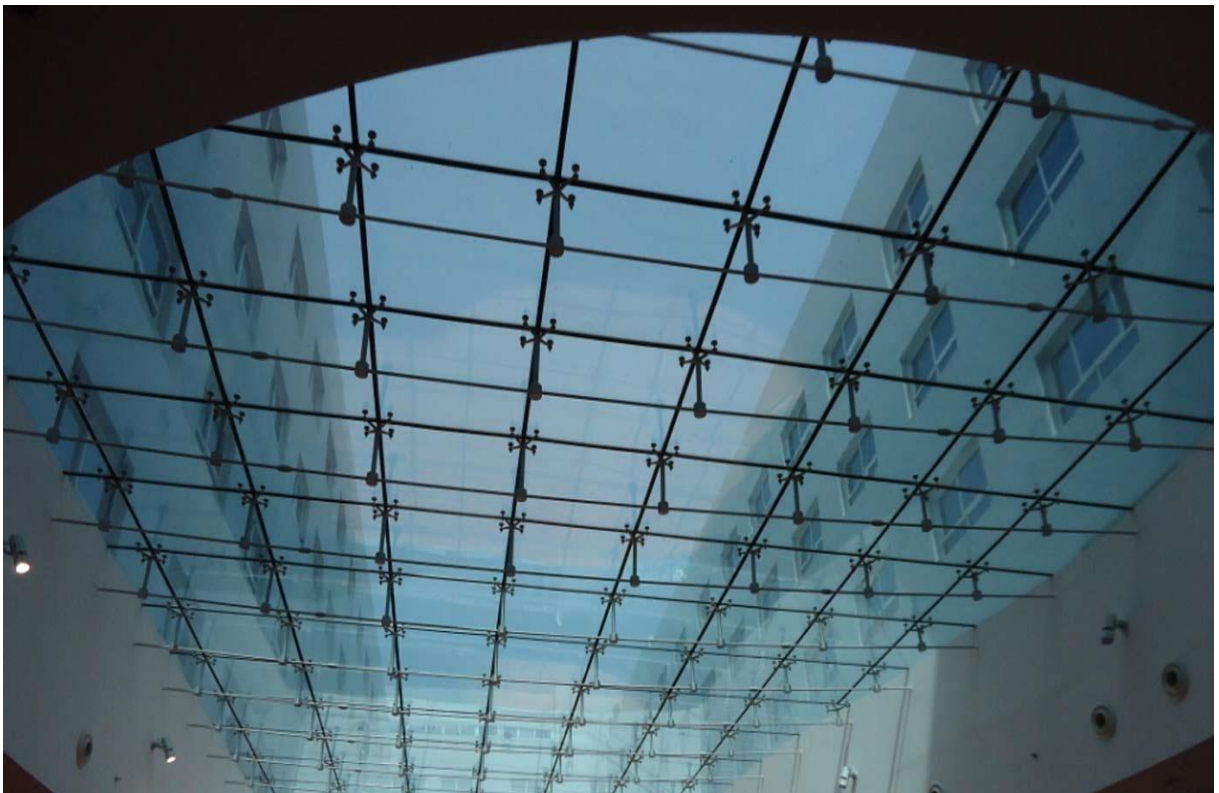
FONTE: <http://www.5starhelicoptertours.com/tours/grand-canyon-skywalk-express-helicopter-tour/>



FONTE: <https://www.coindesk.com/hsbc-central-banks-blockchain-economic-activity/>



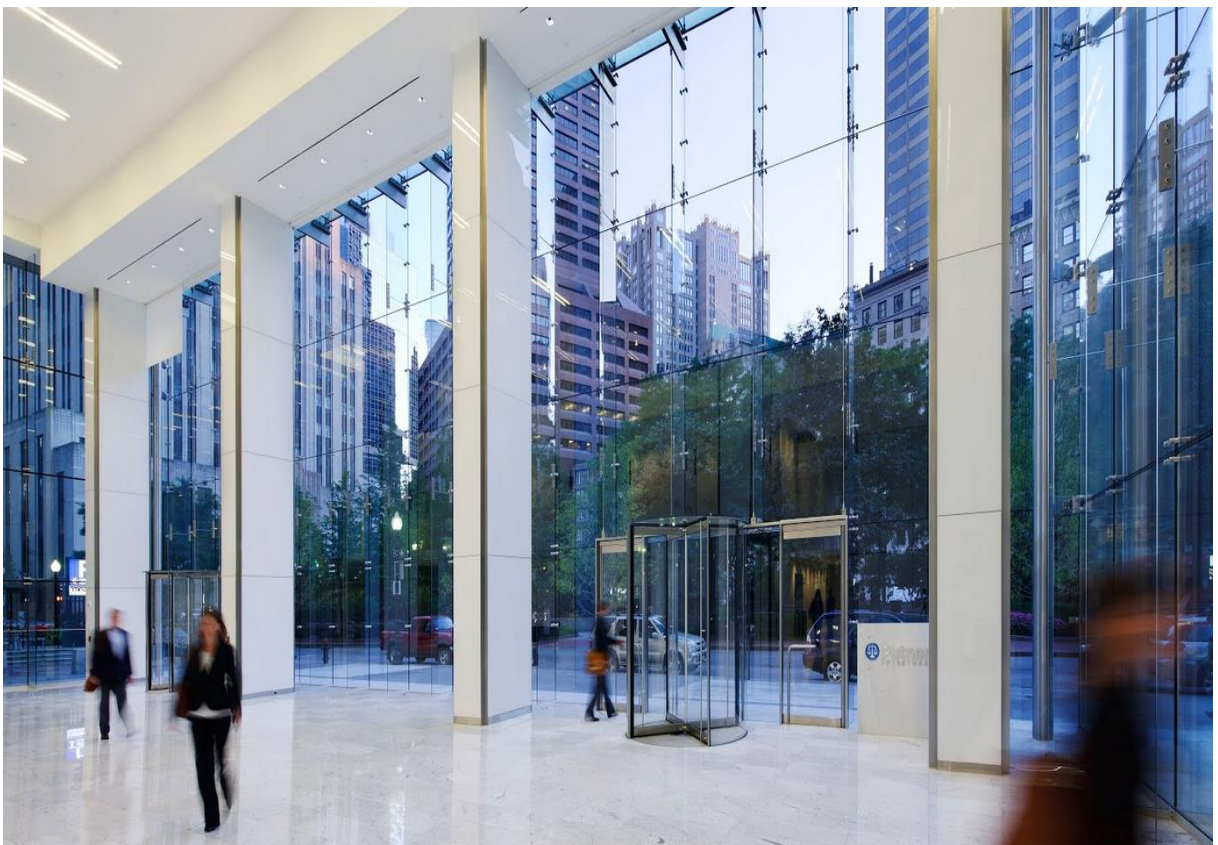
FONTE: <https://www.frener-reifer.com/references/all-glass-constructions/>



FONTE: [http://www.prisma.ae/service\\_single.php?id=2](http://www.prisma.ae/service_single.php?id=2)



FONTE: <http://envidracamento.vidrado.com/spider-glass>



FONTE: <http://www.wglass.com/blog/post/glass-fin-walls/>

## ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS SPIDERS (WALMETAL)



Relatório de Ensaio nº MEC/193.078/4/A/10  
Página: 1/3

### RELATÓRIO DE ENSAIO Nº MEC/193.078/4/A/10

#### CONJUNTO SPIDER GLASS

#### PROVA DE CARGA POR ESFORÇO DE COMPRESSÃO

**INTERESSADO:** **W. COSTA DE CARVALHO METAIS EPP – WALMETAL**  
Rua Ribeiro do Vale, 360 – Brooklin  
04568-000 – São Paulo – SP  
Ref.: (39.839)

#### 1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)

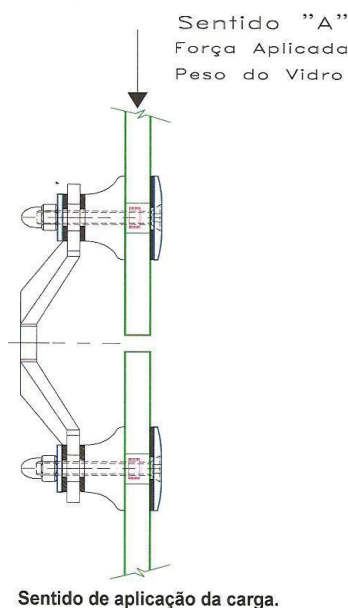
01 (uma) amostra identificada pelo interessado como: 01 (um) conjunto "Spider Glass" em Aço AISi inox 304, modelo **X 15**, composto por: arruela frontal em aço inox AISi 304, arruela de contato metal / vidro em polímero, rótula fixa em polímero preto, arruelas especiais de borracha, parafusos Ø M8 em aço inoxidável AISi 304 e porca de aço inox AISi 304, recebido no laboratório em 08/02/2010.

**Identificação interna nº 323.695.**

#### 2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)

Conforme solicitação do interessado, o conjunto foi fixado à máquina de ensaios por meio de um dispositivo metálico apropriado, simulando a montagem do mesmo na condição de uso em uma fachada de vidro. Dando-se continuidade ao ensaio, o conjunto foi submetido ao esforço de compressão até o limite de deformação.

A carga foi aplicada na posição "Sentido A", conforme desenho abaixo. Para esta prova de carga foi necessária a substituição do vidro por chapa de aço com 10mm de espessura (Vide foto nº 01).



Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

Relatório de Ensaio nº MEC/193.078/4/A/10  
 Página: 2/3

### 3. RESULTADOS OBTIDOS (SENTIDO A)

CARGA APLICADA		OCORRÊNCIAS
(N)	(kgf)	
3 089	315	Não apresentou ruptura do "Spider Glass" apenas deformação

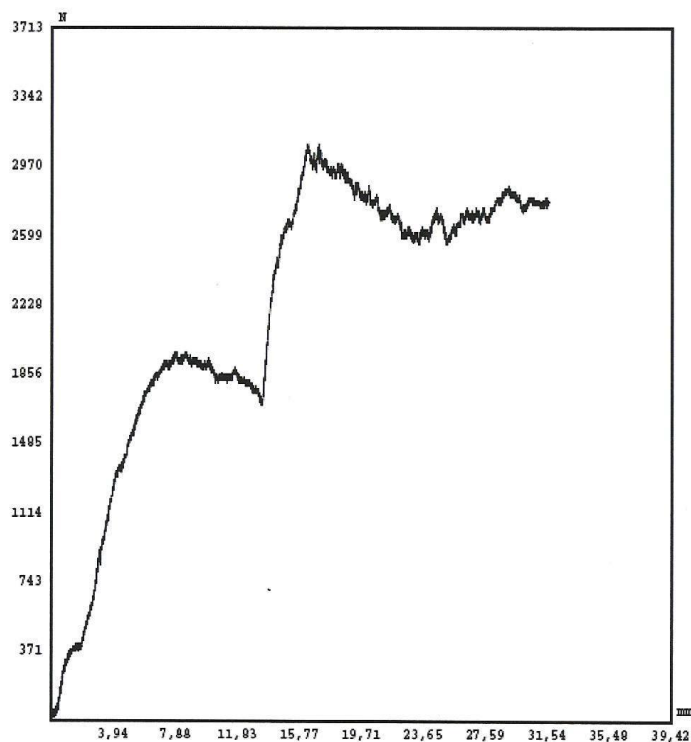


Gráfico: Carga x Deformação.

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

**RELATÓRIO DE ENSAIO Nº MEC/193.078/5/A/10**  
**CONJUNTO SPIDER GLASS**  
**PROVA DE CARGA POR ESFORÇO DE COMPRESSÃO**

**INTERESSADO: W. COSTA DE CARVALHO METAIS EPP – WALMETAL**  
 Rua Ribeiro do Vale, 360 – Brooklin  
 04568-000 – São Paulo – SP  
 Ref.: (39.839)

**1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)**

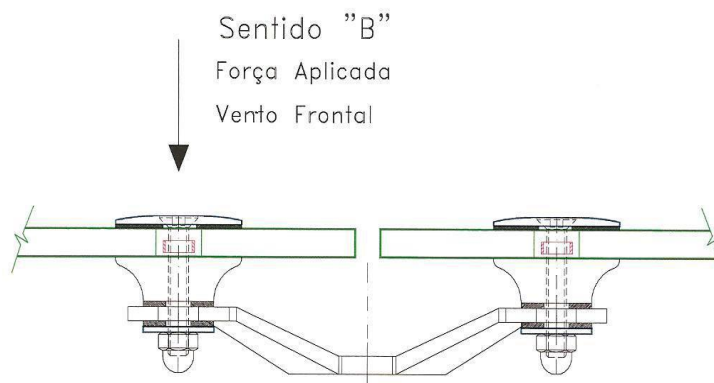
01 (uma) amostra identificada pelo interessado como: 01 (um) conjunto "Spider Glass" em Aço AISi inox 304, modelo **X 15**, composto por: arruela frontal em aço inox AISi 304, arruela de contato metal / vidro em polímero, rótula fixa em polímero preto, arruelas especiais de borracha, parafusos Ø M8 em aço inoxidável AISi 304 e porca de aço inox AISi 304, recebido no laboratório em 08/02/2010.

**Identificação interna nº 323.696.**

**2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)**

Conforme solicitação do interessado, o conjunto foi fixado à máquina de ensaios por meio de um dispositivo metálico apropriado, simulando a montagem do mesmo na condição de uso em uma fachada de vidro. Dando-se continuidade ao ensaio, o conjunto foi submetido ao esforço de compressão até o limite de deformação.

A carga foi aplicada na posição "Sentido B", conforme desenho abaixo. Para esta prova de carga foi necessária a substituição do vidro por chapa de aço com 10mm de espessura (Vide foto nº 01).



**Sentido de aplicação da carga.**

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.



Relatório de Ensaio nº MEC/193.078/5/A/10

Página: 2/4

**3. RESULTADOS OBTIDOS (SENTIDO B)**

CARGA APLICADA		OCORRÊNCIAS
(N)	(kgf)	
1 133	116	Não apresentou ruptura do "Spider Glass" apenas deformação

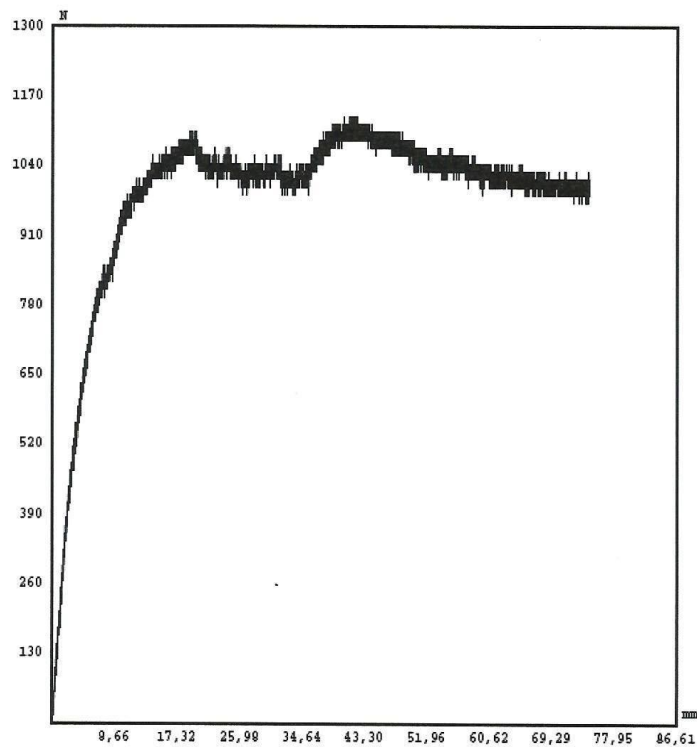


Gráfico: Carga x Deformação.

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

**RELATÓRIO DE ENSAIO Nº MEC/193.078/6/A/10**  
**CONJUNTO SPIDER GLASS**  
**PROVA DE CARGA POR ESFORÇO DE COMPRESSÃO**

**INTERESSADO: W. COSTA DE CARVALHO METAIS EPP – WALMETAL**  
Rua Ribeiro do Vale, 360 – Brooklin  
04568-000 – São Paulo – SP  
Ref.: (39.839)

**1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)**

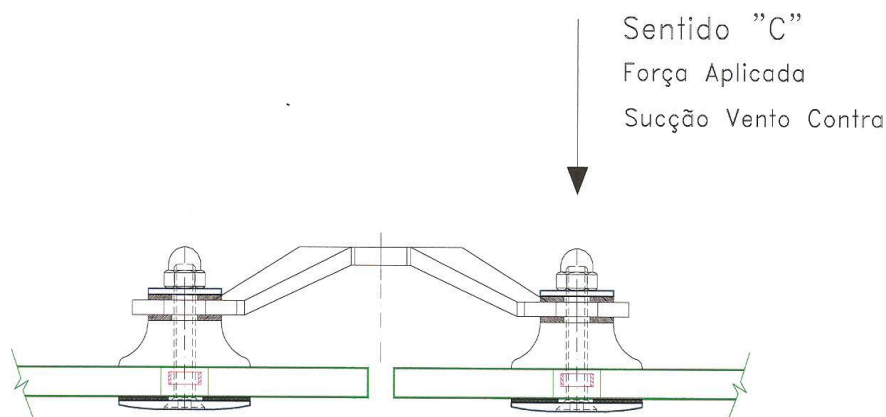
01 (uma) amostra identificada pelo interessado como: 01 (um) conjunto "Spider Glass" em Aço AISi inox 304, modelo **X 15**, composto por: arruela frontal em aço inox AISi 304, arruela de contato metal / vidro em polímero, rótula fixa em polímero preto, arruelas especiais de borracha, parafusos Ø M8 em aço inoxidável AISi 304 e porca de aço inox AISi 304, recebido no laboratório em 08/02/2010.

**Identificação interna nº 323.697.**

**2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)**

Conforme solicitação do interessado, o conjunto foi fixado à máquina de ensaios por meio de um dispositivo metálico apropriado, simulando a montagem do mesmo na condição de uso em uma fachada de vidro. Dando-se continuidade ao ensaio, o conjunto foi submetido ao esforço de compressão até o limite de deformação.

A carga foi aplicada na posição "Sentido C", conforme desenho abaixo. Para esta prova de carga foi necessária a substituição do vidro por chapa de aço com 10mm de espessura (Vide foto nº 01).



**Sentido de aplicação da carga.**

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.

Relatório de Ensaio nº MEC/193.078/6/A/10

Página: 2/4

### 3. RESULTADOS OBTIDOS (SENTIDO C)

CARGA APLICADA		OCORRÊNCIAS
(N)	(kgf)	
1 883	192	Não apresentou ruptura do "Spider Glass" apenas deformação

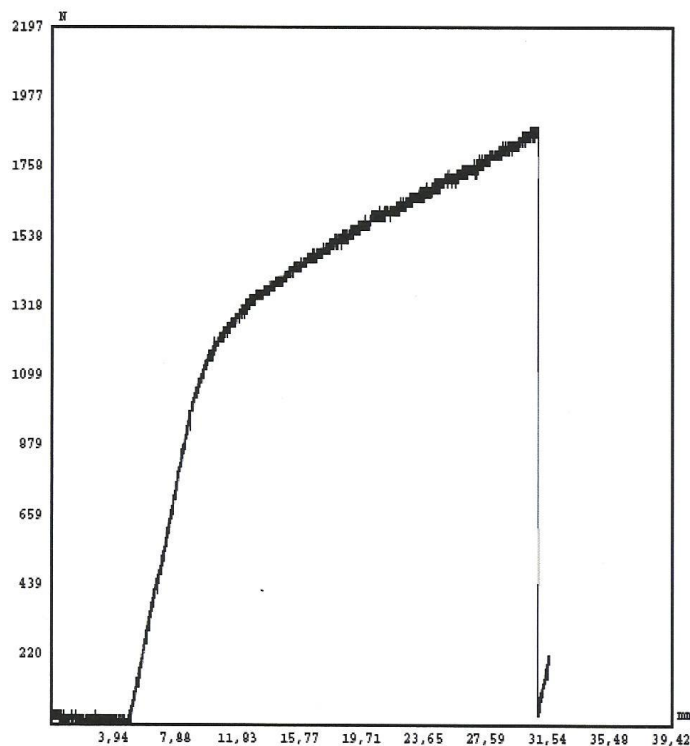


Gráfico: Carga x Deformação.

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) ensaiada(s).  
 A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de autorização prévia.