

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS - CARVI**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**LEANDRO GHIDOLIN ZARDO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS**  
**PARA APLICAÇÃO NA PARTE EXTERNA DE EDIFICAÇÕES**

**BENTO GONÇALVES**

**2021**

**LEANDRO GHIDOLIN ZARDO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS  
PARA APLICAÇÃO NA PARTE EXTERNA DE EDIFICAÇÕES**

Trabalho apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à aprovação da disciplina MEC0291 – Trabalho de Conclusão de Curso II a qual é obrigatória na grade curricular GRA000660H – Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Vagner Grison

**BENTO GONÇALVES**

**2021**

**LEANDRO GHIDOLIN ZARDO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS  
PARA APLICAÇÃO NA PARTE EXTERNA DE EDIFICAÇÕES**

Trabalho apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à aprovação da disciplina MEC0291 – Trabalho de Conclusão de Curso II a qual é obrigatória na grade curricular GRA000660H – Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Vagner Grison

**Aprovado em** \_\_/\_\_/\_\_

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Vagner Grison  
Orientador / Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier  
Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini  
Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

A **Deus** por esta conquista, sem Ele não somos nada, e ao longo desta caminhada que se encerra a dedicação e a fé foram fundamentais para tudo dar certo.

Aos meus pais **José Zardo** e **Dalvete Ghidolin Zardo** pelo apoio incondicional diariamente, sempre procurando oferecer o melhor independentemente da situação.

Aos meus colegas e amigos que me incentivaram em todos os momentos, os quais sou grato pelas ajudas e por entender as minhas ausências.

A Universidade de Caxias do Sul pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Mecânica.

A todos os professores que acabei conhecendo durante a graduação, pelos seus ensinamentos e conselhos prestados. Em especial ao professor **Vagner Grison**, responsável pela orientação deste trabalho por sua atenção e apoio.

A empresa Alomiconte Componentes de Alumínio Eireli que forneceu todo suporte necessário para o bom êxito deste trabalho.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

*“Viver é enfrentar um problema atrás do outro. O modo como você encara é que faz a diferença.”*

**Benjamin Franklin**

## RESUMO

Janelas de alumínio são utilizadas em edificações residenciais e comerciais brasileiras devido à longa vida útil, aspectos relacionados ao *design* do ambiente e ao conforto do usuário. As constantes evoluções da construção civil e as demandas do mercado e da indústria exigem cada vez mais o desempenho e a eficiência das esquadrias. Este trabalho apresenta as características empregadas na definição das esquadrias e seus elementos, além de informações referentes ao desempenho e questões relacionadas ao projeto e dimensionamento. Foram realizados cálculos analíticos, ensaios experimentais e simulações numéricas com o objetivo de verificar o comportamento das esquadrias quando sujeita a ação do vento. Através da definição dos pontos de controle, avaliou-se a deflexão e tensão dos perfis que compõe uma janela de correr de duas folhas chamada JCR200 comparando os resultados dos modelos de estudo em relação aos valores admissíveis previstos nas normas regulamentadoras. Os resultados de deflexão obtidos experimentalmente e analiticamente foram coerentes e inferiores a deflexão admissível prevista em norma, enquanto os resultados numéricos foram divergentes e mais conservadores apresentando um coeficiente de segurança de 2,9.

**Palavras-chave:** esquadrias, dimensionamento, comportamento estrutural, desempenho.

## ABSTRACT

Aluminum windows are used in Brazilian residential and commercial buildings due to their long service life, aspects related to the design of the environment and user comfort. The constant evolution of civil construction and the demands of the market and industry, increasingly the performance and efficiency of frames. This work presents the characteristics used in the definition of frames and their elements, as well as information regarding performance and issues related to design and dimensioning. Analytical calculations, experimental tests and numerical simulations were carried out in order to verify the behavior of the frames when presenting the wind action. Through the definition of the control points, the deflection and tension of the profiles that compose a sliding window of two sheets called JCR200 were evaluated, comparing the results of the study models in relation to the admissible values complied with in the regulatory standards. The deflection results that seek experimentally and analytically were coherent and inferior to the allowable deflection predicted in the norm, while the numerical results were divergent and more conservative elevating a safety coefficient of 2.9.

**Keywords:** frames, sizing, structural behavior, performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de uma esquadria e seus elementos.....	18
Figura 2 - Corte esquemático de esquadrias com vidro duplo e (a) junta do tipo cheia e (b) do tipo aberta.....	20
Figura 3 - Tipos básicos de janelas.....	21
Figura 4 - Alinhamentos para instalação de uma esquadria.....	22
Figura 5 - Isopletas das velocidades básicas do vento ( $V_0$ ), em m/s, conforme ABNT NBR 6123.....	25
Figura 6 - (a) Área de influência para dimensionamento dos perfis centrais e (b) esquema de carga dos perfis.....	31
Figura 7 - Disposição dos perfis centrais em janelas: (a) mesmo plano e (b) planos paralelos.....	33
Figura 8 - Janela de bater de duas folhas móveis.....	34
Figura 9 - Modelo 1 aplicado a pressões positivas em uma janela de bater de duas folhas móveis.....	34
Figura 10 - Modelo 2 aplicado a pressões negativas em uma janela de bater de duas folhas móveis.....	35
Figura 11 - Fluxograma das atividades.....	37
Figura 12 - Detalhes construtivos JCR 200.....	38
Figura 13 - Largura e altura das folhas da esquadria de correr de duas folhas.....	39
Figura 14 - Dimensões dos perfis centrais: (a) EXL-88501 e (b) EXL-88502.....	40
Figura 15 - Momentos de inércia e módulo de resistência dos perfis montantes.....	41
Figura 16 - Vista em corte da janela de correr de duas folhas JCR200.....	42
Figura 17 - Modelo discretizado.....	42



Figura 18 - Restrições impostas ao modelo numérico: (a) engaste do marco e (b) fixação e apoio das folhas de correr.....	43
Figura 19 - Vistas esquemáticas de uma câmara de ensaio.....	44
Figura 20 - Instalação da esquadria no vão: (a) vista interna e (b) vista externa.....	45
Figura 21 - Posicionamento dos relógios comparadores em uma janela de correr de duas folhas.....	46
Figura 22 - Resultados de deflexão do modelo numérico.....	48
Figura 23 - Tensão máxima obtida nos montantes centrais.....	49
Figura 24 - Deflexão máxima dos perfis centrais da JCR200.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de deflexão experimental e dados dos modelos 1 e 2 obtidos na análise de uma janela de bater de duas folhas móveis.....	35
Tabela 2 - Variação do coeficiente de pressão em função do ângulo de incidência do vento sobre a esquadria.....	36
Tabela 3 – Resultados dos cálculos analíticos.....	47
Tabela 4 – Deflexões máximas do modelo numérico.....	48
Tabela 5 – Tensões de flexão referente ao modelo numérico.....	49
Tabela 6 – Resultados de deflexão referentes aos ensaios experimentais.....	50

## LISTA DE SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>CAE</b>	<i>Computer Aided Engineering</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 TEMA .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	15
1.3 OBJETIVO GERAL.....	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 JANELA EM EDIFICAÇÕES.....	17
<b>2.1.1 Tipologia.....</b>	<b>20</b>
2.1.1.1 Janela de correr.....	21
<b>2.1.2 Instalação e manutenção.....</b>	<b>22</b>
2.2 DESEMPENHO DAS ESQUADRIAS .....	23
<b>2.2.1 Permeabilidade do ar.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2 Resistência a cargas uniformemente distribuídas.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3 Estanqueidade à água.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.4 Uso, manuseio e segurança de operação.....</b>	<b>26</b>
2.3 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS JANELAS.....	27
<b>2.3.1 Cálculo da ação do vento.....</b>	<b>28</b>
2.3.1.1 Forças estáticas devidas ao vento .....	28
<b>2.3.2 Esforços e verificação de estabilidade .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3 Análise computacional através do método de elementos finitos.....</b>	<b>33</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 DELIMITAÇÃO DAS PRESSÕES DE VENTO E TAMANHO DA ESQUADRIA....	37

3.2 DEFINIÇÕES DO PROTÓTIPO JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS.....	38
3.3 CÁLCULO MATEMÁTICO ANALÍTICO .....	39
3.4 MODELAGEM NUMÉRICA.....	41
3.5 ENSAIO EXPERIMENTAL.....	43
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1 RESULTADOS DOS CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	47
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	47
4.3 RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL.....	49
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS.....	50
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>
<b>APÊNDICE A - CÁLCULO ANALÍTICO DE DEFLEXÃO E TENSÃO MÁXIMA EM PERFIS MONTANTES DE UMA ESQUADRIA DE CORRER DE DUAS FOLHAS....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE B – DEFLEXÕES OBTIDAS NOS CÁLCULOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO A - VALORES DE PRESSÃO DE VENTO, MEDIDOS EM PASCAL (PA), CONFORME REGIÃO DO PAÍS E NÚMERO DE PAVIMENTOS DA EDIFICAÇÃO.</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO B - EFEITO COMBINADO DA RUGOSIDADE DO TERRENO (S<sub>2</sub>) .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO C - FATOR PROBABILÍSTICO REFERENTE A SEGURANÇA E VIDA ÚTIL DA EDIFICAÇÃO (S<sub>3</sub>) .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO D - PROJETO JCR200 - JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução da construção civil no Brasil tem pressionado as indústrias envolvidas neste setor a aumentar sua produção e entregar seus produtos com o menor prazo possível mantendo a qualidade e preço acessível ao mercado. Desta forma a incorporação de novas técnicas, estratégias e otimização de custos é de extrema importância para manter a competitividade.

As esquadrias externas para edificações fazem parte do contexto abordado. Além de agregar na estética do edifício, elas são responsáveis por proporcionar conforto térmico, acústico e lumínico. Segundo Martins (2010, p. 5), “De uma maneira geral pode-se dizer que as caixilharias vieram revolucionar a relação entre os edifícios e o mundo exterior, atuando como uma tela que retrata essa realidade filtrada pelo homem”.

São inúmeros os tipos de janelas existentes, cada qual com uma funcionalidade, composta por diferentes acessórios e aplicáveis a situações distintas. Podem ser fabricadas em alumínio, aço, PVC, madeira, vidro, entre outros. Necessitam que sejam instaladas adequadamente para garantir que suas funções como ventilação, iluminação e isolamento sejam desempenhadas.

A flexibilidade com o design da esquadria devido a gama de perfis possível de ser obtida através do processo de extrusão e um vasto conjunto de acabamentos diferentes proporcionam alternativas interessantes para a aplicação de uma janela em alumínio.

O crescimento dos edifícios em altura veio trazer novos desafios à aplicação e especificação das esquadrias. O conhecimento da distribuição do vento nos edifícios assim como os processos de fabricação das esquadrias, permitiram obter soluções mais rigorosas do ponto de vista do dimensionamento (CARDOSO, 2004).

Para dimensionar uma esquadria é necessário um conhecimento prévio sobre a altura em relação ao chão, relevo e região do local em que será aplicada a janela. Com estas informações é possível definir a velocidade do vento que atuará na edificação para assim calcular a pressão de vento, a qual será de extrema importância para análise estrutural do projeto.

Normas técnicas como ABNT NBR 10821: 2017 (Esquadrias para edificações) e ABNT NBR 15575: 2013 (Edificações Habitacionais - Desempenho) servem como

base para que os projetos atendam os requisitos mínimos de conforto, segurança e desempenho.

Neste trabalho foi desenvolvido um método para dimensionamento estrutural de um tipo de esquadria em alumínio conhecido como, por exemplo, janela de correr de duas folhas. A esquadria analisada foi disposta pela empresa Alumicone Componentes de Alumínio Eireli, a qual comercializa perfis, componentes e persianas para esquadrias.

Baseado nas normas técnicas, ensaios experimentais, simulações numéricas e cálculos analíticos, este documento tem como principal objetivo melhorar o desempenho, agregar na confiabilidade do projeto e auxiliar no desenvolvimento de futuras esquadrias.

## 1.1 TEMA

O presente trabalho tem como principal finalidade ampliar o conhecimento sobre o comportamento estrutural de esquadrias de alumínio em edificações residenciais e comerciais com enfoque na avaliação da tensão e deflexão de uma janela de correr de duas folhas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Caixilhos de alumínio são empregados principalmente devido a sua longa vida útil sem necessidade de manutenção. Além disso, a razão entre sua resistência e peso é elevada, o que favorece na redução das cargas introduzidas na estrutura do edifício. A estabilidade dimensional e baixa deformação também são fatores que contribuem para sua utilização.

De acordo com Viegas (2012), a necessidade de cumprir funções tão diversas exige que os projetos das caixilharias sejam melhores estruturalmente e mais rigorosos, principalmente quanto há aspectos relacionados à segurança e funcionalidade, os quais influenciam diretamente na integridade física e bem estar dos usuários.

Estudar e analisar os modos de falha de uma esquadria é o primeiro passo na busca por este refino citado por Viegas (2012). Definir os pontos críticos da estrutura e saber quais são os aspectos que levarão a falha permite estabelecer condições de contorno que facilitam a análise e auxiliam no dimensionamento estrutural de uma esquadria.

Conhecendo os limites admissíveis e informações de resistência dos perfis e do vidro que compõem a janela, permite a elaboração de métodos de cálculo que possibilitam um estudo mais amplo a fim de aperfeiçoar o dimensionamento de um caixilho e obter resultados de desempenho próximo ao ideal. Porém, é necessário que estes procedimentos sejam embasados na teoria e principalmente alinhados com as normativas para que sejam seguros e confiáveis.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento estrutural de uma janela de correr de duas folhas aplicada na parte externa de edifícios residenciais e comerciais.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) definir as condições de contorno aplicáveis ao modelamento e dimensionamento do objeto de estudo;
- b) desenvolver a modelagem matemática analítica com base nas normas e na teoria clássica para fins de atendimento de requisitos funcionais e normativos;
- c) desenvolver a modelagem numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF) para identificar em detalhe a tensão e a deflexão dos perfis que compõem a esquadria;
- d) realizar testes experimentais conforme as normativas a fim de se obter resultados reais dos deslocamentos transversais dos perfis.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo pretende-se apresentar e caracterizar uma esquadria de janela. São tratados assuntos referentes a funcionalidade, composição, instalação, exigências de desempenho, propriedades e questões relacionadas ao dimensionamento para fins de análise estrutural.

Em especial é abordada a janela de correr de duas folhas demonstrando as vantagens e desvantagens para sua aplicação, seus aspectos funcionais e questões relacionadas a sua caracterização.

O Método dos Elementos Finitos também faz parte do conteúdo apresentado nesta etapa. É demonstrada sua importância para determinação do comportamento da esquadria e verificação de possíveis modos de falha.

### 2.1 JANELA EM EDIFICAÇÕES

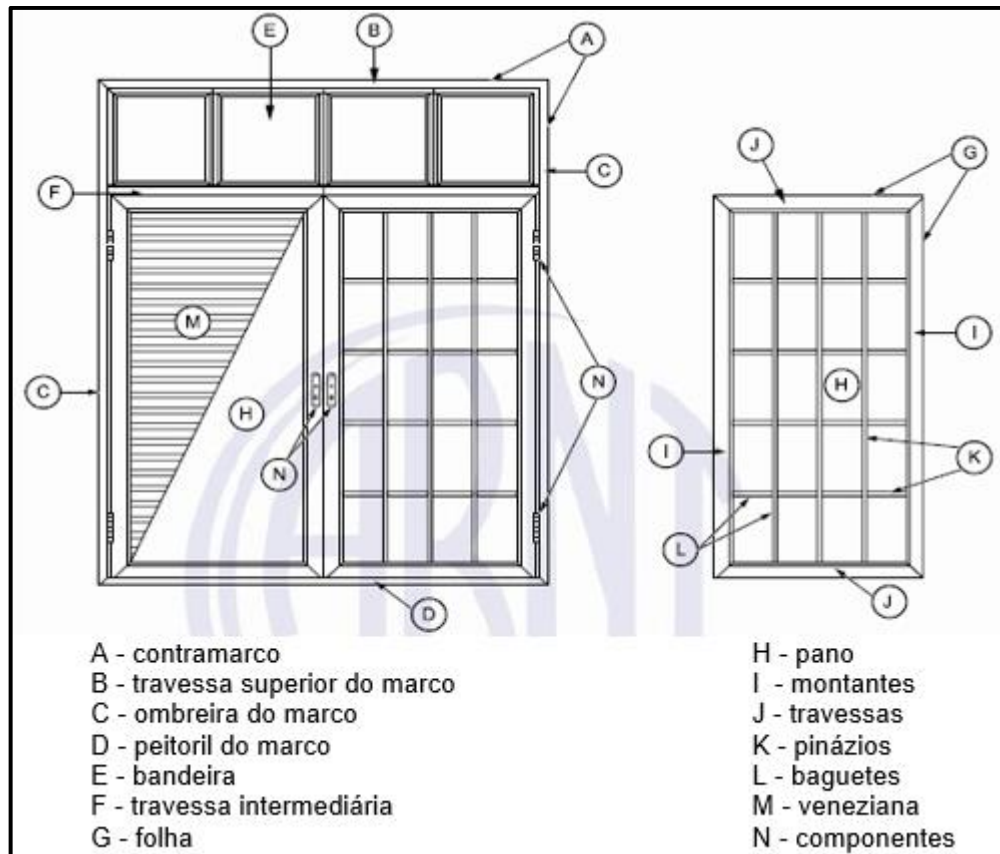
De acordo com a NBR 10821-1 (2017, p.1), janela é uma esquadria “vertical ou inclinada, geralmente envidraçada, destinada a preencher um vão em fachadas ou não. Sua finalidade é permitir a iluminação e/ou ventilação de um recinto para outro.”

A utilização do alumínio como matéria prima para a fabricação de esquadrias proporciona vantagens como estabilidade dimensional, boa resistência mecânica e elevada resistência a corrosão. Além de ser quase 3 vezes mais leve que o aço, suas características próprias permitem a obtenção de perfis com inúmeras geometrias agregando na estética e design da janela (ZIKUZA,2001).

Segundo Allen (2013), elementos foram adicionados às janelas com o passar do tempo, agregando funções como regulação de fluxo de ar, segurança contra roubos, permitir a entrada de luz e bloquear a entrada de água e neve, impedir a entrada de insetos e garantir conforto térmico e acústico.

Luduvico (2016), relata que as janelas possuem detalhes construtivos e elementos típicos, independente do material a qual é fabricada. De acordo com a ABNT NBR 10821-1 (2017), as janelas são instaladas no vão, o qual é uma abertura na parede que recebe a esquadria, e as partes que compõe o caixilho podem ser observadas no esquema geral apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema geral de uma esquadria e seus elementos.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 10821-1 (2017).

De acordo com a NBR 10821 (2017) e ABCI (1991), os itens citados na legenda da Figura 1 possuem diferentes especificações e funcionalidades. Abaixo segue a descrição de alguns elementos que compõem a janela.

- a) **Contramarco:** instalado diretamente na parede de fechamento, geralmente pré-moldado em concreto, alumínio ou madeira. Sua função é garantir a vedação e regularização do vão, além de permitir ao construtor fazer o acabamento do vão sem danificar a esquadria. Pode ser utilizado como gabarito racionalizando o processo construtivo. Atualmente a instalação de uma janela de alumínio em edifícios residenciais é realizada através do uso de um quadro provisório (contramarco), desta forma evita-se batidas, riscos, respingos de argamassa e pintura durante a obra civil, mantendo a integridade da esquadria. Suas características fazem o balizamento, garantindo as dimensões necessárias para o posicionamento da esquadria.
- b) **Marco:** quadro periférico e aparente da esquadria. Formado por peças fixas que entram em contato com o contramarco ou contorno do vão. Em janelas

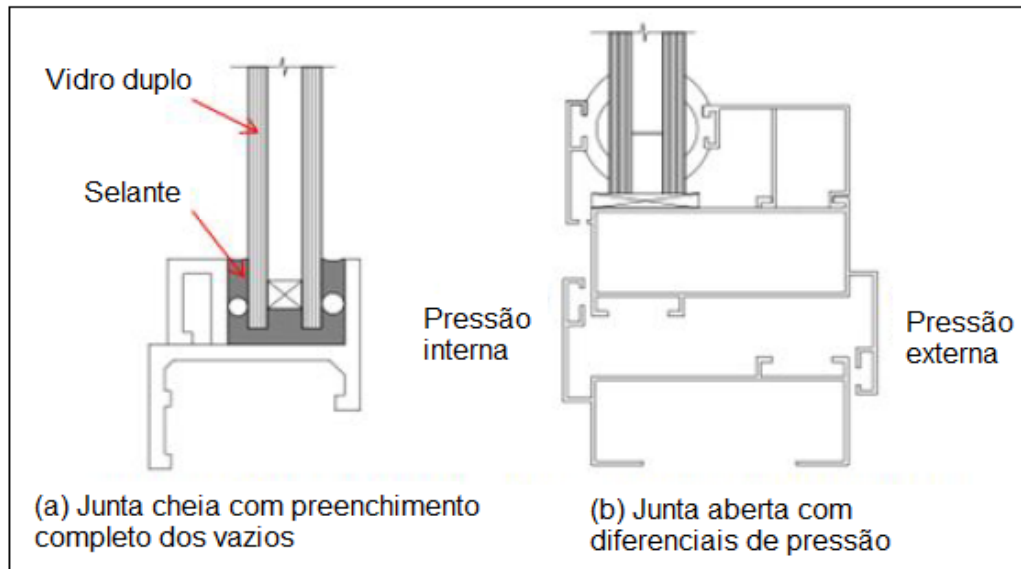
de correr funcionam como trilhos ou guias das folhas móveis e em janelas de abrir como batentes.

- c) Folha: parte fixa ou móvel da esquadria, onde são instalados vidros e venezianas. Esta parte pode ou não conter subdivisões. Sua função é permitir ou restringir a entrada de luz ou ar ao ambiente interno da edificação.
- d) Pano: parte integrante das folhas destinado à vedação. Geralmente constituído de placas de vidro ou venezianas.
- e) Vidro: elemento translúcido e versátil que compõe o pano. Desempenha funções como auxiliar no isolamento acústico, iluminação natural e contribuir na integração entre os ambientes externos e internos da edificação. Segundo a ABNT NBR 7199 (2016), pode ser instalado com baguele, gaxetas, massa de vidro ou silicone, variando sua espessura e tipo conforme a aplicação e finalidade.
- f) Travessas: perfis que constituem os elementos horizontais de uma esquadria ou de qualquer parte integrante desta. Sua função é garantir a sustentação das placas de vidro.
- g) Montantes: perfis que compõem os elementos verticais de uma janela ou de qualquer parte desta. São seções ocas destinados a absorver os esforços de tração e compressão que ocorrem na alvenaria nas laterais do vão. De acordo com a NBR ABNT 10821-3 (2017), em janelas de correr de duas folhas as deformações impostas pela distribuição uniforme das forças do vento são avaliadas no montante central da esquadria.
- h) Juntas: região entre dois componentes distintos ou entre duas partes adjacentes de um mesmo componente, que pode conter ou não elementos de ligação e vedação. Sua função é estabelecer a conexão entre os perfis que compõem a esquadria, além de garantir a estanqueidade do produto, não permitindo a entrada de ar ou água através dessas junções.

De acordo com a ABCI (1991), as juntas que promovem a estanqueidade, distinguem-se entre cheias e seladas, que por meio de gaxetas ou selantes garantem o preenchimento completo dos vazios. Luduvico (2016), considera que as juntas abertas ou drenadas possuem sua parte central vazia, onde através do princípio da equalização de pressões, transforma a parte frontal em uma barreira para infiltrações

e a posterior uma barreira de ar. A Figura 2 mostra a diferenciação entre juntas abertas e cheias.

Figura 2 – Corte esquemático de esquadrias com vidro duplo e (a) junta do tipo cheia e (b) do tipo aberta.



Fonte: Adaptado de Luduvico (2016).

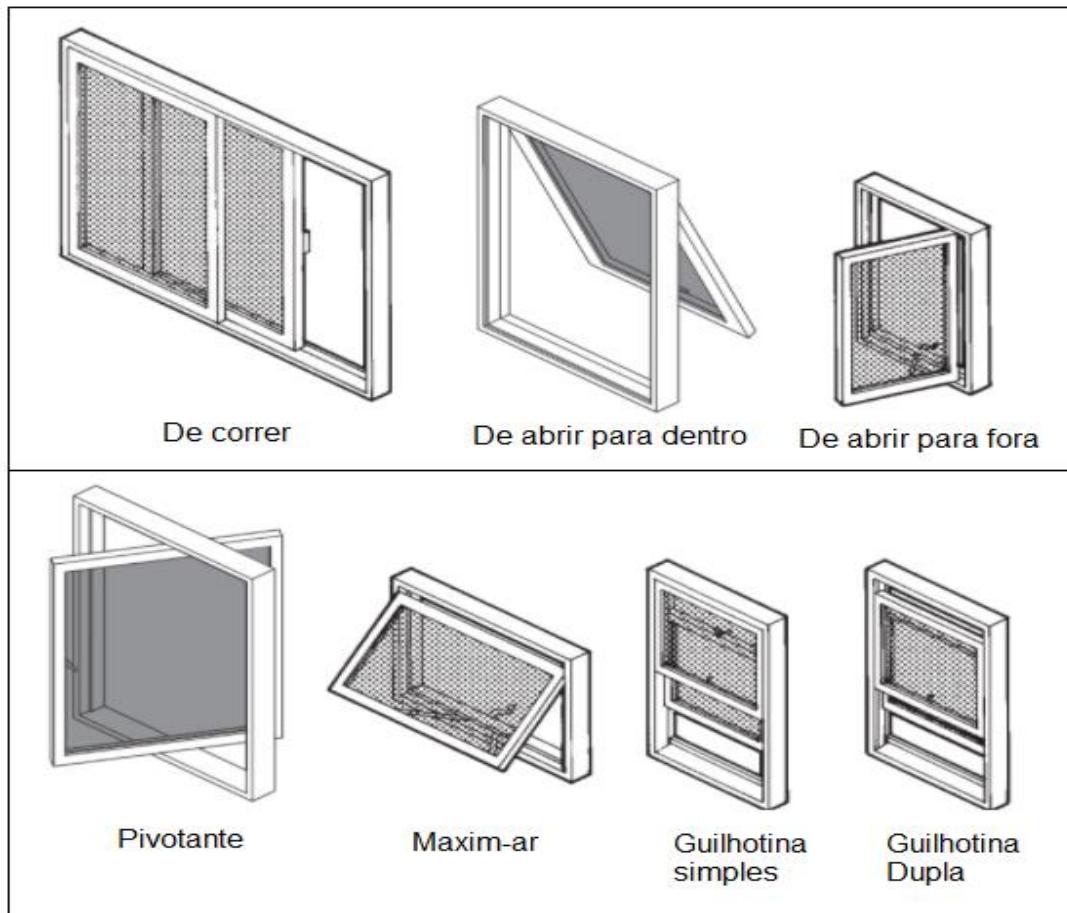
Uma esquadria também é composta por alguns acessórios definidos como componentes. Pode-se citar roldanas, fechos, dobradiças, puxadores, escovas de vedação, trincos, limitadores, entre outros. São destinados a fixação, manobra, travamento e/ou estanqueidade das partes fixas e móveis da janela. Geralmente instalados pelo próprio fabricante de esquadrias.

### 2.1.1 Tipologia

A ABNT NBR 10821-1 (2017), define cada tipo de esquadria segundo sua finalidade, utilização, funcionalidade, movimento, composição das suas partes e componentes.

De acordo com Salgado (2018), os modelos mais comuns encontrados de janelas no mercado são do tipo de correr, guilhotina, abrir (folha simples ou folha dupla), pivotante (horizontal ou vertical), projetante deslizante e basculante. A escolha da esquadria deve ser feita de acordo com a necessidade, mas sua definição deve ser embasada nas informações prestadas pelos fornecedores ou fabricantes. A Figura 3 retrata os modelos citados por Salgado (2018).

Figura 3 – Tipos básicos de janelas.



Fonte: Adaptado de Allen (2013).

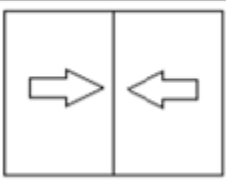
#### 2.1.1.1 Janela de correr

A funcionalidade de uma janela de correr baseia-se no movimento horizontal das folhas móveis, as quais são conduzidas através de roldanas que rolam em cima de carris inseridos nos aros fixos das janelas, segundo planos paralelos.

As janelas de correr podem ser projetadas em uma variedade de tamanhos e proporções quase ilimitada. A esquadria de correr tem uma estrutura mais leve comparada com as janelas projetadas, as quais possuem caixilhos que giram para fora ou para dentro a partir de seus marcos, portanto, necessitam de rigidez estrutural para resistir as cargas de vento, enquanto estão sendo suportadas somente em dois cantos (ALLEN, 2013).

Salgado (2018), apresenta através do Quadro 1 as vantagens e desvantagens para a escolha de uma janela de correr:

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens de uma janela de correr.

<b>Janela de correr de duas folhas</b>	
	Possui uma ou mais folhas que se movimentam por deslizamento horizontal no plano da folha.
<b>Vantagens</b>	Fácil operação.
	Ventilação regulável conforme a abertura das folhas.
<b>Desvantagens</b>	Vão livre para ventilação de apenas 50%.
	Dificuldade de limpeza na face externa.
	Riscos de infiltração de água através dos drenos do trilho inferior, em vedações mal executadas.

Fonte: Adaptado de Salgado (2018).

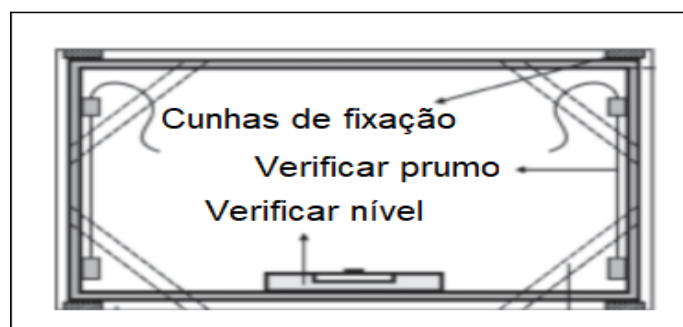
Segundo Martins (2010), são poucos os acessórios estruturais deste modelo de esquadria, já que estes itens são utilizados somente para fixar as folhas móveis ao aro e aplicados ao sistema de fechamento. Porém, este tipo de janela possui muitos problemas em nível de estanqueidade à água e permeabilidade de ar e, por isso, necessita de componentes que diminuam esses efeitos.

Pode-se ter janelas de correr de uma ou duas folhas móveis, e, além disso, é possível implantar grades e persianas no seu lado externo, já que as folhas não se prolongam além do plano de ação.

### 2.1.2 Instalação e manutenção

As esquadrias podem ser parafusadas, coladas ou chumbadas no vão. Salgado (2018) e Likuza (2001) apontam que a fixação de uma janela deve ser feita, respeitando os prumos, níveis e alinhamentos, os quais garantem um desempenho adequado em relação à estanqueidade a água, permeabilidade ao ar, resistência as cargas de vento e esforços de uso. A Figura 4 mostra os itens a serem aferidos para instalação da janela.

Figura 4 – Alinhamentos para instalação de uma esquadria.



Fonte: Adaptado de Salgado (2018).

As cunhas de fixação existentes na Figura 4 são responsáveis por manter o posicionamento provisório da janela até a conclusão da instalação. Utiliza-se também travessas fixadas ao quadro para garantir o ângulo de 90 graus entre as laterais da esquadria.

Conforme NBR ABNT 10821-5 (2017), as folgas necessárias para o posicionamento da esquadria no vão são definidas proporcionalmente com o tamanho da esquadria e geralmente encontradas no manual de instalação das esquadrias fornecido pelo fabricante.

Os aspectos relacionados a manutenção de uma esquadria externa baseiam-se de acordo com a NBR ABNT 10821-5 (2017), a qual recomenda a limpeza de guarnições e escovas, lubrificação de articulações e roldanas que trabalham sobre perfis, ajustes de regulagem e reaperto de parafusos que fixam os componentes ou folhas móveis, além da verificação do desgaste do acabamento da esquadria.

## 2.2 DESEMPENHO DE ESQUADRIAS

De acordo com Likuza (2001, p.77), “Independente do material ou método construtivo, a esquadria necessita atender a requisitos mínimos de qualidade para conferir o conforto ao usuário, e por ser um dos componentes da construção civil, sua durabilidade participa da definição da vida útil da edificação.”

Torres (2009), traduz a durabilidade citada por Likuza (2001) como sendo a inalteração das características de desempenho iniciais, associada a um plano de manutenção contínuo coerente com as especificações do fabricante durante o período de vida útil da esquadria.

Segundo Lima (2018) e Luduvico (2016), o desempenho das janelas de alumínio provém da avaliação quanto à permeabilidade ao ar, estanqueidade à água, resistência às cargas uniformemente distribuídas, operações referentes ao uso e manuseio e segurança nas operações de manuseio.

Os requisitos e critérios para a avaliação do desempenho das edificações habitacionais são definidos pela ABNT NBR 15575 (2013) e os métodos de ensaio para verificação destas exigências são abordados na ABNT NBR 10821-3, a qual especifica procedimentos, sequência, execução e os resultados dos ensaios.

A testagem das esquadrias em laboratório visa a determinação do desempenho da janela quanto à permeabilidade do ar, estanqueidade à água e resistência às ações do vento (ABNT NBR 10821-3, 2017).

Os resultados extraídos de testes experimentais possibilitam a calibração e validação de modelos matemáticos utilizados nas simulações das janelas submetidas às solicitações do vento, além de contribuir no estudo e desenvolvimento de protótipos para o aperfeiçoamento das esquadrias.

### 2.2.1 Permeabilidade do ar

O fluxo de ar entre o ambiente externo e interno de uma edificação deve ser imperceptível pelos usuários, assegurando o conforto em relação as correntes de ar e a eventuais ruídos provenientes da esquadria. A permeabilidade do ar é fundamental para garantir o equilíbrio térmico interior, além de influenciar nas perdas de energia térmica.

A NBR ABNT 10821-2 classifica as esquadrias em relação a permeabilidade do ar em níveis mínimo, intermediário e superior. A vazão de ar é determinada através do comprimento das juntas abertas e da área do vão. Likusa (2001), determina através do Quadro 2 as exigências de permeabilidade de ar para cada estado brasileiro segundo o tipo de ambiente e classe de utilização.

Quadro 2 – Ensaio de permeabilidade do ar.

TIPO DE AMBIENTE	LOCALIZAÇÃO : (Estado do país)	CLASSE DE UTILIZAÇÃO	EXIGÊNCIA DE PERMEABILIDADE AO AR
condicionado ou climatizado	qualquer Estado	Normal ou Melhorada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência térmica mínima 0,15 m<sup>2</sup>K/W</li> <li>Vazão máxima de 5m<sup>3</sup>/h x metro linear de juntas abertas, sob uma pressão de 30 Pa</li> </ul>
		Reforçada ou Excepcional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência térmica mínima 0,15 m<sup>2</sup>K/W</li> <li>Vazão máxima de 5m<sup>3</sup>/h x metro linear de juntas abertas, sob uma pressão de 50 Pa</li> </ul>
não condicionado ou não climatizado	São Paulo, Paraná, Sta. Catarina e Rio Grande do Sul	Normal ou Melhorada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Velocidade do ar ≤ 0,5m/s, a uma distância de 2,0cm da janela quando submetida a uma pressão de 30 Pa</li> </ul>
		Reforçada ou Excepcional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Velocidade do ar ≤ 0,5m/s, a uma distância de 2,0cm da janela quando submetida a uma pressão de 50 Pa</li> </ul>
	outros Estados	qualquer classe de utilização	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não há exigência</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Likusa (2001).

### 2.2.2 Resistência à cargas uniformemente distribuídas

A segurança dos usuários e da edificação está associada ao correto dimensionamento da janela através da análise da resistência à cargas uniformemente

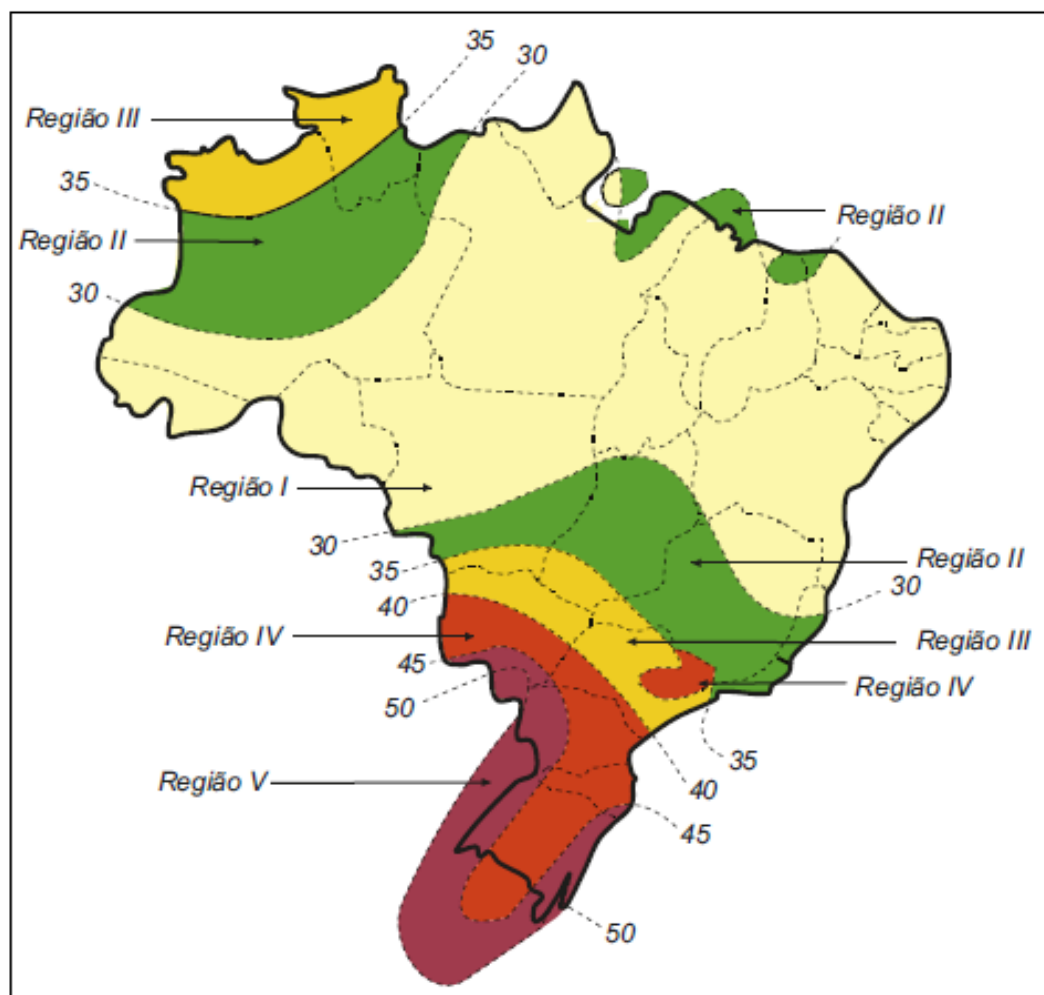


distribuídas proporcionadas pela ação do vento. Elevadas deformações diminuem o desempenho das juntas e aumentam a entrada de ar exterior para interior, e se forem muito severas propiciam entrada de água e empenamentos dos perfis (CARDOSO, 2004).

De acordo com Likusa (2001), a janela é exposta a máxima pressão de vento incidente, proveniente da velocidade básica do vento, da sua posição em relação ao envoltório externo do edifício, sua altura em relação ao solo e da localização topográfica ou regional do edifício.

A ABNT NBR 6123 (1988) apresenta a velocidade básica do vento ( $V_0$ ), através da divisão do território nacional em 5 regiões de acordo com a localização e altitude das estações meteorológicas da aeronáutica. A Figura 5 mostra a distribuição das velocidades básicas do vento.

Figura 5 – Isopletas das velocidades básicas do vento ( $V_0$ ), em m/s, conforme ABNT NBR 6123.



Fonte: Adaptado de catálogo da construção civil da empresa Alumiconte (2020).

A ABNT NBR 10821-3 (2017), estabelece pressões de ensaio diferenciadas para cada categoria de uso, sendo mais rigorosas quanto mais complexo for o formato do edifício. O Anexo A demonstra as pressões de vento utilizadas para a realização de ensaios.

A pressão de projeto ( $P_p$ ) mostrada no Anexo A é também conhecida como pressão dinâmica, deve ser calculada segundo a ABNT NBR 6123, para assim definir a pressão de ensaio determinada pela ABNT NBR 10821-2 (2017).

Likusa (2001) e Lima (2018), relatam que a esquadria quando submetida a pressões de vento características do local do edifício, não deve apresentar situações que prejudiquem o desempenho quanto as condições de funcionamento, de estanqueidade e deflexão instantânea máxima ou residual (quando o perfil não retorna à condição inicial) superiores aos valores especificados de acordo com a ABNT NBR 10821-2 (2017).

### **2.2.3 Estanqueidade à água**

Uma das características de desempenho mais difíceis de serem cumpridas é a estanqueidade à água. As esquadrias devem ser estanques a condições de chuva e vento que acontecem, em média, uma vez em cada três anos. Segundo Yamamoto (2005), as principais causas referentes à falta de estanqueidade são associadas ao dimensionamento incorreto dos sistemas de drenagem e vedação e da montagem e instalação mal sucedida.

De acordo com Martins (2010), em janelas de correr o efeito conjunto de chuva e vento, associado a energia cinética, capilaridade, gravidade, sobre pressão de vento e correntes de ar faz com que a entrada de água ocorra principalmente através das juntas.

A ABNT NBR 10821-2 (2017), determina que a esquadria não pode apresentar escorrimento de água no seu interior ou vazamento de água nos seus componentes quando submetida a pressão de ensaio equivalente a 20% da pressão de projeto.

### **2.2.4 Uso, manuseio e segurança de operação**

Conforme Likusa (2001), os esforços devido ao uso, ou seja, operações de manuseio são empíricas. Em cada tipo de janela são simuladas operações de utilização normal ou acidental aplicando cargas especificadas na norma. Segundo Likusa (2001), as esquadrias são ensaiadas em relação à resistência ao esforço

torsor, esforço vertical ao plano da folha, arrancamento das articulações, resistência à deflexão da travessa inferior, resistência ao esforço horizontal no plano da folha, resistência à flexão e comportamento a ações repetidas de abertura e fechamento.

De acordo com a ABNT NBR 10821-3 (2017), as esquadrias, independente do movimento que tenham, devem suportar 10000 ciclos de abertura. Além disso, para assegurar a segurança nas operações de manuseio, as janelas não podem apresentar deformação residual superior a 0,4% do comprimento livre dos perfis em análise, fissura ou ruptura dos vidros e deterioração de qualquer componente ou elemento de fixação durante os ensaios previstos em norma.

### 2.3 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DAS JANELAS

De acordo com Martins (2010), o dimensionamento de uma janela leva em consideração a ação do vento como sendo a condição mais desfavorável. Para análise estrutural, Martins (2010) cita o vidro e os perfis que compõe a esquadria como sendo os principais absorvedores da força imposta pelo vento. As propriedades mecânicas atribuídas ao vidro e perfis de alumínio são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas do vidro e alumínio.

<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Vidro</b>	<b>Alumínio</b>
<b>Módulo de elasticidade</b>	70 GPa	70 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,22	0,33
<b>Módulo de deformação transversal</b>	26,2 GPa	27,8 GPa
<b>Densidade</b>	2500 kg/m <sup>3</sup>	2700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistência a compressão</b>	1000 MPa	84,5 MPa
<b>Limite de resistência a tração</b>	-	<b>Liga 6063</b> - 126,9 a 208,2 MPa
<b>Resistência ao escoamento</b>	-	<b>Liga 6063</b> - 55,8 a 172,6 MPa
<b>Tensão de ruptura a flexão</b>	<b>Comum</b> 40 MPa	-
	<b>Temperado</b> 180 MPa	-

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7199 (2016) e Buzinelli (2000).

O dimensionamento do vidro segue os requisitos da ABNT NBR 7199 (2016), a qual solicita que seja analisado o tipo e funcionamento do envidraçamento, se será aplicado a esquadrias fixas, móveis ou projetantes, sua posição de aplicação em relação ao solo e sua localização na obra para assim definir qual tipo e espessura o vidro deverá ter para suportar as pressões de vento incidentes.

### 2.3.1 Cálculo da ação do vento

De acordo com Wahrhaftig (2017), turbulências são geradas através da passagem de correntes de ar por edificações ou obstáculos localizados nas proximidades. Essas modificações da ação do vento causam alterações na velocidade média do vento, superpondo efeitos dinâmicos aos efeitos estáticos causados pela velocidade média.

A ABNT NBR 6123 (1988), recomenda para a avaliação dinâmica a variação do módulo e a orientação da velocidade média do vento. Sendo assim, a norma fornece três modelos para calcular a ação do vento nas estruturas: forças estáticas devidas ao vento ou modelo estático, modelo dinâmico simplificado e modelo dinâmico discreto.

#### 2.3.1.1 Forças estáticas devidas ao vento

A velocidade básica do vento ( $V_0$ ), mostrada na Figura 5 deste documento, está associada ao local onde a estrutura está construída. A ABNT NBR 6123 (1988), define a velocidade básica do vento como sendo a velocidade de uma rajada de 3 segundos proveniente de qualquer direção horizontal, excedida em média uma vez em 50 anos, acima de 10 metros do terreno em campo aberto e plano.

A velocidade básica multiplicada pelos fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , possibilita obter a velocidade característica do vento ( $V_k$ ) aplicada a edificação a ser analisada. A Equação 1 demonstra a velocidade característica.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (1)$$

Sendo assim,  $S_1$ , definido como fator topográfico, considera variações do relevo do terreno e o aumento do vento na presença de morros e taludes, mas não considera o aumento da turbulência com o aumento da velocidade do vento. Utiliza-se o valor de 0,9 quando o objeto de estudo se localiza em vales profundos protegidos de todos os ventos, 1,1 para encostas e cristas de morros sujeitos a aceleração do vento e 1 para demais casos não citados.

$S_2$  é definido como sendo o efeito combinado da rugosidade do terreno com variação da velocidade do vento, altura acima do terreno ( $z$ ) e dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. Os valores de  $S_2$  são determinados de acordo com a ABNT NBR 6123 (1988) e podem ser visualizados no Anexo B.

As classes abordadas no Anexo B são definidas pela ABNT NBR 6123 (1988) de acordo com as características construtivas e estruturais das partes ou elementos da edificação analisados. As classes A, B e C são definidas a seguir:

- a) Classe A: todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal não exceda 20 metros.
- b) Classe B: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros.
- c) Classe C: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros.

O fator probabilístico,  $S_3$ , é baseado em conceitos estatísticos. Considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A ABNT NBR 6123 (1988), adota o valor de 0,63 para edificações normais, como sendo a probabilidade de a velocidade básica do vento exceder ou igualar-se aos valores definidos de acordo as isopletas de velocidade demonstradas na Figura 5, considerando o período de vida útil da edificação de 50 anos.

Na falta de uma norma específica para determinação do fator de segurança ou de indicações correspondentes de normas estruturais os valores a serem considerados para  $S_3$  são determinados conforme Anexo C. Com a determinação da velocidade característica ( $V_k$ ), é possível obter a pressão dinâmica ou pressão de obstrução através da equação (2):

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot V_k^2 \quad (2)$$

Sendo:

$q$  = Pressão dinâmica (N/m<sup>2</sup>);

$\rho$  = Massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>);

$V_k$  = Velocidade característica (m/s).

A força do vento ( $F$ ) sobre um elemento plano da edificação de área ( $A$ ) depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo.

Sendo assim, a força é definida pela Equação (3) e a pressão de ensaio pela Equação (4).

$$F = q \cdot A \cdot (C_e - C_i) \quad (3)$$

$$P_e = q \cdot (C_e - C_i) \quad (4)$$

Sendo:

$C_e$  = Coeficiente de forma externo;

$C_i$  = Coeficiente de forma interno.

Os coeficientes de forma devem ser calculados de acordo com cada aplicação, seguindo as orientações da ABTN NBR 6123 (1988) a qual considera o posicionamento da janela, a forma do edifício e fatores aerodinâmicos (efeitos de sob pressão e sucção).

### 2.3.2 Esforços e verificação de estabilidade

De acordo com Yamamoto (2005), a deflexão de uma janela depende da rigidez dos perfis e de outros componentes como o vidro. Apesar dos perfis que compõem a esquadria serem reforçados, o dimensionamento deve ser feito limitando a deflexão admissível dos perfis para evitar a ruptura do vidro, principalmente quando o envidraçamento da esquadria não for duplo ou estruturalmente reforçado.

Segundo Viegas (2012), a verificação do estado limite de utilização consiste na comparação entre o deslocamento transversal máximo admissível e o deslocamento transversal proveniente da ação do vento. Os valores máximos de deflexão propostos ao estado limite variam em função do tipo de janela e envidraçado, podendo ser expresso de forma relativa ou absoluta de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4 – Deflexão relativa e absoluta máximas admissíveis em função do tipo de envidraçado.

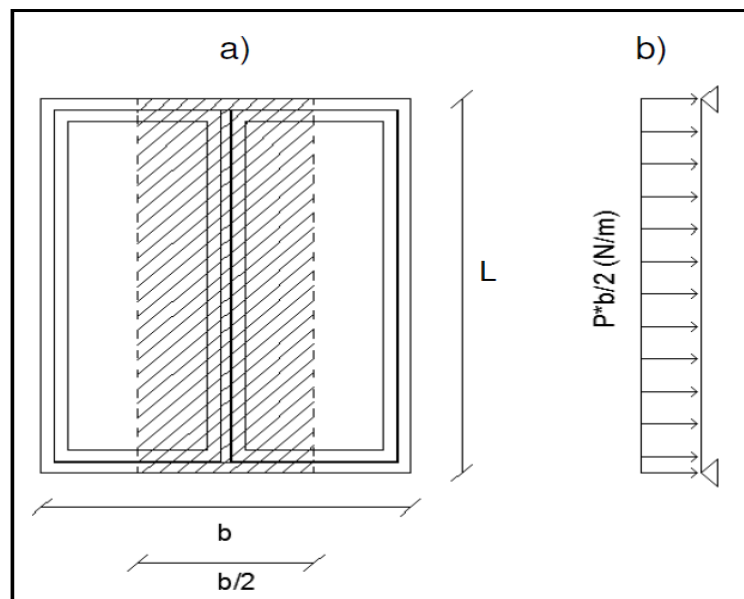
<b>Deflexão máxima admissível</b>		
	<b>Relativa</b>	<b>Absoluta</b>
Portas e janelas exteriores com vidro simples	$(1/150)*L$	15 mm
Portas e janelas com vidros isolantes (duplos ou triplos)	$(1/200)*L$	11 mm
Fachadas leves	$(1/200)*L$	15 mm

Fonte: Viegas (2012).

O termo  $L$  do Quadro 4 refere-se ao comprimento total do perfil analisado para se obter as deflexões relativas ou absolutas. De acordo com Viegas (2012), a deflexão máxima pode ser determinada baseando-se na teoria de vigas, desde que a carga seja aplicada uniformemente ao plano da esquadria e que os deslocamentos transversais originados não sejam superiores a 1/100 do tamanho do vão em análise.

Yamamoto (2005) e Martins (2010), tratam os elementos centrais das esquadrias como sendo mais desfavoráveis quanto a deflexão e consideram que o comportamento da carga uniformemente distribuída sobre os perfis se assemelha ao carregamento de uma viga simplesmente apoiada. A Figura 6 ilustra a região crítica da esquadria e o comportamento dos perfis em relação a carga uniformemente distribuída.

Figura 6 – (a) Área de influência para dimensionamento dos perfis centrais e (b) esquema de carga dos perfis.



Fonte: Martins (2010).

Através do produto da pressão ( $P$ ) e a largura sobre a área em análise ( $b/2$ ) tem-se a carga distribuída por metro de comprimento. Considerando a aplicação de carga uniformemente distribuída sobre os montantes centrais de acordo com a Figura 6 (b), Viegas (2012) cita a Equação (5) e Equação (6) para calcular respectivamente a máxima deflexão ( $\delta_{max}$ ) e o momento fletor máximo ( $M_f$ ) que ocorrem no meio do vão.

$$\delta_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{P \cdot L^4}{E \cdot I} \quad (5)$$

$$M_f = P \cdot \frac{L^2}{8} \quad (6)$$

Onde:

$\delta_{max}$  = deflexão máxima (m);

$M_f$  = momento fletor máximo (N.m);

$P$  = carga por metro de comprimento (N/m);

$L$  = altura da janela (m);

$E$  = módulo de elasticidade (N/m<sup>2</sup>);

$I$  = momento de inércia (m<sup>4</sup>).

A tensão normal provocada pela flexão dos perfis também chamada de tensão de flexão pode ser obtida através da Equação (7) e Equação (8).

$$\sigma = \frac{M_f \cdot c}{I} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{M_f}{w} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão normal (MPa);

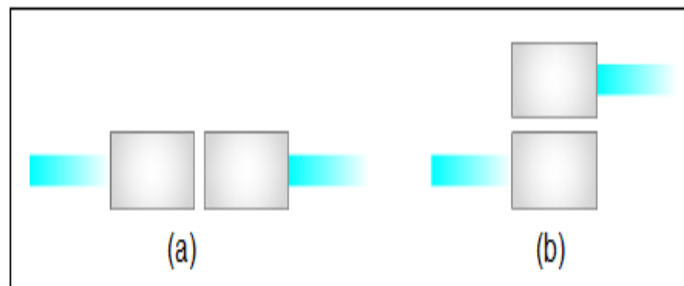
$w$  = módulo de resistência (m<sup>3</sup>);

$c$  = distância em relação à linha neutra (m).

Dependendo do tipo de alinhamento dos perfis centrais em análise da esquadria, o momento de inércia a ser considerado para efetuar o cálculo de deformação pode variar. A Figura 7 mostra como os perfis centrais podem estar posicionados.



Figura 7 – Disposição dos perfis centrais em janelas: (a) mesmo plano e (b) planos paralelos.



Fonte: Martins (2010).

De acordo com Martins (2010), os perfis que não se encontram no mesmo plano (b), as deflexões podem ocorrer de forma não linear já que as interações entre os elementos e o atrito entre as interfaces dos perfis contribuem para variação da inércia total. A parte prática deste trabalho abordará o efeito causado pelo alinhamento paralelo dos perfis centrais em janelas de correr, definindo um coeficiente capaz de traduzir o real comportamento dos perfis e seu impacto para definição do momento de inércia total.

### 2.3.3 Análise computacional através do método de elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF), determina o estado de tensão e deformação de um sólido composto por uma geometria quando exposto a ações externas. Conforme Azevedo (2003), a análise de uma estrutura deve considerar a geometria, material constituinte e as ações externas aplicadas.

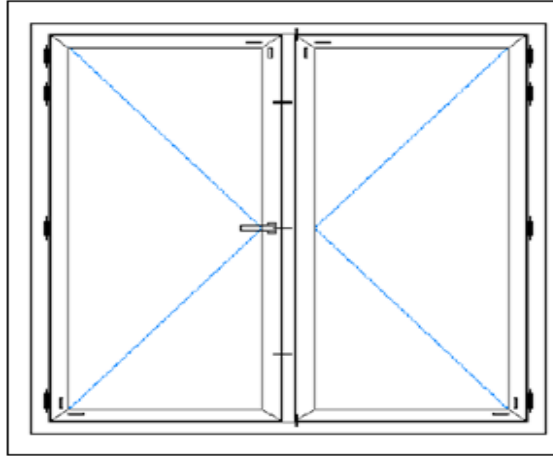
De acordo com Martins (2010), a análise através de elementos finitos deve ser realizada considerando a existência de pressões externas e internas em relação a esquadria em estudo. Para cada condição de pressão atuante na janela, Martins (2010), propõe dois modelos para efetuar a análise:

Modelo 1 - modelo mais completo, que representa o sistema de apoios de toda janela, contabilizando todos os elementos constituintes da esquadria e a forma de ligação entre eles.

Modelo 2 - modelo simplificado, que consiste geralmente em barras simplesmente apoiadas, não considerando todos os elementos constituintes da esquadria e nem interação entre eles, apenas os mais desfavoráveis e com maior importância estrutural. Os modelos 1 e 2 podem ser melhor explicados através da

análise realizada por Martins (2010) em uma janela de bater de duas folhas móveis ilustrada na Figura 8.

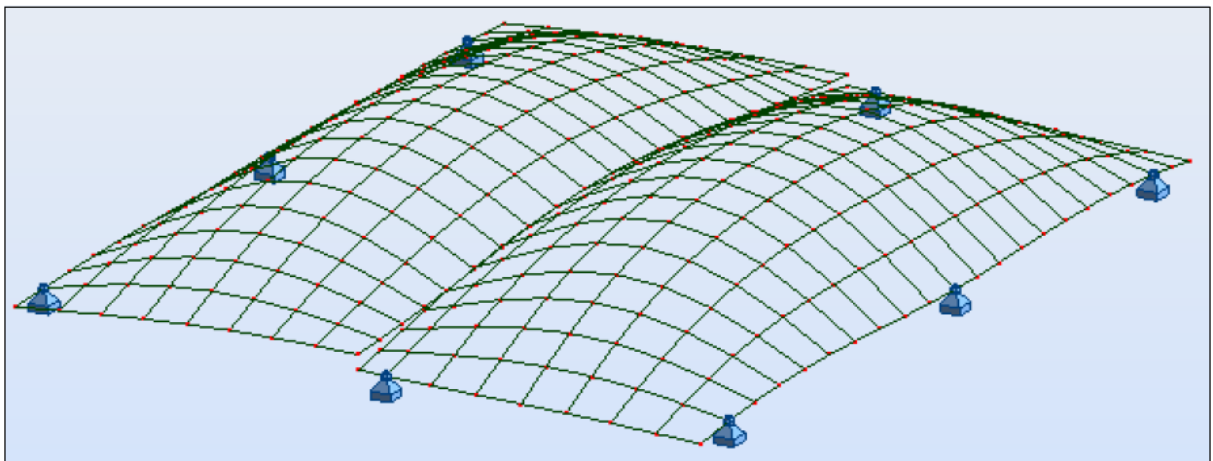
Figura 8 – Janela de bater de duas folhas móveis.



Fonte: Martins (2010).

O modelo 1 proposto por Martins (2010) considera as dobradiças e os pontos de fechamento do aro fixo como sendo os pontos de apoio ao sistema para análise numérica de acordo com a Figura 9.

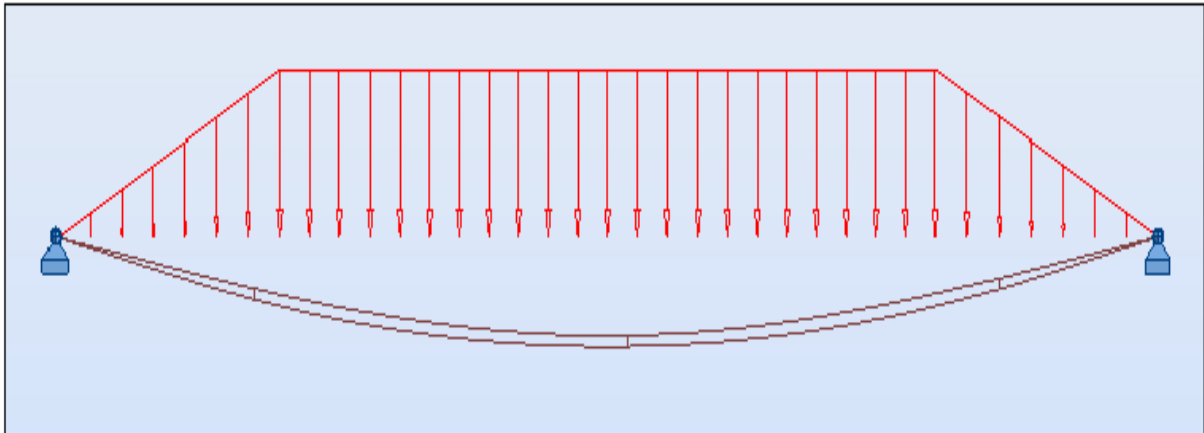
Figura 9 – Modelo 1 aplicado a pressões positivas em uma janela de bater de duas folhas móveis.



Fonte: Martins (2010).

O modelo 2 citado por Martins (2010) é representado na Figura 10, a qual apresenta basicamente o perfil vertical central da esquadria de bater de duas folhas como sendo o item mais crítico para análise computacional.

Figura 10 – Modelo 2 aplicado a pressões negativas em uma janela de bater de duas folhas móveis.



Fonte: Martins (2010).

De acordo com Martins (2010), o modelo 1 apesar de ser mais completo, apresenta resultados de deflexão mais afastados aos evidenciados em ensaios laboratoriais. O modelo 2 apresenta valores de deflexão que se aproximam aos dados experimentais. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos por Martins (2010) na análise de uma janela de bater de duas folhas móveis.

Tabela 1 – Resultados de deflexão experimental e dados dos modelos 1 e 2 obtidos na análise de uma janela de bater de duas folhas móveis.

<b>Pressão de ensaio (Pa)</b>	<b>Deflexão experimental (mm)</b>	<b>Deflexão Modelo 1 (mm)</b>	<b>Deflexão Modelo 2 (mm)</b>
1200	7,6	5,861	8,526
-1200	10,4	2,5	10,2

Fonte: Adaptado de Martins (2010).

Um dos principais aspectos que influenciam na aproximação dos resultados de ambos os modelos é a rigidez estrutural, a qual é afetada diretamente pelo vidro e pela ligação entre os perfis (Martins ,2010).

Azevedo (2003), acrescenta que as simplificações a serem feitas para aplicação do Método dos Elementos Finitos devem ser determinadas de acordo com o tipo de análise, podendo ser dinâmica ou estática, linear ou não-linear. Outro item a ser considerado para a aplicação do MEF é o tipo de geometria, que pode ser sólido, plano ou reticulado.

A análise numérica relacionada às esquadrias em edificações é melhor compreendida através do estudo realizado por Guan et al. (2016), o qual compara dados referentes a ensaios em túnel de vento, resultados analíticos e simulações computacionais.

De acordo com Guan et al. (2016), o fato de as esquadrias estarem abertas ou fechadas interfere pouco nos valores dos coeficientes de pressão, variando em média 0,78 para janelas fechadas e 0,8 para janelas abertas. Porém, o coeficiente de pressão varia bastante quando relacionado ao ângulo de incidência do vento sobre a esquadria. A Tabela 2 mostra a variação do coeficiente de pressão em relação ao ângulo de incidência do vento.

Tabela 2 – Variação do coeficiente de pressão em função do ângulo de incidência do vento sobre a esquadria.

<b>Ângulo de incidência (graus)</b>	<b>Coefficiente de pressão médio (-)</b>
0	0,84
15	0,9
30	0,9
45	0,85
60	0,8
75	0,63
90	0,73

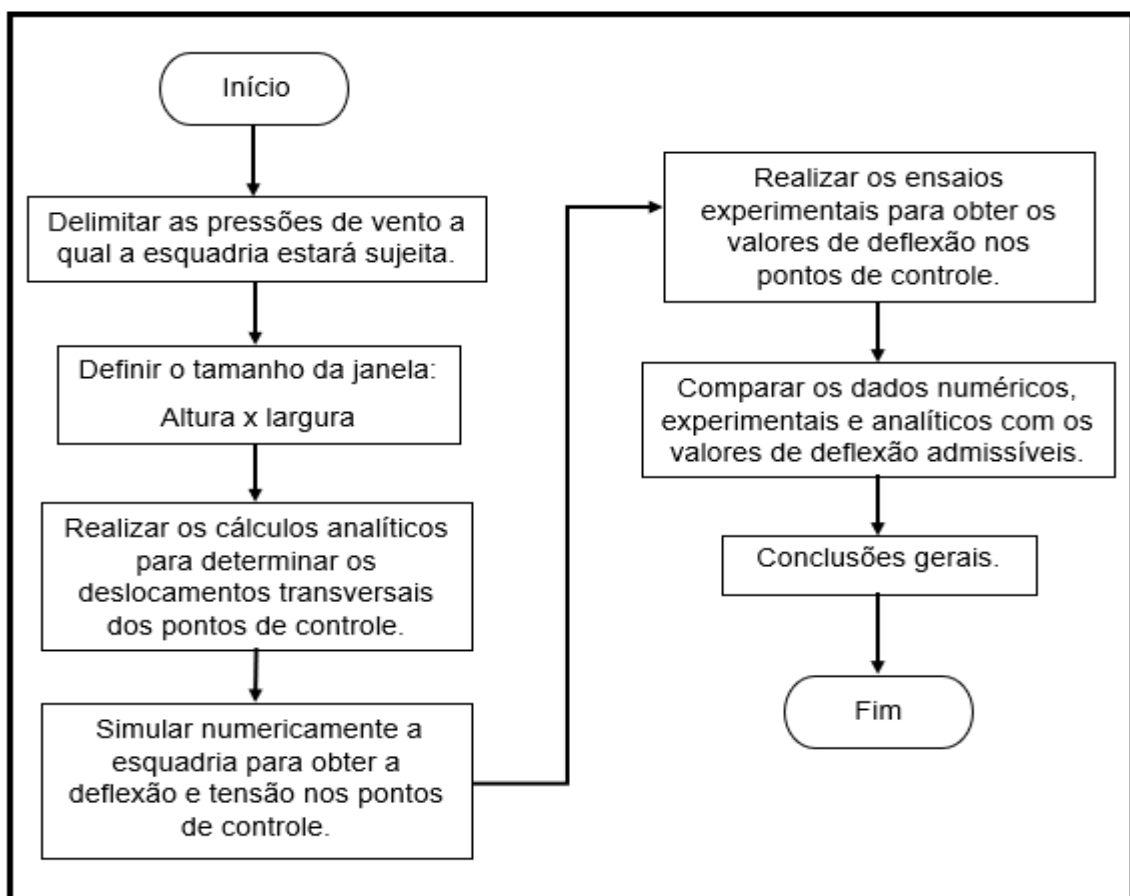
Fonte: Adaptado de Guan et al. (2016).

Para a realização do presente trabalho foi considerado 90° como sendo o ângulo de incidência do vento sobre a esquadria analisada. A utilização do modelo numérico tem como principal objetivo compreender o comportamento estrutural dos elementos que compõem a esquadria quando sujeitos às pressões de vento a fim de encontrar um modelo capaz de representar a realidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como foco analisar o comportamento estrutural de uma janela de correr de duas folhas, através do estudo dos deslocamentos transversais ocorridos em diferentes pontos da esquadria devido a ação do vento. A implementação consistiu na comparação de resultados obtidos em ensaios laboratoriais, cálculos matemáticos analíticos e simulações numéricas por meio do método de elementos finitos. A Figura 11 mostra o fluxograma das atividades realizadas.

Figura 11 - Fluxograma das atividades.



Fonte: Do autor (2021).

#### 3.1 DELIMITAÇÃO DAS PRESSÕES DE VENTO E TAMANHO DA ESQUADRIA

A realização da análise numérica, analítica e os ensaios experimentais foram baseados em um único tamanho de esquadria, considerando altura x largura de 1200x1200 mm. Estas dimensões de janela são definidas pela empresa Alumicone Componentes de Alumínio Eireli para a realização de ensaio experimental, a qual justifica a escolha como sendo um tamanho padrão que representa a aplicação de esquadrias de correr de duas folhas no território nacional.

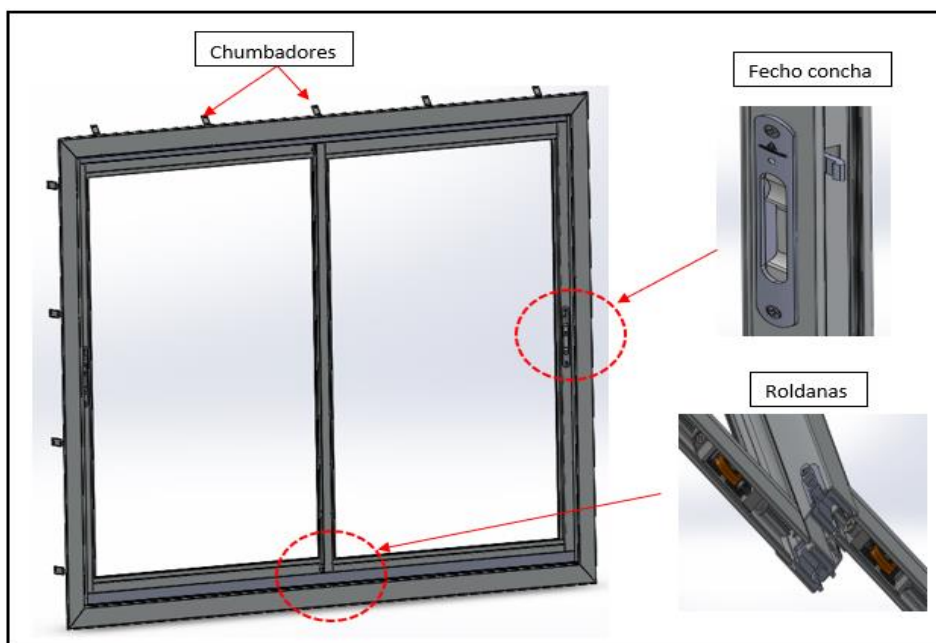
As pressões de vento aplicadas para realização dos ensaios experimentais e para o desenvolvimento dos cálculos numéricos e analíticos são extraídas do Anexo A de acordo com a norma ABNT NBR 10821-2 (2017). Foram escolhidos arbitrariamente 3 níveis de pressões para representar a aplicação da esquadria em qualquer que for o pavimento ou altura: 540,1090 e 1820 Pa.

### 3.2 DEFINIÇÕES DO PROTÓTIPO JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS

A esquadria analisada é chamada JCR200, composta por perfis de alumínio extrudados com propriedades mecânicas relacionadas a liga 6063-T5, a qual possui tensão de escoamento de 105 MPa e limite de resistência a tração de 140 MPa e módulo de elasticidade de 70 GPa.

As folhas de correr são apoiadas em roldanas, as quais sustentam o peso e promovem o deslocamento transversal permitindo a abertura ou o fechamento da janela. O fechamento da janela é realizado por um componente conhecido como fecho concha, o qual possui uma lingueta que quando acionada encaixa-se a um contrafecho. A Figura 12 ilustra as características citadas.

Figura 12 – Detalhes construtivos JCR 200.



Fonte: Do autor (2021).

Os chumbadores ilustrados na Figura 12 são utilizados para fixar a esquadria ao vão. A janela possui também vedações e elementos de fixação e conexão entre os

perfis, além de ser constituída por vidro monolítico de espessura de 4 mm o qual possui tensão de resistência a tração de 40 MPa.

A deflexão máxima admissível considerada para realização deste trabalho foi limitada em  $L/175$  mm de acordo com a ABNT NBR 10821-2 (2017), não podendo ser superior a 30 mm em qual qualquer que seja o perfil em análise. Sendo assim, a deflexão admissível para os montantes centrais foi de 6,40 mm.

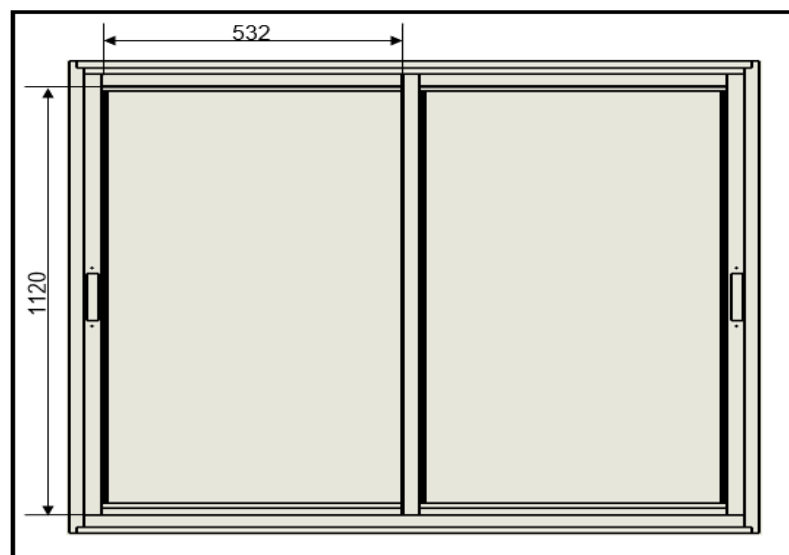
### 3.3 CÁLCULO MATEMÁTICO ANALÍTICO

Para obter a deflexão nos perfis centrais da esquadria aplicou-se o conceito citado por Yamamoto (2005), Martins (2010) e Viegas (2012), os quais consideram que os montantes centrais sob carregamento uniformemente distribuído se assemelham a uma viga biapoiada.

Os cálculos matemáticos referentes ao modelo analítico foram baseados na teoria de vigas de acordo com a Equação (5) e Equação (6) sendo avaliados os pontos de controle da esquadria definidos como os montantes centrais. Posteriormente, foram calculados os deslocamentos transversais máximos e os momentos fletores máximos para se obter a tensão de escoamento.

Para realizar os cálculos se fez necessário a definição da altura e largura das folhas, assim como o momento de inércia dos perfis e o módulo de elasticidade da liga de alumínio utilizada. A Figura 13 apresenta as dimensões atribuídas as folhas da esquadria.

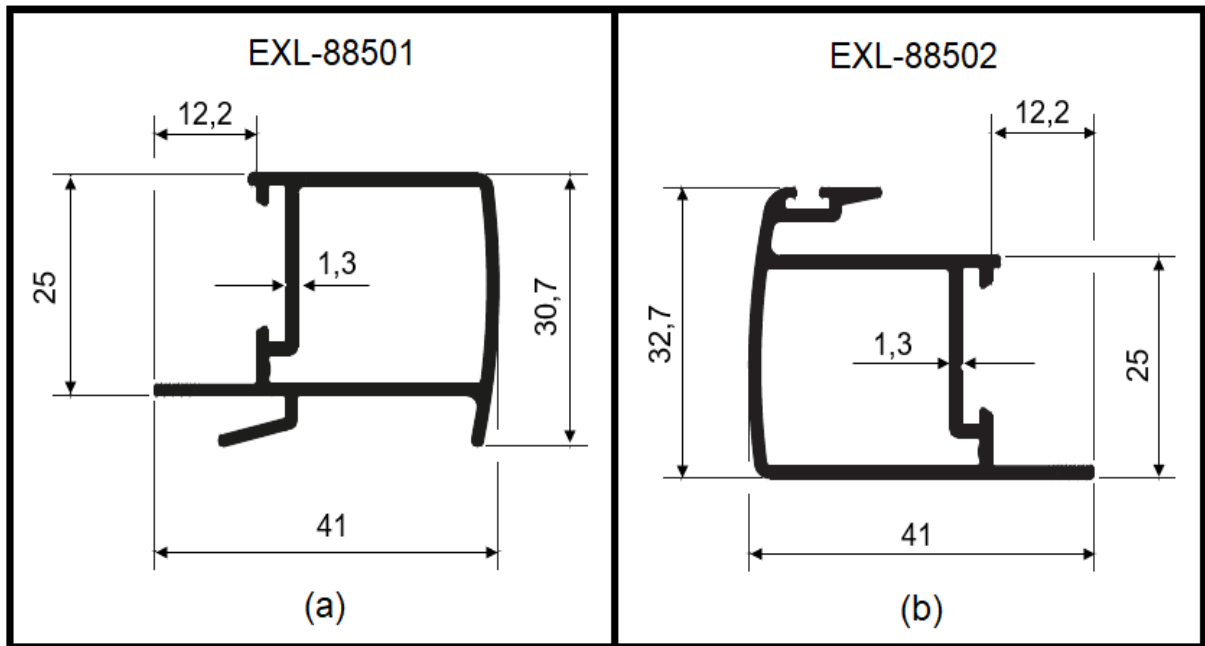
Figura 13 – Largura e altura das folhas da esquadria de correr de duas folhas.



Fonte: Do autor (2021).

Para se obter a carga por metro de comprimento, divide-se a carga aplicada pela largura da folha da esquadria. Além da deflexão, foi calculada a tensão de flexão dos montantes centrais através da Equação (8), a qual necessitou do módulo de resistência dos perfis e do momento fletor máximo obtido pela Equação (6). A Figura 14 mostra as dimensões dos perfis centrais que compõem a esquadria JCR200.

Figura 14 – Dimensões dos perfis centrais: (a) EXL-88501 e (b) EXL-88502.



Fonte: Adaptado do Catálogo geral da construção civil (2020).

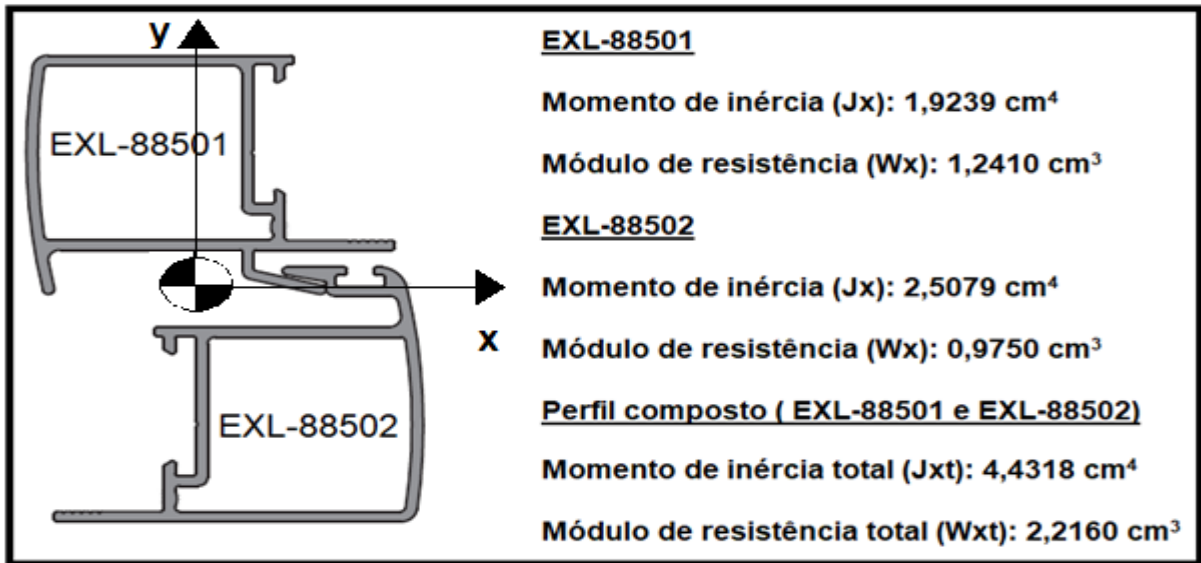
O momento de inércia total ( $J_{xt}$ ) e módulo de resistência total ( $W_{xt}$ ), foi calculado de acordo com o teorema dos eixos paralelos citado por Hibbeler (2005). A junção entre o EXL-88501 e EXL88502 formam um perfil composto, desta forma o momento de inércia total pode ser obtido através da soma algébrica de cada uma das partes constituintes, desde que os momentos de inércia de cada área tenham sido calculados em relação a um eixo comum. A Equação 9 representa a teoria dos eixos paralelos citado por Hibbeler (2005).

$$I_x = \bar{I}_{x'} + Ad^2_y \quad (9)$$

A Figura 15 apresenta os valores dos momentos de inércia e os módulos de resistência dos perfis centrais.



Figura 15 – Momentos de inércia e módulo de resistência dos perfis montantes.



Fonte: Adaptado do Catálogo geral da construção civil (2020).

Para facilitar na execução dos cálculos e organização dos resultados foi utilizado o *software* Excel, no qual foram inseridas todas as informações necessárias para realização dos cálculos analíticos, assim como a organização geral dos dados coletados dos ensaios experimentais e das simulações numéricas para posterior comparação entre os modelos utilizados na análise estrutural da esquadria a fim de se obter as devidas conclusões.

### 3.4 MODELAGEM NÚMERICA

A modelagem da esquadria e sua posterior análise numérica baseada no método de elementos finitos foi realizada através do *software Solidworks*, o qual possui um recurso conhecido como módulo CAE – *Computer Aided Engineering* – voltado a tarefas de análise de engenharia. Apesar de possuir limitações em termos de recursos, algoritmos, customização, entre outros, o *SolidWorks* foi escolhido devido a disponibilidade para acesso na empresa Alumicone Componentes de Alumínio Eireli.

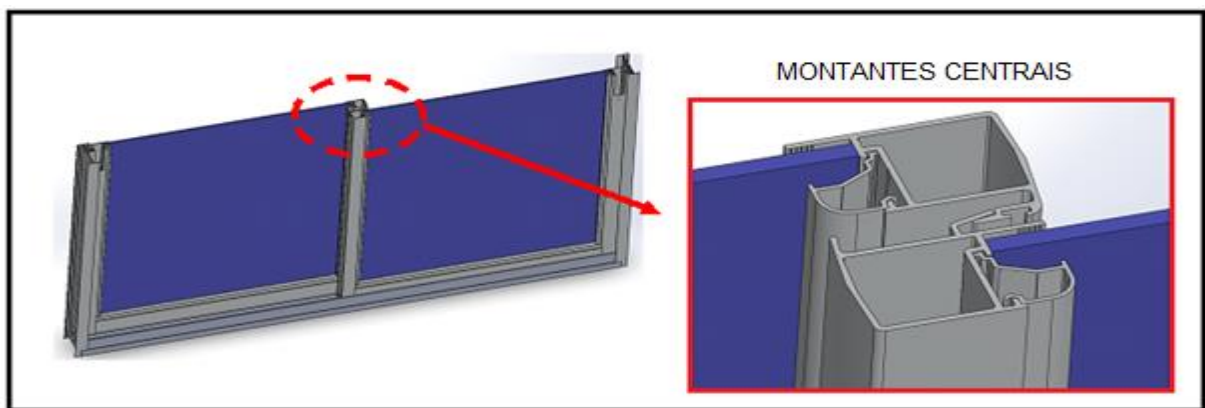
A esquadria JCR200 foi simplificada para a realização da análise numérica. Elementos de fixação como parafusos, chumbadores e argamassa foram desconsiderados, assim como componentes como roldanas, fecho conchas, drenos e escovas de vedação. Os perfis de alumínio foram unidos uns aos outros formando um

único corpo, e as placas de vidro foram inseridas nas folhas sendo simplesmente apoiadas.

A simulação numérica foi baseada no estudo estático da esquadria, onde foram aplicadas restrições aos pontos de apoio da janela. O contato entre os perfis de alumínio e o vidro foram do tipo “não penetrante” para que as interações entre os corpos sejam consideradas.

A seção transversal dos perfis montantes, assim como sua ligação e interação com o vidro estão representados na Figura 16, a qual através de um corte horizontal no meio da esquadria mostra a vista interna da esquadria de correr de duas folhas JCR200.

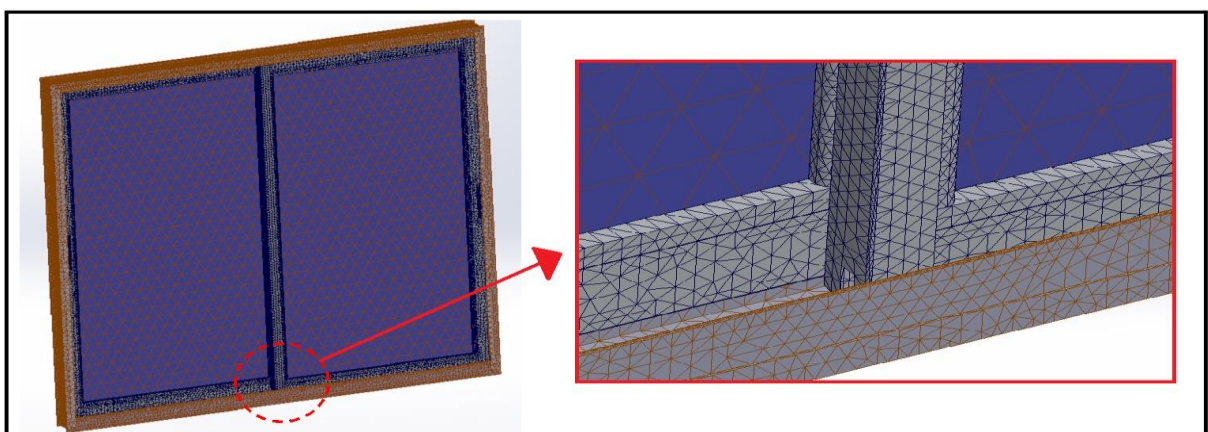
Figura 16 – Vista em corte da janela de correr de duas folhas JCR200.



Fonte: Do autor (2021).

O modelo de superfícies discretizadas foi composto por elementos tetraédricos tanto para os perfis de alumínio como para o vidro, gerando uma malha com 1128810 elementos e 1546301 nós. A Figura 17 mostra a malha do modelo numérico.

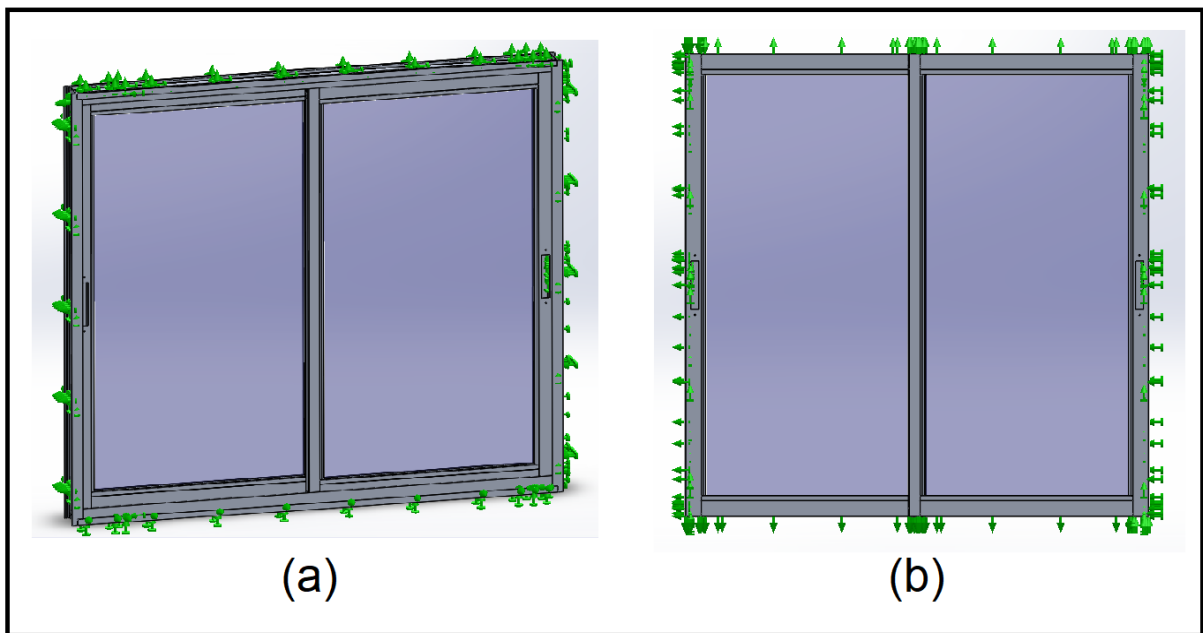
Figura 17 – Modelo discretizado.



Fonte: Do autor (2021).

Foram impostas restrições ao modelo de estudo de forma a considerar a fixação da esquadria ao vão, como um engaste da janela a parede. As folhas móveis foram fixadas através dos perfis montantes laterais e as travessas superior e inferior foram restritas com apoios. A Figura 18 mostra através das setas na cor verde a restrição do engaste do contramarco da JCR200 e de fixação e apoio das folhas móveis.

Figura 18 – Restrições impostas ao modelo numérico: (a) engaste do marco e (b) fixação e apoio das folhas de correr.



Fonte: Do autor (2021).

As cargas foram aplicadas perpendicularmente ao plano da esquadria de forma uniforme. Foram atribuídas ao *software* as pressões de vento de acordo com as informações citadas na seção 3.1 e as propriedades do vidro e do alumínio conforme citado na seção 3.2. Os resultados das deflexões foram extraídos do *Solidworks* e plotados em gráficos e tabelas, onde foram comparados com os demais modelos de estudo.

### 3.5 ENSAIO EXPERIMENTAL

A realização de ensaios laboratoriais em esquadrias de alumínio tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico da esquadria, além de requisitos relacionados à permeabilidade do ar, estanqueidade à água e ações de operação e manuseio.

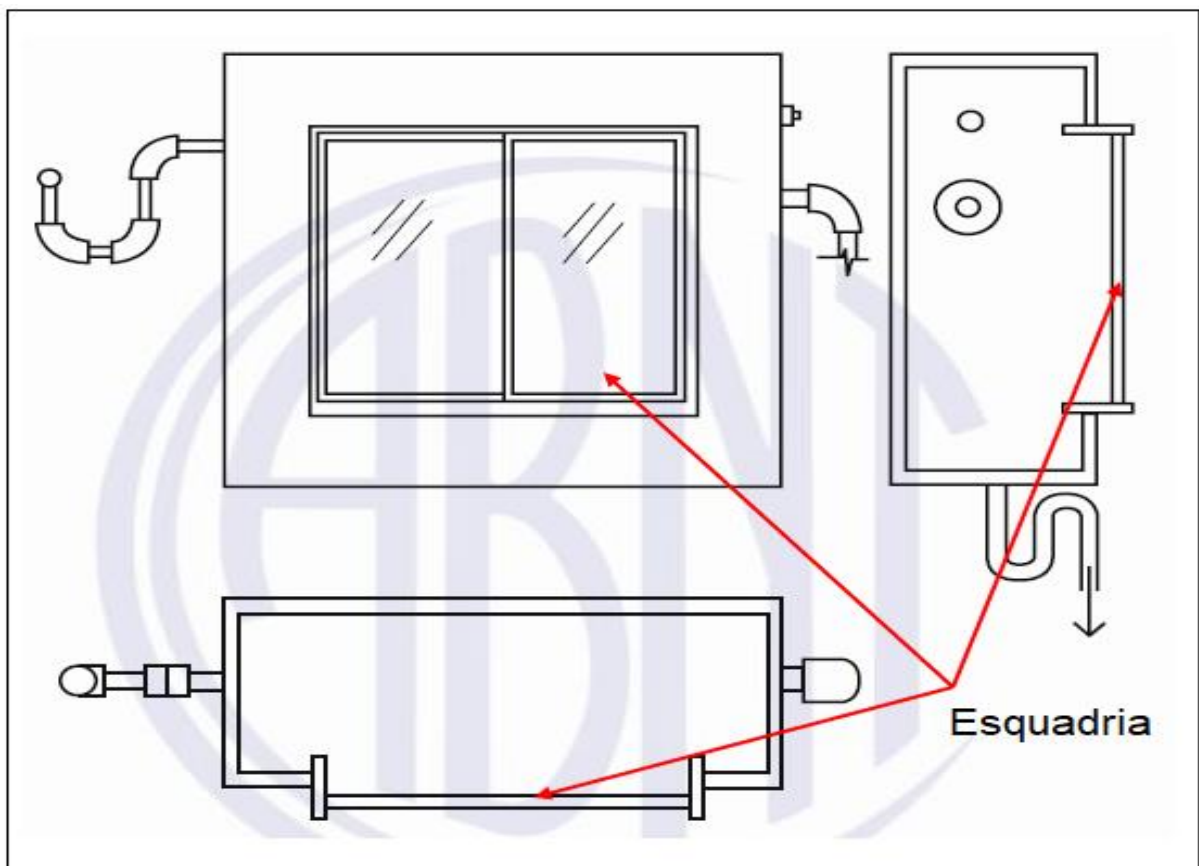
Os ensaios experimentais referentes ao presente trabalho foram realizados pelo Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt *Performance*, pertencente a Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Os experimentos realizados seguiram as prescrições descritas na ABNT NBR 10821-3: 2017, a qual trata dos métodos de ensaio.

A amostra da esquadria foi fornecida pela empresa Alumiconte Componentes de Alumínio Eireli conforme projeto detalhado no Anexo D. A Alumiconte também foi responsável pela devida instalação da janela a ser avaliada experimentalmente pelos profissionais do itt *Performance*.

Através do relatório de ensaio emitido pelo instituto foram extraídos os dados de deflexão para serem analisados e comparados com os demais modelos de estudo.

O procedimento de ensaio consistiu na fixação do corpo de prova à câmara de ensaio, sendo a interface da esquadria e vão de instalação conforme recomendação do projeto ou manual de instalação do fabricante. A Figura 19 apresenta a câmara de ensaio destinada aos testes experimentais.

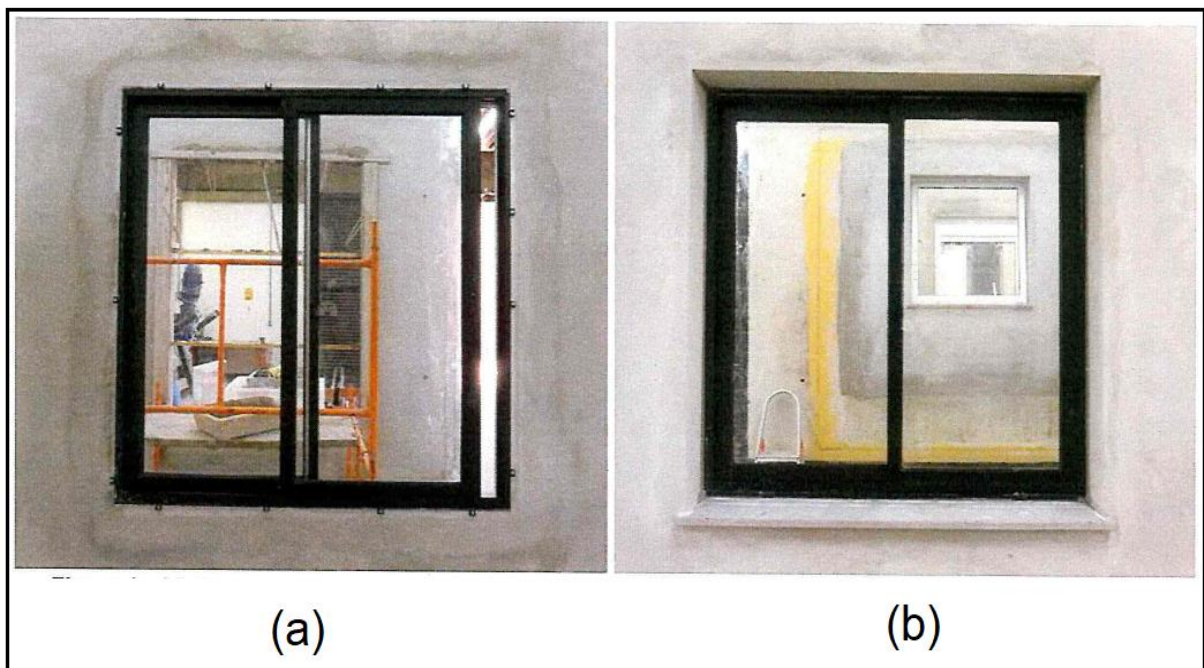
Figura 19 – Vistas esquemáticas de uma câmara de ensaio.



A entrada de ar na câmara foi realizada de maneira a não incidir diretamente sobre o corpo de prova. Os manômetros tipo faixa 1 utilizados para a medição das pressões estáticas positivas e negativas possuem uma exatidão de medição de  $\pm 1$  Pa, e eles são instalados em posições onde as medições não são afetadas pela velocidade do ar.

A fixação mecânica entre o contramarco e o vão foi feita com o uso de chumbador tipo cadeirinha, parafusos e argamassa científica. A fixação entre o marco e o contramarco foi realizada por meio de parafusos. A interface entre o marco e o contramarco foi selada com silicone incolor. A Figura 20 mostra as vistas internas e externas da esquadria instalada.

Figura 20 – Instalação da esquadria no vão: (a) vista interna e (b) vista externa.



Fonte: Adaptado do relatório de ensaio (2020).

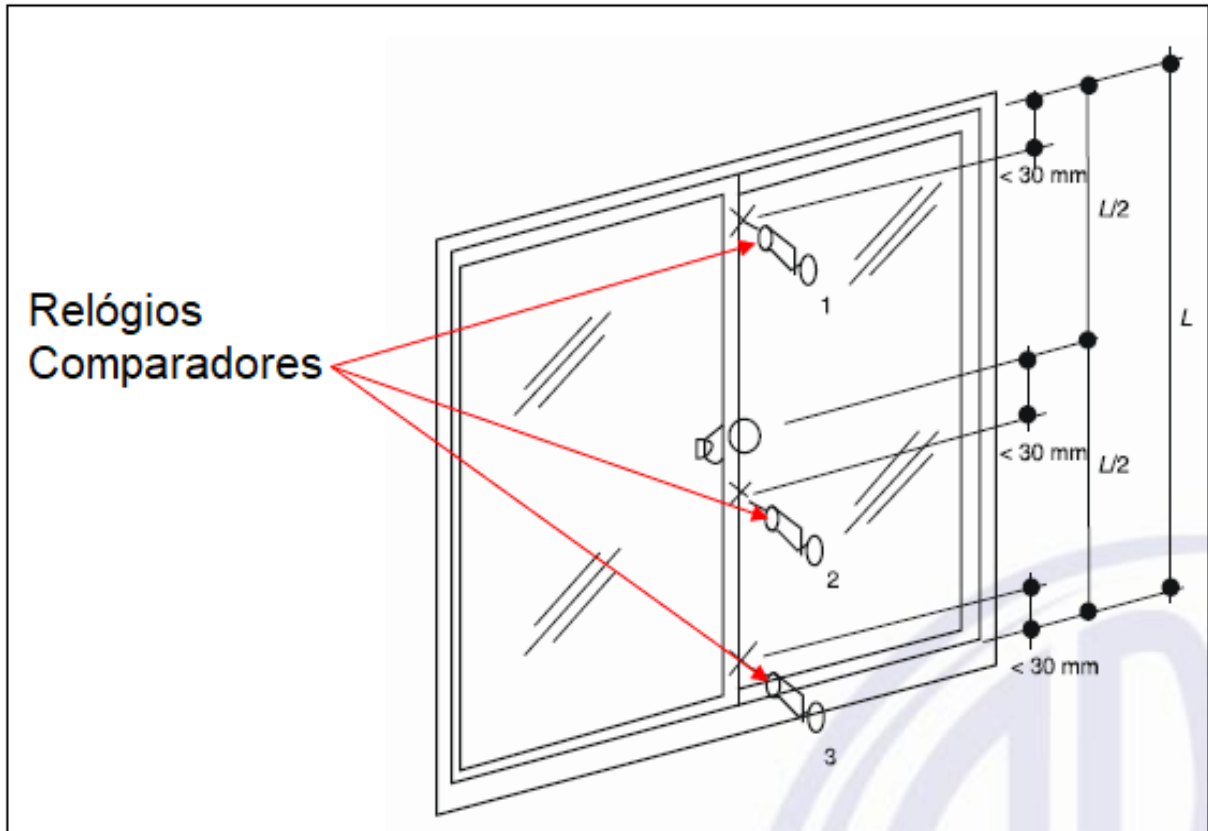
Após a instalação da esquadria na câmara de ensaio verificou-se a selagem do corpo de prova para garantir as pressões de ensaio exigidas, ajustou-se os componentes, realizou-se cinco ciclos completos de abertura, fechamento e travamento, instalou-se os relógios comparadores responsáveis pela medição dos deslocamentos dos perfis e por fim aplicou-se três vezes a pressão de acomodação de 350 Pa.

De acordo com a norma ABNT NBR 10821-3 (2017), a avaliação da deflexão sofrida pelos perfis deve ser realizada com aparelhos de medição com resolução de



0,1 mm, analisando os perfis no centro e em suas extremidades. A Figura 21 mostra o posicionamento dos relógios comparadores em uma janela de correr de duas folhas.

Figura 21 – Posicionamento dos relógios comparadores em uma janela de correr de duas folhas.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10821-3 (2017).

O posicionamento dos relógios comparadores conforme a Figura 21, possibilita caracterizar os pontos de controle do corpo de prova sujeitos aos maiores deslocamentos. Para se obter o máximo deslocamento utiliza-se a Equação 10, destinada ao cálculo de deflexão para esquadrias de correr.

$$D_{m\acute{a}x} = D_2 - \frac{D_1 + D_3}{2} \quad (10)$$

Onde:

$D_{m\acute{a}x}$  = deslocamento máximo (mm);

$D_1$  = deslocamento medido no relógio comparador 1 (mm);

$D_2$  = deslocamento medido no relógio comparador 2 (mm);

$D_3$  = deslocamento medido no relógio comparador 3 (mm).

## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados de deflexão e a tensão de escoamento referentes aos pontos de controle da esquadria de correr de duas folhas obtidos através dos cálculos analíticos, cálculos numéricos e testes experimentais.

### 4.1 RESULTADOS DOS CÁLCULOS ANALÍTICOS

Os cálculos referentes as Equações (5), (6) e (8) foram realizados com auxílio do *software Excel* e podem ser verificados detalhadamente no Apêndice A. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos cálculos analíticos.

<b>Pressão de ensaio (Pa)</b>	<b>Momento fletor máximo (N.m)</b>	<b>Tensão Normal Máxima (MPa)</b>	<b>Deflexão máxima apresentada (mm)</b>	<b>Coefficiente de Segurança (CS)</b>
546	45,05	20,33	1,83	3,49
-546	45,05	20,33	1,83	3,49
1092	90,93	41,03	3,83	1,67
-1092	90,93	41,03	3,83	1,67
1820	151,82	68,51	6,39	1,00
-1820	151,82	68,51	6,39	1,00

Fonte: Do autor (2021).

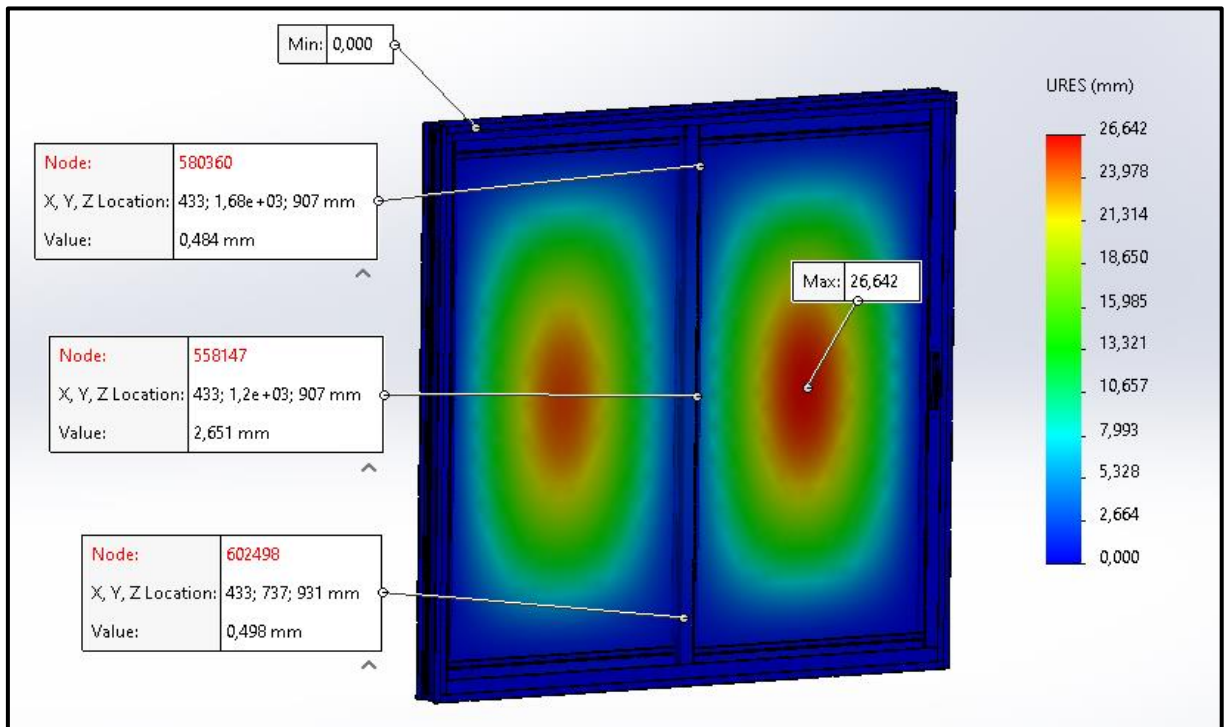
O fator de segurança CS mostrado nas tabelas anteriores é a relação entre a deflexão admissível e a deflexão máxima apresentada. A Equação 11 representa esta relação.

$$CS = \frac{\text{Deflexão Admissível}}{\text{Deflexão máxima apresentada}} \quad (11)$$

### 4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O comportamento da JCR200 apresentado durante a análise de elementos finitos realizada através do *software SolidWorks* pode ser visto na Figura 22, a qual apresenta os resultados de deflexão máxima e mínima quando aplicada a pressão de 1820 Pa e os valores das deflexões obtidas nos pontos de controle definidos como os montantes centrais da esquadria.

Figura 22 – Resultados de deflexão do modelo numérico.



Fonte: Do autor (2021).

Os resultados de deslocamento transversal obtidos através da aplicação dos três níveis de pressão nos pontos de controle definidos como os montantes centrais, podem ser verificados no Apêndice B e estão resumidos na Tabela 4, a qual mostra os valores de deflexão máxima obtidos no centro da esquadria obtidos através da aplicação da Equação 10.

Tabela 4 – Deflexões máximas do modelo numérico.

Pressão de ensaio (Pa)	Deflexão máxima apresentada (mm)	Coefficiente de Segurança (CS)
-540	0,67	9,55
540	0,65	9,84
-1090	1,31	4,88
1090	1,33	4,81
-1820	2,20	2,90
1820	2,16	2,96

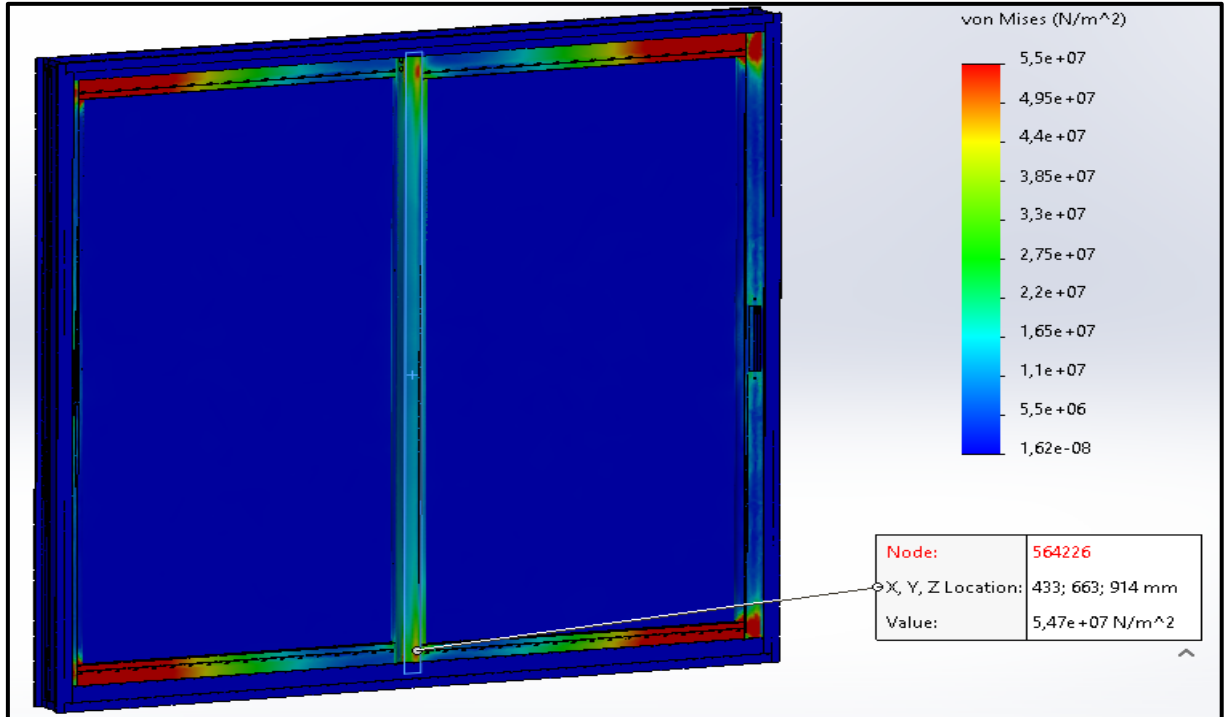
Fonte: Do autor (2021).

As tensões de flexão em nenhum ponto da esquadria foram superiores ao limite de escoamento no caso do alumínio, e em nenhum ponto das folhas de vidro foram



superiores ao limite de ruptura do vidro. Nos perfis centrais a área onde foi registrado o maior valor de deslocamento transversal pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – Tensão máxima obtida nos montantes centrais.



Fonte: Do autor (2021).

As demais tensões obtidas nos montantes centrais devido à aplicação das demais pressões de estudo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Tensões de flexão referente ao modelo numérico.

<b>Pressão de ensaio (Pa)</b>	<b>Tensão apresentada (MPa)</b>
-540	18,43
540	17,04
-1090	37,23
1090	34,46
-1820	62,09
1820	54,70

Fonte: Do autor (2021).

### 4.3 RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL

A esquadria foi submetida a cargas uniformemente distribuídas, aplicando-se pressões negativas e positivas. Foi avaliada a deflexão dos perfis centrais (montantes)

de acordo com o posicionamento dos relógios comparadores apresentado na Figura 21. A Tabela 6 mostra os deslocamentos transversais obtidos através da Equação 10.

Tabela 6 – Resultados de deflexão referentes aos ensaios experimentais.

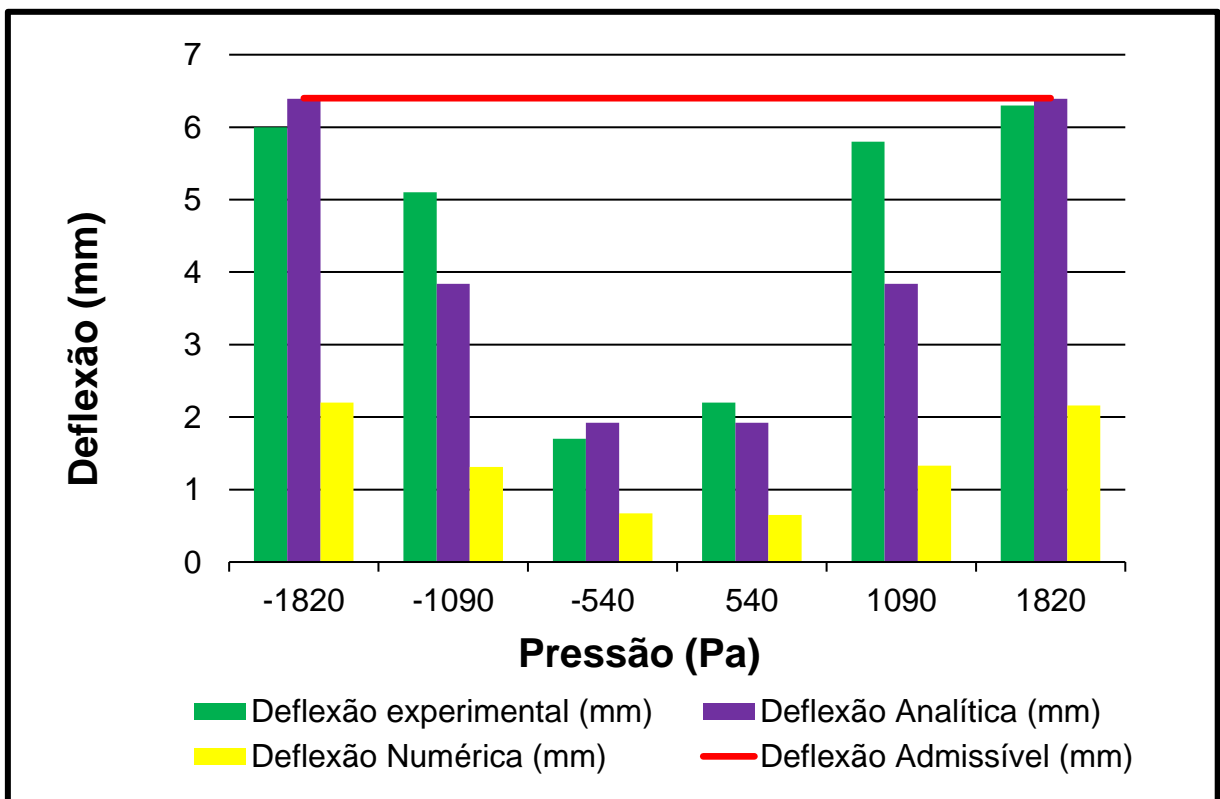
Pressão de ensaio (Pa)	Deflexão máxima apresentada (mm)	Coefficiente de Segurança (CS)
-546	1,70	3,76
546	2,20	2,91
-1092	5,10	1,25
1092	5,80	1,10
-1820	6,00	1,07
1820	6,30	1,02

Fonte: Adaptado do relatório de ensaio (2020).

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados de deslocamento transversal adquiridos em cada tipo de análise foram plotados em um gráfico de acordo com a Figura 24.

Figura 24 – Deflexão máxima dos perfis centrais da JCR200.



Fonte: Do autor (2021).

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados de deflexão obtidos analiticamente e experimentalmente foram mais coerentes quando comparados aos resultados numéricos. Apesar dos valores numéricos de tensão ser próximos aos analíticos, a dispersão dos resultados de deflexão demonstra que o modelo numérico desenvolvido neste trabalho precisa ser aprimorado para assim apresentar resultados adequados ao estudo.

Os valores numéricos foram mais conservadores quando avaliados em relação ao deslocamento transversal admissível. O coeficiente de segurança de 2,9 quando aplicada a pressão negativa de 1820 Pa, foi superior aos demais modelos de estudo. A análise analítica retornou respostas de deflexão próximas aos valores reais e abaixo dos valores admissíveis tanto de deflexão quanto de tensão, mostrando ser adequada para o dimensionamento de uma janela de correr de duas folhas.

Através da definição dos pontos de controle juntamente com a aplicação das normas técnicas e teorias clássicas, o objetivo geral do trabalho foi atingido ao adquirir os dados de resposta referentes aos modelos numéricos, experimental e analítico. O comportamento estrutural da esquadria de correr de duas folhas observado e analisado de três formas diferentes possibilita ao profissional da engenharia tomar ações mais assertivas quanto ao projeto deste tipo de janela.

Sugere-se como forma de continuidade do trabalho, aprimorar o estudo sobre esquadrias de correr de duas folhas através da análise de deflexão para diferentes tamanhos de esquadria (largura x altura), a fim de se obter o comportamento global para este tipo de esquadria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMICONTE COMPONENTES DE ALUMÍNIO EIRELI. **Catálogo geral da construção civil**, 2020.

ALLEN, Edward. **Fundamentos de engenharia de edificações**: materiais e métodos. Joseph Iano; revisão técnica desta edição: José Alberto Azambuja, Miguel Aloysio Sattler, Ruy Alberto Cremonini. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. **Manual técnico de caixilhos, janela**: aço, alumínio, vidros, PVC, madeira, acessórios, juntas e materiais de vedação. São Paulo, Pini, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-1**: Esquadrias para edificações: esquadria internas e externas - terminologia: Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-2**: Esquadrias para edificações: esquadrias externas – requisitos e classificação: Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-3**: Esquadrias para edificações: esquadria internas e externas – métodos de ensaio: Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-4**: Esquadrias para edificações: esquadrias externas – requisitos adicionais de desempenho: Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-5**: Esquadrias para edificações: esquadrias externas – instalação e manutenção: Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho: Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199**: Vidros na construção civil - projeto, execução e aplicações: 2ª edição, Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1ª ed. [S.n.] Porto, Portugal, 2003.

BEER, Ferdinand P. [et al]. **Mecânica dos materiais**. 8ª ed. Porto Alegre, AMGH, 2021.

BUZINELLI, Didiane Victória. **Dimensionamento de elementos estruturais em alumínio**. Dissertação de mestrado, USP – Universidade de São Carlos, São Paulo, 2000.

CARDOSO, Antonio.B. **Esquadrias de alumínio no Brasil: histórico, tecnologia, linhas atuais, gráficos de desempenho**. 18ª ed. São Paulo. ProEditores, 2004. 304p.

GONÇALVES, Jennifer; BASÁGLIA, Cilmar; REQUENA, João A. Análise numérica dos efeitos das ações do vento edifícios industriais metálicos. **Construmetal 2016 – Congresso Latino- americano da construção metálica**. São Paulo, SP, Brasil, 2016. Disponível em: <https://doaj.org/article/d75a8db38c61463c865ce492a343d365>. Acesso em: 20 abril, 2021.

GUAN, Y. LI, A. ZHANG, Y. JIANG, C. WANG, Q. Experimental and numerical investigation on the distribution characteristics of wind pressure coefficient of airflow around enclosed and open-window buildings. **Tsinghua University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, Xi'an Branch, China, p. 551-568, 2016.

HIBBELER, R.C. **Estática: mecânica para engenharia**. 10ª ed. São Paulo Pretince Hall, 2005.

LIKUSA, Marson Toshiyo. **Instalação de esquadrias de alumínio: prática e inovação**. Dissertação de mestrado, IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas, São Paulo, 2001.

LIMA, Diego Rodrigues de et al. **Especificação de esquadrias de alumínio com base na ABNT/NBR 10821 (2017) e ABNT/NBR 7199 (2016)**. Anais da Engenharia Civil / 2595-1823, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 34 - 55, oct. 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGcivil/article/view/220>>. Acesso em: 02 apr. 2021.

LUDUVICO, Thesse Sousa. **Desempenho a estanqueidade da água: interface janela e parede**. Dissertação ao programa de pós-graduação em engenharia civil, UFSM – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MARTINS, Hélder Ricardo Correia Tavares. **Resistência ao vento de caixilhas de alumínio: comparação entre simulação numérica e caracterização experimental**. Dissertação de mestrado, FEUP, Porto, 2010.

SALGADO, Júlio César Pereira. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 4ª ed. São Paulo: Érica, 2018. 320p.

TORRES, João Veloso da Silva. **Manutenção técnica de edifícios: vãos exteriores: portas e janelas**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, 2009.

VIEGAS, João Carlos. **Componentes de edifícios: Seleção de caixilharia e seu dimensionamento mecânico**. 6ªed. Lisboa: Lneq, 2012.

WAHRHAFTIG, Alexandre de Macêdo. **Ação do vento em estruturas esbeltas com efeito geométrico**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2017.

YAMAMOTO, Carlos Yuiti. **Desempenho de caixilhos**: formulação de parâmetros normativos de segurança e habitabilidade. Dissertação de mestrado. Edição revisada. Escola da politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

## APÊNDICE A – CÁLCULO ANALÍTICO DE DEFLEXÃO E TENSÃO MÁXIMA EM PERFIS MONTANTES DE UMA ESQUADRIA DE CORRER DE DUAS FOLHAS

### EQUAÇÕES:

$$\delta_{max} = \frac{5.P.L^4}{384.E.I} \quad (5)$$

$\delta_{max}$  = deflexão máxima (m).

$$M_f = P \frac{L^2}{8} \quad (6)$$

$M_f$  = momento fletor máximo (N.m).

$$\sigma = \frac{M_f}{w} \quad (8)$$

$P$  = carga por metro de comprimento (N/m).

$L$  = altura da janela (m).

$E$  = módulo de elasticidade (N/m<sup>2</sup>).

$I$  = momento de inércia (m<sup>4</sup>).

$\sigma$  = tensão normal (MPa).

$w$  = módulo de resistência (m<sup>3</sup>).

### APLICAÇÃO DE CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA:

**Pressão de ensaio = 540 N/m<sup>2</sup>**

**L = 0,532 m**

**E = 70 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>**

**I<sub>xt</sub> = 4,4318 x 10<sup>-8</sup> m<sup>4</sup>**

**W<sub>xt</sub> = 2,216 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>**

$$P = \text{Pressão de ensaio} * \text{largura da folha} = 540 \frac{N}{m^2} \cdot 0,532 \text{ m} = 287,28 \text{ N/m}$$

$$\delta_{max} = \frac{5.P.L^4}{384.E.I} = \frac{5.287,28.1,12^4}{384.70 \times 10^9 \cdot 4,4318 \times 10^{-8}} = 1,83 \text{ mm}$$

$$M_f = P \cdot \frac{L^2}{8} = 290,972 \cdot \frac{1,12^2}{8} = 45,05 \text{ N.m}$$

$$\sigma = \frac{M_f}{w} = \frac{45,55}{2,216 \times 10^{-6}} = 20,33 \text{ Mpa}$$

Pressão de ensaio= 1090 N/m<sup>2</sup>

L = 0,532 m

E= 70 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>

I<sub>xt</sub> = 4,4318 x 10<sup>-8</sup> m<sup>4</sup>

W<sub>xt</sub> = 2,216 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>

$$P = \text{Pressão de ensaio} * \text{largura da folha} = 1090 \frac{N}{m^2} \cdot 0,532 \text{ m} = 579,88 \text{ N/m}$$

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 579,88 \cdot 1,12^4}{384 \cdot 70 \times 10^9 \cdot 4,4318 \times 10^{-8}} = 3,83 \text{ mm}$$

$$M_f = P \cdot \frac{L^2}{8} = 1092 \cdot \frac{1,12^2}{8} = 90,93 \text{ N.m}$$

$$\sigma = \frac{M_f}{w} = \frac{91,09}{2,216 \times 10^{-6}} = 41,03 \text{ Mpa}$$

Pressão de ensaio= 1820 N/m<sup>2</sup>

L = 0,532 m

E= 70 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>

I<sub>xt</sub> = 4,4318 x 10<sup>-8</sup> m<sup>4</sup>

W<sub>xt</sub> = 2,216 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>

$$P = \text{Pressão de ensaio} * \text{largura da folha} = 1820 \frac{N}{m^2} \cdot 0,532 \text{ m} = 968,24 \text{ N/m}$$

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 968,24 \cdot 1,12^4}{384 \cdot 70 \times 10^9 \cdot 4,4318 \times 10^{-8}} = 6,39 \text{ mm}$$

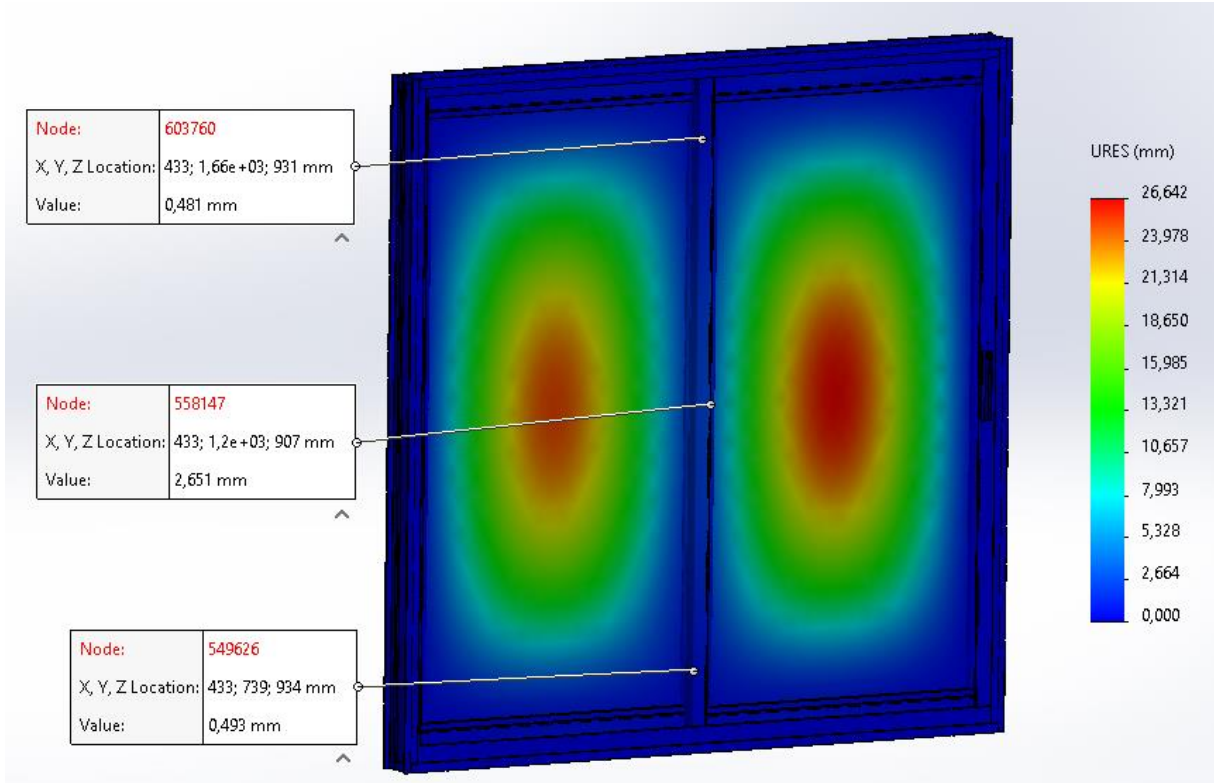
$$M_f = P \cdot \frac{L^2}{8} = 1820 \cdot \frac{1,12^2}{8} = 151,82 \text{ N.m}$$

$$\sigma = \frac{M_f}{w} = \frac{151,82}{2,216 \times 10^{-6}} = 68,51 \text{ Mpa}$$

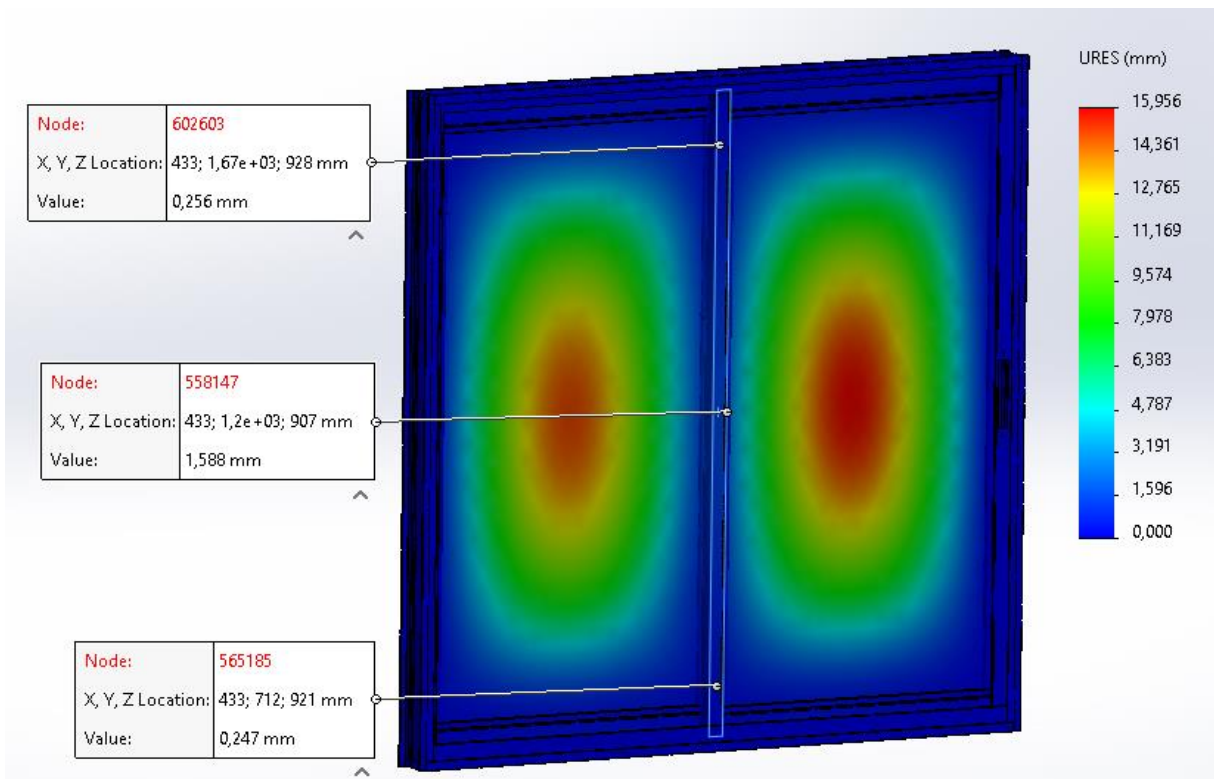


## APÊNDICE B – DEFLEXÕES OBTIDAS NOS CÁLCULOS NÚMERICOS

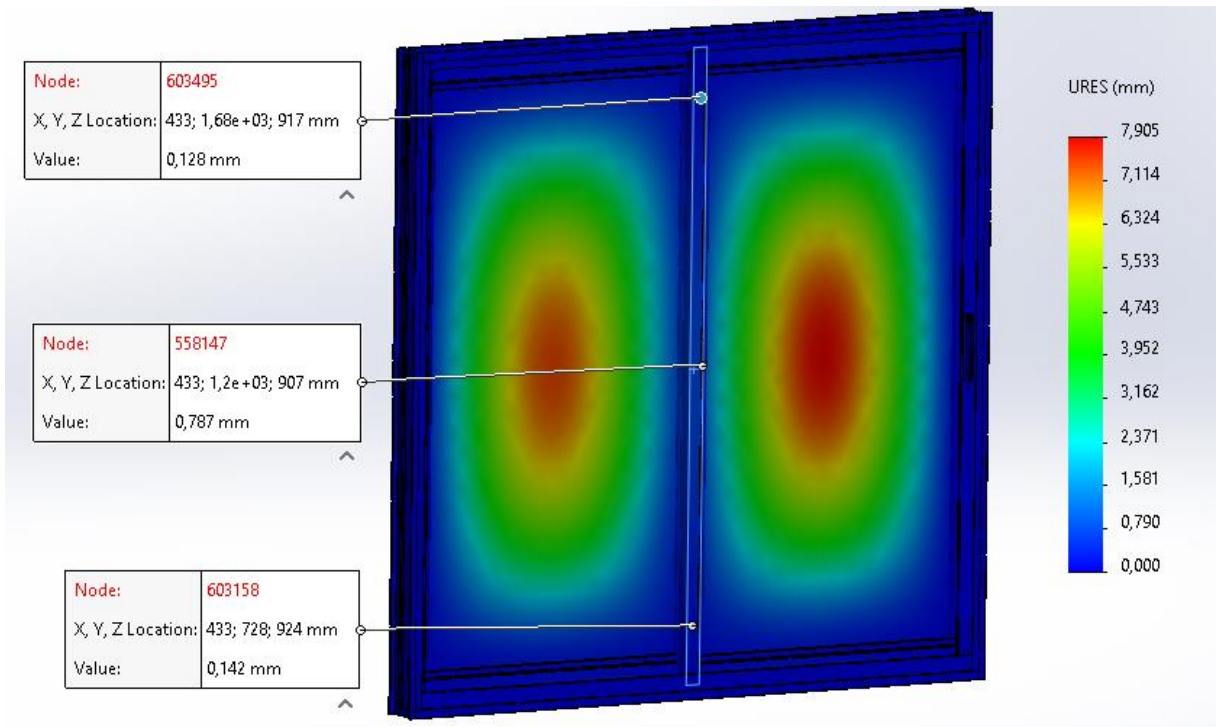
### Pressão de ensaio= 1820 N/m<sup>2</sup>



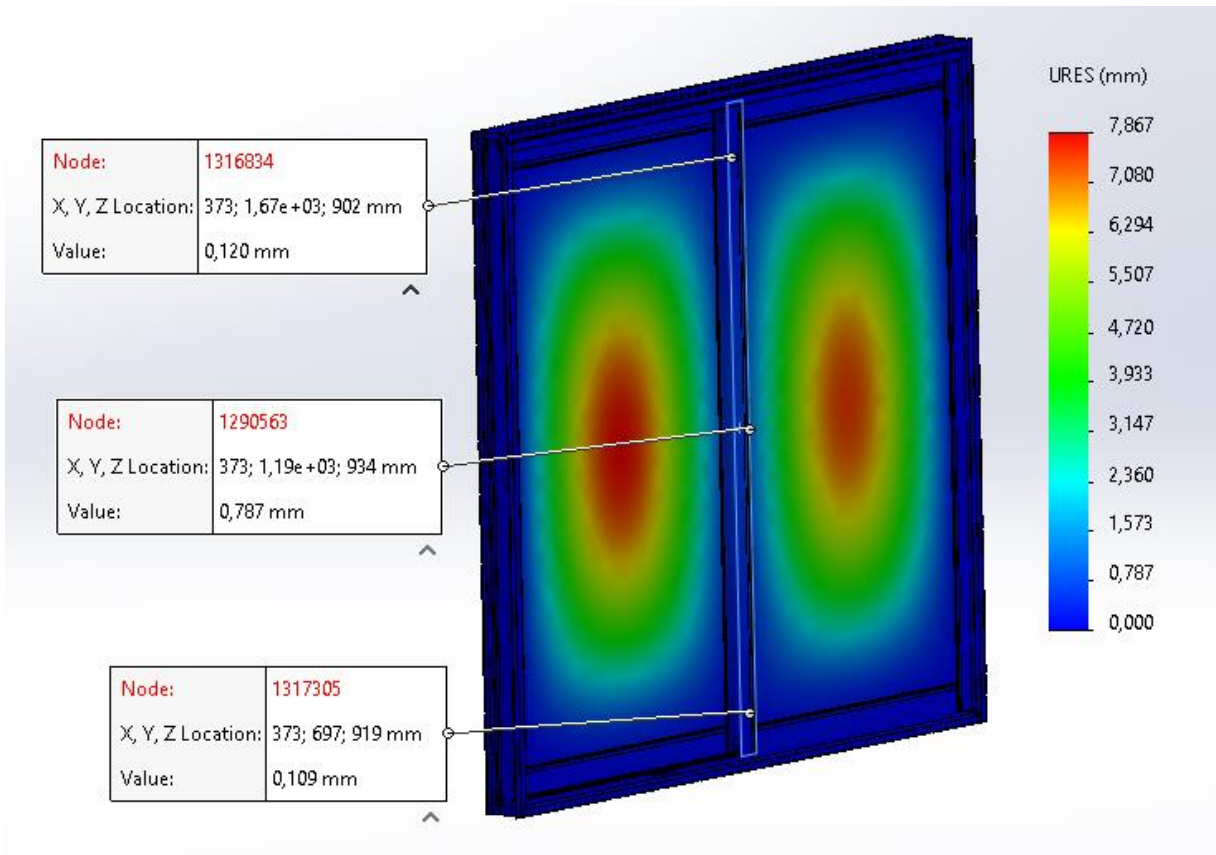
### Pressão de ensaio= 1090 N/m<sup>2</sup>



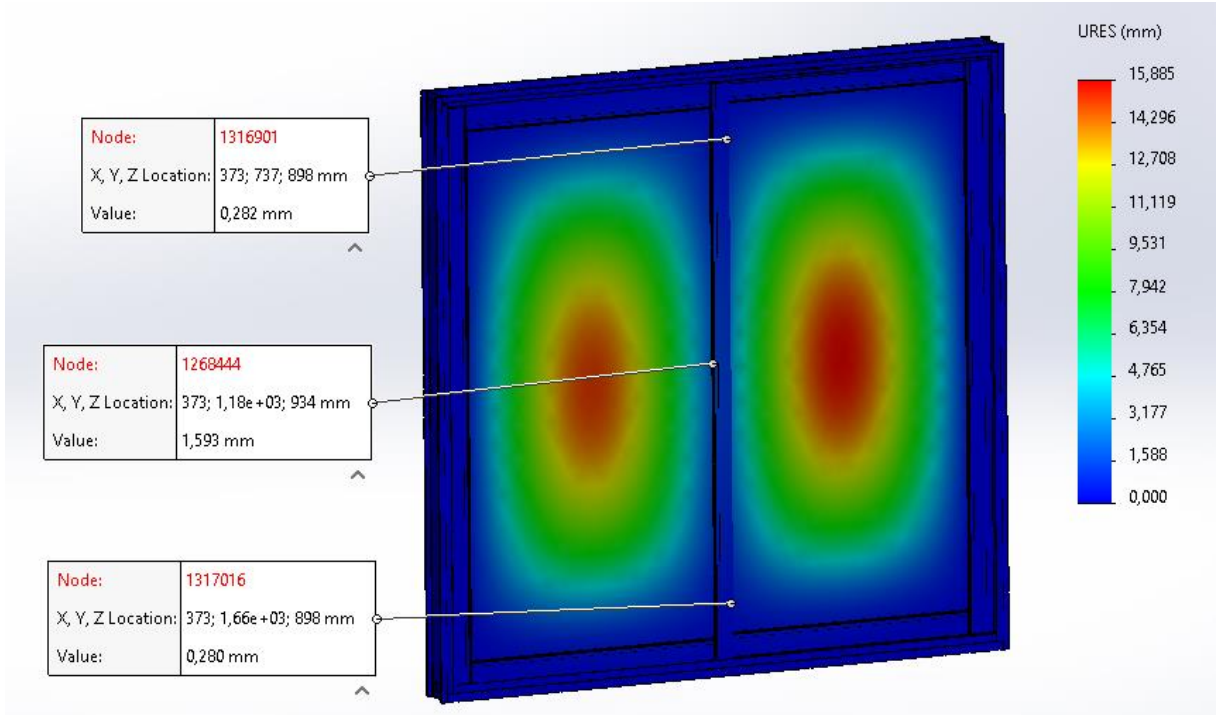
**Pressão de ensaio= 540 N/m<sup>2</sup>**



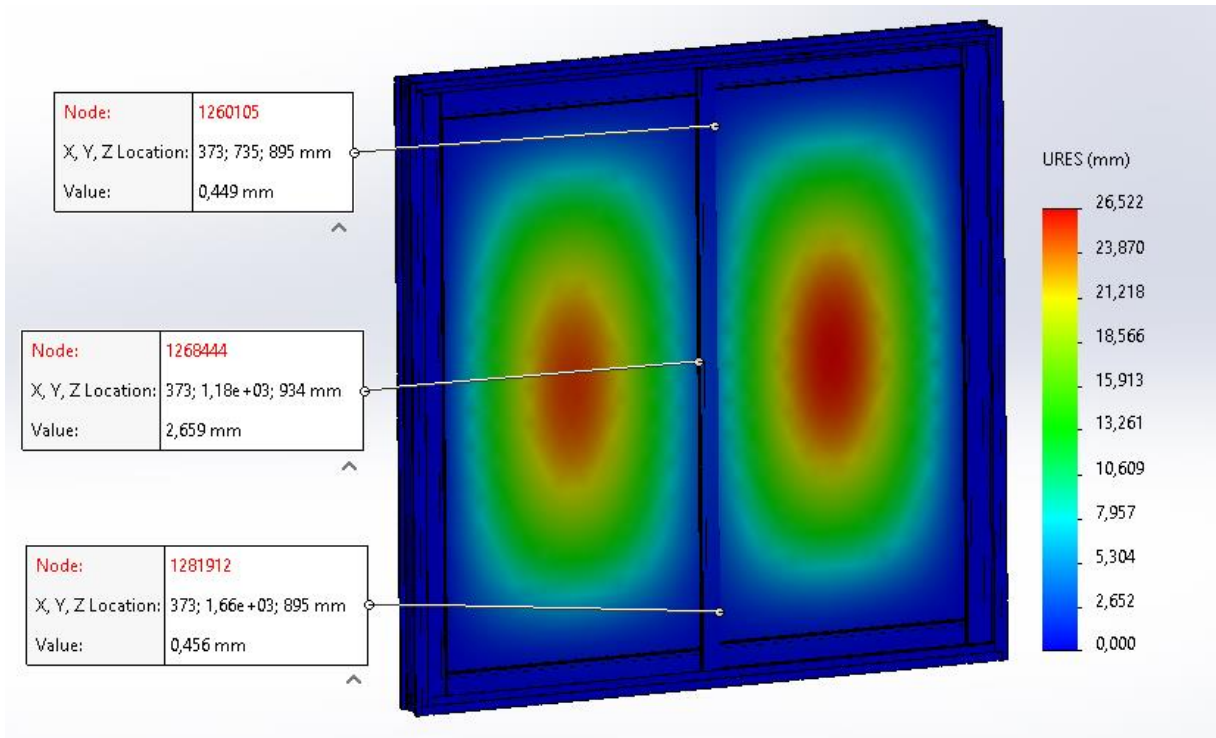
**Pressão de ensaio= -540 N/m<sup>2</sup>**



**Pressão de ensaio= -1090 N/m²**



**Pressão de ensaio= -1820 N/m²**



**ANEXO A – VALORES DE PRESSÃO DE VENTO, MEDIDOS EM PASCAL (PA), CONFORME REGIÃO DO PAÍS E NÚMERO DE PAVIMENTOS DA EDIFICAÇÃO.**

Quantidade de pavimentos	Altura máxima	Região do país	Pressão de ensaio ( $P_e$ ) positiva e negativa $P_e = P_p \times 1,2$	Pressão de segurança ( $P_s$ ) positiva e negativa $P_s = P_e \times 1,5$	Pressão de água ( $P_a$ ) $P_a = P_p \times 0,20$
02	6 m	I	350	520	60
		II	470	700	80
		III	610	920	100
		IV	770	1 160	130
		V	950	1 430	160
05	15 m	I	420	640	70
		II	580	860	100
		III	750	1 130	130
		IV	950	1 430	160
		V	1 180	1 760	200
10	30 m	I	500	750	80
		II	680	1 030	110
		III	890	1 340	150
		IV	1 130	1 700	190
		V	1 400	2 090	230
20	60 m	I	600	900	100
		II	815	1 220	140
		III	1 060	1 600	180
		IV	1 350	2 020	220
		V	1 660	2 500	280
30	90 m	I	660	980	110
		II	890	1 340	150
		III	1 170	1 750	200
		IV	1 480	2 210	250
		V	1 820	2 730	300



**ANEXO B – EFEITO COMBINADO DA RUGOSIDADE DO TERRENO ( $S_2$ ).**

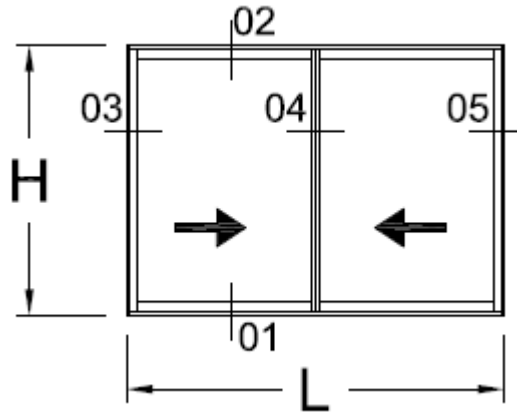
z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	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
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

**ANEXO C – FATOR PROBABILÍSTICO REFERENTE A SEGURANÇA E VIDA  
ÚTIL DA EDIFICAÇÃO ( $S_3$ ).**

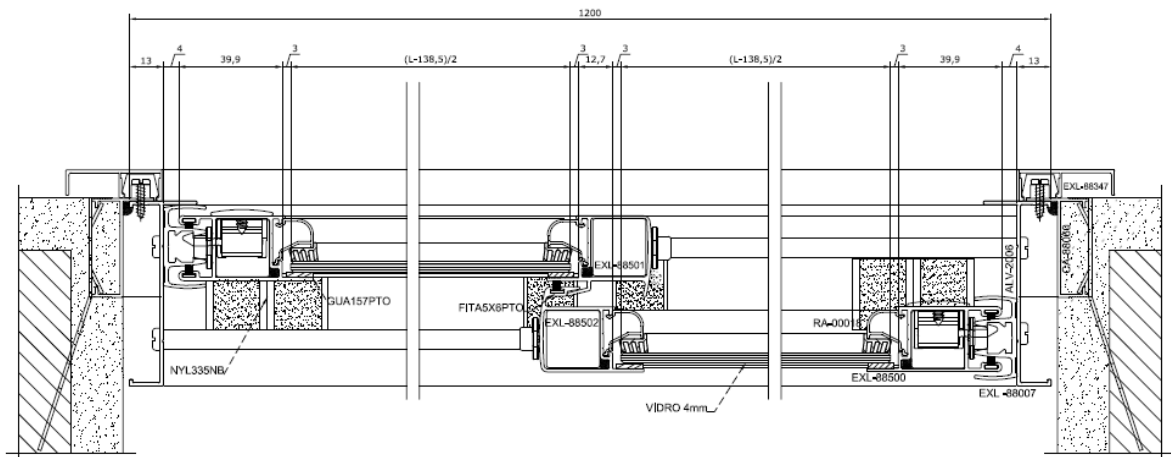
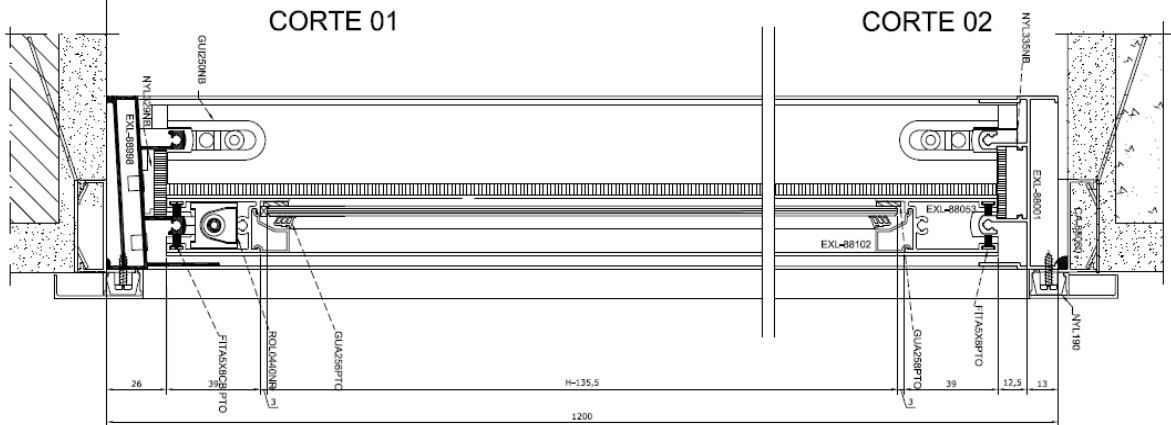
Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

ANEXO D – PROJETO JCR200 - JANELA DE CORRER DE DUAS FOLHAS

ELEVAÇÃO VISTA EXTERNA



LADO EXTERNO



CORTE 03

CORTE 04  
LADO EXTERNO

CORTE 05