

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
YANKA MOREIRA TÁVORA

**DESENVOLVIMENTO DE ESQUADRIA DE CORRER DE ALUMÍNIO: simulação de
cálculo estrutural de cargas uniformemente distribuídas**

Varginha

2024

YANKA MOREIRA TÁVORA

**DESENVOLVIMENTO DE ESQUADRIA DE CORRER DE ALUMÍNIO: simulação
de cálculo estrutural de cargas uniformemente distribuídas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – Grupo UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau Bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Matheus Henrique Pereira.

**Varginha
2024**

YANKA MOREIRA TÁVORA

**DESENVOLVIMENTO DE ESQUADRIA DE CORRER DE ALUMÍNIO: simulação
de cálculo estrutural de cargas uniformemente distribuídas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – Grupo UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau Bacharel, pela banca avaliadora:

Aprovada em

Obs.:

Dedico este trabalho à minha mãe, Walquiria. Sem todo o cuidado e carinho recebido ao longo dos anos, não seria possível me tornar a estudante, profissional e pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais George e Walquiria por todos os conselhos, auxílio e direcionamento necessários. Aos meus irmãos Gabriella, George Wyller e Shayanne e às minhas amigas Caroline e Caren, por sempre estarem ao meu lado prestando apoio. Aos meus tios, que conseguiram tornar mais leve a experiência vivida.

Ao meu orientador Matheus, que dedicou seu tempo e conhecimento como forma de me fazer uma profissional melhor.

Aos meus amados Nossa Senhora de Aparecida e Guerreiro Ogum, por terem sido base perante todos os desafios.

“O hoje é real

É a realidade que você pode interferir

As oportunidades de mudança

“Tá” no presente

Não espere o futuro mudar sua vida

Porque o futuro será a consequência do presente”

(ROCK, Edi; A vida é desafio, 2002.)

RESUMO

A utilização de esquadrias de alumínio em edificações, ocorre de maneira ampla no mercado da construção civil. Diversos modelos são empregados com o intuito de separação de ambiente, iluminação ou ventilação, a variar de acordo com a tipologia em questão. Baseado em tal, há o recorrente lançamento de novos modelos com os mais diversos tipos de perfis, de modo que a competitividade seja constantemente fomentada. Como os demais materiais empregados em uma edificação, as esquadrias também necessitam do atendimento de normas e verificação de resistência através de ensaios em laboratórios especializados previamente a seu fornecimento. Assim, o presente trabalho analisa e simula os esforços sofridos por uma janela do tipo de correr, concluindo se o modelo desenvolvido possui a resistência estrutural necessária para comercialização. A verificação realizada é caracterizada de acordo com os ensaios considerados mecânicos pela norma ABNT NBR 10821, os quais permitem a aferição de dimensão máxima de variação nos componentes, tornando possível analisar se a esquadria tente a ser aprovada ou reprovada nos ensaios práticos. A partir dos dados analisados de uma esquadria linha 12, foi possível verificar que, dentro do projeto elaborado, o produto não possui resistência mecânica suficiente para a aprovação, comercialização e consequente utilização do produto em região 3 com 5 pavimentos.

Palavras-chave: Alumínio. Esquadria. Perfil extrudado. Resistência dos materiais.

ABSTRACT

The use of aluminum frames in buildings occurs widely in the construction market. Several models are used with the intention of separating the environment, lighting or ventilation, varying according to the typology in question. Based on this, there is a recurring launch of new models with the most diverse types of profiles, so that competitiveness is constantly encouraged. Like other materials used in a building, the frames also underwent compliance with standards and resistance verification through tests in specialized laboratories prior to being supplied. Therefore, the present work analyzes and simulates the efforts suffered by a racing-type window, concluding whether the developed model has the necessary structural resistance for movement. The verification carried out is characterized in accordance with the mechanical tests considered by the ABNT NBR 10821 standard, which allow measurement of the maximum dimension of variation in the components, making it possible to analyze whether the frame tries to pass or fail in practical tests. Based on the data analyzed from a line 12 frame, it was possible to verify that, within the project developed, the product does not have sufficient mechanical resistance for the approval, commercialization and consequent use of the product in region 3 with 5 floors.

Keywords: *Aluminum. Square. Extruded profile. Strength of materials.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de isopletras da velocidade básica do vento, em m/s, no Brasil, conforme a ABNT NBR 6123	16
Figura 2 – Pontos de medição de deformação na esquadria do tipo janela de duas folhas móveis.....	17
Figura 3 – Esquema de ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com o canto inferior imobilizado, para esquadrias do tipo de correr de duas folhas móveis (vista interna).....	18
Figura 4 – Esquema de ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados, para esquadrias do tipo de correr	19
Figura 5 – Janela de correr de duas folhas móveis	20
Figura 6 – Bitola de um perfil de alumínio	20
Figura 7 – Perfil Altura da folha da janela de correr	22
Figura 8 – Perfil Largura de folha da janela de correr.....	23
Figura 9 – Perfil Mão-de-amigo da janela de correr	23
Figura 10 – Perfil Trilho inferior da janela de correr	23
Figura 11 – Perfil Trilho superior da janela de correr	24
Figura 12 – Perfil Trilho superior da janela de correr	24
Figura 13 – Projeto 2D janela de correr 2 folhas móveis linha 12	24
Figura 14 – Área de influência do perfil submetido ao carregamento	26
Figura 15 – Deformação na folha de janela com um canto imobilizado após aplicação da carga de 400 N	28
Figura 16 – Diagrama de momento fletor da janela com dois cantos imobilizados.....	29
Figura 17 – Deformação na folha de janela com dois cantos imobilizados após aplicação da carga de 400 N.....	30
Figura 18 – Diagrama de momento fletor da janela com dois cantos imobilizados.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de valores de pressão do vento conforme a região do país e o número de pavimentos da edificação.....	15
Tabela 2 - Composição química ligas de alumínio.....	21
Tabela 3 - Propriedades mecânicas ligas de alumínio.....	22
Tabela 4 - Propriedades dos perfis da janela de correr 2 folhas móveis linha 12	25
Tabela 5 - Resultados das simulações	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 ABNT NBR 10821-3:2017: Esquadrias para edificações	14
2.2.1 Resistência às cargas uniformemente distribuídas	16
2.2.2 Resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado.....	18
2.2.3 Resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados	19
3 METODOLOGIA	20
3.1 O projeto	22
3.2 Simulações de ensaios	25
3.2.1 Execução da simulação de resistência às cargas uniformemente distribuídas	26
3.2.2 Execução da simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado	27
3.2.3 Execução da simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados	30
3.3 Resultados	32
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a necessidade de moradia anda lado a lado com o ser humano, seja na época pré-histórica com a busca de abrigo em cavernas ou nos tempos atuais com a confecção de casas e edifícios tecnológicos. E com a evolução das construções, surgiu a necessidade da utilização de componentes que possuíssem funcionalidades além da resistência de uma parede: as esquadrias. As primeiras portas e janelas de que se tem ciência são datadas de 4000 anos a.C. em Persa, onde atualmente é o Irã, conforme descrito no artigo “Portas e Janelas. Sua origem.” de 31 de agosto de 2019, publicado pelo site Lohn Esquadrias.

Esquadrias é o termo utilizado para definir elementos responsáveis pelo fechamento de vãos em uma propriedade, proporcionando a possibilidade de passagem de transeuntes, luz e ventilação. Tais produtos possuem grande utilização no mercado da construção civil e demandam cada vez mais tipologias e preços distintos para os mais amplos públicos. Isso porque, além de possuírem características estruturais, têm em sua estética a possibilidade de mudarem o ambiente em que se encontram instaladas.

Além de um padrão estético agradável, uma esquadria precisa ter sua qualidade comprovada em laboratório, de modo que seja garantida a eficiência necessária para suportar chuvas e ventanias nas mais diversas condições. No Brasil, diversas normas regulam os produtos citados, tendo como exemplo a ABNT NBR 10821: Esquadrias externas para edificações que se refere a portas e janelas de aço e alumínio e a ABNT NBR 15930: Portas de Madeira.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e análise teóricos de uma esquadria de alumínio do tipo janela de correr de 2 folhas móveis, a fim de simular se sua estrutura é capaz de cumprir os requisitos de esforços mecânicos presentes na norma ABNT NBR 10821. Com o embasamento teórico, há a possibilidade de previsão de um resultado, permitindo que o projeto seja enviado ao laboratório apenas se obtido resultado satisfatório. Assim, há a economia de investimentos com laudos e testes, se avaliado um retorno negativo do conjunto.

Como objetivos gerais, têm-se o desenvolvimento de perfis de alumínio para uma esquadria de correr do tipo duas folhas móveis; a avaliação de características como área, perímetro e momentos de inércia dos perfis desenvolvidos; e a avaliação de resistência dos perfis desenvolvidos de acordo com os critérios da norma ABNT NBR 10821.

Para a execução do estudo, será realizada a simulação através do software Ftool, disponibilizado gratuitamente, o que aumenta o alcance de usuários que pretendem repetir o

procedimento futuramente. O objetivo é a aplicação de cargas simuladas, de acordo com a região e número de pavimentos que se pretende atingir para o projeto em questão, de modo que a flecha recebida pelo perfil possa ser verificada como aprovada ou não, conforme requisitos da norma ABNT NBR 10821.

Como ponto de partida da verificação necessária, foi desenvolvido um projeto de esquadria do tipo janela de correr de 2 folhas móveis com bitola/linha de 12 mm. Os perfis confeccionados foram altura, largura, trilhos, lateral e mão-de-amigo, possibilitando a montagem do produto, a partir de software do tipo CAD 2D. Houve a determinação de que o produto em questão seja capaz de ser utilizado em região 3 com 5 pavimentos, cuja pressão a ser suportada é de 750 Pa, conforme tabelado na norma ABNT NBR 10821.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Cardoso (2022), o alumínio extrudado passa a ser utilizado para a fabricação de esquadrias no Brasil na década de 1960. A partir disso, é notável o crescimento que o material teve no segmento, destacando uma virada de página em 1980.

Já a década de 1980 consagrou o uso do alumínio, pois os sistemas vieram para facilitar o desenvolvimento das esquadrias em todo Brasil. Os sistemas eram compostos não só por perfis, mas também por acessórios e ferramentais de usinagem, embora ainda manuais. Claro que isso merece um destaque positivo. Houve inúmeros contatos corpo a corpo, com treinamento intensivo da mão de obra - uma verdadeira revolução (Cardoso, 2022, p. 32).

Com a utilização das esquadrias de alumínio, há a necessidade de verificação de qualidade do produto e, em 1998, é criado o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - PBQP-H. A partir do programa, há a obrigatoriedade de que construções utilizem esquadrias certificadas, quando se tratando de empreendimentos a serem comercializados, como apartamentos e casas do programa Minha Casa Minha Vida. Ao mesmo tempo, é de interesse a maior disputa de mercado, para atendimento principalmente de famílias de baixa renda. A seguir consta um trecho de apresentação do programa disponibilizado no site PBQP-H.

Dessa forma, espera-se o aumento da competitividade no setor, a melhoria da qualidade de produtos e serviços, a redução de custos e a otimização do uso dos recursos públicos. O objetivo, a longo prazo, é criar um ambiente de isonomia competitiva, que propicie soluções mais baratas e de melhor qualidade para a redução do déficit habitacional no país, atendendo, em especial, a produção habitacional de interesse social (PBQP-H, 2024).

A partir do PBQP-H, são desenvolvidos os Programas Setoriais de Qualidade, os quais regem em diversos segmentos ligados a produtos destinados à construção civil. No caso das esquadrias, seus fabricantes foram os primeiros a entrarem no PSQ, conforme descrito por Cardoso.

Os fabricantes de esquadrias em série foram os primeiros a entrar no PSQ. Isso já está trazendo benefícios entre os fabricantes, uma vez que eles passaram a testar as esquadrias - o que possibilitou fazer o acompanhamento da produção mais de perto e descobrir pontos de melhoria. Consequentemente, houve um avanço na qualidade dos produtos como um todo. (Cardoso, 2022, p. 39).

Desta maneira, a confecção de uma esquadria exige a aprovação em laboratório acreditado pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) para a validação de sua qualidade tanto estrutural quanto de funcionamento.

2.1 ABNT NBR 10821: Esquadrias para edificações

A norma ABNT NBR 10821-3: Esquadrias externas e internas – Métodos de Ensaio, possui sua última publicação datada em 2017 e traz consigo os critérios avaliativos para a aprovação de uma esquadria de alumínio a ser comercializada. Além da parte 3, para a análise neste realizada, foi utilizada a parte 2 da norma, sendo a ABNT NBR 10821-2: Esquadrias externas – Requisitos e classificação, com última publicação em 2023.

Para a aprovação de uma esquadria, existem dois tipos de avaliação, sendo uma que define se o item atende ou não atende aos requisitos expostos e outra que apresenta a região do Brasil e o número de pavimentos em que o item poderá ser instalado. Para o último caso, é considerada a tabela de valores de pressão do vento conforme a região do país e o número de pavimentos da edificação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023).

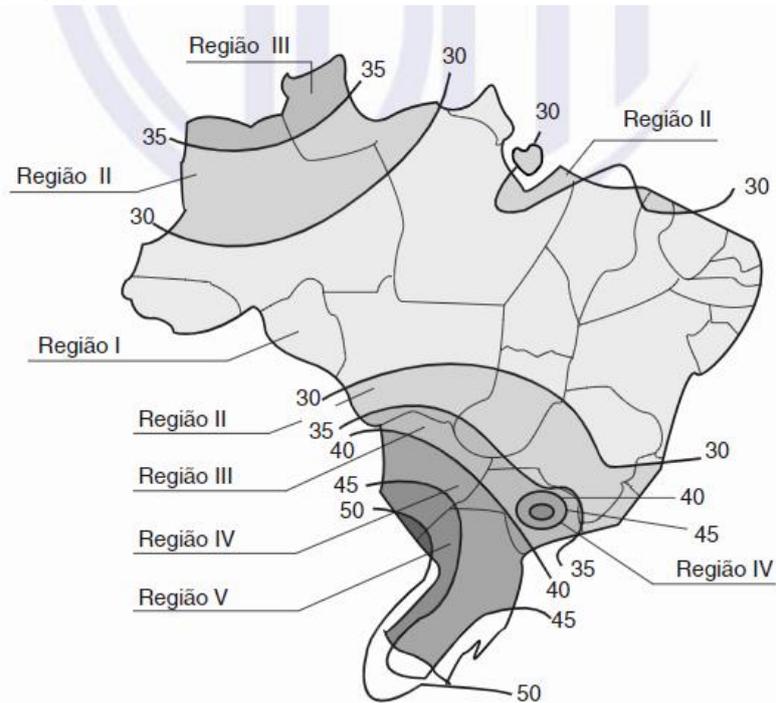
Tabela 1 - Tabela de valores de pressão do vento conforme a região do país e o número de pavimentos da edificação

Quantidade de pavimentos	Altura máxima	Região do país	Pressão de ensaio (P_a)	Pressão de segurança (P_s)	Pressão de água (P_a)
			positiva e negativa	positiva e negativa	
			$P_e = P_p \times 1,2$	$P_s = P_e \times 1,5$	$P_a = P_p \times 0,2$
2	6 m	I	350	520	60
		II	470	700	80
		III	610	920	100
		IV	770	1160	130
		V	950	1430	160
5	15 m	I	420	640	70
		II	580	860	100
		III	750	1130	130
		IV	950	1430	160
		V	1180	1760	200
10	30 m	I	500	750	80
		II	680	1030	110
		III	890	1340	150
		IV	1130	1700	190
		V	1400	2090	230
20	60 m	I	600	900	100
		II	815	1220	140
		III	1060	1600	180
		IV	1350	2020	220
		V	1660	2500	280
30	90 m	I	660	980	110
		II	890	1340	150
		III	1170	1750	200
		IV	1480	2210	250
		V	1820	2730	300

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023).

Para a definição de região, é seguido o gráfico de isopletas. Tal gráfico, baseado no mapa do Brasil, conta com a diferenciação das regiões baseada na velocidade básica do vento, em m/s, no Brasil, conforme a ABNT NBR 6123.

Figura 1 – Gráfico de isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, no Brasil, conforme a ABNT NBR 6123



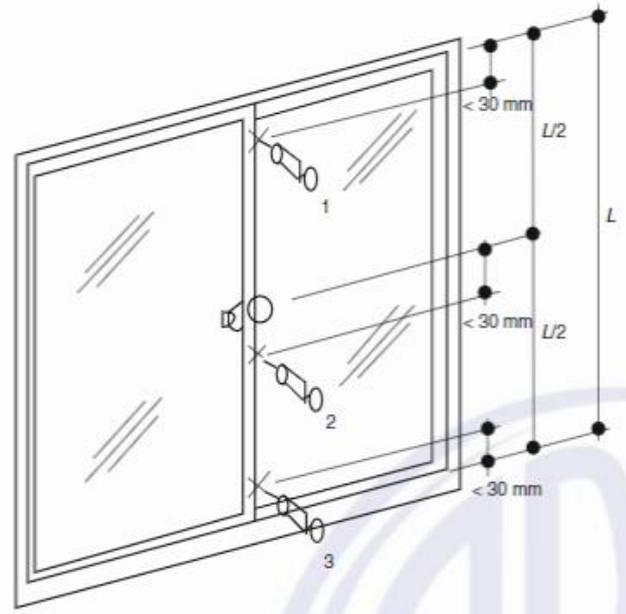
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023).

Para a análise de resistência de uma esquadria, o qual é o foco da monografia aqui apresentada, há a necessidade de seguimento de alguns ensaios previstos em norma, sendo estes a seguir detalhados.

2.2.1 Resistência às cargas uniformemente distribuídas

O ensaio de resistência às cargas uniformemente distribuídas tem como função simular a presença de tempestades de vento, através da instalação do produto em uma câmara, de modo que a deformação dos perfis seja analisada. Em tal verificação, há a aferição em três pontos ao longo do comprimento dos perfis centrais da esquadria, antes e depois da aplicação de cargas.

Figura 2 – Pontos de medição de deformação na esquadria do tipo janela de duas folhas móveis



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017).

Para o modelo de correr, a equação a ser executada é:

$$D_{\text{máx}} = D_2 - (D_1 + D_3) / 2 \quad (1)$$

Onde:

- a) $D_{\text{máx}}$ = Deformação máxima.
- b) D_1 = Deformação no ponto 1 (ponto superior).
- c) D_2 = Deformação no ponto 2 (ponto central).
- d) D_3 = Deformação no ponto 3 (ponto inferior).

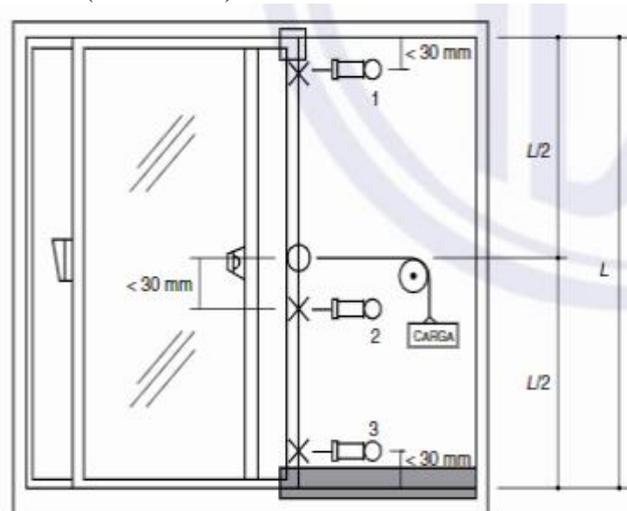
Como resultado, o perfil central que será analisado, deve seguir os critérios apresentados na parte 2 da norma ABNT NBR 10821.

[...] d) apresentar deflexão máxima instantânea superior a $L/175$ do perfil, sendo L o comprimento livre do componente em análise; em nenhum caso deve ser superior a 30 mm em qualquer um dos seus perfis; e
 e) apresentar deformação residual superior a 0,4 % do comprimento livre do perfil em análise, medida após pelo menos 3 min do desligamento da pressão de ensaio. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023, p. 14).

2.2.2 Resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado

Para a simulação de resistência ao esforço horizontal/vertical, no plano da folha, com um canto imobilizado, a esquadria do tipo janela de correr 2 folhas móveis tem suas folhas abertas de maneira intermediária e calços de madeira seca de densidade superior a 800 kg/m^3 , inseridos em seu trilho inferior para o travamento de abertura. Na sequência, há a aplicação de uma força de 400 N gradativa, de 50 N em 50 N, no sentido de fechamento da esquadria. A força de 400 N deve se manter aplicada na esquadria por 3 minutos e removida. Após sua remoção, são aguardados mais 3 minutos para a leitura de deformação residual da altura da folha da janela de correr.

Figura 3 – Esquema de ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com o canto inferior imobilizado, para esquadrias do tipo de correr de duas folhas móveis (vista interna)



Legenda

- Ponto de imobilização
- Ponto para aplicar a carga
- X Ponto de medição

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017).

Conforme a parte 2 da norma ABNT NBR 10821, para o citado ensaio, a esquadria não pode possuir:

[...] deformação residual superior a 0,4% do vão (comprimento livre do perfil em análise), quando aplicável (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023, p. 15).

2.2.3 Resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados

Na realização do ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados, há o travamento das folhas com a utilização de calços de madeira de densidade superior a 800 kg/m^3 em posição intermediária, tanto na parte superior quanto inferior da esquadria. Após, há a aplicação de forças de 50 N até o atingimento de 400 N de carga, no centro da folha do produto, por 3 minutos.

Figura 4 – Esquema de ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados, para esquadrias do tipo de correr



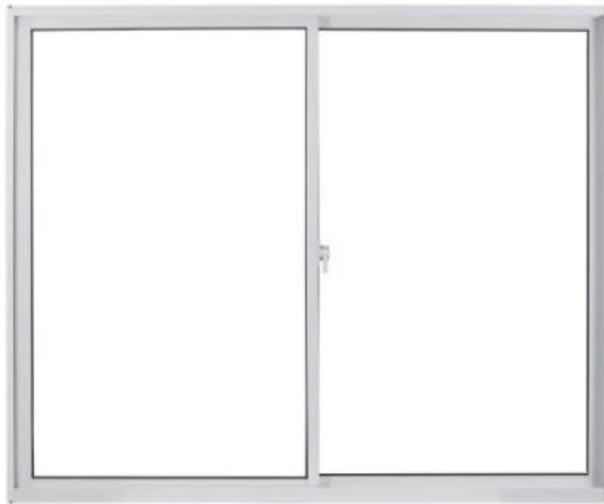
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017).

Como resultado, a esquadria não pode sofrer deformação residual superior a 0,4% relativa ao comprimento do perfil em análise, no caso, a altura da folha, cujo comprimento considerado é de 1000 mm.

3 METODOLOGIA

Para a simulação de cálculo estrutural de cargas uniformemente distribuídas, houve o desenvolvimento de perfis de alumínio de trilho inferior, trilho superior, altura, mão-de-amigo, largura e lateral para uma janela de correr de 2 folhas móveis.

Figura 5 – Janela de correr de duas folhas móveis



Fonte: MGM Portas e Janelas (2024).

Na execução do projeto, foi considerada uma janela linha 12, que recebe esse nome devido à bitola de seu perfil altura de folha possuir 12 mm, representada na figura 6 pela dimensão “B”.

Figura 6 – Bitola de um perfil de alumínio



Fonte: O autor.

Para o desenvolvimento dos perfis, foi considerada a utilização da liga de alumínio 6060, que possui como composição química os dados a seguir apresentados.

Tabela 2 - Composição química ligas de alumínio

ALUSSIN / ASTM	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros elementos	Al (mín)
6060	0,30 - 0,60	0,10 - 0,30	0,10	0,10	0,35 - 0,60	0,05	0,15	0,10	0,15	Restante
6063	0,20 - 0,60	0	0,10	0,10	0,45 - 0,90	0,10	0,10	0,10	0,15	Restante
6101	0,30 - 0,70	1	0,10	0,03	0,35 - 0,80	0,03	0,10	-	0,10	Restante
6005A	0,50 - 0,90	0	0,30	0,50	0,40 - 0,70	0,30	0,20	0,10	0,15	Restante
6061	0,40 - 0,80	1	0,15 - 0,40	0,15	0,80 - 1,20	0,04 - 0,35	0,25	0,15	0,15	Restante
6351	0,70 - 1,30	1	0,10	0,40 - 0,80	0,40 - 0,80	-	0,20	0,20	0,15	Restante
6082	0,70 - 1,30	1	0,10	0,40 - 1,00	0,60 - 1,20	0,04 - 1,20	0,20	0,10	0,15	Restante
6463	0,20 - 0,60	0	0,20	0,05	0,45 - 0,90	-	0,05	0,03	0,15	Restante

Fonte: Adaptado de Alussin, (2024).

A composição do material garante suas propriedades mecânicas. No caso da liga de alumínio 6060, outro fator que permite sua variação é a têmpera a ser adotada.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas ligas de alumínio

Liga	Têmpera	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
6060	T5	145 (mín)	105 (mín)	8 (mín)
	T6	190 (mín)	150 (mín)	
6063	T5	145 (mín)	105 (mín)	8 (mín)
	T6	205 (mín)	170 (mín)	
6101	T6	200 (mín)	170 (mín)	8 (mín)
6005A	T5	260 (mín)	215 (mín)	7 (mín)
	T6	270 (mín)	225 (mín)	6 (mín)
6061	T4	180 (mín)	110 (mín)	16 (mín)
	T6	260 (mín)	240 (mín)	8 (mín)
6351	T5	270 (mín)	230 (mín)	6 (mín)
	T6	280 (mín)	250 (mín)	
6082	T6	290 (mín)	250 (mín)	6 (mín)

Fonte: Adaptado de Alussin, (2024).

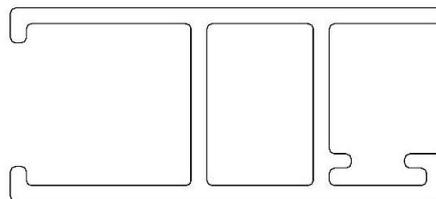
A têmpera considerada para o material foi a T5. Assim, foi possível determinar o limite de escoamento do material como sendo de 105 MPa e o módulo de elasticidade de 69 GPa.

3.1 O projeto

Com a bitola e a matéria-prima definidas, foi possível de fato executar o desenvolvimento dos perfis de alumínio a serem utilizados na esquadria. O modelo janela de correr de 2 folhas móveis necessita de perfis dos tipos

a) Altura (perfis verticais da extremidade da folha¹);

Figura 7 – Perfil Altura da folha da janela de correr

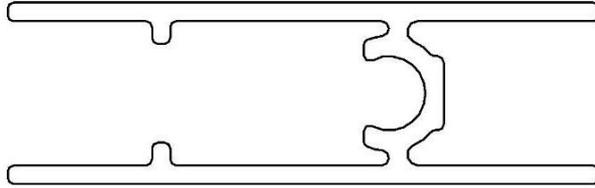


Fonte: O autor.

¹Região que abriga o vidro de uma esquadria; no projeto, parte que se move.

b) Largura (perfis horizontais da folha);

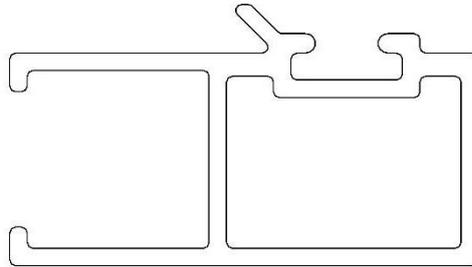
Figura 8 – Perfil Largura de folha da janela de correr



Fonte: O autor.

c) Mão-de-amigo (perfis centrais das folhas);

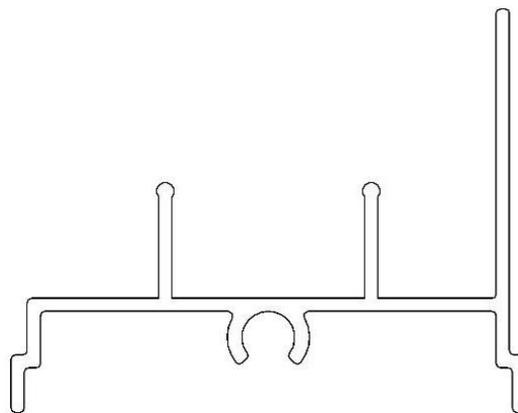
Figura 9 – Perfil Mão-de-amigo da janela de correr



Fonte: O autor.

d) Trilho inferior (perfil inferior do quadro²);

Figura 10 – Perfil Trilho inferior da janela de correr

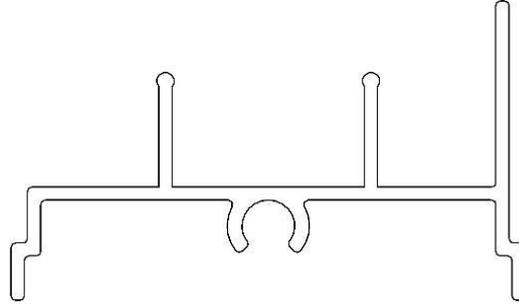


Fonte: O autor.

²Região em que as folhas correm; parte que fica fixa no vão.

e) Trilho superior (perfil superior do quadro);

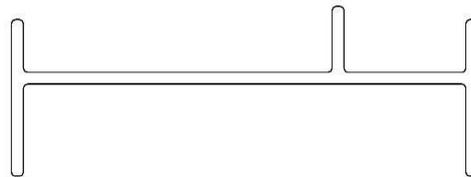
Figura 11 – Perfil Trilho superior da janela de correr



Fonte: O autor.

f) Lateral (perfis laterais do quadro).

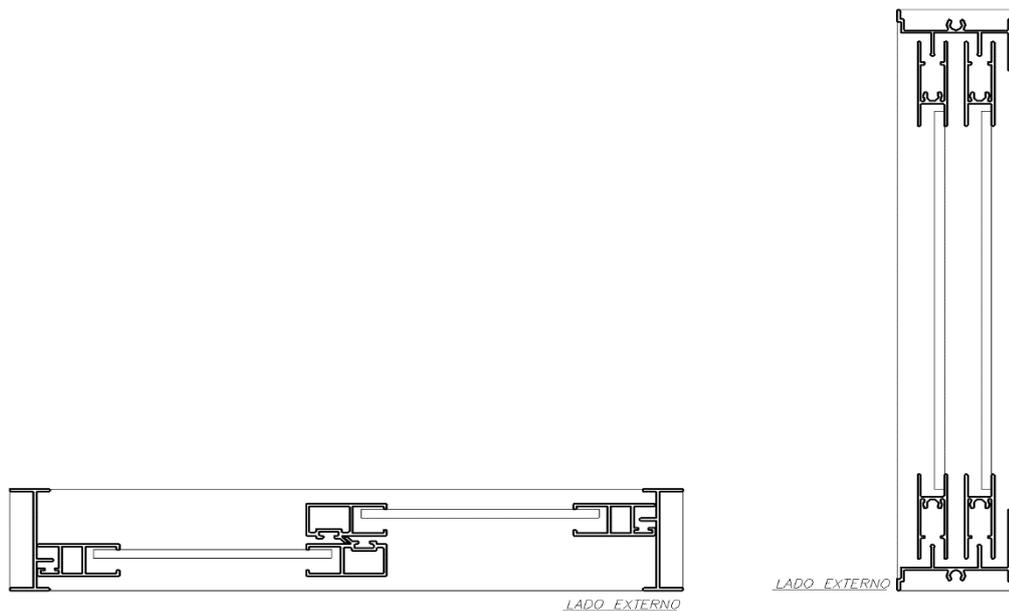
Figura 12 – Perfil Trilho superior da janela de correr



Fonte: O autor.

Baseado nas necessidades, foi realizado através de um software 2D do tipo CAD o projeto a ser analisado.

Figura 13 – Projeto 2D janela de correr 2 folhas móveis linha 12



Fonte: O autor.

De acordo com o projeto desenvolvido, houve a coleta dos dados de área, perímetro e momentos de inércia dos perfis. Tais dados são possíveis de serem extraídos a partir de comando disponível no próprio software 2D do tipo CAD. A seguir constam as informações segregadas por tipologia de perfil.

Tabela 4 - Propriedades dos perfis da janela de correr 2 folhas móveis linha 12

Perfil	Área (mm ²)	Perímetro (mm)	Momento de inércia em relação ao eixo x (mm ⁴)	Momento de inércia em relação ao eixo y (mm ⁴)
Altura	65,8892	142,2722	4127,5770	893,1133
Largura	66,0800	143,7947	2090,9900	3431,7400
Mão-de-amigo	71,9256	150,5415	2681,3360	6772,6670
Trilho inferior	84,5535	182,2163	2861,2060	10957,5900
Trilho superior	78,2535	168,2163	1347,9260	9884,2340
Lateral	55,7227	123,7398	9152,0500	338,3877

Fonte: O autor.

A partir da realização de todo o projeto da esquadria, foi possível iniciar a execução dos cálculos para simulação de resistência dos perfis que a compõem, conforme detalhado no próximo tópico.

3.2 Simulações de ensaios

As simulações de ensaios realizadas, foram baseadas nos itens anteriormente apresentados da norma ABNT NBR 10821. Para auxílio nas verificações, foi utilizado o software Ftool, onde é possível aplicar uma carga em determinado ponto e prever o comportamento do componente analisado. Para a parametrização pré-análise, é necessária a inserção no software da informação de limite de escoamento da matéria-prima que, conforme visto, é de 105 Mpa para a liga de alumínio 6060 com tempera T5. Como pressão positiva e negativa a ser utilizada, foi considerado que tal produto seria para instalação em um prédio de 5 pavimentos localizado na região 3 que, conforme a tabela de valores de pressão do vento conforme a região do país e o número de pavimentos da edificação, define-se em 750 Pa. A seguir constam os detalhamentos das análises realizadas.

3.2.1 Execução da simulação de resistência às cargas uniformemente distribuídas

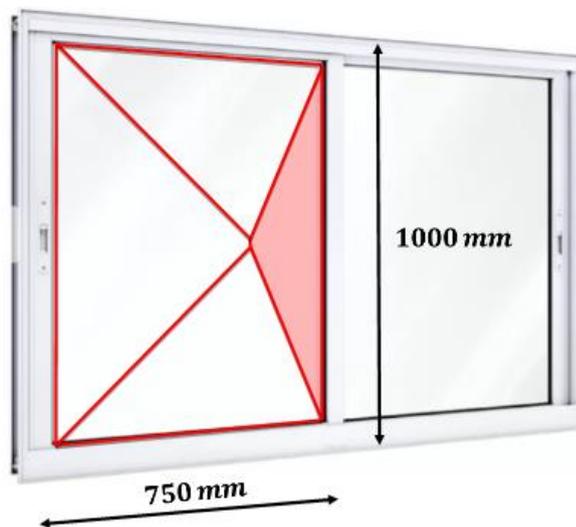
Para a simulação do ensaio de resistência às cargas uniformemente distribuídas, considerou-se a posição do relógio comparador em:

- 30 mm a partir da parte inferior do perfil (D1);
- 30 mm a partir da parte superior do perfil (D2);
- 30 mm abaixo do centro do perfil (D3).

Além disso, o comprimento considerado para a mão-de-amigo foi de 1000 mm e a inércia em y.

Devido à aplicação dos esforços se darem com a folha da esquadria totalmente fechada, foi adotada a utilização de ângulos de 30 graus entre o perfil da esquadria e a delimitação da área de influência do perfil submetido ao carregamento, conforme figura 14. Tal determinação foi obtida através do Teorema de Charneira Plástica – metodologia utilizada para determinar a área de influência de uma carga aplicada em itens com bordas apoiadas e engastadas. Assim, foi possível chegar à área de 143990,47 mm².

Figura 14 – Área de influência do perfil submetido ao carregamento



Fonte: O autor.

Com a pressão a ser suportada definida em 750 Pa ou 0,00075 N/mm², houve a aplicação através do software Ftool, tendo como resultado uma carga recebida pelo perfil de 0,108 N/mm. Após, o perfil foi cotado nos três pontos referentes à instalação do relógio comparador, de modo que o deslocamento pudesse ser dimensionado. Os resultados foram:

- Para D1: 0,73 mm;

- b) Para D2: 7,6 mm;
 c) Para D3: 0,73 mm.

Através da equação 1, foi calculada a deflexão máxima do perfil em questão, conforme a seguir.

$$D_{\text{máx}} = D2 - (D1+D3) / 2$$

$$D_{\text{máx}} = 7,6 - (0,73+0,73) / 2$$

$$D_{\text{máx}} = 6,87 \text{ mm}$$

Para o primeiro critério de verificação, tem-se que a deflexão máxima não pode ser superior a $L/175$, onde L é o comprimento do perfil. Desta maneira:

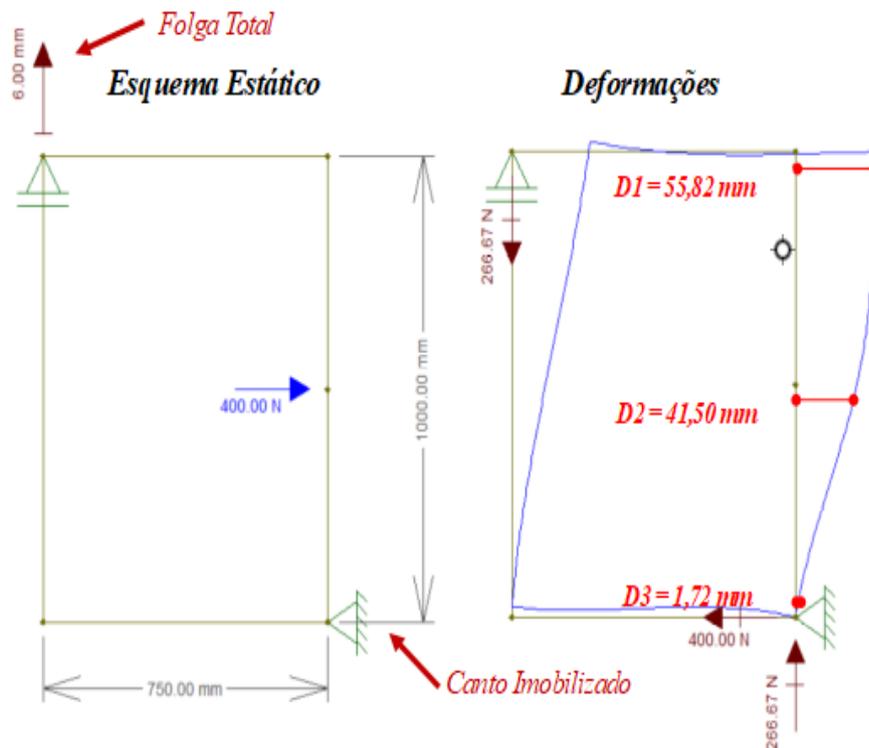
$$L/175 = 1000/175 = 5,71 \text{ mm}$$

Logo, o resultado da análise deveria ser inferior a 5,71 mm. Devido ao resultado de deflexão máxima ter sido de 6,87 mm, o produto foi considerado reprovado para o ensaio de resistência às cargas uniformemente distribuídas.

3.2.2 Execução da simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado

Para a realização da simulação do teste, foram consideradas as folgas de 3 mm inferior e superior, conforme projeto, na folha desenhada no software Ftool. Com a tendência da força aplicada no centro da folha da esquadria de provocar a rotação do item, entende-se que deve haver a aplicação da folga total de 6 mm na parte superior da folha. Além disso, foram consideradas as inércias em y para os perfis de altura e mão-de-amigo e a inércia em x para os perfis de largura da folha da janela. Na sequência, foi aplicada a carga de 400 N no sentido de fechamento da folha (centro do perfil de altura, horizontalmente). Com a carga aplicada, resultou-se em deformações plásticas de 55,82 mm, 41,5 mm e 1,72 mm para os pontos D1, D2 e D3, consecutivamente.

Figura 15 – Deformação na folha de janela com um canto imobilizado após aplicação da carga de 400 N



Fonte: O autor.

Desta maneira, foi possível calcular a deformação real do item, dada por:

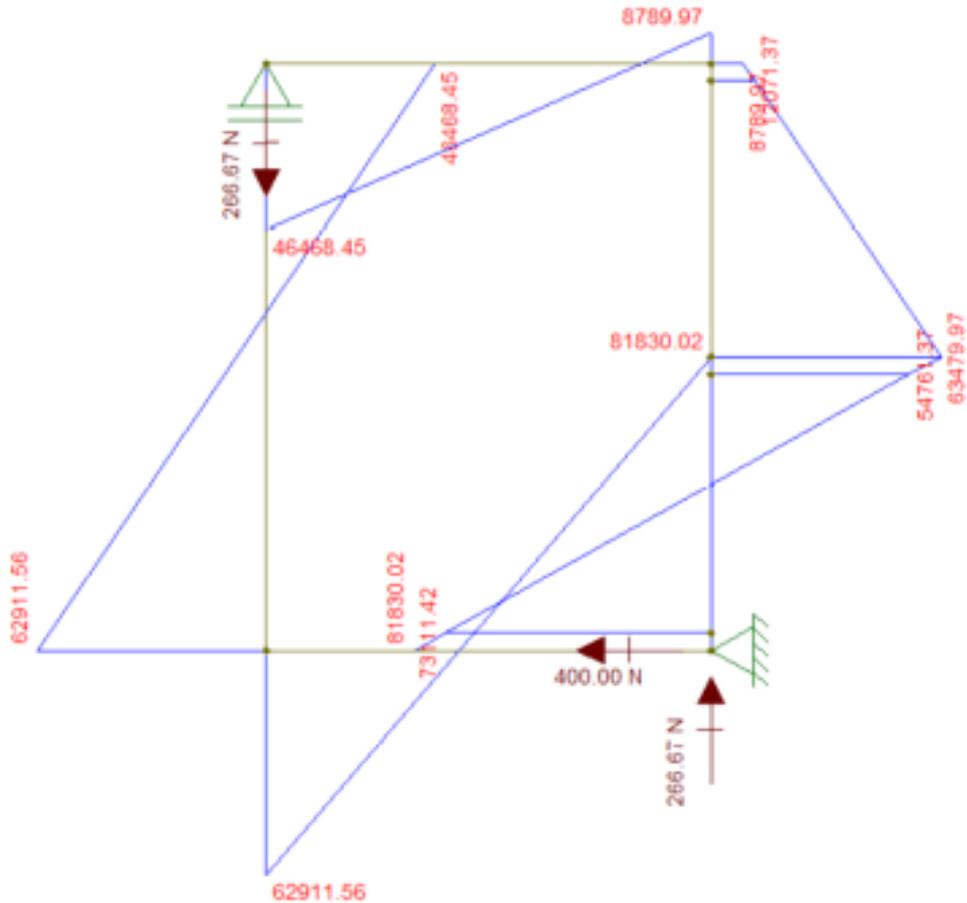
$$D_{\text{máx}} = 41,5 - (55,82 + 1,72)/2$$

$$D_{\text{máx}} = 12,73 \text{ mm}$$

Considerando que a deformação residual máxima ao longo do perfil deve ser de até 0,4% de seu comprimento (que é de 1000 mm), têm-se que esta não pode ultrapassar 4 mm, tornando o produto reprovado para a análise de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado.

Como complemento, com o auxílio do software Ftool, foi possível calcular os momentos atuantes sobre a estrutura, sendo eles de 81803,02 N.mm (Momento 1), 81803,02 N.m (Momento 2) e 62911,56 N.mm (Momento 3).

Figura 16 – Diagrama de momento fletor da janela com dois cantos imobilizados



Fonte: O autor.

A partir de tal, houve a possibilidade de cálculo das tensões de flexão dos perfis, sendo:

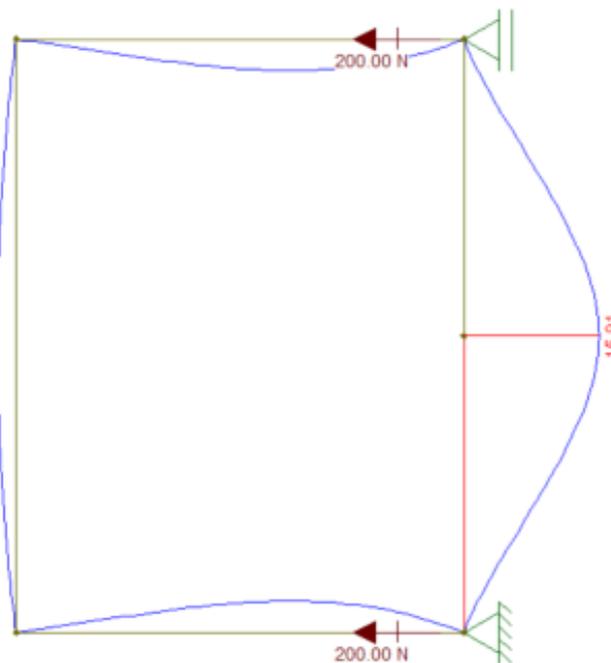
- Altura da folha: 288 MPa;
- Mão-de-amigo da folha: 111 MPa;
- Largura da folha: 288 MPa.

Assim, considerando a tensão de escoamento da liga 6060 como sendo de 105 MPa, não é possível garantir o comportamento elástico dos perfis. Logo, não é possível garantir que a deformação dos mesmos seja inferior a 0,4% de seu comprimento. Desta maneira, o produto se encontra reprovado quanto à verificação realizada por poder apresentar altas deformações residuais.

3.2.3 Execução da simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados

Para a execução da simulação do ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados, foi aplicada a carga de 400 N no sentido de fechamento da folha (centro do perfil de altura, horizontalmente). Com a carga aplicada, resultou-se em uma deformação de 15,91 mm.

Figura 17 – Deformação na folha de janela com dois cantos imobilizados após aplicação da carga de 400 N



Fonte: O autor.

Considerando que a deformação residual máxima ao longo do perfil deve ser de 0,4 % de seu comprimento (que é de 1000 mm), têm-se que:

$$D_{\text{máx}} = 1000 * 0,004$$

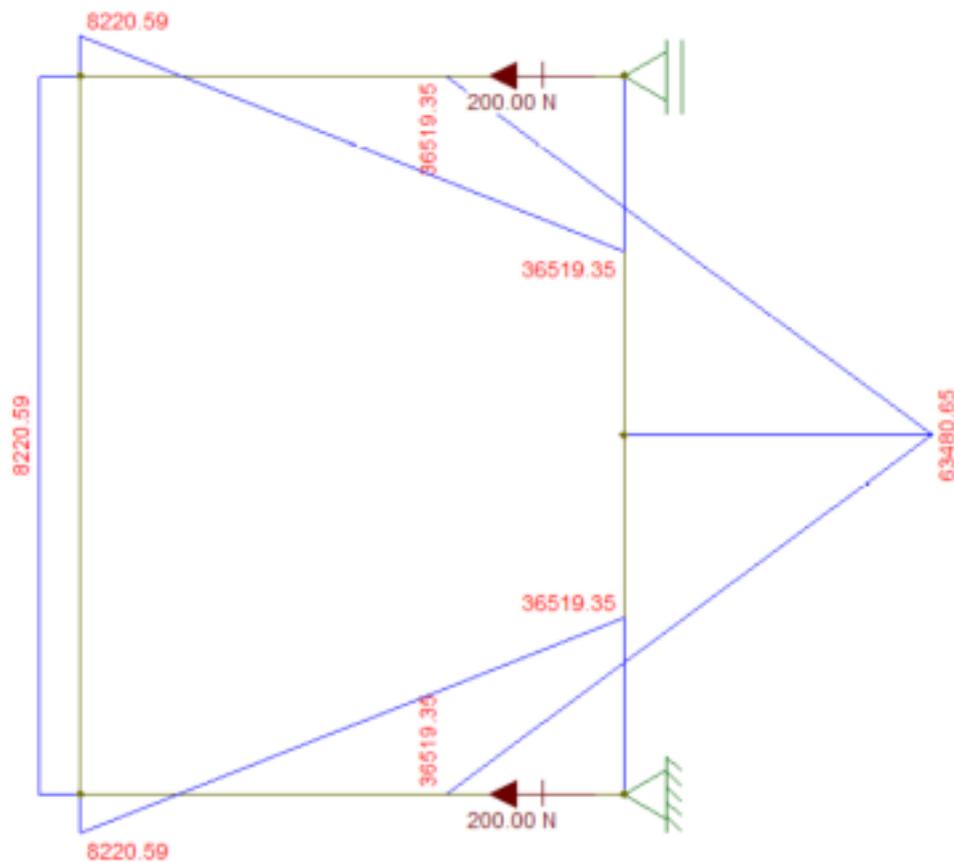
$$D_{\text{máx}} = 4 \text{ mm}$$

Desta maneira, assim como na análise anterior, o item se torna reprovado na simulação devido a possuir deformação quase quatro vezes maior do que a indicada pela norma. Ainda

que com o resultado negativo, foi realizada a análise das flexões dos perfis em relação ao limite de escoamento da matéria-prima.

Seguindo com a utilização do Ftool, foram calculados os momentos atuantes sobre a estrutura, sendo eles de 63480,65 N.mm (Momento 1), 36519,35 N.m (Momento 2) e 8220,59 N.mm (Momento 3) para o ensaio de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados, conforme a seguir.

Figura 18 – Diagrama de momento fletor da janela com dois cantos imobilizados



Fonte: O autor.

A partir dos valores obtidos, houve a possibilidade de cálculo das tensões de flexão dos perfis, sendo:

- Altura da folha: 225 MPa;
- Mão-de-amigo da folha: 15 MPa;
- Largura da folha: 128 MPa.

Assim, considerando a tensão de escoamento da liga 6060 como sendo de 105 MPa, não é possível garantir o comportamento elástico dos perfis. Logo, não é possível garantir que a deformação dos mesmos seja inferior a 0,4% de seu comprimento. Desta maneira, o produto se

encontra reprovado quanto à verificação realizada por poder apresentar altas deformações residuais.

3.3 Resultados

De acordo com as simulações realizadas, os perfis utilizados no desenvolvimento da esquadria não possuem resistência suficiente para serem utilizados em um produto destinado à região 3 com até 5 pavimentos, a qual a pressão de ensaio é de 750 Pa. Logo, o conjunto apresentado foi considerado reprovado, conforme tabela a seguir.

Tabela 5 - Resultados das simulações

Simulação	Considerações	Valor pretendido	Valor obtido	Resultado
Simulação de resistência às cargas uniformemente distribuídas	Deflexão máxima não pode ser superior a $L/175$, onde L é o comprimento do perfil.	$\leq 5,71$ mm	6,87 mm	Reprovado
Simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com um canto imobilizado	Deformação residual máxima ao longo do perfil deve ser de até 0,4%.	≤ 4 mm	12,73 mm	Reprovado
Simulação de resistência ao esforço horizontal, no plano da folha, com dois cantos imobilizados	Deformação residual máxima ao longo do perfil deve ser de até 0,4%.	≤ 4 mm	15,91 mm	Reprovado

Fonte: O autor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a execução das simulações de ensaio, foi possível analisar a resistência dos perfis desenvolvidos para uma janela de correr de duas folhas móveis da linha 12, a partir da verificação de três testes descritos na norma ABNT NBR 10821. De acordo com os critérios estabelecidos, o produto se tornou reprovado em ambas as análises apresentadas. Desta maneira, o produto desenvolvido é considerado reprovado para a utilização em prédios de até cinco pavimentos (limitado a 15 m) na região 3, conforme gráfico de isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, no Brasil.

Tomando como base o estudo realizado, foi possível prever o comportamento dos perfis de alumínio da liga 6060 quando submetidos a pressão de 750 Pa. Para que fosse possível obter a aprovação da tipologia, o item desenvolvido necessitaria atender todos os critérios estabelecidos, não sendo apenas um deles suficiente para a garantia de qualidade e resistência do produto. Assim, o produto apresentado necessita de reavaliação estrutural para tornar viável sua confecção e posterior utilização em edificações.

Como proposta de continuidade do estudo apresentado, há a possibilidade de reanálise do projeto, partindo agora da verificação do conjunto, tendo como objetivo não a aprovação em determinada região e número de pavimentos, e sim a verificação de qual a maior pressão suportada pela estrutura. Para tal, deve-se determinar como ponto de partida a região 1 com 2 pavimentos e ir aumentando a pressão analisada consecutivamente à aprovação, até que haja a determinação de limite pelo qual o projeto seria adequado.

Outro ponto a ser verificado, trata-se de novo desenvolvimento de um modelo de esquadria para aplicação da metodologia apresentada, partindo da linha 14 (uma linha superior à de 12 mm), de modo que seja verificada qual a menor linha e estrutura possível de obter aprovação para a região 3 e 5 pavimentos.

De acordo com dados fornecidos pela empresa MGM Produtos Siderúrgicos S/A, o custo médio das ferramentas de extrusão e usinagem, assim como do ensaio em laboratório, é de cerca de R\$5.000,00. A partir de tal, é possível estimar que, considerando o projeto apresentado com 6 ferramentas de extrusão, ferramentas de usinagem para os perfis de altura, mão-de-amigo, trilho inferior e lateral mais os ensaios em si, a economia gerada pela previsão dos ensaios é de cerca de R\$55.000,00.

REFERÊNCIAS

LOHN. **Portas e Janelas. Sua origem.** Disponível em: <<https://www.lohnesquadrias.com.br/blog/portas-e-janelas-sua-origem/>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

PBQP-H. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/pbqp_apresentacao.php>. Acesso em 18 mar. 2024.

CARDOSO, Antonio B. **Esquadrias de alumínio: A conquista do desempenho.** Editora All Print, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10821: **Esquadrias para edificações – Parte 2: Esquadrias externas – Requisitos e classificação.** Rio de Janeiro, 2023.

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

Janela de correr 2 folhas móveis | MGM – PORTAS, JANELAS E FECHADURAS. Disponível em: <<https://mgmportasejanelas.com.br/produtos/janela-de-correr-2-folhas-moveis/>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

Alussin – Ligas de Alumínio. Disponível em: <<http://www.alussin.com.br/liga-aluminio.html>>. Acesso em: 27 abr. 2024.