



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
DIRETORIA GERAL DO CÂMPUS JOÃO PESSOA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE AÇO EM ESTRUTURAS METÁLICAS
ATRAVÉS DO TRAVAMENTO AUXILIAR DE PILARES

IAGO LUCAS DE LIMA AUGUSTO

JOÃO PESSOA-PB

2023

IAGO LUCAS DE LIMA AUGUSTO

ANÁLISE DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE AÇO EM ESTRUTURAS METÁLICAS
ATRAVÉS DO TRAVAMENTO AUXILIAR DE PILARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra

JOÃO PESSOA-PB

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

A923a Augusto, Iago Lucas de Lima.

Análise da redução do consumo de aço em estruturas metálicas através do travamento auxiliar de pilares / Iago Lucas de Lima Augusto. – 2023.

68 f. : il.

TCC (Graduação – Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de Ensino Superior / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

Orientação : Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra.

1. Estrutura metálica. 2. Travamento. 3. Raio de giração.
4. Comprimento de flambagem. 5. Aço. I. Título.

CDU 624.014.2(043)

Bibliotecária responsável: Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132

DECISÃO 17/2023 - CBEC/UA1/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

IAGO LUCAS DE LIMA AUGUSTO

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE AÇO EM ESTRUTURAS METÁLICAS ATRAVÉS DO TRAVAMENTO
AUXILIAR DE PILARES**

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito curricular para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil
--	--

Aprovada em 27 de dezembro de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra (Orientador/IFPB)

Profa. Dra. Ana Cláudia Leão Borges (Examinadora Interna/IFPB)

Prof. Me. Camila Campos Gomez Famá(Examinadora Interna/IFPB)

JOÃO PESSOA

2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ulisses Targino Bezerra, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/12/2023 18:15:57.
- **Ana Claudia Leao Borges, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/12/2023 19:21:08.
- **Camila Campos Gomez Fama, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/12/2023 09:40:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/12/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 515506
Verificador: cb17b57f81
Código de Autenticação:



NOSSA MISSÃO: Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

VALORES E PRINCÍPIOS: Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.

Dedico este trabalho à minha mãe, minha maior incentivadora, que me ajudou nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu paz e energia para que este trabalho fosse concluído.

Aos familiares queridos, pelo apoio, compreensão e carinho.

Aos meus professores, que me ensinaram muito ao longo desses anos. Especialmente agradeço ao Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra pela sua orientação e seus ensinamentos.

Aos meus colegas de turma, que participaram de muitos momentos importantes ao longo da minha trajetória.

Aos membros da banca, nas pessoas da Prof.^a Dra. Ana Claudia Leão Borges e Prof.^a Me. Camila Campos Gomez Fama, pelas contribuições que certamente enriqueceram essa versão final.

RESUMO

O aumento do preço do aço decorrente de vários fatores, e entre eles, a pandemia, fez com que a produção de aço desacelerasse, diminuindo a oferta e aumentando o seu preço. No âmbito deste estudo, procurou-se desenvolver um dimensionamento de estrutura metálica mais leve e, conseqüentemente, mais econômica. Para alcançar esse objetivo, utilizou-se a técnica conhecida como "travamento auxiliar de pilares". Essa abordagem envolve a redução do comprimento de flambagem dos pilares, direcionando essa diminuição no sentido do menor momento de inércia e raio de giração. Esse ajuste confere maior rigidez à estrutura, permitindo a escolha de pilares mais econômicos. A implementação bem-sucedida dessa técnica representa uma significativa economia financeira, pois a possibilidade de utilização de perfis que possuem um consumo menor por metro faz com que a estrutura demande menos quilos de aço, mantendo a eficiência e a segurança estrutural necessárias para atender às exigências do projeto. Ao adotar essa abordagem, o presente estudo visa proporcionar uma solução prática e inovadora para a redução de custos em projetos de construção utilizando estruturas metálicas.

Palavras-chaves: Estrutura metálica, travamento, raio de giração, comprimento de flambagem.

ABSTRACT

The increase in the price of steel due to various factors, including the pandemic, has caused steel production to slow down, reducing supply and increasing its price. The aim of this study was to develop a lighter and, consequently, more economical steel structure. To achieve this, the technique known as "auxiliary column bracing" was used. This approach involves reducing the buckling length of the columns, directing this reduction in the direction of the smallest moment of inertia and radius of gyration. This adjustment gives the structure greater rigidity, allowing more economical columns to be chosen. The successful implementation of this technique represents significant financial savings, since the possibility of using profiles that have a lower consumption per meter means that the structure requires fewer kilos of steel, while maintaining the efficiency and structural safety needed to meet the project's requirements. By adopting this approach, this study aims to provide a practical and innovative solution for reducing costs in construction projects using steel structures.

Keywords: Steel structure, locking, turning radius, buckling length.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trecho inicial dos diagramas tensão x deformação dos aços A242 e A36.....	18
Figura 2 - Esquema de funcionamento dos laminadores	21
Figura 3 - Estrutura metálica	22
Figura 4 - Sistema de elementos estruturais.....	23
Figura 5 - Isopletas da velocidade básica	25
Figura 6 - Coluna sofrendo flambagem	38
Figura 7 - Modelo estrutural que faz uso do TAP.....	40
Figura 8 - Esboço inicial do prédio.....	42
Figura 9 - Modelo estrutural 3D do prédio convencional	43
Figura 10 - Modelo estrutural 3D do prédio com o TAP.....	44
Figura 11 - Carga de cobertura.....	45
Figura 12 - Especificação de materiais e dimensões da laje treliçada	46
Figura 13 - Carga de alvenaria.....	47
Figura 14 - Informações sobre a laje.....	48
Figura 15- Tabela com valores dos coeficientes de arrasto.....	51
Figura 16 - Determinação dos coeficientes de arrasto	52
Figura 17 - Carregamentos atuantes na estrutura.....	55
Figura 18 - Carregamentos atuantes na estrutura.....	56
Figura 19 - Diagrama de momento fletor da estrutura convencional.....	57
Figura 20 – Diagrama de esforço normal da estrutura convencional.....	58
Figura 21 - Diagrama de esforço cortante da estrutura convencional.....	58
Figura 22 - Diagrama de momento fletor da estrutura travada.....	60
Figura 23 - Diagrama de esforço normal da estrutura travada.....	61
Figura 24 - Diagrama de esforço cortante da estrutura travada	61
Figura 25 - Detalhamento da ligação viga-pilar	64
Figura 26 - Detalhamento da ligação do TAP.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço estrutural.....	18
Tabela 2 - Especificações dos tipos de aço mais utilizados	19
Tabela 3 – Elementos de liga num aço de alta resistência e baixa liga.....	20
Tabela 4 - Valores do fator topográfico.....	26
Tabela 5 - Valores do fator estatístico S3.....	27
Tabela 6 - Coeficientes de ponderação das ações $Y=Yf1Yf3$	29
Tabela 7 - Coeficientes de ponderação das ações variáveis	29
Tabela 8 - Coeficientes de ponderação das ações variáveis.....	30
Tabela 9 - Coeficientes de ponderações das resistências	30
Tabela 10 - Deslocamentos máximos	31
Tabela 11 - Valores de $(b/t)_{lim}$	34
Tabela 12 - Coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados.....	35
Tabela 13 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente	36
Tabela 14 - Carregamentos atuantes na laje.....	46
Tabela 15 - Carregamentos atuantes nas vigas e pilares	53
Tabela 16 - Carregamentos atuantes na cobertura	54
Tabela 17 - Carregamentos atuantes nos demais pavimentos	55
Tabela 18 – Planilha com o cálculo das vigas da estrutura convencional.....	59
Tabela 19 – Planilha com o cálculo dos pilares da estrutura convencional	59
Tabela 20 - Quantitativo da estrutura metálica convencional	60
Tabela 21 - Planilha com o cálculo dos pilares da estrutura travada	62
Tabela 22 - Planilha com o cálculo das vigas da estrutura travada.....	62
Tabela 23 - Planilha com o cálculo dos perfis responsáveis pelo travamento da estrutura.....	63
Tabela 24 – Quantitativo da estrutura metálica travada.....	63

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Delimitações.....	14
2	Revisão bibliográfica.....	16
2.1	Considerações iniciais.....	16
2.1.1	Vantagens da utilização do aço.....	16
2.1.2	Desvantagens da utilização do aço.....	17
2.2	Propriedades do aço	17
2.3	Propriedades mecânicas dos aços estruturais	17
2.3.1	Curva tensão deformação dos aços estruturais.....	18
2.3.2	Denominações, composição e classificação dos aços	18
2.3.3	Perfis laminados	20
2.4	Sistema estrutural	21
2.5	Dimensionamento.....	23
2.6	Ações na estrutura	23
2.6.1	Ações permanentes.....	24
2.6.2	Ações variáveis	24
2.7	Combinações das ações	28
2.8	Condições para dimensionamento de barras prismáticas de aço.....	31
2.8.1	Deslocamentos máximos.....	31
2.8.2	Dimensionamento da força axial de tração resistente de cálculo.....	32
2.8.3	Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão.....	32
2.8.4	Barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante	35
2.9	Flambagem de colunas.....	37
2.10	Travamento de pilares	38
3	Metodologia.....	39
3.1	Considerações iniciais.....	39
3.2	Travamento auxiliar de pilares	39
3.3	Concepção estrutural	40
3.4	Cálculo da estrutura.....	41
4	Desenvolvimento do projeto.....	42
4.1	Considerações iniciais.....	42
4.2	Início do desenvolvimento do projeto.....	42

4.3	Modelo da estrutura.....	43
5	Carregamentos considerados	45
5.1	Determinação das cargas atuantes na edificação.....	45
5.1.1	Determinação do peso próprio da laje.....	45
5.1.2	Cálculo da força de arrasto proveniente do vento	48
5.2	Combinações das cargas atuantes na edificação	52
5.3	Carregamentos atuantes na estrutura.....	54
6	Resultados e discussões	57
6.1	Considerações iniciais	57
6.2	Dimensionamento das estruturas.....	57
6.3	Estrutura convencional.....	57
6.3.1	Cálculo da estrutura convencional	58
6.3.2	Quantitativo da estrutura convencional.....	59
6.4	Estrutura que faz uso do TAP	60
6.4.1	Cálculo da estrutura travada.....	61
6.4.2	Quantitativo da estrutura travada	63
6.5	Detalhamento das ligações	63
6.5.1	Detalhamento da ligação viga-pilar	64
6.5.2	Detalhamento do TAP	64
7	Considerações finais	66
	Referências.....	67

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil é um dos mais competitivos do país. É o mercado responsável por gerar milhões de empregos e movimentar bilhões de reais anuais. Procuram-se cada vez mais soluções eficientes, duráveis, econômicas e que possuam um prazo de execução adequado.

Devido à alta competitividade, tanto entre as construtoras quanto entre os escritórios de projetos estruturais ao redor do mundo, cada vez mais são necessárias soluções inovadoras capazes de fazer com que a construção civil seja mais racional, utilizando de técnicas construtivas que sejam mais viáveis para as construtoras.

Através das estruturas metálicas, tudo isso pode ser alcançado, tanto em tempo de execução, como otimização estrutural, pois são estruturas leves e de rápida montagem, já que as peças da estrutura são pré-moldadas e, na obra, apenas a conexão entre elas deverá ser realizada. Segundo Chaves (2007), o processo para construções em estruturas em aço se destaca, pois o aço tem uma maior resistência mecânica se comparado a outros materiais. É um dos processos construtivos mais velozes e é o que suporta os maiores vãos. Por isso são muito utilizados principalmente em indústrias e supermercados que precisam de grandes vãos e velocidade na execução. Também se emprega o aço em ginásios, pavilhões, torres, guindastes, escadas, passarelas, pontes, garagens, hangares, depósitos, lojas, entre outros.

Porém, mesmo com as inúmeras vantagens que as estruturas metálicas possuem, elas são consideravelmente mais caras que as estruturas de concreto armado (que é o modelo estrutural mais popular do Brasil), fazendo com que ela seja menos utilizada que as estruturas convencionais, como concreto armado e alvenaria estrutural, por exemplo. Uma vantagem em termos de custo se aplica nos casos em que a estrutura construída terá como objetivo obter uma determinada renda futuramente, pois, como as estruturas de concreto armado em sua maioria são feitas no próprio canteiro de obras, isso faz com que as estruturas metálicas tenham uma vantagem em termos de tempo de execução em relação a edificações que tem como objetivo receber algum estabelecimento comercial, pois como a construção em concreto armado é mais lenta que a em estruturas metálicas, quanto mais tempo a estrutura levar para ser finalizada, mais dinheiro o cliente deixará de ganhar.

Com isso, surge a pergunta: o que fazer para reduzir o consumo de aço das estruturas metálicas para que elas se tornem mais competitivas em relação às estruturas de concreto armado?

Para isso, o presente trabalho analisa a viabilidade da técnica, denominada TAP (travamento auxiliar de pilares) para estruturas metálicas, a fim de otimizar ainda mais esse modelo construtivo que está em expansão no país.

1.1 Justificativa

O presente trabalho tem por motivação o aumento de preço do aço. De acordo com Moreira (2023), a Gerdau anunciou crescimento em seus preços de aço para o próximo ano. A empresa afirmou que seus preços serão aumentados em cerca de 10%, devido a uma combinação de fatores, incluindo a alta dos custos de matérias-primas e o crescimento da demanda global por aço, o que aumenta a urgência na busca de formas mais econômicas de se construir utilizando esse material.

Desta maneira, espera-se contribuir com o tema apontando para o uso de novas técnicas construtivas que buscam reduzir os custos das obras que utilizam esse material.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão classificados em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

- (i) Reduzir o consumo de aço de uma estrutura metálica, introduzindo o TAP (travamento auxiliar de pilares), que será melhor descrito posteriormente.

1.2.2 Objetivos específicos

- (i) Conceber pórticos planos para análise;
- (ii) Calcular a estrutura considerando os pilares travados (adoção do TAP);
- (iii) Calcular a estrutura em conjunto considerando a rigidez dos nós (sem travamento);
- (iv) Elaborar quantitativos de aço para as estruturas calculadas; e
- (v) Comparar o consumo de aço entre os modelos anteriores;

1.3 Delimitações

Este trabalho delimita-se em desenvolver o dimensionamento de vigas e pilares de uma edificação comercial com estrutura em aço, elaborando dois modelos: um modelo com o lançamento convencional de vigas e pilares, e outro modelo com a técnica TAP, a fim de realizar um comparativo entre esses dois projetos.

Não foram considerados efeitos de segunda ordem nem estabilidade global da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Segundo Bellei (2011), as estruturas e os elementos estruturais devem ter resistência adequada, bem como rigidez e durabilidade para permitir funcionalidade adequada durante a vida útil da estrutura. Nesse sentido, Bellei (2011) destaca que “uma seção de aço pode ocasionalmente ter uma tensão de escoamento abaixo do valor mínimo especificado, mas ainda dentro dos limites estatísticos aceitáveis”.

No que diz respeito à segurança estrutural, Bellei (2011, p. 12) diz que:

“Para uma segurança estrutural adequada, devem ser feitas provisões para ambos os efeitos: um excesso de carga e uma menor resistência. Estudos para constituir uma formulação apropriada de segurança estrutural têm sido feitos durante os últimos anos. O principal esforço tem sido para examinar as chances de a “ruína” ocorrer num elemento, ligação ou sistema estrutural por vários métodos probabilísticos”.

Em relação a supermercados, galpões ou ginásios, há uma dominância considerável das estruturas metálicas, pois são estruturas que conseguem facilmente atingir vãos consideráveis, e que nem sempre é possível para o concreto armado. Porém, quando existem vãos menores e necessidade de tempo para captação de recursos, o custo do aço se torna um empecilho para sua implementação.

2.1.1 Vantagens da utilização do aço

Segundo Bellei (2003), as principais vantagens da utilização da estrutura em aço são as seguintes:

- (i) Alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão etc.);
- (ii) Possibilidade de desmontar as estruturas e posteriormente montá-las em outro local; e
- (iii) Reaproveitamento dos materiais em estoque, ou mesmo as sobras de obra.

2.1.2 Desvantagens da utilização do aço

Segundo Bellei (2003), a principal desvantagem de uma estrutura em aço que se pode destacar é que os elementos de aço possuem uma propensão maior à corrosão, o que requer que eles sejam cobertos com uma camada de tinta, ou galvanizados com uma camada de zinco, ou seja, deve-se empregar um outro método para proteção, o que no concreto armado, na maioria dos casos se resolve aumentando o cobrimento das armaduras dos seus elementos.

Também deve ser lembrado que a estrutura em aço, quando exposta ao fogo, perde suas propriedades de resistência, o que se torna uma de suas maiores desvantagens.

2.2 Propriedades do aço

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), as características físicas que podem ser adotadas na maioria dos tipos de aços estruturais que estejam na faixa normal de temperatura atmosférica são:

- (i) Ductibilidade: é a capacidade que o material tem de se deformar quando da existência de cargas e vai até o material atingir a sua ruptura;
- (ii) Fragilidade: é exatamente o oposto do material dúctil; o material se torna frágil quando expostos a diversos agentes como baixas temperaturas, entre outros;
- (iii) Resiliência e Tenacidade: essas propriedades são diretamente relacionadas à capacidade que o material tem em absorver energia mecânica;
- (iv) Resistência à fadiga: é a capacidade de resistir a um fenômeno no qual um material sofre falha ou dano estrutural devido à aplicação repetida de cargas ou tensões, mesmo que essas cargas estejam abaixo do limite de resistência do material para uma única aplicação de carga; e
- (v) Elasticidade: é a capacidade de um material desenvolver grandes deformações antes do escoamento.

2.3 Propriedades mecânicas dos aços estruturais

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), para efeitos de cálculo, adotam-se os seguintes valores de propriedades mecânicas para os aços em geral:

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço estrutural

Módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade	$E = 205 \text{ GPa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Coefficiente de dilatação térmica	$\beta = 12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Massa específica	$\rho_a = 7\,850 \text{ kg/m}^3$
Módulo de elasticidade transversal	$G = 77 \text{ GPa}$

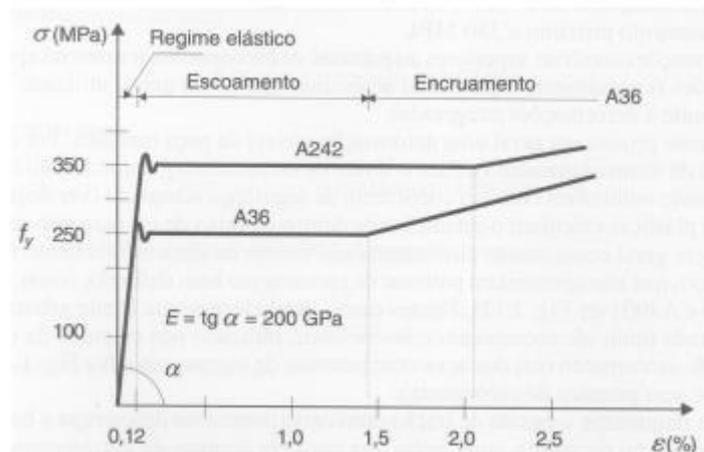
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.3.1 Curva tensão deformação dos aços estruturais

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), nas aplicações estruturais, as grandezas utilizadas com mais frequência são as tensões (σ) e as deformações (ε).

Segundo Bellei (2003), as propriedades mecânicas dos aços estruturais que descrevem a sua resistência e ductibilidade são dadas em termos de comportamento em ensaios de tração simples.

Figura 1 - Trecho inicial dos diagramas tensão x deformação dos aços A242 e A36



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008)

2.3.2 Denominações, composição e classificação dos aços

2.3.2.1 Denominações

Os aços mais encontrados no mercado são os normatizados pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), denominados de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2 - Especificações dos tipos de aço mais utilizados

Especificação do aço	Classificação química	Grupo ou grau	fy (MPa)	fu (MPa)	Aplicações e observações
ASTM A36			250	400	Geral
ASTM A572	Aços de baixa liga e Alta resistência mecânica	42	290	415	Perfis, chapas e barras
		50	345	450	
		60	415	485	
		65	450	520	
ASTM A242	Aços de baixa liga e alta resistência mecânica, resistência a corrosão		345	480	Perfis, chapas e barras
			315	460	
			290	435	
ASTM A588	Alta resistência mecânica e a corrosão atmosférica		345	485	Perfis

Nota: fy significa tensão de escoamento e fu significa tensão de ruptura.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

2.3.2.2 Composição dos aços

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), quanto à composição química, os aços utilizados em estruturas se dividem em dois grupos:

(i) Aços carbono: é o tipo mais utilizado; o carbono produz o aumento da resistência em relação ao ferro puro; e

(ii) Aços de baixa liga: é o aço carbono que recebe aditivos de elementos com liga (manganês, nióbio, níquel, fósforo, vanádio, cobre, molibdênio, zircônio etc.), que faz com que o aço melhore algumas de suas propriedades mecânicas.

Já para os aços com tratamento térmico, de acordo com Pfeil e Pfeil (2008), os dois grupos de aço (aço carbono e aços de baixa liga) podem sofrer tratamentos térmicos, que fazem com que algumas de suas propriedades mecânicas melhorem.

Tabela 3 – Elementos de liga num aço de alta resistência e baixa liga

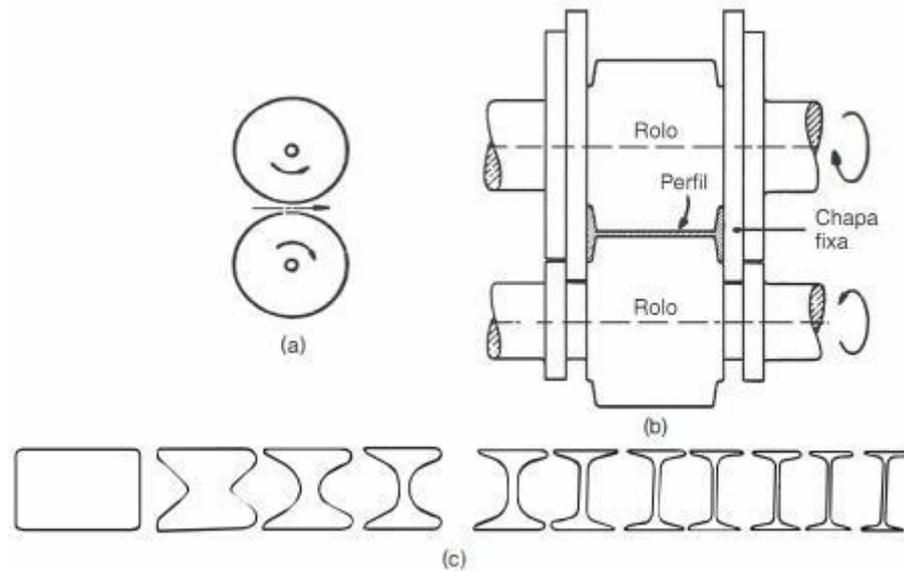
Elemento	Porcentagem (%)	Efeito nas propriedades
Cobre	0,2 - 1,5	Melhora a resistência à corrosão atmosférica
Níquel	Ao menos a metade do percentual do cobre	Beneficia a qualidade superficial
Nióbio	0,02	Aumenta o limite de resistência e o limite de escoamento
Nitrogênio	0,03 - 0,012	Contribui para a resistência e pode melhorar a soldabilidade
Vanádio	Até 0,12	Melhora a resistência sem reduzir a soldabilidade

Fonte: Bianchi

2.3.3 Perfis laminados

Os perfis laminados são aqueles que passam por um processo de laminação que, segundo Pfeil e Pfeil (2008), é o processo pelo qual o aço é transformado nos principais produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de construção. As placas são inicialmente aquecidas até atingirem altas temperaturas e introduzidas em conjuntos sucessivos de laminadores desbastadores, nos quais vários rolos giratórios comprimem a placa, reduzindo sua seção e aumentando seu comprimento. São necessárias diversas passagens no laminador, nas quais a distância entre os rolos é progressivamente reduzida. Dos laminadores desbastadores, o aço passa para os laminadores propriamente ditos, em que são confeccionados os produtos siderúrgicos utilizados na indústria.

Figura 2 - Esquema de funcionamento dos laminadores



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

2.4 Sistema estrutural

A definição do sistema estrutural se inicia a partir da escolha do tipo de material utilizado, que irá variar dependendo de alguns itens como localidade (facilidade de encontrar determinados materiais de construção, e localização da edificação), custo (um fator determinante para a escolha do sistema estrutural é o de quanto se está disposto a gastar em uma obra), tempo de execução (dependendo do quão rápida for a execução da construção, mesmo que se tenha um custo mais elevado, pode ser que valha a pena escolher determinado sistema), disponibilidade de mão de obra (nem sempre há mão de obra especializada para determinado modelo construtivo, sendo necessário contratar mão de obra que não reside na região da construção, aumentando o custo da obra), entre outros. Logo após, serão determinados os carregamentos incidentes sobre a estrutura, que irão incidir sobre as lajes, que transferirão estes carregamentos para as vigas, que irão levar o peso para os pilares, que conseqüentemente irão se transferir para as fundações e, logo depois para o solo.

Figura 3 - Estrutura metálica

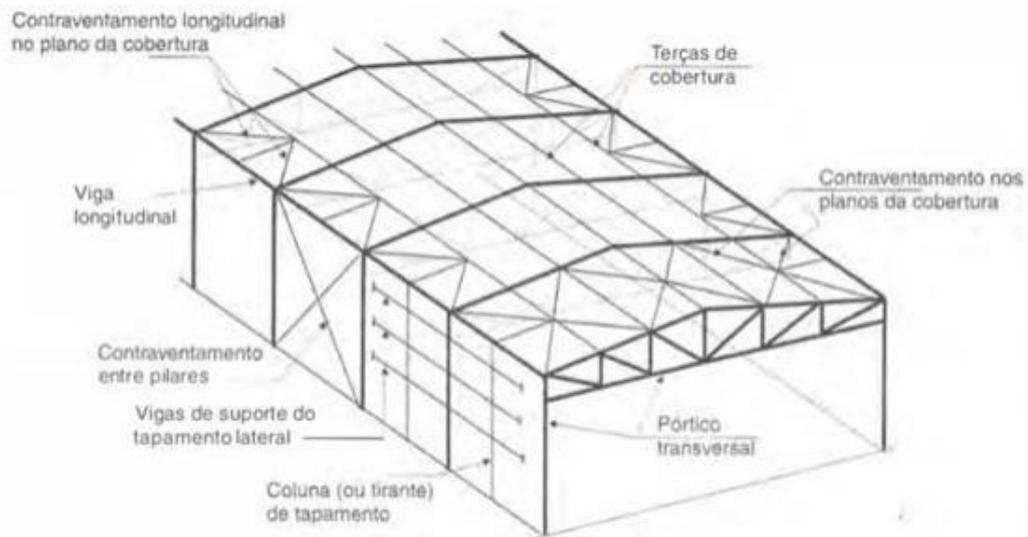


Fonte: Santos (2020)

É a etapa mais importante de um projeto estrutural, pois é nela que se irá determinar a melhor relação custo-benefício possível para o cliente que desejar utilizar o projeto estrutural do engenheiro.

Segundo Chaves (2007), os elementos estruturais podem ser determinados por modelos planos de elementos (tirantes, colunas, vigas) que formam pórticos, ligados por solda, parafusos etc. Compostos elementos secundários "sistema de pisos para edificações" (vigas, chapas steel deck etc.). Estes elementos podem formar sistema de elementos bidimensionais.

Figura 4 - Sistema de elementos estruturais



Fonte: Pfeil e Pfeil (2008).

2.5 Dimensionamento

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), o objetivo de um projeto estrutural é garantir a segurança estrutural, propiciando um bom desempenho da estrutura evitando-se a ocorrência de grandes deslocamentos, vibrações, danos locais ou até mesmo um colapso. Segundo Pfeil e Pfeil (2008), as etapas de um projeto estrutural podem ser reunidas em três fases:

- (i) Anteprojeto ou projeto básico, quando não foram definidos o sistema estrutural, os materiais a serem utilizados e o sistema construtivo;
- (ii) Dimensionamento ou cálculo estrutural, fase na qual são definidas as dimensões dos elementos da estrutura e suas ligações de maneira a garantir a segurança e o bom desempenho da estrutura; e
- (iii) Detalhamento, quando são elaborados os desenhos executivos da estrutura contendo as especificações de todos os seus componentes.

2.6 Ações na estrutura

Segundo a NBR 6120 (ABNT, 2019), ações são causas que provocam esforços solicitantes que atuam sobre a estrutura, capazes de produzir ou alterar as deformações ou o estado de tensão nos elementos estruturais. Após a escolha do sistema estrutural, o levantamento

de ações é a etapa seguinte do projeto estrutural. É através dessa etapa que se terá uma noção inicial das dimensões dos elementos estruturais.

2.6.1 Ações permanentes

De acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019), as ações permanentes são ações que atuam com valores praticamente constantes, ou com pequena variação em torno de sua média, durante a vida da edificação ou que aumentam com o tempo, tendendo a um valor-limite constante, como por exemplo, o peso próprio da estrutura e demais elementos construtivos, pesos de equipamentos fixos, entre outros.

2.6.2 Ações variáveis

Conforme a NBR 6120 (ABNT, 2019), ações variáveis são ações cujos valores, estabelecidos por consenso, apresentam variações significativas em torno de sua média durante a vida da edificação. Seus valores possuem de 25 % a 35 % de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável em um período de 50 anos (o que corresponde a um período médio de retorno de 174 a 117 anos, respectivamente). Em função da probabilidade de ocorrência durante a vida da edificação, as ações variáveis são classificadas como normais ou especiais.

Entre essas ações, as mais comuns são: ações de uso e ocupação da edificação atuantes sobre pisos, coberturas, barreiras, guarda-corpos e parapeitos, divisórias móveis, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas (exceto o peso da água em piscinas e reservatórios que permanecem cheios durante a maior parte da vida da edificação), forças devido à ação do vento e variação de temperatura.

2.6.2.1 Ações variáveis normais

Como está escrito na NBR 6120 (ABNT, 2019), essas ações possuem probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de determinado tipo de edificação.

2.6.2.2 Ação dos ventos

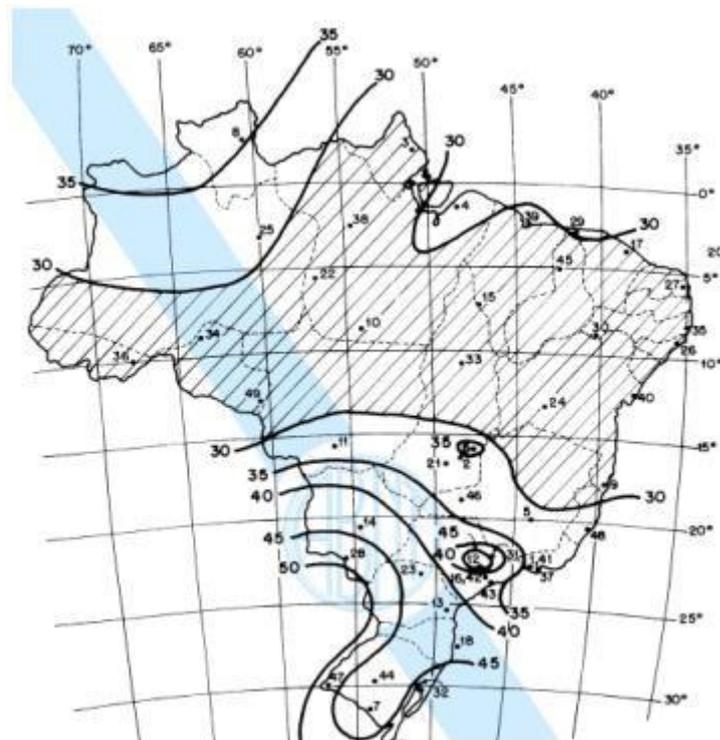
A ação dos ventos é uma das ações variáveis mais importantes a se considerar na etapa de dimensionamento de uma estrutura. A negligência no seu dimensionamento pode acarretar problemas dos mais variados: desde um desconforto acústico até a ruína total da estrutura.

No dimensionamento da carga de vento, foi utilizada a NBR 6123 (ABNT, 2023), que é a norma vigente no Brasil a respeito de forças devido ao vento em edificações. Para se determinar o valor do carregamento na estrutura, deve-se iniciar através da determinação de V_0^1 , que varia de acordo com a região do país em que a edificação se encontra.

Conforme a NBR 6123 (ABNT, 2023), a velocidade básica do vento, V_0 , é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.

A velocidade básica do vento é determinada através das isopletas de velocidade básica, que é dada em metros por segundo. Através da figura abaixo, é possível determinar a velocidade básica do vento de acordo com a região em que se encontra a construção.

Figura 5 - Isopletas da velocidade básica



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

¹ Velocidade básica do vento

Logo após a escolha da velocidade básica, se faz necessário determinar o fator topográficos S_1 , o fator S_2 e o fator estatístico S_3 .

2.6.2.2.1 Fator topográfico S_1

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023), o fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno nas proximidades da edificação e é determinado do seguinte modo:

Tabela 4 - Valores do fator topográfico

Classe	Tipo de terreno	Valor do fator
Classe A	Terreno plano ou levemente acidentado	1,0
Classe B	Taludes ou morros	Determinar de acordo com a figura 2 da NBR 6123 (ABNT, 2023)
Classe C	Vales profundos protegidos do vento em qualquer direção	0,9

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

2.6.2.2.2 Fator S_2

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 2023), o fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

- Categoria 1: Superfícies lisas de grandes dimensões com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- Categoria 2: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados. Com altura média abaixo de 1 metro;
- Categoria 3: Terrenos planos ou isolados com obstáculos, tais como muros, pouco quebra ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Com altura média do topo dos obstáculos de 3 metros;
- Categoria 4: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, zona florestal industrial ou urbanizada. Com altura média do topo dos obstáculos de 10 metros;
- Categoria 5: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

2.6.2.2.3 Fator estatístico S_3

Este fator é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação demonstrado na tabela 3 da NBR 6123 (ABNT, 2023).

Tabela 5 - Valores do fator estatístico S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	<p>Estruturas 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, edifícios de centrais de controle etc.).</p> <p>Pontes rodoviárias e ferroviárias.</p> <p>Estruturas que abrigam substâncias infamáveis, tóxicas e/ou explosivas.</p> <p>Vedações das edificações do grupo 1 (telhas, vidros, painéis de vedação).</p>	1,11
2	<p>Estruturas cuja ruína represente substancial risco à vida humana, particularmente a pessoas em aglomerações, crianças e jovens.</p> <p>Vedações das edificações do grupo 2 (telhas, vidros, painéis de vedação).</p>	1,06
3	<p>Edificações para residências, hotéis, comércio, indústrias.</p> <p>Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas a reutilização.</p> <p>Vedações das edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).</p>	1,00
4	<p>Edifcações não destinadas à ocupação humana (depósitos, silos) e sem circulação de pessoas no entorno.</p> <p>Vedações das edifcações do grupo 4 (telhas, vidros, painéis de vedação)</p>	0,95

5	Edificações temporárias não reutilizáveis. 0,83 Estruturas dos Grupos 1 a 4 durante a construção (fator aplicável em um prazo máximo de 2 anos). Vedações das edificações do grupo 5 (telhas, vidros, painéis de vedação).
---	--

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

2.6.2.2.4 Velocidade característica do vento (V_K)

Para determinar V_K , é necessário calcular a seguinte expressão:

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

2.6.2.2.5 Pressão dinâmica do vento

A pressão dinâmica, segundo a NBR 6123 (ABNT, 2023), é determinada pela equação:

$$q = 0,613 * V_K^2 \quad (2)$$

2.6.2.2.6 Coeficientes de pressão interna e externa

A força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação, com isto é necessário o coeficiente de pressão externa Δp_e e interna Δp_i para determinar esta diferença de pressão, produzindo a seguinte equação conforme NBR 6123 (ABNT, 2023):

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i \quad (3)$$

Quanto às combinações dos coeficientes de pressão externa e interna, elas são feitas utilizando coeficientes de forma têm valores definidos para diferentes tipos de construção conforme a NBR 6123 (ABNT, 2023), obtidos através de estudos experimentais em túneis de vento. A força devida ao vento através dos coeficientes de forma pode ser expressa por:

$$F = \Delta p * q * A \quad (4)$$

2.7 Combinações das ações

Para que o dimensionamento de uma estrutura seja mais seguro, é necessário adotar a combinação das ações, visto que nem sempre o carregamento na estrutura é o mesmo a todo momento, o que faz com que se tenha que calcular diversos tipos de combinações de cargas.

Tabela 6 - Coeficientes de ponderação das ações $Y=Yf1Yf3$

Combinações	Ações permanentes (γ_p) ^{1) 3)}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Tabela 7 - Coeficientes de ponderação das ações variáveis

	Ações variáveis (γ_q) ^{1) 4)}			
	Efeito da temperatura ²⁾	Ação do vento	Ações truncadas ⁵⁾	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Tabela 8 - Coeficientes de ponderação das ações variáveis

Ações		γ_{Ω}^2		
		ψ_0	ψ_1^d	ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

^{a)} Ver alínea c) de 4.7.5.3.
^{b)} Edificações residenciais de acesso restrito.
^{c)} Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.
^{d)} Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar ψ_1 igual a 1,0.
^{e)} Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Tabela 9 - Coeficientes de ponderações das resistências

Combinações	Aço estrutural ¹⁾		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

¹⁾ Inclui o aço de forma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Após a determinação dos coeficientes, utiliza-se a seguinte equação:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + (\gamma_{g1} F_{Q1,k}) \sum_{j=2}^N (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Qj,k}) \quad (5)$$

em que:

$F_{Gi,k}$: Representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$: É o valor característico da ação especial;

$F_{Qj,k}$: Representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável especial; e

$\psi_{0j,ef}$: Representa a combinação de efetivos de cada uma das ações variáveis que pode atuar concomitantemente com a ação variável especial F_{Q1} .

2.8 Condições para dimensionamento de barras prismáticas de aço

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), que considera os estados limites últimos, elementos submetidos a ações estáticas, devem atender aos limites de esbeltez e manter os deslocamentos elásticos verticais e horizontais dentro dos limites especificados em norma. Além disso, se deve satisfazer a condição de desigualdade, expressa pela equação abaixo:

$$R_d > S_d \quad (6)$$

em que:

R_d : É o valor da resistência de cálculo; e

S_d : É o valor da sollicitação de cálculo.

2.8.1 Deslocamentos máximos

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), os deslocamentos ou flechas devem atender estas condições conforme sua classificação de utilização, como mostra o Tabela abaixo:

Tabela 10 - Deslocamentos máximos

Descrição	δ ¹⁾
- Travessas de fechamento	$L/180$ ²⁾
	$L/120$ ^{3) 4)}
- Terças de cobertura ⁷⁾	$L/180$ ⁵⁾
	$L/120$ ⁶⁾
- Vigas de cobertura ⁷⁾	$L/250$ ⁸⁾
- Vigas de piso	$L/350$ ⁸⁾
- Vigas que suportam pilares	$L/500$ ⁸⁾

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.8.2 Dimensionamento da força axial de tração resistente de cálculo

Para o dimensionamento de barras submetidas ao esforço de tração, a NBR 8800 (ABNT, 2008) determina que a seguinte condição deverá ser atendida:

$$N_{t,Sd} < N_{t,Rd} \quad (7)$$

em que:

$N_{t,Sd}$: é a força axial de tração de cálculo; e

$N_{t,Rd}$: é a força axial de tração resistente de cálculo.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), para calcular a força resistente, deve-se analisar o escoamento da seção bruta e o escoamento da seção líquida, utilizando o menor valor absoluto como referência, por questões de segurança no cálculo do projeto.

(i) para o escoamento na seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g * f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

(ii) para ruptura na seção líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e * f_u}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

em que:

A_g : é a área bruta da seção transversal da barra;

A_e : é a área líquida efetiva da seção transversal da barra;

f_y : é a resistência ao escoamento do aço; e

f_u : é a resistência à ruptura do aço.

2.8.3 Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), a seguinte condição para o dimensionamento das barras deve ser a seguinte:

$$N_{c,Sd} < N_{c,Rd} \quad (10)$$

em que:

$N_{c,Sd}$: é a força axial de compressão de cálculo; e

$N_{c,Rd}$: é a força axial de compressão resistente de cálculo.

2.8.3.1 Força axial resistente de cálculo

A força axial de compressão resistente de cálculo de uma barra, associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), através da expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * Q * A_g * f_y}{\gamma_{a1}} \quad (11)$$

em que:

χ : é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q : é o fator de redução total associado à flambagem local; e

A_g : é a área bruta da seção transversal da barra.

2.8.3.2 Fator de redução associado a resistência a compressão “ χ ”

O fator de redução χ , segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008) é determinado pelas seguintes expressões:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$: $\chi = 0,658\lambda_0^2$

Para $\lambda_0 \geq 1,5$: $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$

sendo:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q * A_g * f_y}{N_e}} \quad (12)$$

em que:

N_e : é a força axial de flambagem elástica obtida pela equação abaixo:

$$N_e = \frac{\sqrt{\pi^2 * E * I}}{k * L} \quad (13)$$

2.8.3.3 Fator de redução total “ Q ”

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), as barras submetidas a força axial de compressão, nas quais os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre

largura e espessura (relações b/t) que não superam os valores de $(b/t)_{lim}$, tem o fator de redução total “Q” igual a 1,00.

Tabela 11 - Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre lamelas paralelas ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-cabeço Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	<ul style="list-style-type: none"> Abas de cantoneiras simples ou múltiplas provexas de chapas de travessamento 		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou provexas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U soldadas* 		$0,04 \sqrt{\frac{E}{(f_y + k_y)}}$
	6	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções T 		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

* O coeficiente k_y é dado em F.2.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Nos cálculos dos perfis do projeto, o valor de $(b/t)_{lim}$ utilizado foi o dos perfis AL do grupo 4 que, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), são perfis que possuem apenas uma borda longitudinal vinculada.

2.8.3.4 Coeficiente de flambagem por flexão

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), a determinação do coeficiente de flambagem por flexão é dado por valores teóricos de K_x e K_y , fornecidos pela tabela abaixo:

Tabela 12 - Coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	 Rotação e translação impedidas  Rotação livre, translação impedida  Rotação impedida, translação livre  Rotação e translação livres					

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Nos cálculos dos perfis do projeto, o valor dos coeficientes K_x e K_y adotado foi de 1.

2.8.4 Barras prismáticas submetidas a momento fletor e força cortante

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), ao dimensionar barras submetidas ao momento fletor e a força cortante, devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Rd} > M_{Sd} \quad (14)$$

$$V_{Rd} > V_{Sd} \quad (15)$$

em que:

M_{Rd} : é o momento fletor resistente de cálculo;

M_{Sd} : é o momento fletor solicitante de cálculo;

V_{Rd} : é a força cortante resistente de cálculo; e

V_{Sd} : é a força cortante solicitante de cálculo.

2.8.4.1 Momento fletor resistente de cálculo

De acordo com o que determina a NBR 8800 (ABNT, 2008), o momento fletor resistente de cálculo se calcula da seguinte forma:

$$M_{Rd} = \frac{Z * f_y}{1,1} \quad (16)$$

Desde que a seguinte condição seja atendida:

$$\lambda > \lambda_p \quad (17)$$

O valor de λ pode ser calculado da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_{mín}} \quad (18)$$

em que:

L_b : é o comprimento de flambagem da barra prismática; e

$r_{mín}$: é o raio de giração mínimo da barra prismática.

O valor de λ deve ser menor que 200, para evitar instabilidades causadas por flambagem lateral.

Já o valor de λ_p é determinado de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 13 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_c)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_c)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b/t}{\text{Ver Nota 8}}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.8.4.2 Força cortante resistente de cálculo

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008) determina, a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento é dada por:

$$V_{pl} = 0,6 * A_w * f_y \quad (19)$$

em que:

A_w : é a área efetiva de cisalhamento, obtida multiplicando a altura total da seção transversal pela espessura da alma.

Além disso, uma verificação é necessária para que haja um dimensionamento seguro, que é a seguinte:

para $\lambda > \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (20)$$

Os valores de λ e λ_p podem ser determinados da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (21)$$

$$\lambda_p = 1,10 * \sqrt{\frac{k_v * E}{f_y}} \quad (22)$$

em que:

k_v : tem o valor de 5,0 para almas sem enrijecedores transversais;

h : é a altura da alma; e

t_w : é a espessura da alma.

2.9 Flambagem de colunas

Segundo Hibbeler (2019), “um elemento não deve apenas satisfazer requisitos específicos de resistência e deflexão, mas também deve ser estável. A estabilidade é particularmente importante se o elemento for comprimido e delgado e suportar uma carga de compressão que se torne grande o suficiente para fazer o que o elemento sofra deflexão lateral repentina. Esses elementos são chamados colunas, e a deflexão lateral que ocorre é chamada flambagem. Muitas vezes a flambagem de uma coluna pode levar a uma falha repentina e significativa de uma estrutura ou mecanismo; como resultado, deve-se dar atenção especial ao projeto das colunas, de modo que elas possam suportar com segurança as cargas pretendidas sem sofrer flambagem. A carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está na iminência de sofrer flambagem é denominada carga crítica. Qualquer carga adicional fará com que a coluna sofra flambagem e, portanto, deflexão lateral”.

Figura 6 - Coluna sofrendo flambagem



Fonte: Hibbeler (2019)

2.10 Travamento de pilares

Travamento de pilares, segundo Dornelles (2023), “é uma ligação que impede o pilar, ou qualquer outra peça que esteja sendo travada, de se deslocar”. Travamentos em pilares possibilitam o aumento da sua carga crítica, melhora na estabilidade global da estrutura e reduz consideravelmente as deformações.

Através do travamento de pilares, a estrutura confere uma otimização muito maior, fazendo com que seu custo seja consideravelmente reduzido, uma vez que uma estrutura travada adequadamente pode suportar as mesmas cargas de uma estrutura não travada, porém utilizando uma quantidade menor de aço.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

O objetivo deste trabalho, conforme exposto no item 1.2 é mostrar a possibilidade de redução de consumo de aço de uma edificação em estrutura metálica que faz uso do travamento auxiliar de pilares.

Trata-se de uma edificação planejada para ser localizada em uma região urbana, localizado em terreno plano, que tem por finalidade abrigar escritórios comerciais.

Para as estruturas em aço vários fatores influenciam na escolha de um perfil. De modo geral, neste trabalho utiliza-se um modelo estrutural bastante comum entre estruturas metálicas de pequeno porte.

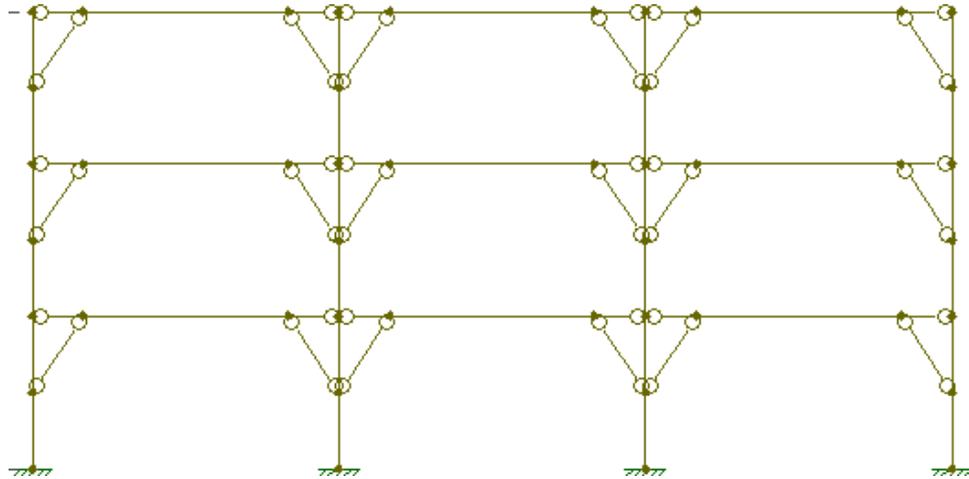
3.2 Travamento auxiliar de pilares

O travamento auxiliar de pilares (TAP), é uma técnica construtiva desenvolvida ao longo do presente texto, que visa reduzir o comprimento de flambagem de pilares de estruturas metálicas, a fim de reduzir o consumo de aço de uma construção.

Seu funcionamento se baseia no travamento dos pilares no sentido do seu menor raio de giração (indicador de distribuição da massa ou área da seção transversal em torno de um eixo. Quanto maior o raio de giração, mais distribuída está a área em torno do eixo considerado, o que significa que a seção do pilar tem maior resistência à flambagem), de forma a reduzir o seu comprimento de flambagem, o que aumenta a força axial de compressão resistente de cálculo, e conseqüentemente, um perfil com menor consumo de aço é necessário para resistir ao mesmo esforço. Além disso, para o dimensionamento funcionar, é necessário que o perfil necessário para o travamento se conecte com a viga.

A ligação é rotulada, utilizando uma chapa de aço, que é soldada nos pilares e vigas, juntamente com o perfil laminado responsável pelo travamento, e parafusos ASTM A-325 para realizar a conexão entre os perfis e a chapa. Através dessa ligação, é possível diminuir o vão efetivo da maioria das vigas da estrutura, dessa forma, o momento fletor atuante nelas é reduzido, fazendo com que um perfil com menor consumo seja utilizado no dimensionamento. Ambas as alterações são exibidas na figura abaixo:

Figura 7 - Modelo estrutural que faz uso do TAP



Fonte: autoria própria (2023)

Através dessa técnica, é possível reduzir consideravelmente o peso próprio total da estrutura, fazendo com que estruturas metálicas se tornem mais competitivas do ponto de vista comercial.

3.3 Concepção estrutural

Antes de se iniciar qualquer cálculo, é necessário realizar a concepção estrutural da obra que, segundo Barboza (2008), é a fase mais importante do projeto, pois nesta fase define-se o sistema estrutural, os materiais que serão empregados e as ações a serem consideradas, tendo como objetivo pré-dimensionar os elementos estruturais e prever seu comportamento. Os tipos de aço utilizados no projeto serão: aço ASTM A-572 grau 50 para os perfis dos pilares e vigas, aço ASTM A-36 para chapas e aço ASTM A-325 para parafusos. A solda utilizada nas ligações será a ER 70S6 (MIG). As cargas utilizadas envolvem a carga de cobertura, carga de telha, carga de alvenaria, sobrecarga, carga do revestimento, efeito do vento e peso próprio da estrutura, que serão calculadas no item 5.

Ao analisar os arranjos estruturais, devido à necessidade de velocidade na execução, foi escolhido o perfil de alma cheia para execução dos pilares, vigas e travamentos dos pilares.

Os contraventamentos serão cabos galvanizados de 38 mm de diâmetro, pois a edificação não possui uma altura elevada nem está localizada em uma região de incidência de ventos de alta velocidade (a edificação está na Paraíba e está protegida por outras construções ao seu redor). As bases dos pilares serão engastadas nas fundações para garantir maior rigidez à estrutura, possuindo pé esquerdo de 3 metros.

3.4 Cálculo da estrutura

Para o cálculo da estrutura foi utilizado o *software* Ftool, a fim de lançar as cargas e encontrar os esforços atuantes na estrutura. Após obtê-los, foi necessário calcular os perfis necessários para suportá-los. Além disso, é necessário considerar as condições estabelecidas pela norma, no que diz respeito aos 3 tipos de flambagem: flambagem lateral da mesa, flambagem lateral da alma e flambagem lateral por torção. Com isso, se faz necessário uma verificação manual dos perfis através de cálculos matemáticos, pois alguns softwares não toma tais verificações em consideração. Para automatizar esse processo, foi desenvolvida uma planilha eletrônica que dimensiona os perfis laminados para cada esforço atuante.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

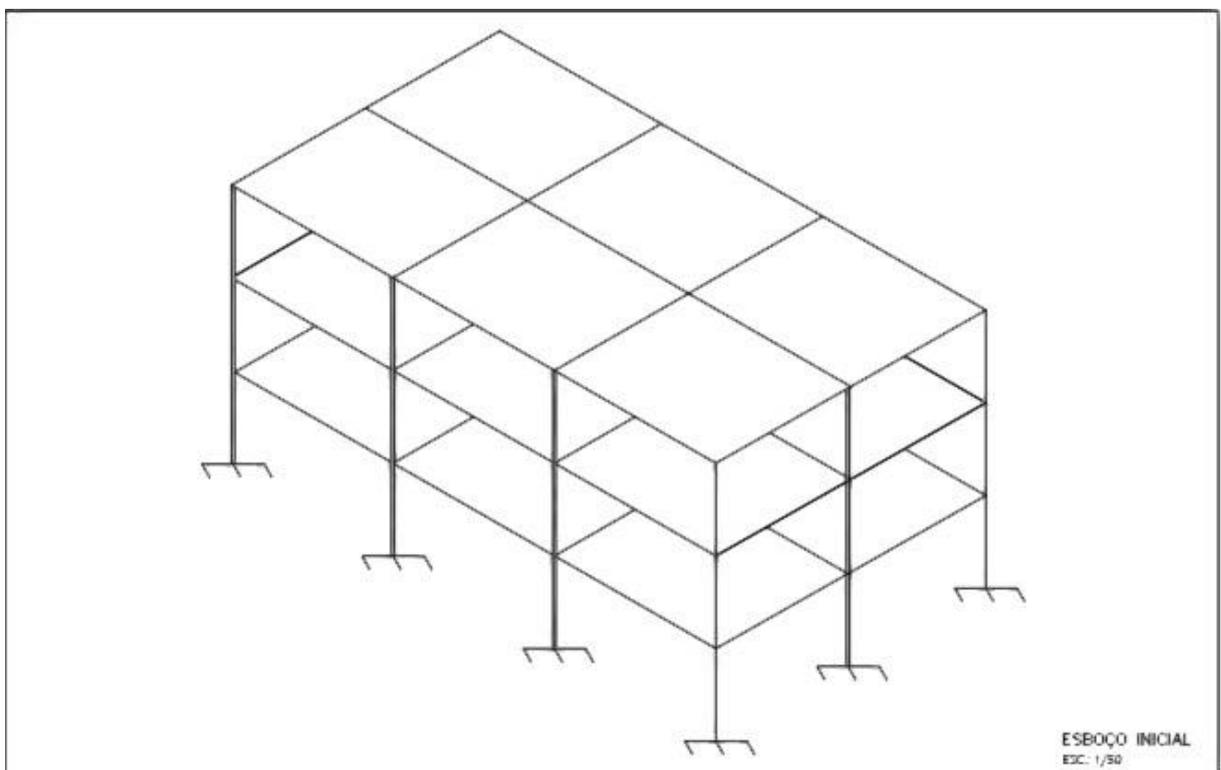
4.1 Considerações iniciais

Para o desenvolvimento desse projeto, foram projetadas duas estruturas: uma estrutura que utiliza os travamentos auxiliares de pilares (TAP), e outra que não utiliza essa técnica construtiva. Ao final do dimensionamento das duas estruturas, o consumo de aço de ambas foi levantado e comparado. O objetivo é mostrar que o TAP é um modelo construtivo que efetivamente pode reduzir a quantidade de aço necessária para o funcionamento pleno da estrutura.

4.2 Início do desenvolvimento do projeto

Para ilustrar uma prévia da edificação, utilizou-se o aplicativo AutoCAD, em que foi feita uma representação simples de como é o modelo utilizado ao longo deste trabalho. O objetivo dessa parte inicial é ter uma ideia de como a estrutura final foi modelada.

Figura 8 - Esboço inicial do prédio.



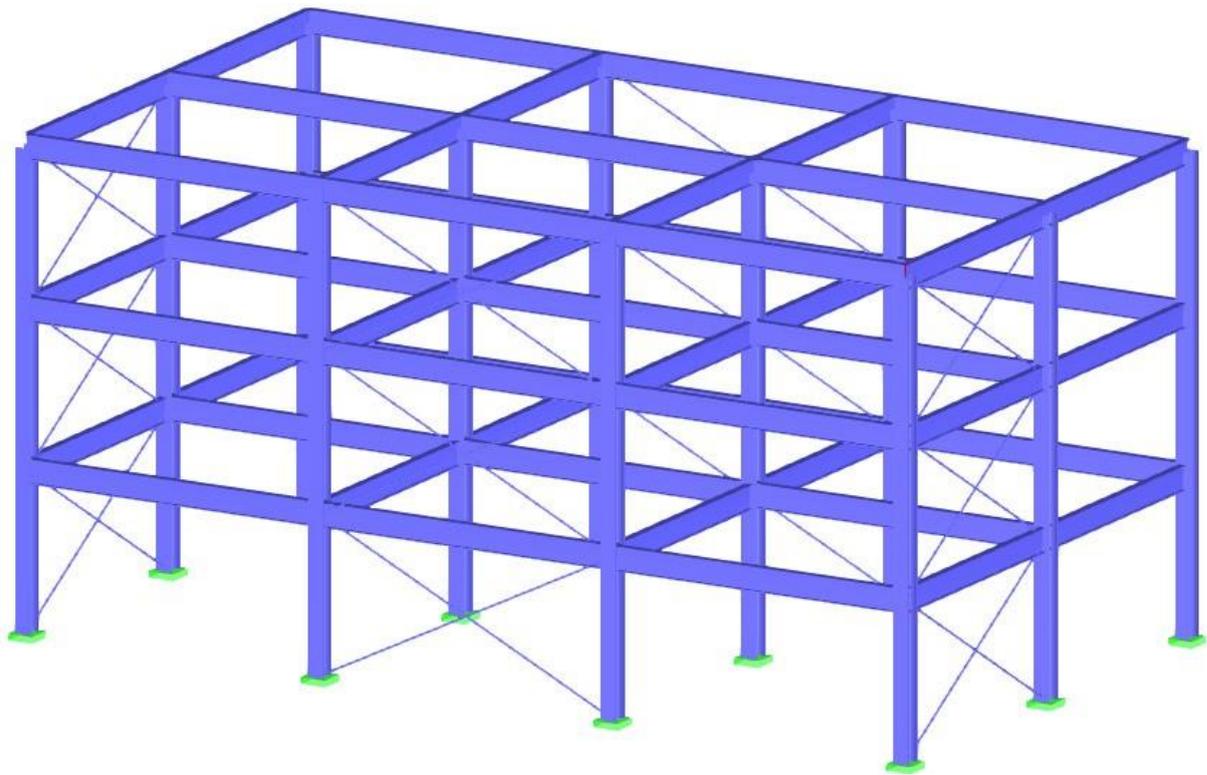
Fonte: autoria própria (2023)

Após a elaboração do modelo, é possível indicar que a edificação é um prédio que possui 3 pavimentos juntamente com uma cobertura. Como uma edificação comercial, seu objetivo é abrigar diversos escritórios, o que levará a um tráfego maior de pessoas e, conseqüentemente, um carregamento mais elevado.

4.3 Modelo da estrutura

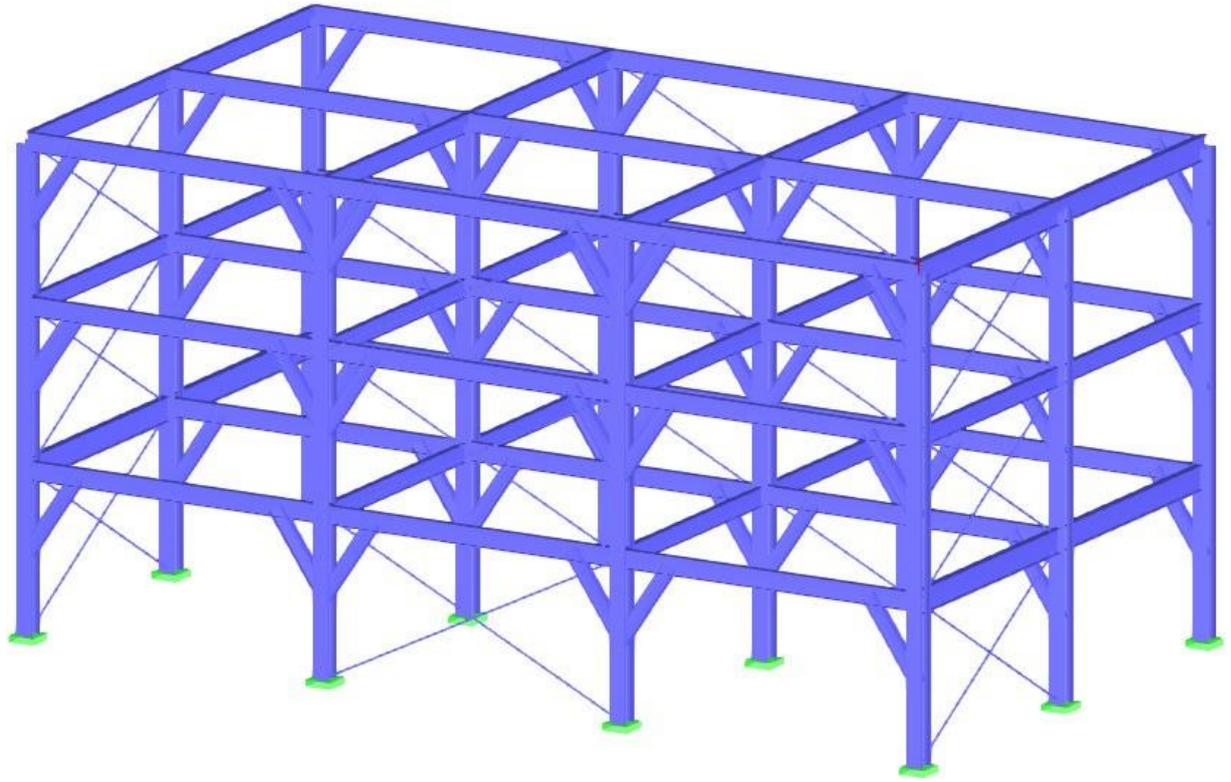
A elaboração de um modelo inicial da estrutura é fundamental para a compreensão geral do projeto. É através dele que surgirão as primeiras ideias a respeito da otimização dos elementos estruturais, concepções iniciais de ligações e disposição dos perfis na área de construção. Para elaborar um modelo inicial, o aplicativo RFEM foi utilizado, em que se pode dispor de um modelo em 3 dimensões com dimensões dos perfis em escala.

Figura 9 - Modelo estrutural 3D do prédio convencional.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 10 - Modelo estrutural 3D do prédio com o TAP.



Fonte: autoria própria (2023)

5 CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

5.1 Determinação das cargas atuantes na edificação

Antes de tudo, o primeiro carregamento a ser determinado é o carregamento da cobertura (que foi totalmente baseado na NBR 6120 (ABNT, 2019)), que se inicia com o telhado utilizado. O telhado escolhido para essa estrutura é composto por telhas de fibrocimento tipo canaleta com espessura 8 mm, que possui uma carga de 0,25 kN/m². Logo após determinar a carga da telha, a NBR 6120 (ABNT, 2019) especifica que as demais coberturas devem ser projetadas para suportar uma carga variável uniformemente distribuída conforme a expressão a seguir:

Figura 11 - Carga de coberta

$$q = 0,50 \times \alpha \quad \text{onde} \quad 0,25 \text{ kN/m}^2 \leq q \leq 0,50 \text{ kN/m}^2$$

$$\alpha = \begin{cases} 1,0 & 1\% < i \leq 2\% \\ 2,0 - 0,5 \times i & 2\% < i < 3\% \\ 0,5 & i \geq 3\% \end{cases}$$

onde

i é a inclinação da cobertura, medida entre a cumeeira e a extremidade mais baixa, expressa em porcentagem (%);

Fonte: NBR 6120 (ABNT, 2019)

Como a maioria das coberturas possuem inclinação superior a 3%, a sobrecarga utilizada na cobertura foi de 0,25 kN/m².

Além disso, a carga da platibanda é necessária para o dimensionamento da estrutura. Escolhendo os blocos de alvenaria de cerâmica furados, que possuem uma massa específica de 1300 kg/m³, uma espessura de 0,15 m e uma altura de 1 m, foi obtido o valor de carregamento de 1,95 kN/m.

5.1.1 Determinação do peso próprio da laje

Partindo para a laje utilizada, foi escolhida uma laje treliçada dimensionada com o auxílio do *software* de treliças GERDAU. Nele, todas as informações da laje foram inseridas, e logo após o dimensionamento realizado pelo programa, o peso próprio encontrado.

A carga das lajes da cobertura é diferente da carga das lajes dos demais pavimentos, mas para fins construtivos, serão utilizadas considerada em todo o prédio as lajes dimensionadas de acordo com os piores carregamentos, a fim de uniformizar os materiais utilizados na obra.

O carregamento atuante nas lajes se dá pela Tabela abaixo:

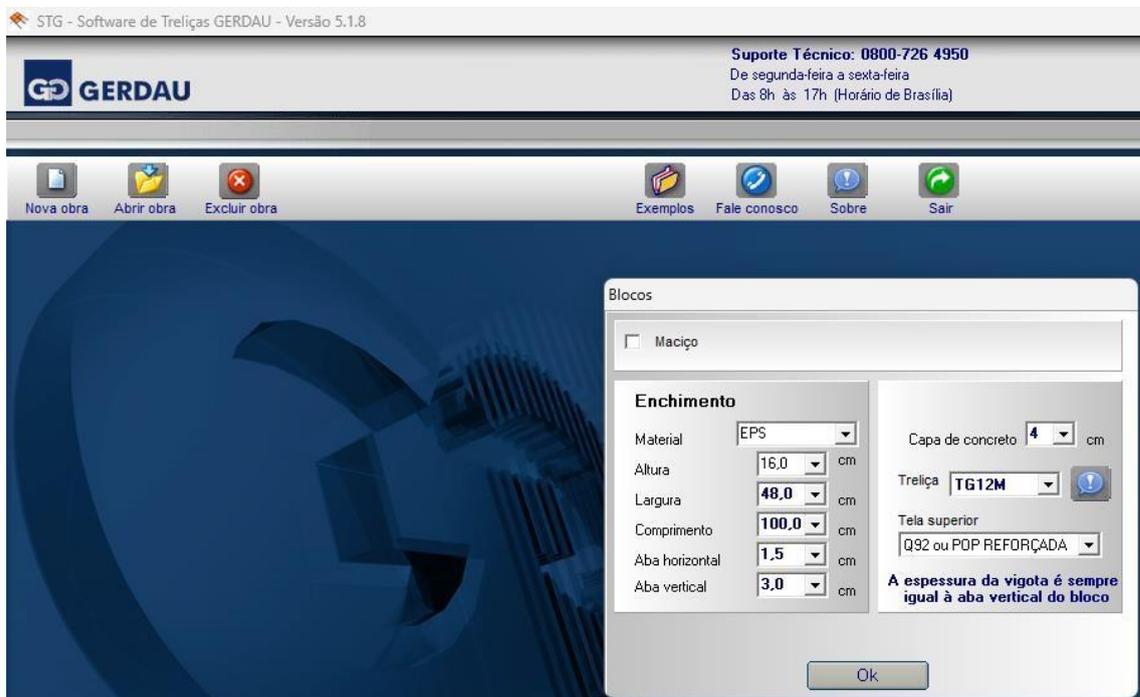
Tabela 14 - Carregamentos atuantes na laje

Tipos de carregamentos atuantes	Carga uniformemente distribuída (kN/m ²)
Comercial, corporativos e escritórios	3,0
Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais	1,0
Peso próprio de instalações diversas	0,5

Fonte: NBR 6120 (ABNT, 2019)

Todas as informações detalhadas foram inseridas no *software* de treliças GERDAU e utilizadas para o cálculo da laje, e assim, obtendo o valor de seu peso próprio, que é fundamental para determinar o carregamento nas vigas e pilares.

Figura 12 - Especificação de materiais e dimensões da laje treliçada



Fonte: *Software* de treliças GERDAU

Para o cálculo da carga de alvenaria, o *software* de treliças GERDAU também calcula esse carregamento em uma de suas opções, podendo determinar abertura nas paredes para diminuir o peso próprio, mas, por segurança, essa opção será descartada (afinal não se tem como saber de forma precisa o valor da carga adicional gerada por esquadrias).

Figura 13 - Carga de alvenaria

Cálculo de Alvenarias

Tipo de alvenaria: Cerâmica furada

Massa específica aparente: 1300 (kg/m³)

Clique no sentido de alvenaria

Longitudinal Transversal

Pé-direito: 3,00

Espeçura: 0,15

Comp total: 6,00

* Obs.: Todas as medidas em metros

Descontar aberturas Calcular

Carga: 585 kgf/m

Fechar

Fonte: *Software* de treliças GERDAU

Após determinar o peso próprio da alvenaria e inserindo no *software*, logo após ele calcula a laje, dando informações como peso próprio, armadura da laje, flecha máxima, momentos, reações, entre outros. Inserindo todos os carregamentos na laje, obtém-se as suas dimensões, conforme a figura 14.

Figura 14 - Informações sobre a laje

Fonte: *Software* de treliças GERDAU

5.1.2 Cálculo da força de arrasto proveniente do vento

5.1.2.1 Considerações iniciais

Para uma edificação de múltiplos andares, se calcula a incidência do vento na edificação através da força de arrasto, que irá incidir sobre a fachada da edificação, gerando um momento fletor na base do prédio. Para se chegar ao valor da força de arrasto, o *software* Ciclone foi utilizado no dimensionamento.

5.1.2.2 Início do dimensionamento

Para começar, se deverá considerar as dimensões do terreno, em que:

- (i) a: é a maior dimensão da edificação;
- (ii) b: é a menor dimensão da edificação; e
- (iii) h: é a altura da edificação.

A maior dimensão da edificação utilizada no presente trabalho é de 18 m, a menor dimensão é de 10 m e a altura é de 9 m.

5.1.2.3 Força de arrasto

A força de arrasto em uma edificação refere-se à resistência que a estrutura enfrenta devido à ação do vento. Quando o vento sopra contra um edifício, ele cria uma pressão sobre a superfície do edifício, gerando uma força paralela à direção do vento. Essa força é conhecida como força de arrasto.

A magnitude da força de arrasto em uma edificação depende de vários fatores, incluindo a velocidade do vento, a forma e a altura da edificação, a rugosidade da superfície do edifício e a orientação em relação à direção do vento. Edifícios altos, com formas que capturam mais o vento, geralmente experimentam maiores forças de arrasto. A fórmula para seu cálculo é a seguinte:

$$F_a = C_a * q * A \quad (23)$$

em que:

F_a : força de arrasto;

C_a : coeficiente de arrasto;

q : pressão dinâmica do vento; e

A : área da fachada.

Inicialmente, foi determinada a velocidade básica do vento (V_0), através da Figura 8, chegando ao valor de 30 m/s.

Para o cálculo do fator topográfico S_1 , o terreno considerado é plano com poucas ondulações, resultando no valor de 1.

Já no cálculo do fator de rugosidade do terreno S_2 , foram considerados dois fatores: rugosidade do terreno, cota média do topo dos obstáculos e sua quantidade.

Para a escolha da categoria de rugosidade do terreno, foi considerada a categoria IV, que diz que é composta de terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m.

Logo após, deve-se determinar a categoria da edificação para o vento a 90° e para o vento a 0°. Para os dois casos, a categoria da edificação é a categoria A, que diz que é uma categoria para toda a edificação que a sua maior dimensão não exceda 20 m.

Após todas as considerações, o valor de S_2 obtido é de 0,849 tanto para o vento incidente a 90° quanto para o vento a 0°.

Para se dimensionar o último fator, que é o fator estatístico S_3 , é necessário considerar que a edificação é de classe 2, em que são consideradas as edificações comerciais, nos dando o valor de 1 para este fator.

Agora, calcula-se V_k através da equação 1:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

$$V_k = 30 * 1 * 0,849 * 1,06$$

$$V_k = 27 \text{ m/s}$$

Após o valor de V_k ser calculado, é calculada a pressão dinâmica do vento através da equação 2:

$$q = 0,613 * V_k^2$$

$$q = 0,613 * 27^2$$

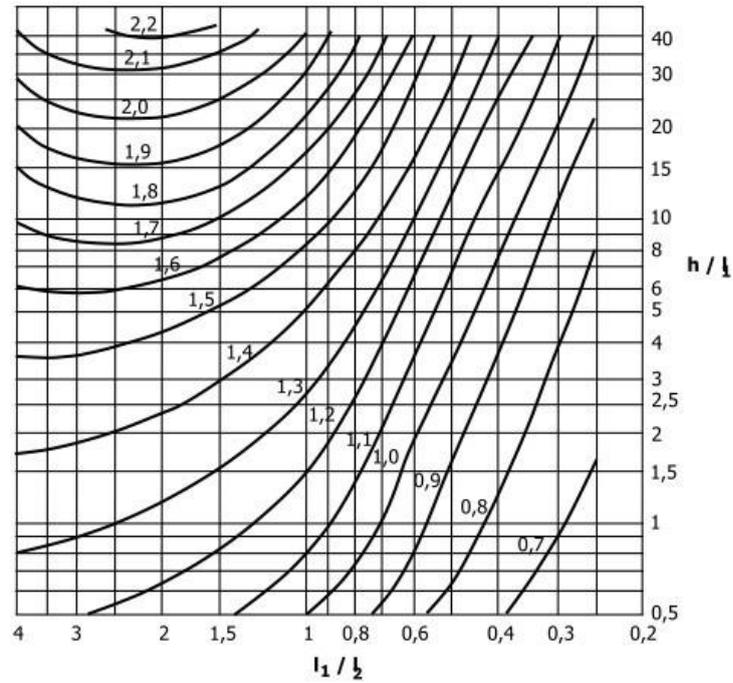
$$q = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

5.1.2.3.1 Cálculo do coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto é uma medida da resistência do ar que um objeto encontra enquanto se move através dele. É um coeficiente adimensional que descreve o quão eficientemente um objeto pode penetrar no ar. Quanto menor o coeficiente de arrasto, mais aerodinâmico é o objeto.

A determinação desse coeficiente é importante para que se chegue ao cálculo da força de arrasto, que se dá da seguinte forma:

Figura 15 - Ábaco com valores dos coeficientes de arrasto

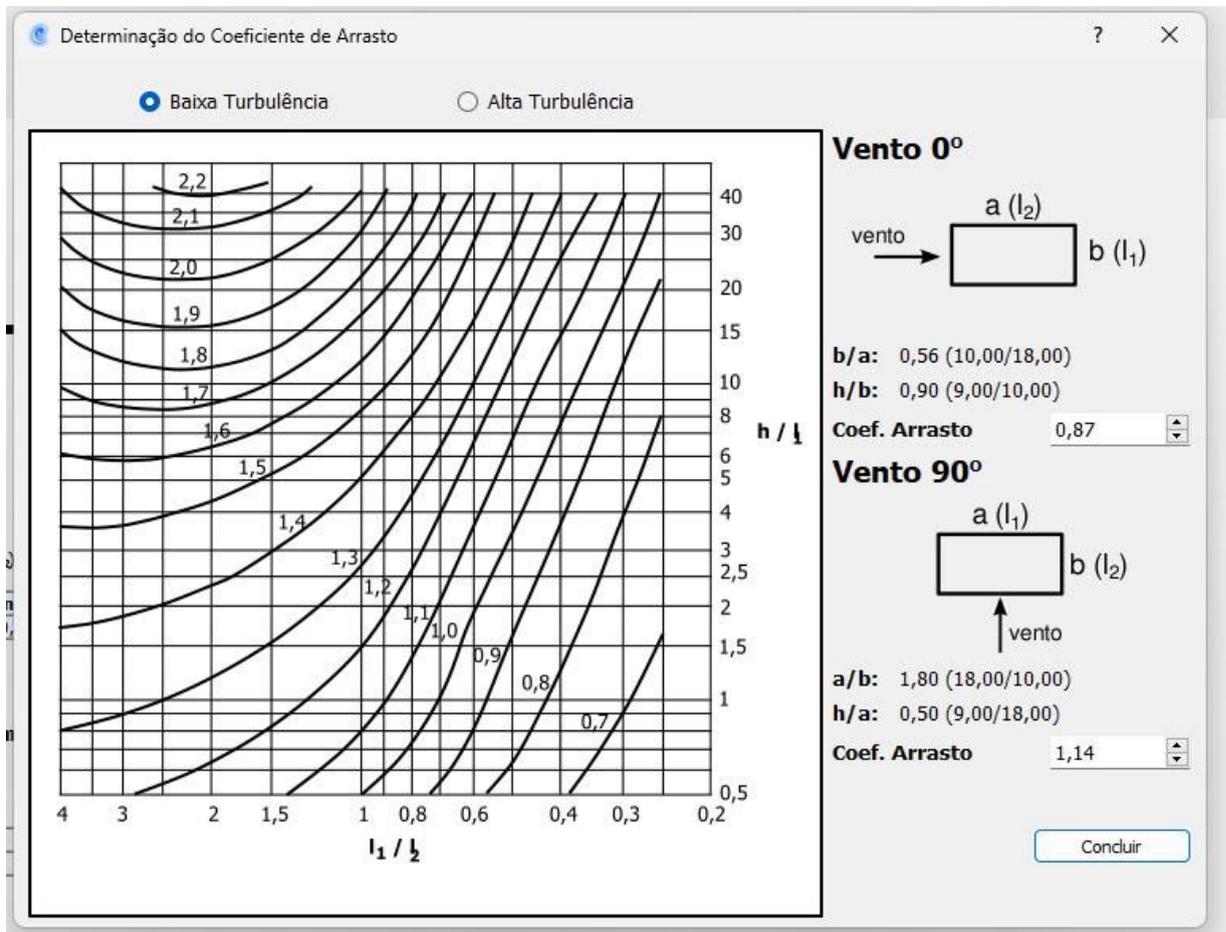


Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2023)

O ábaco acima contém os valores dos coeficientes de arrasto, que podem ser encontrados através de duas razões que envolvem as dimensões da edificação: uma razão é a entre a maior e menor dimensão da edificação, e a outra é entre a dimensão da edificação e sua altura.

Através do programa Ciclone, foram determinados os coeficientes de arrasto de 0,87 para o vento a 0° e 1,14 para o vento a 90° .

Figura 16 - Determinação dos coeficientes de arrasto



Fonte: Ciclone V5

Após todos os cálculos e considerações finalizadas, por questões de segurança, foi utilizado apenas o valor do maior coeficiente. Agora será determinado o valor da força de arrasto, encontrado através da equação 23.

$$F_a = C_a * q * A$$

$$F_a = 1,14 * 0,4 * 18 * 9$$

$$F_a = 73,9 \text{ kN}$$

O valor de F_a foi utilizado no dimensionamento da edificação no programa Ftool.

5.2 Combinações das cargas atuantes na edificação

Após consultas nas normas e cálculos realizados, os carregamentos atuantes no prédio serão os seguintes:

Tabela 15 - Carregamentos atuantes nas vigas e pilares

Tipos de carregamentos atuantes	Carga atuante
Peso próprio	0,40 kN/m ²
Comercial, corporativos e escritórios	3,00 kN/m ²
Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais	1,00 kN/m ²
Peso próprio da laje treliçada	3,00 kN/m ²
Telhado de fibrocimento do tipo canaletas com 8 mm de espessura	0,25 kN/m ²
Peso próprio de instalações diversas	0,50 kN/m ²
Vento	73,90 kN
Parede de alvenaria	5,85 kN/m
Platibanda	1,95 kN/m

Fonte: NBR 6120 (ABNT, 2019)

Agora, os carregamentos acima serão divididos nas seguintes categorias: PP (peso próprio da estrutura), PA (que representa a carga gerada por coisas que serão inseridas na obra ao longo de sua construção, tais como instalações, elementos pré-fabricados, entre outros), SC (que é o valor da sobrecarga atuante no prédio, que é determinada de acordo com a finalidade da construção) e VT (que é a carga de vento). As combinações de carga serão divididas em duas categorias: combinações últimas e combinações de serviço. As combinações últimas são utilizadas para o dimensionamento da estrutura, já as combinações de serviço são utilizadas para verificar a segurança da estrutura.

Segundo CABRAL, as combinações últimas normais para edifícios são:

- (i) $C1 = 1,25*PP + 1,4*PA + 1,5*SC$;
- (ii) $C2 = 1,25*PP + 1,4*PA + 1,4*VT + 1,5*SC$; e
- (iii) $C3 = 1,25*PP + 1,4*PA + 1,5*SC + 1,4*0,6*VT$.

Já as combinações de serviço mais utilizadas são:

- (i) $C1 = PP + PA + \gamma_2*SC$ (quase permanente);
- (ii) $C2 = PP + PA + VT + \gamma_1*SC$ (rara); e
- (iii) $C3 = PP + PA + VT$ (rara).

Em que γ_1 e γ_2 são coeficientes de ponderação das ações.

Após todas as combinações terem sido consideradas, a combinação última C2 se mostrou a mais segura de ser escolhida, devido ao fato de que os esforços internos na estrutura são maiores utilizando-a.

5.3 Carregamentos atuantes na estrutura

Na tabela abaixo o resultado da combinação última normal foi discriminado, tal qual os valores dos carregamentos adotados.

Para a cobertura:

Tabela 16 - Carregamentos atuantes na cobertura

Tipos de carregamentos atuantes	Carga atuante
Peso próprio (PP) - $\gamma = 1,25$	
Peso próprio	0,4 kN/m ²
Sobrecarga (SC) - $\gamma = 1,5$	
Sobrecarga na cobertura	0,25 kN/m ²
PA - $\gamma = 1,4$	
Telhado de fibrocimento tipo canaleta com espessura 8 mm	0,25 kN/m ²
Peso próprio da laje treliçada	3,0 kN/m ²
Peso próprio de instalações diversas	0,5 kN/m ²
Platibanda	195 kgf/m
VT - $\gamma = 1,4$	
Vento	73,9 kN

Fonte: autoria própria (2023)

Para os demais pavimentos:

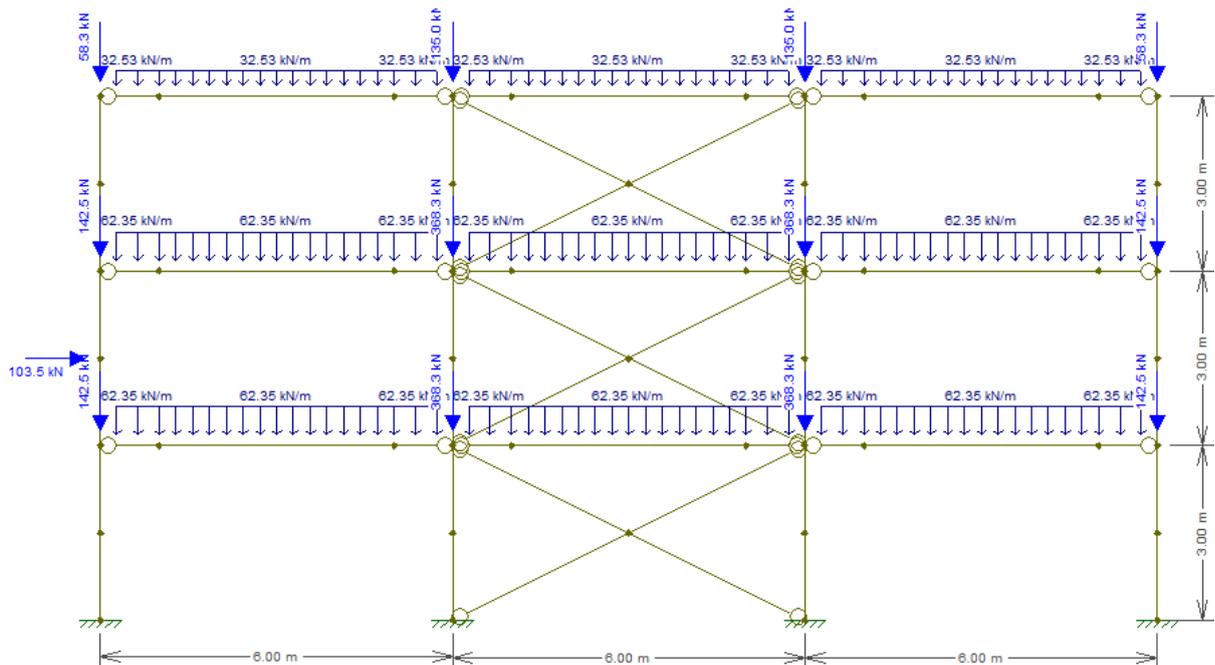
Tabela 17 - Carregamentos atuantes nos demais pavimentos

Tipos de carregamentos atuantes	Carga atuante
Peso próprio (PP) - $\gamma = 1,25$	
Peso próprio	0,4 kN/m ²
Sobrecarga (SC) - $\gamma_2 = 1,5$	
Comercial, corporativos e escritórios	3,0 kN/m ²
PA - $\gamma = 1,4$	
Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais	1,0 kN/m ²
Peso próprio da laje treliçada	3,0 kN/m ²
Peso próprio de instalações diversas	0,5 kN/m ²
Parede de alvenaria	585 kgf/m
VT - $\gamma = 1,4$	
Vento	73,9 kN

Fonte: autoria própria (2023)

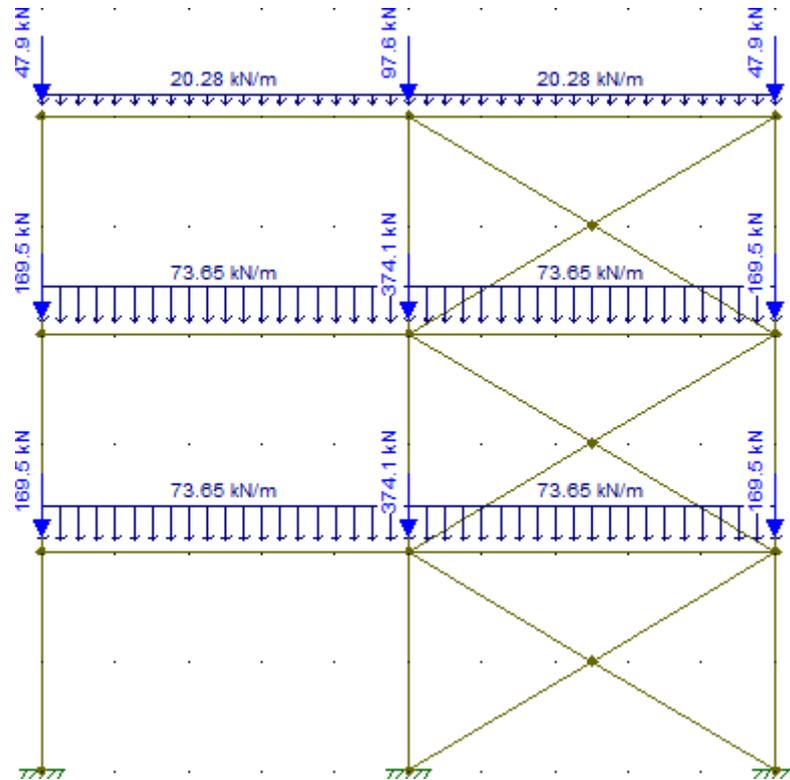
Com os carregamentos determinados, como mostram as figuras 17 e 18, a etapa seguinte é lançar os carregamentos no programa Ftool, a fim de obter os esforços atuantes na estrutura.

Figura 17 - Carregamentos atuantes na estrutura



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 18 - Carregamentos atuantes na estrutura



Fonte: autoria própria (2023)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Considerações iniciais

Neste tópico são apresentados os resultados da pesquisa realizada através da metodologia adotada, com referência à análise estrutural da estrutura metálica no aplicativo Ftool, juntamente com a planilha eletrônica, que automatizou o cálculo manual da estrutura.

Além disso, será mostrado o detalhamento do TAP, ilustrando o que será necessário para a sua execução, juntamente com o quantitativo dos perfis metálicos das duas estruturas do trabalho, comparando o peso próprio delas.

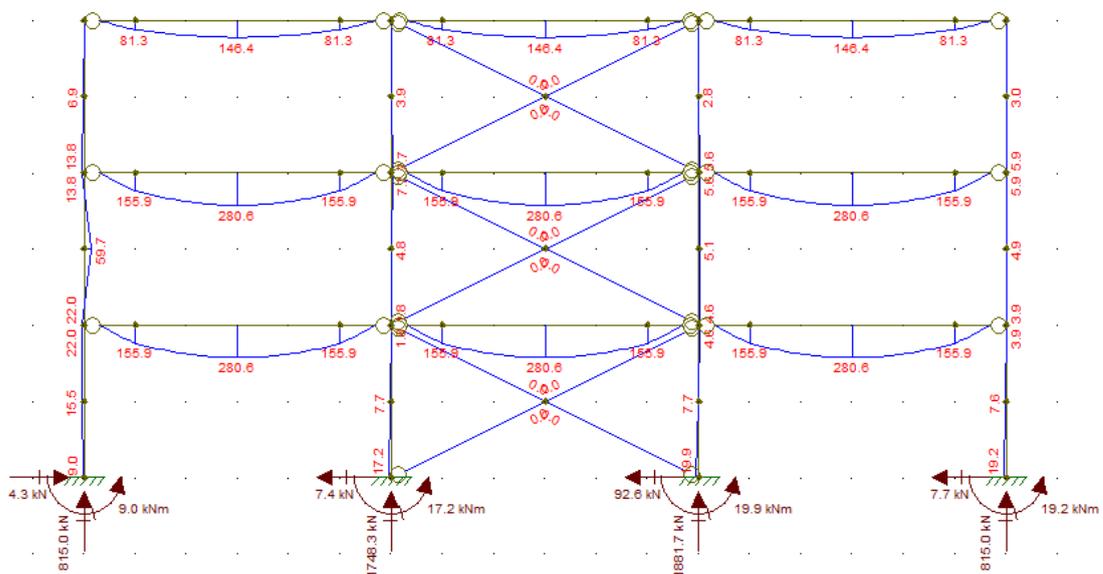
6.2 Dimensionamento das estruturas

Com os carregamentos das figuras 17 e 18, é possível determinar os esforços da estrutura através do programa Ftool. Logo após o aplicativo calcular os esforços internos, o cálculo manual por meio das planilhas foi realizado utilizando os conceitos teóricos estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

6.3 Estrutura convencional

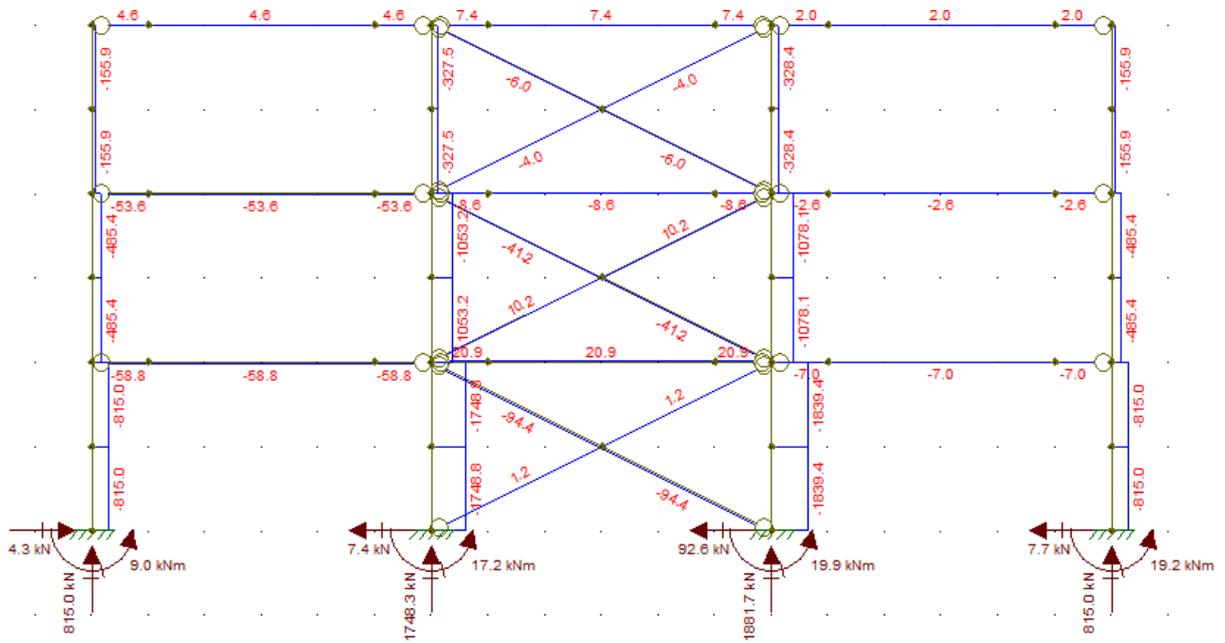
Os esforços internos da estrutura convencional estão nas figuras 19,20 e 21.

Figura 19 - Diagrama de momento fletor da estrutura convencional



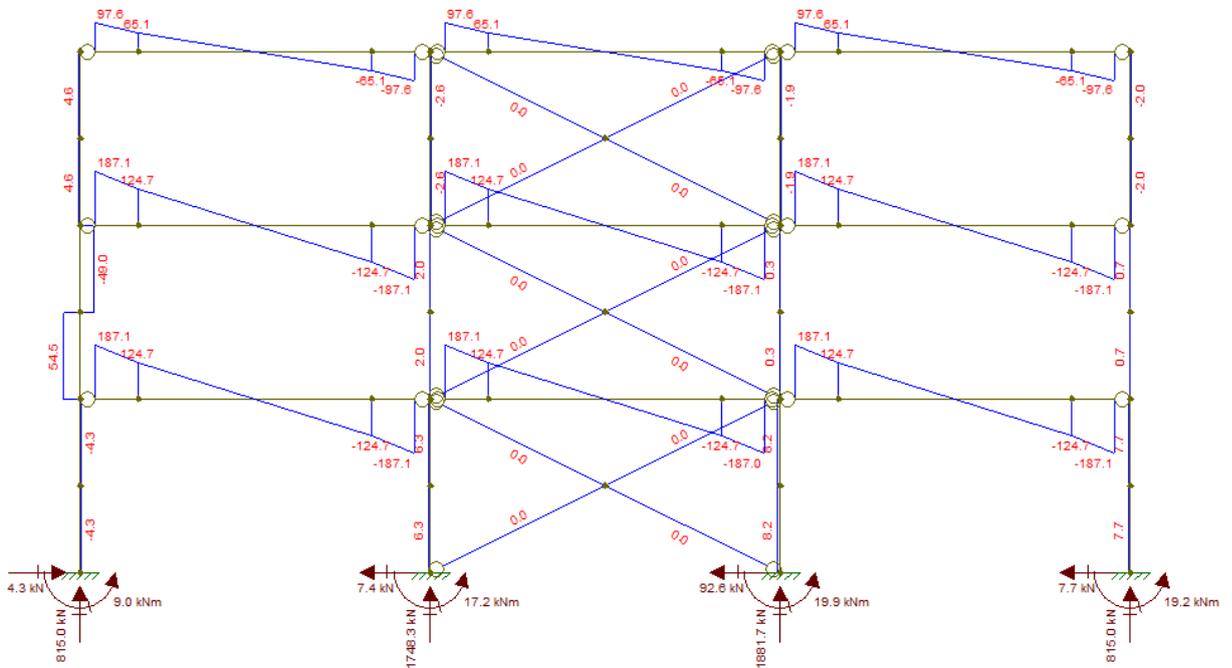
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 20 – Diagrama de esforço normal da estrutura convencional



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 21 - Diagrama de esforço cortante da estrutura convencional



Fonte: autoria própria (2023)

6.3.1 Cálculo da estrutura convencional

Para o cálculo dos perfis da estrutura, uma planilha eletrônica foi feita, a fim de deixar o processo de dimensionamento o mais automatizado possível.

Após a elaboração da planilha, foram utilizados no cálculo da estrutura os piores valores de esforços, a fim de se dimensionar uma estrutura segura. O cálculo pode ser encontrado nas tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Planilha com o cálculo das vigas da estrutura convencional

Para perfis W laminados				
Carga distribuída:	62,35 kN/m		Estado-limite último	
Vão utilizado (L):	6 m		Verificação FLT:	
Momento fletor de cálculo:	86,6 kN*m		Parâmetro A:	5,49
Vão destravado (Lb):	18 m		Parâmetro Ap:	42,90
			Verificação FLT:	Aprovado
Perfil utilizado:	W 460 x 68,0*			
Momento de inércia principal:	29851 cm ⁴		Verificação FLM:	
Momento resistente do eixo x:	1300,7 cm ³		Parâmetro A:	5,00
Momento plástico do eixo x:	1495,4 cm ³		Parâmetro Ap:	9,26
Raio de giração do eixo x:	18,46 cm		Verificação FLM:	Aprovado
Raio de giração do eixo y:	3,28 cm			
			Verificação FLA:	
			Parâmetro A:	47,03
Momento resistente de cálculo:	469,01 kN*m		Parâmetro Ap:	91,65
Resistência final da viga:	542%		Verificação FLA:	Aprovado
			Estado-limite de serviço:	
			Deformação:	1,72 cm
			Limite da norma:	1,714286 cm
				100%
			Logo, a viga escolhida está:	Reprovada

Nota: Caso a célula que indica a “resistência final da viga” fique verde, o perfil é capaz de absorver as tensões atuantes com segurança; caso fique vermelho, o perfil não atende as solicitações atuantes.

Fonte: autoria própria (2023)

Tabela 19 – Planilha com o cálculo dos pilares da estrutura convencional

Para perfis W Laminados				
Esforço com segurança:	1840 kN		Verificação FLM	
Comprimento de flambagem (x):	3 m		b/tlim:	13,65
Comprimento de flambagem (y):	3 m		b/2t:	7,48
Tensão de escoamento:	345 MPa		Verificação FLM:	Aprovada
Tensão de ruptura:	450 MPa			
			Verificação FLA:	
			b/t:	36,32
			d'/tw:	18,70
			Verificação FLA:	Aprovada
			Valor de Q:	1
Perfil Utilizado:	W 310 x 129,0 (H)*			
Raio de giração em x:	13,65 cm		Escolha o valor de kx:	1
Raio de giração mínimo(y):	7,79 cm		Nex:	692834,73 kg
Área da seção transversal:	165,4 cm ²		A0:	0,91
Momento de inércia em x:	30819 cm ⁴		X:	0,71
Momento de inércia em y:	10039 cm ⁴		Ncrd:	3674,94 kN
Ax:	21,98		Resistência final do pilar:	200%
Ay:	38,51			
			Escolha o valor de ky:	1
			Ney:	225684,40 kg
			A0:	1,59
			X:	0,35
			Ncrd:	1799,32 kN
			Resistência final do pilar:	98%

Nota: Caso a célula que indica a “resistência final da viga” fique verde, o perfil é capaz de absorver as tensões atuantes com segurança; caso fique vermelho, o perfil não atende as solicitações atuantes.

Fonte: autoria própria (2023)

6.3.2 Quantitativo da estrutura convencional

O quantitativo da estrutura tem como objetivo informar a quantidade de cada elemento da estrutura, assim como seu peso. Para a estrutura convencional, o quantitativo é o seguinte:

Tabela 20 - Quantitativo da estrutura metálica convencional

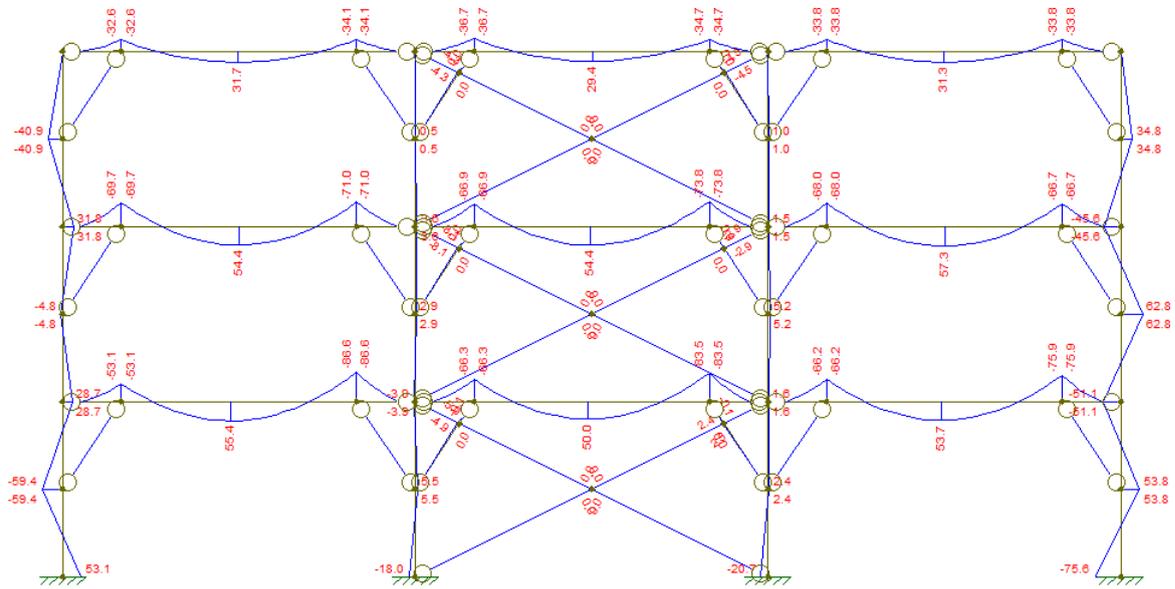
Perfil	Massa (kg)	Comprimento (m)	Área (m ²)
W 460x68	19.176	282	423
W 310x129 (H)	13.932	108	196
Chapa 9,5 mm	130	-	3,5
Total	33.238	270	439

Fonte: autoria própria (2023)

6.4 Estrutura que faz uso do TAP

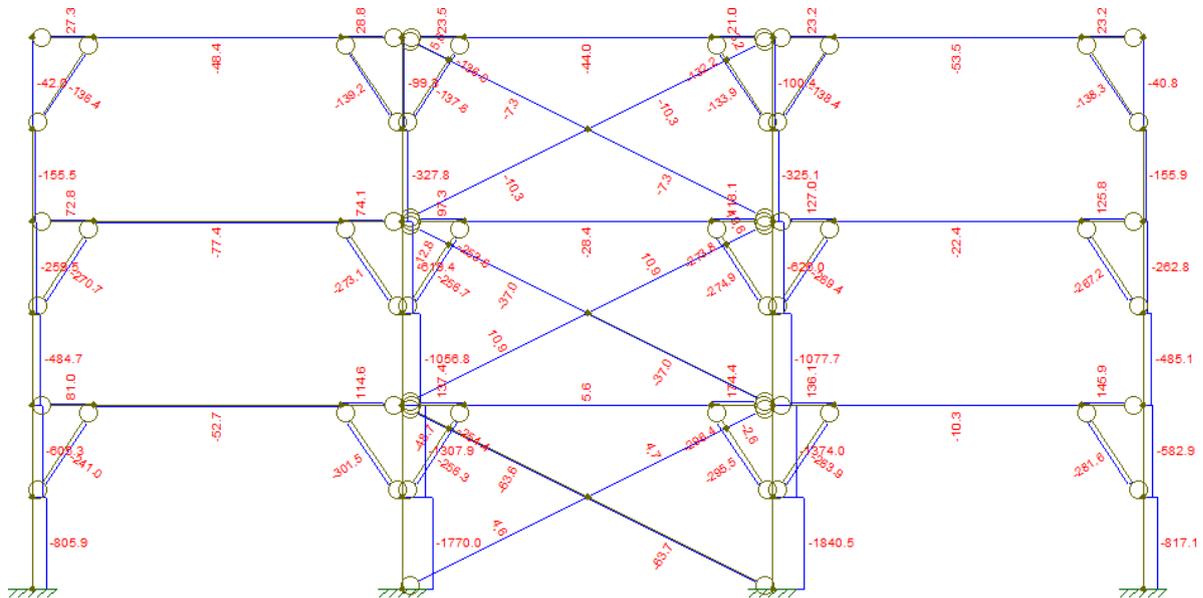
Para a estrutura travada, os carregamentos são idênticos, porém, os esforços internos são alterados devido à disposição de novos elementos na estrutura, como mostram as figuras 24, 25 e 26 abaixo:

Figura 22 - Diagrama de momento fletor da estrutura travada



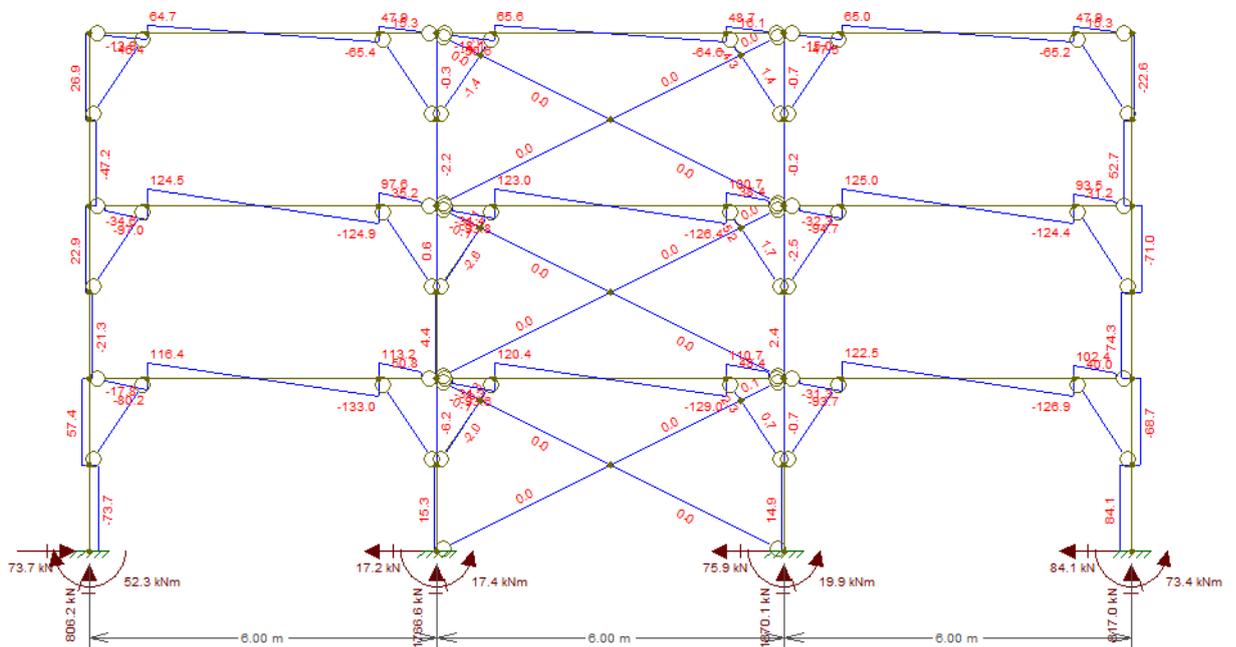
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 23 - Diagrama de esforço normal da estrutura travada



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 24 - Diagrama de esforço cortante da estrutura travada



Fonte: autoria própria (2023)

6.4.1 Cálculo da estrutura travada

Para calcular os perfis utilizados na estrutura travada, o método de cálculo é o mesmo: após obter os piores esforços no Ftool, utilizar as planilhas de dimensionamento automatizadas.

Tabela 21 - Planilha com o cálculo dos pilares da estrutura travada

Para perfis W Laminados			
Esforço com segurança:	1840	kN	
Comprimento de flambagem (x):	3	m	
Comprimento de flambagem (y):	1,5	m	
Tensão de escoamento:	345	MPa	
Tensão de ruptura:	450	MPa	
		Verificação FLM	
		b/tlim:	13,65
		b/2t:	8,17
		Verificação FLM:	Aprovada
		Verificação FLA:	
		b/t:	36,32
		d/tw:	21,38
		Verificação FLA:	Aprovada
		Valor de Q:	1
Perfil Utilizado:	W 250 x 80,0 (H)		
Raio de giração em x:	11,1	cm	
Raio de giração mínimo(y):	6,51	cm	
Área da seção transversal:	101,9	cm ²	
Momento de inércia em x:	12550	cm ⁴	
Momento de inércia em y:	4313	cm ⁴	
Ax:	27,03		
Ay:	23,04		
		Escolha o valor de kx:	1
		Nex:	282133,61 kg
		A0:	1,12
		X:	0,59
		Ncrd:	1897,14 kN
		Resistência final do pilar:	103%
		Escolha o valor de ky:	1
		Ney:	387838,15 kg
		A0:	0,95
		X:	0,68
		Ncrd:	2186,91 kN
		Resistência final do pilar:	119%

Nota: Caso a célula que indica a “resistência final da viga” fique verde, o perfil é capaz de absorver as tensões atuantes com segurança; caso fique vermelho, o perfil não atende as solicitações atuantes.

Fonte: autoria própria (2023)

Tabela 22 - Planilha com o cálculo das vigas da estrutura travada

Para perfis W laminados			
Carga distribuída:	62,35	kN/m	
Vão utilizado (L):	4	m	
Momento fletor de cálculo:	86,6	kN*m	
Vão destravado (Lb):	18	m	
		Estado-limite último	
		Verificação FLT:	
		Parâmetro λ:	6,59
		Parâmetro λp:	42,90
		Verificação FLT:	Aprovado
		Estado-limite de serviço:	
		Deformação:	0,98 cm
		Limite da norma:	1,142857 cm
			116%
		Logo, a viga escolhida está: Aprovada	
Perfil utilizado:	W 360 x 39,0		
Momento de inércia principal:	10331	cm ⁴	
Momento resistente do eixo x:	585,3	cm ³	
Momento plástico do eixo x:	667,7	cm ³	
Raio de giração do eixo x:	14,35	cm	
Raio de giração do eixo y:	2,73	cm	
		Verificação FLM:	
		Parâmetro λ:	5,98
		Parâmetro λp:	9,26
		Verificação FLM:	Aprovado
		Verificação FLA:	
		Parâmetro λ:	51,08
		Parâmetro λp:	91,65
Momento resistente de cálculo:	209,42	kN*m	
Resistência final da viga:	242%		
		Verificação FLA: Aprovado	

Nota: Caso a célula que indica a “resistência final da viga” fique verde, o perfil é capaz de absorver as tensões atuantes com segurança; caso fique vermelho, o perfil não atende as solicitações atuantes.

Fonte: autoria própria (2023)

Tabela 23 - Planilha com o cálculo dos perfis responsáveis pelo travamento da estrutura

Para perfis W Laminados			
Esforço com segurança:	300	kN	
Comprimento de flambagem (x):	1,8	m	
Comprimento de flambagem (y):	1,8	m	
Tensão de escoamento:	345	MPa	
Tensão de ruptura:	450	MPa	
Perfil Utilizado:		W 250 x 38,5	
Raio de giração em x:	11,05	cm	
Raio de giração mínimo(y):	3,46	cm	
Área da seção transversal:	49,6	cm ²	
Momento de inércia em x:	6057	cm ⁴	
Momento de inércia em y:	594	cm ⁴	
Ax:	16,29		
Ay:	52,02		
Verificação FLM		Verificação FLA:	
b/tlim:	13,65	b/t:	36,32
b/zt:	6,56	d/tw:	33,33
Verificação FLM:	Aprovada	Verificação FLA:	Aprovada
Valor de Q:		1	
Escolha o valor de kx:		Escolha o valor de ky:	
Nex:	378238,89	kg	1
A0:	0,67		
X:	0,83		
Ncrd:	1287,27	kN	
Resistência final do pilar:	429%		
Escolha o valor de ky:		Escolha o valor de ky:	
Ney:	37093,26	kg	1
A0:	2,15		
X:	0,19		
Ncrd:	295,73	kN	
Resistência final do pilar:	99%		

Nota: Caso a célula que indica a “resistência final da viga” fique verde, o perfil é capaz de absorver as tensões atuantes com segurança; caso fique vermelho, o perfil não atende as solicitações atuantes.

Fonte: autoria própria (2023)

As vigas que não tiveram seu vão efetivo reduzido permanecerão com os mesmos perfis, pois não foram beneficiadas pelo TAP.

6.4.2 Quantitativo da estrutura travada

Para que se possa fazer uma comparação entre a estrutura que utiliza e a que não utiliza o TAP, é necessário que se faça mais um quantitativo, que está na tabela abaixo:

Tabela 24 – Quantitativo da estrutura metálica travada

Perfil	Massa (kg)	Comprimento (m)	Área (m ²)
W 250x38,5	3.742	97	105
W 360x39	6.318	162	191
W 460x68	8.160	120	180
W 250x80 (H)	8.640	108	161
Chapa 9,5 mm	283	-	7,6
Total	27.143	487	637

Fonte: autoria própria (2023)

6.5 Detalhamento das ligações

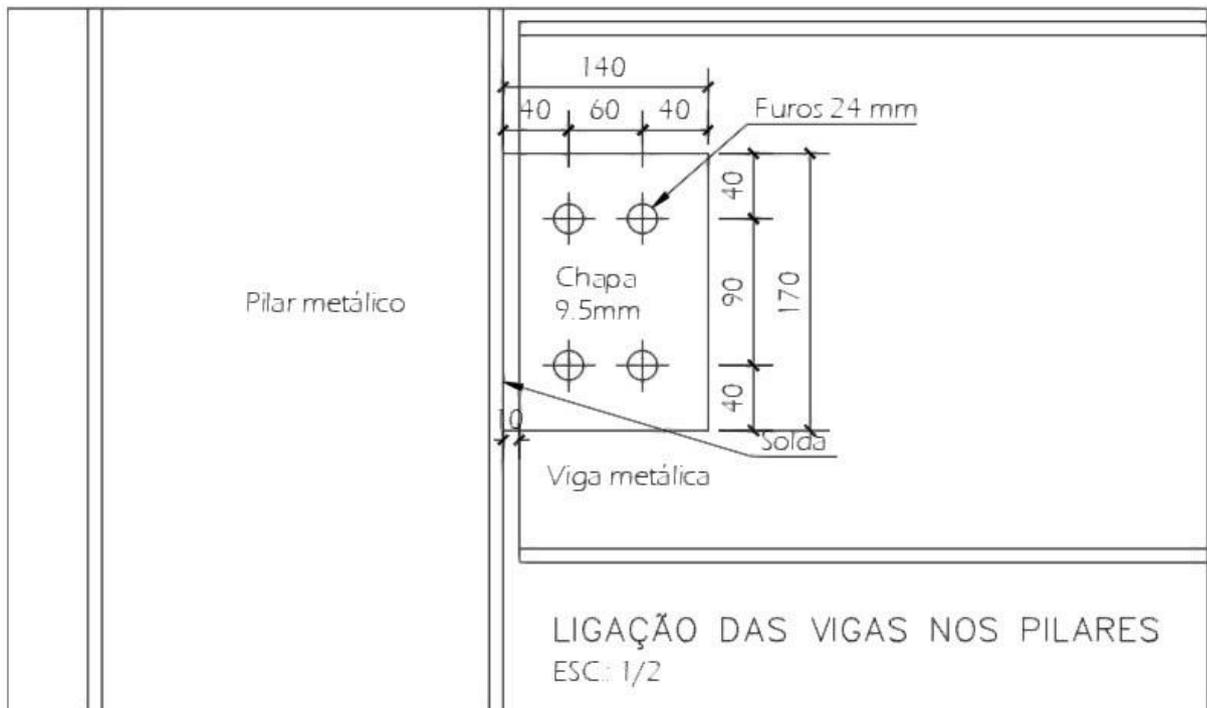
Para que haja um bom entendimento de como se idealizou a implementação da estrutura, é necessário que haja um detalhamento estrutural, que foi feito através do programa Autocad, e

que terá o objetivo de, através da representação gráfica da estrutura, facilitar o seu entendimento.

6.5.1 Detalhamento da ligação viga-pilar

Essa ligação consiste em soldar uma chapa com 9,5 mm de espessura nos pilares, (juntamente com parafusos com 22 milímetros de diâmetro, sendo necessários furos de 24 mm de diâmetro) e logo após, parafusar a chapa nos pilares, de forma a criar ligações rotuladas na estrutura (o que confere maior eficiência na execução da estrutura).

Figura 25 - Detalhamento da ligação viga-pilar



Fonte: autoria própria (2023)

6.5.2 Detalhamento do TAP

O detalhamento do travamento auxiliar de pilares consiste em utilizar uma chapa com espessura de 6,3 mm que é soldada nos perfis das vigas e pilares, e em seguida parafusada no perfil responsável por executar o travamento da estrutura. Os dois parafusos possuem um diâmetro de 22 milímetros, o que faz com que seja necessário um furo de 24 milímetros para que a execução da instalação do parafuso seja possível.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao travamento auxiliar de pilares, a estrutura convencional, que pesa 33238 kg, agora passa a pesar 27143 kg, o que representa uma redução de peso de aproximadamente 18,33%, com uma redução semelhante tanto nas vigas quanto nos pilares: ambos tiveram seu peso próprio diminuído em cerca de 5 toneladas.

Ao longo da pesquisa, constatou-se que os travamentos são fundamentais para distribuir melhor as cargas e evitar concentrações de tensões que podem comprometer a integridade da estrutura. Além disso, a implementação adequada dos elementos de travamento reduz significativamente o risco de flambagem, melhora a resistência às forças horizontais e proporciona maior rigidez à edificação, fazendo com que a estrutura fique mais segura, mesmo tendo o consumo de aço reduzido.

Tal redução de peso sugere uma aplicação uniforme e equilibrada do travamento auxiliar em toda a estrutura. Esse equilíbrio é crucial para garantir uma distribuição eficiente de cargas e, ao mesmo tempo, maximizar os benefícios da redução de peso.

A confirmação da ideia inicial do trabalho é um marco significativo, indicando que a estratégia escolhida atendeu às expectativas, tanto do ponto de vista da otimização estrutural quanto do ponto de vista econômico. A assertiva de que construir utilizando estruturas metálicas com o travamento auxiliar de pilares não é apenas rápido, mas também um pouco mais barato, destaca a viabilidade econômica dessa abordagem.

Embora o método apresentado neste estudo tenha demonstrado resultados promissores, é imprescindível que sejam realizados mais experimentos em laboratórios para validar sua eficácia. A aplicação em obras convencionais exige uma investigação mais detalhada sobre os possíveis desafios e limitações que podem surgir durante a execução prática. Além disso, esses estudos devem contemplar diferentes condições de carga, materiais e técnicas de construção, de modo a garantir a viabilidade técnica e econômica do método proposto. Somente com a confirmação desses fatores será possível assegurar sua aplicabilidade em larga escala, proporcionando maior segurança e confiabilidade.

Essa conclusão pode ter implicações importantes para futuros projetos, incentivando a consideração do travamento auxiliar de pilares como uma prática recomendada na busca por estruturas mais eficientes e econômicas. A combinação de redução de peso, eficiência estrutural e benefícios econômicos destaca o potencial impacto positivo dessa técnica na indústria da construção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas. 30 set. 2019. 1 Figura.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. 20 dez. 2023. 1 Figura.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 25 ago. 2008. 1 Figura.

BARBOZA, M. R. **Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado**, Bauru, 10 de agosto 2008.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em aço**: Projeto e cálculo. [S.l.]: [s.n.], 2003.

BELLEI, I. H.; BELLEI, H. N. **Edifícios de pequeno porte estruturados em aço**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2011.

BIANCHI, Alessandro. **Aços de Alta Resistência e Baixa Liga**. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga. Acesso em: 2 dez. 2023.

CABRAL, S. V. D. S. **Projeto, dimensionamento e detalhamento de estruturas metálicas - Parte II**. [S.l.]: [s.n.].

CHAVES, M. R. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões**. Ouro Preto: [s.n.], 2007.

DORNELLES, G. **Youtube**, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=W-57Uexc05M>. Acesso em: 2023.

GERDAU. **Software de treliças Gerdau**. Versão 5.1.8. [S. l.: s. n.], 2006.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 10^a. ed. [S.l.]: Pearson Universidades, 2019.

MOREIRA, R. Aumento do aço em 2023. **Hydraulcomp**, 2023. Disponível em:
<https://hydraulcomp.blog/aumento-do-aco-em-2023/>. Acesso em: 15 de maio 2023.

NETO, Dorival. **Ciclone**. Versão 5.0.2. [S. l.: s. n.], 2023.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 8^a. ed. Rio de Janeiro:
LTC -Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008.

SOUZA, D. H. D. **Projeto de estrutura metálica em mezanino**, Palhoça, p. 153, 2019.

SANTOS, Edílson. **Venda de estruturas metálicas**. Imagem. Disponível
em: <https://www.telestruturasmetalicas.com.br/venda-de-estruturas-metalicas>. Acesso em:
18 dez. 2023.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC do Aluno

Assunto:	TCC do Aluno
Assinado por:	Iago Augusto
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Iago Lucas de Lima Augusto, ALUNO (201912220028) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - JOÃO PESSOA, em 18/10/2024

Este documento foi armazenado no SUAP em 01/11/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou

acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1297624

