



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Lucas Tasca

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE PEÇAS METÁLICAS
COMPOSTAS POR CANTONEIRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO**

Santa Cruz do Sul
2025

Lucas Tasca

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE PEÇAS METÁLICAS
COMPOSTAS POR CANTONEIRAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO
SEGUNDO A NBR 8800/2024**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul
2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder forças nos momentos de cansaço e por iluminar meu caminho durante toda essa jornada.

À minha namorada, Manuela Helfer, pelo apoio incondicional, pela paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre disposta a me ajudar em tudo que fosse necessário com este trabalho.

Aos meus pais, pelo suporte de sempre, pelos ensinamentos e pelo incentivo contínuo que me motivaram a nunca desistir.

Aos meus irmãos, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e por sempre estarem presentes ao meu lado.

Ao meu orientador, Henrique Luiz Rupp, pela disponibilidade, atenção e pelas valiosas orientações que foram fundamentais para a realização deste TCC.

Ao Elemar Helfer, pelo auxílio essencial na etapa prática, especialmente na elaboração das peças utilizadas nos ensaios, contribuindo diretamente para a execução do projeto.

A todos vocês, minha sincera gratidão.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise teórico-experimental da compressão em estruturas de aço, focando na resistência de perfis tipo cantoneira. O estudo iniciou com fundamentação teórica baseada na norma ABNT NBR 8800:2024. A partir disso foram definidos três arranjos de cantoneiras “L” de 1.1/4”x 1.1/4”x 1/8” (simples, retangular e em formato “X”), com três corpos de prova para cada. A cantoneira simples foi submetida a ensaio de tração para determinar sua tensão de ruptura, e todos os modelos, a ensaios de compressão para verificar resistências máximas. O Modelo 01 (cantoneira simples) demonstrou desempenho superior ao esperado, superando os valores teóricos. O Modelo 02 (retangular) obteve uma resistência experimental correspondendo a aproximadamente 92% da resistência de cálculo para segurança e ligeiramente acima da de projeto, indicando boa correspondência. O Modelo 03 (formato em “X”) apresentou resistência representando cerca de 89% da ruptura teórica e 98% da resistência de projeto, ficando relativamente abaixo da expectativa. Falhas de montagem, desalinhamentos e posicionamento impreciso dos corpos de prova foram observados, influenciando os resultados.

Palavras-chave: Compressão; Cantoneira; ABNT NBR 8800:2024; Corpo de prova; Perfis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ponte sobre o Rio Severn.....	14
Figura 2 - Porcentagens máximas de elementos adicionais.	16
Figura 3 - Teor de carbono.	16
Figura 4 - Propriedades mecânicas de Aços-carbono.....	16
Figura 5 - Propriedades mecânicas de Aços de Baixa Liga	17
Figura 6 - Aços fabricados no Brasil.....	17
Figura 7 - Aços Estruturais.....	19
Figura 8 - Ligações Metálicas	21
Figura 9 - Exemplos de Perfis Soldados.....	21
Figura 10 - Ligações soldadas	23
Figura 11 - Tipos de Solda	24
Figura 12 -Soldas de Penetração	25
Figura 13 -Solda de filete	25
Figura 14 -Simbologia.....	26
Figura 15 -Parafusos Estruturais.....	27
Figura 16 - Ligação do tipo apoio	27
Figura 17 - Ligação do tipo atrito.....	28
Figura 18 - Classificação quanto ao esforço solicitante	28
Figura 19 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.	29
Figura 20 – Seções.....	30
Figura 21 - Flambagem Global por Flexão	31
Figura 22 - Análise do Comportamento de Colunas Sob Ação de Cargas Progressivas	33
Figura 23 - Comportamento de Colunas com Diferentes Índices de Esbeltez	34
Figura 24 - Variação de Resistência de Uma Coluna Comprimida em Função do Índice de Esbeltez l/i	36
Figura 25 - Comprimento de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados	37
Figura 26 - Coluna Curta Após Flambagem Local.....	38
Figura 27 - Comportamento da Placa Isolada	40
Figura 28 - Valores de $(b/t)_{lim}$	41
Figura 29 - Fatores c_1 e c_2 Para Cálculo de Flambagem Local.	44
Figura 30 - Peças de Seção Múltipla	45
Figura 31 - Peças de Seção Múltipla	46

Figura 32 - Peças comprimidas formadas por associação de cantoneiras justapostas com ligações descontínuas	47
Figura 33 – Cantoneira Simples	51
Figura 34 – Cantoneira retangular	52
Figura 35 – Cantoneira formato “X”	52
Figura 36– Especificações técnicas	53
Figura 37 – Características Geométricas	54
Figura 38 –Máquina universal de ensaio Emic	55
Figura 39 – Corpo de prova tração	56
Figura 40 – Eletrodo	56
Figura 41 –Peça tracionada na máquina	57
Figura 42 – Ensaio cantoneira simples	59
Figura 43 – Ensaio cantoneira retangular	60
Figura 44 – Ensaio cantoneira formato “X”	60
Figura 45 – Perfil simples.....	61
Figura 46 – Valores de $(b/t)_{lim}$	63
Figura 47 – Perfil peça retangular	65
Figura 48 – Valores de $(b/t)_{lim}$	67
Figura 49 – Perfil peça em “X”	68
Figura 50 – Valores de $(b/t)_{lim}$	70
Figura 51 – Cantoneiras Simples após os ensaios	73
Figura 52 – Cantoneiras retangulares após o ensaio.....	75
Figura 53 – Cantoneiras em formato “X” após o ensaio	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Tensões de escoamento e ruptura.....	58
Tabela 2 – Resistência a compressão cantoneira simples	73
Tabela 3– Resistência à compressão das cantoneiras em arranjo retangular	75
Tabela 4 – Resistência à compressão das cantoneiras em formato “X”	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo dos ensaios e resistências da cantoneira simples	78
Gráfico 2 – Comparativo dos ensaios e resistências da cantoneira retangular	79
Gráfico 3 – Comparativo dos ensaios e resistências cantoneira formato “X”	80
Gráfico 4 –Comparação de resultados	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

ASTM - American Society for Testing and Materials

CP – Corpo de Prova;

MR250 – Designação do tipo de aço utilizado (resistência mínima de escoamento de 250 MPa);

AWS E6013 – Classificação do eletrodo conforme a American Welding Society;

Ksi – Quilo libra por polegada quadrada (unidade de tensão – sistema imperial);

Fy (fy) – Tensão de escoamento do material;

Fu (fu) – Tensão de ruptura do material;

fc (fc) – Tensão última de compressão;

fcr – Tensão crítica de flambagem;

Lx1, eq – Comprimento destravado Equivalente;

rxl – Raio de giração da seção transversal;

Ag – Área bruta da seção;

Aef – Área efetiva da seção;

W – Modo elástico à flexão;

Nt – Momento fletor atuante;

i – Raio de giração;

E – Módulo de elasticidade;

Ncr / Nc / Ne / Ny – Carga Crítica / Carga última / Carga de flambagem / Carga de início de plastificação;

b/t – Relação largura/espessura do elemento (esbeltez);

MPa – Mega Pascal;

kN – Kilo Newton;

G – Módulo de elasticidade transversal;

E – Eletrodo;

F – Força;

Rd - força axial de compressão resistente de cálculo;

Sd – Solicitação de projeto;

I – Largura;

K – Coeficiente de Flambagem;

I – Momento de inércia;

D – Diâmetro;

A – Área;

Cm - Centímetro;

Q - Fator de redução associado à flambagem local;

LISTA DE SÍMBOLOS

χ – Fator redução da flambagem;

λ – Índice de esbeltez;

λ_0 – Índice de esbeltez reduzido;

γ_{a1} – Coeficiente de ponderação da resistência do aço;

β_a – coeficiente de dilatação térmica;

ρ_a – Massa específica;

ν – Coeficiente de Poisson;

% - por cento;

$N\delta_t$ - Momento fletor atuante na seção do meio do vão;

$\delta / \delta_0 / \delta_t$ – Deslocamento lateral / Deslocamento inicial / Flecha atuante;

σ – Tensão de escoamento;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Área e limitação do tema.....	11
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Origem e definições sobre material.....	14
2.2 Tipos de aços estruturais.....	15
2.2.1 Aços-carbono.....	15
2.2.2 Aços de baixa liga	17
2.2.3 Propriedades dos aços estruturais	18
2.3 Classificação e Características NBR 7007:2022.....	18
2.4 Vantagens e Desvantagens Estruturas de Aço	20
2.5 Ligações Metálicas	20
2.5.1 Ligações soldadas.....	21
2.5.1.1 Processos de Soldagens.....	22
2.5.1.2 Tipos de Eletrodo.....	23
2.5.1.3 Tipos de Solda	24
2.5.1.4 Simbologia solda	26
2.5.2 Ligações parafusadas	26
2.5.2.1 Tipos de ligações parafusadas	27
2.6 Solicitações e Resistências de Projeto	29
2.7 Comportamento do Aço Sob Esforço de Compressão	30
2.7.1 Flambagem por Flexão.....	30
2.7.1.1 Comprimento de Flambagem.....	36
2.7.2 Flambagem Local	38
2.7.2.1 Flambagem da Placa Isolada	38
2.7.2.2 Critérios para Impedir Flambagem Local	40
2.7.2.3 Barras Prismáticas Submetidas à Força Axial de Compressão	42
2.7.2.4 Fator de Redução χ.....	42
2.7.2.5 Area Efetiva da Seção Transversal	43

2.7.3 Peças de Seção Múltipla	44
2.7.3.1 Critério de Dimensionamento de Peças Múltiplas	47
3 METODOLOGIA	50
3.1 Materiais	50
3.1.1 Perfis adotados	51
3.1.3 Características dos materiais	53
3.1.4 Mecanismos e Equipamentos de ensaio	54
3.2 Ensaio de tração do aço	55
3.3 Ensaio de compressão das cantoneiras	59
3.3.1 Cálculo de força normal de compressão resistida pelos perfis segundo NBR 8800:2024	61
3.3.1.1 Modelo 1- Cantoneira simples	61
3.3.1.2 Modelo 2 - cantoneira retangular	64
3.3.1.3 Modelo 3 - Cantoneira em formato “X”	68
4 RESULTADOS	72
4.1 Resultados Experimentais	72
4.1.1 Modelo 1 – Cantoneira simples	72
4.1.2 Modelo 2 – Cantoneira retangular	74
4.1.3 Modelo 3 - Cantoneira em formato “X”	76
4.2 Análise dos resultados	77
4.2.1 Análise modelo 1 – Cantoneira simples	77
4.2.2 Análise modelo 2 – Cantoneira retangular	78
4.2.3 Comparativo de resultados	81
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	83
5.1 Conclusão	83
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	84
6 REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

O aço, conhecido e utilizado desde a Antiguidade em pequenas quantidades devido seu valor, começou a ser industrialmente fabricado a partir de 1856, com a invenção do processo Bessemer, desenvolvido por Henry Bessemer (PFEIL E PFEIL, 2009). Esse processo permitiu a fabricação industrial do aço de forma mais eficiente e econômica, ao remover impurezas do ferro por meio da injeção de ar quente, o que resultou em um material de alta qualidade e com ampla aplicação em todas as áreas da construção civil.

No Brasil, a história da siderurgia começou com a implantação da Companhia Siderúrgica Belga-Mineira em 1921. No entanto, o marco principal ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, com o surgimento da Companhia Siderúrgica Nacional em 1946, que produzia tanto perfis leves quanto chapas e bitolas americanas, de acordo com Bellei (1998).

Com o desenvolvimento do setor da construção civil, o aço tornou-se um material extremamente útil, especialmente por sua capacidade de oferecer rapidez e agilidade nas obras. As peças pré-fabricadas em perfis padronizados requerem apenas a montagem em campo, acelerando significativamente o processo construtivo. Contudo, ao analisar o panorama das estruturas metálicas no Brasil, observa-se um atraso em relação a outros países. Esse descompasso pode ser atribuído a fatores como os elevados custos dos materiais metálicos, o fraco desenvolvimento tecnológico do setor, a escassez de mão de obra especializada e a cultura construtiva do país, que historicamente tem se concentrado no uso do concreto.

Neste contexto, um dos principais desafios no uso de estruturas de aço refere-se ao comportamento do material sob compressão, uma vez que elementos como colunas e pilares são essenciais para a sustentação de cargas verticais nas construções. No entanto, o desempenho desses componentes vai além da resistência do aço, envolvendo questões de instabilidade estrutural, entre as quais se destaca o fenômeno de flambagem. Compreender esses aspectos é crucial para garantir a segurança e a eficiência das estruturas metálicas, além de promover uma maior adoção do aço na construção civil brasileira.

1.1 Área e limitação do tema

O referido projeto foi desenvolvido na área de estruturas de aço, ressaltando o comportamento de peças compostas por cantoneiras submetidas à compressão.

1.2 Justificativa

A realização deste trabalho reside na importância de investigar o comportamento estrutural de componentes metálicos amplamente utilizados na engenharia civil, com ênfase nas cantoneiras. Devido à sua geometria simples e à sua versatilidade, essas peças são frequentemente aplicadas em estruturas submetidas a esforços de compressão, como vigas, pilares e suportes. No entanto, uma compreensão detalhada do comportamento dessas componentes sob diferentes níveis de carga compressiva é fundamental. Fatores como a geometria da seção transversal, as propriedades do material e a interação entre esses parâmetros influenciam diretamente a resistência e o desempenho estrutural. Assim, o estudo minucioso dessas variáveis torna-se essencial para o desenvolvimento de projetos mais seguros, eficientes e com maior otimização no uso de recursos, contribuindo para a evolução das práticas construtivas modernas.

Ademais, a condução de estudos experimentais, aliada a uma sólida fundamentação teórica permite avaliar modelos para NBR 8800/2024, garantindo que as simulações e cálculos matemáticos reflitam o comportamento real das peças em campo. Isso se torna particularmente relevante frente a questões como a instabilidade e o colapso estrutural, que podem ocorrer em situações de sobrecarga ou compressão excessiva. Um estudo detalhado como este contribui para aumentar a precisão dos cálculos estruturais, além de oferecer uma base empírica valiosa para a revisão e aprimoramento de normas e recomendações técnicas aplicadas ao uso das cantoneiras.

Por fim, a análise apresentada impacta diretamente na otimização de custos e materiais na construção civil. Uma compreensão mais profunda dos limites de desempenho das cantoneiras possibilita o desenvolvimento de peças mais leves e economicamente viáveis, sem comprometer a segurança estrutural. Além disso, o estudo abre caminho para a implementação de novas técnicas de fabricação que busquem maximizar a eficiência estrutural, promovendo avanços tecnológicos no setor e impulsionando a evolução das práticas construtivas em um contexto de sustentabilidade e inovação.

1.3 Objetivos

Os objetivos do respectivo estudo estão classificados em geral e específicos e são apresentados nos itens seguintes.

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal dimensionar e executar perfis de aço MR250 em diferentes arranjos, conforme as diretrizes da NBR 8800:2024. Posteriormente, esses perfis serão submetidos a ensaios experimentais, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com as previsões teóricas e a análise de falhas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Dimensionar peças comprimidas por meio da norma NBR 8800:2024, utilizando perfis cantoneira de aço MR250, em diferentes arranjos estruturais;
- Fabricar os modelos propostos e submetê-los ao ensaio de compressão;
- Identificar e apresentar uma análise comparativa entre os resultados teóricos e experimentais obtidos nos ensaios;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

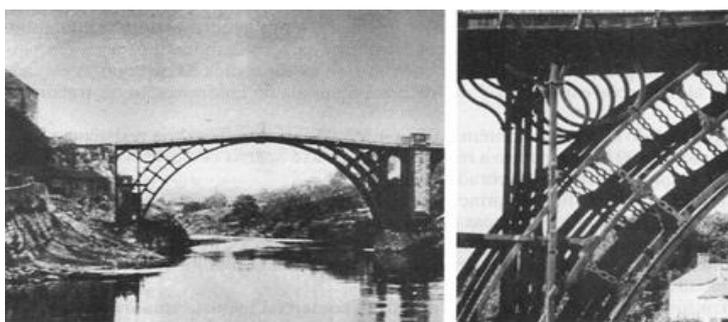
2.1 Origem e definições sobre material

Os metais ferrosos mais conhecidos incluem o ferro fundido, o ferro forjado e o aço, cada um com características e aplicações específicas. Entre eles, o aço se destaca como o mais relevante, amplamente utilizado devido à sua resistência e versatilidade.

Por volta de 6 mil anos antes de Cristo, já havia evidências de obtenção de ferro no Egito, Babilônia e Índia. Na época, esse metal, considerado raro e valioso, era empregado de forma restrita, com sua utilização limitada principalmente a fins militares ou como elemento ornamental em construções de prestígio. (BELLEI, 1998).

Com o passar dos anos, o ferro foi gradualmente consolidado como um material de construção, culminando na primeira obra de grande relevância feita inteiramente em ferro: a ponte sobre o Rio Severn, em Coalbrookdale, Inglaterra, construída em 1779, conforme ilustrado na Figura 01: Ponte sobre o Rio Severn. Essa ponte, com um vão de 42 metros, é formada por um arco de elementos de ferro fundido e permanece em uso até os dias atuais, simbolizando um marco na engenharia e no uso do ferro em grandes obras estruturais.

Figura 1 - Ponte sobre o Rio Severn



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

A partir disso, o metal passou a ser amplamente utilizado em diferentes formas, destacando-se o ferro fundido, ferro forjado e o aço. De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), o ferro fundido contém entre 2% e 4,3% de carbono e apresenta uma boa resistência à compressão, o que o torna ideal para aplicações em estruturas como colunas, suportes e componentes de máquinas. No entanto, sua vulnerabilidade à tração e a tendência a fraturar sob tensões de flexão limitam sua adequação para determinadas aplicações estruturais.

Por outro lado, o ferro forjado se distingue por seu baixo teor de carbono e pelo processo de forjamento, que envolve o aquecimento e a deformação mecânica do metal, resultando em um material mais maleável e dúctil. No entanto, atualmente, sua produção comercial é praticamente inexistente, devido a fatores como a evolução das técnicas de fabricação e a preferência por materiais alternativos que oferecem melhores características estruturais.

Entre os materiais mais utilizados na construção civil, o aço se destaca como uma liga de ferro carbono cujo teor de carbono varia de 0,008% a 2,11%. O aumento dessa concentração confere maior resistência ao material, embora o torne mais frágil. Em contrapartida, os aços com baixo teor de carbono apresentam menor resistência à tração, mas são mais dúcteis, o que os torna mais adequados para aplicações que exigem flexibilidade.

Em relação aos metais utilizados em estruturas, as resistências à ruptura por tração e compressão são equivalentes, apresentando valores que variam amplamente entre 300 MPa e mais de 1200 MPa (PFEIL E PFEIL, 2009).). Essa diversidade nas propriedades do aço permite sua aplicação em uma variedade de contextos na engenharia civil, adaptando-se às necessidades específicas de cada projeto.

Existem diversas categorias de aço cada qual com suas características, exemplo o aço estrutural, que são requeridas propriedades de ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, além da elevada relação entre a tensão resistente e a tensão de escoamento (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.2 Tipos de aços estruturais

De acordo com Bellei (1998), os aços estruturais são classificados em duas categorias principais: aços-carbono e aços de baixa liga, ambos os tipos podem ser submetidos a tratamentos térmicos, que alteram suas propriedades mecânicas, otimizando seu desempenho em aplicações específicas.

2.2.1 Aços-carbono

Os aços-carbono são os tipos de aço mais comuns, onde a resistência, em comparação ao ferro puro, é aumentada principalmente pela presença de carbono e, em menor grau, pelo manganês. À medida que o teor de carbono aumenta, observa-se um ganho na resistência e na

dureza do material. No entanto, ele se torna mais quebradiço, e sua soldabilidade é reduzida de forma significativa, conforme Bellei (1998). A Figura 2: Porcentagens máximas de elementos adicionais apresenta a composição dos aços-carbono em termos de porcentagem máxima de elementos adicionados.

Figura 2 - Porcentagens máximas de elementos adicionais.

carbono	2,0%	manganês	1,65%
silício	0,60%	cobre	0,35%

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Em função do teor de carbono, está classificado em três categorias, conforme demonstrado na Figura 3: Teor de carbono.

Figura 3 - Teor de carbono.

baixo carbono	$C < 0,29\%$
médio carbono	$0,30\% < C < 0,59\%$
alto carbono	$0,6\% < C < 2,0\%$

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Conforme Pfeil e Pfeil 920090, os principais tipos aços-carbono usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (American Society for Testing and Materials) e das normas europeias EN, são apresentados na Figura 4: Propriedades mecânicas de Aços-carbono (ASTM, 2004; ABNT, 2008).

Figura 4 - Propriedades mecânicas de Aços-carbono

Especificação	Teor de carbono ‰	Limite de escoamento f_y (MPa)	Resistência à ruptura f_u (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A7		240	370-500
ASTM A36	0,25-0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A307 (parafuso)	baixo	—	415
ASTM A325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EN S235	baixo	235	360

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.2.2 Aços de baixa liga

Os aços de baixa liga são os aços-carbono acrescidos de alguns elementos de liga, tais como cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio e zircônio. A partir disso, é possível melhorar algumas propriedades mecânicas, alguns elementos de liga produzem um aumento de resistência do aço através da modificação da microestrutura para grãos finos, com este feito, se eleva a resistência com o teor de carbono na ordem de 0,20%, permitindo a soldagem do aço sem preocupações maiores (PFEIL E PFEIL, 2009).

A Figura 05: Propriedades mecânicas de Aços de Baixa Liga mostra de forma resumida alguns tipos de aço de baixa liga usados em estruturas.

Figura 5 - Propriedades mecânicas de Aços de Baixa Liga

Especificação	Principais elementos de liga	Limite de escoamento f_y (MPa)	Resistência à ruptura f_u (MPa)
ASTM 572 Gr. 50	C < 0,23% Mn < 1,35%	345	450
ASTMA588	C < 0,17% Mn < 1,2% Cu < 0,50%	345	485
ASTMA992	C < 0,23% Mn < 1,5%	345	450

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

No Brasil, segundo Pfeil e Pfeil (2009), os aços de baixa liga são muito utilizados, tanto de alta e média resistência mecânicas, soldáveis e com características de elevada resistência atmosférica. Na Figura 06: Aços fabricados no Brasil são apresentados os aços fabricados no Brasil com suas composições químicas e propriedades mecânicas.

Figura 6 - Aços fabricados no Brasil

Nomenclatura	Composição Química (%)							Limite de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (% em 200 mm)
	C _{max}	Si _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	Cu _{max}	Outros			
1 - ASTM A36	0,26	0,40	—	0,04	0,05	—	—	250	400 (mín)	18
2 - ASTM A242 Gr. 1	0,15	—	1,00	0,15	0,05	0,20	—	345	485	18
ASTM A242 Gr. 2	0,20	—	1,35	0,04	0,05	0,20	—	345	485	18
3 - ASTM A572 Gr. 50	0,23	0,40	1,35	0,04	0,05	—	Nb 0,005-0,05	345	450	18
4 - USI - SAC - 300 (antigo 41)	0,20	0,50-1,50	1,50	0,060	0,020	0,05-0,40	Cr 0,60	300	400 a 550	5-12,7
5 - USI - SAC - 350 (antigo 50)	0,25	0,50-1,50	1,50	0,060	0,020	0,05-0,40	Cr 0,60	350	500 a 650	5-12,7

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.2.3 Propriedades dos aços estruturais

Para compreender o comportamento das estruturas de aço é essencial estar familiarizado com as propriedades do mesmo. Os diagramas tensão-deformação representam informações para compreender como será o comportamento do material trabalhado em uma determinada situação de carregamento e esforços, (BELLEI, 1998). Isso leva ao conhecimento de características físicas no metal estrutural que são conhecidas como:

1 - Ductilidade: denomina-se a capacidade de o material se deformar sob a ação de cargas até atingir sua ruptura.

2 - Fragilidade: ao contrário da ductilidade, o metal frágil rompe bruscamente sem aviso prévio e se dá pela ação de diversos agentes. Ex: soldas elétricas, efeitos térmicos e baixas temperaturas.

3 - Resiliência e Tenacidade: são duas propriedades que se relacionam com a capacidade do metal absorver energia mecânica.

4 - Fadiga: quando as peças metálicas trabalham sob efeito de esforços repetidos em grande número, pode haver ruptura em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos.

5- Corrosão: Denomina-se corrosão o processo de reação do aço com alguns elementos presentes no ambiente, ocorre a perda de seção das peças de aço, podendo constituir a causa principal de um colapso.

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024), os valores das propriedades mecânicas dos aços estruturais, para fins de cálculo, são determinados com base nas suas constantes físicas, as quais são:

- a) Módulo de elasticidade, $E = E_a = 200.000 \text{ MPa}$;
- b) Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- c) Módulo de elasticidade transversal, $G = 77.000 \text{ MPa}$;
- d) Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- e) Massa específica, $\rho_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$.

2.3 Classificação e Características NBR 7007:2022

Conforme a NBR 7007 (ABNT, 2022), que trata de aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral, os materiais são classificados com base no limite de escoamento (f_y) e

de ruptura (f_u). Entre as principais categorias destacam-se o MR250, equivalente ao ASTM A36, classificado como um aço de média resistência ($f_y = 250$ MPa e $f_u = 400$ MPa), e o AR350, definido como um aço de alta resistência ($f_y = 350$ MPa e $f_u = 450$ MPa) (PFEIL E PFEIL, 2009).

A NBR 8800 (ABNT, 2024) complementa esses parâmetros, incorporando outros tipos de aços estruturais, suas propriedades mecânicas e as respectivas normas técnicas aplicáveis. Esses dados estão detalhados no Anexo A, Tabela A.1 – Aços especificados por normas técnicas para uso estrutural da norma, conforme ilustrado na Figura 07: Aços Estruturais.

Figura 7 - Aços Estruturais

ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa
MR 250	250	400-560	CG-26 CG-28	255 275	410 440	CF-26	260/260	400/410
AR 350	350	450				CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	---/300	---/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	f_y MPa	f_u MPa
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450			
G-42	415	520	Q-40	380	480	CGR 500 e CGR 500A	370	490
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261					
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	f_y MPa	f_u MPa	Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular		
				f_y MPa	f_u MPa	f_y MPa	f_u MPa	
CFR 400	---/250	---/380	B	290	400	317	400	
CFR 500	310/370	450/490	C	317	427	345	427	

Fonte: ABNT 8800:2024

2.4 Vantagens e Desvantagens Estruturas de Aço

Como qualquer material, o aço apresenta características que devem ser analisadas para garantir seu desempenho e viabilidade técnica para cada projeto. A partir disso, segundo Bellei et al. (2008) e Bellei (1998) é possível observar as seguintes vantagens no aço:

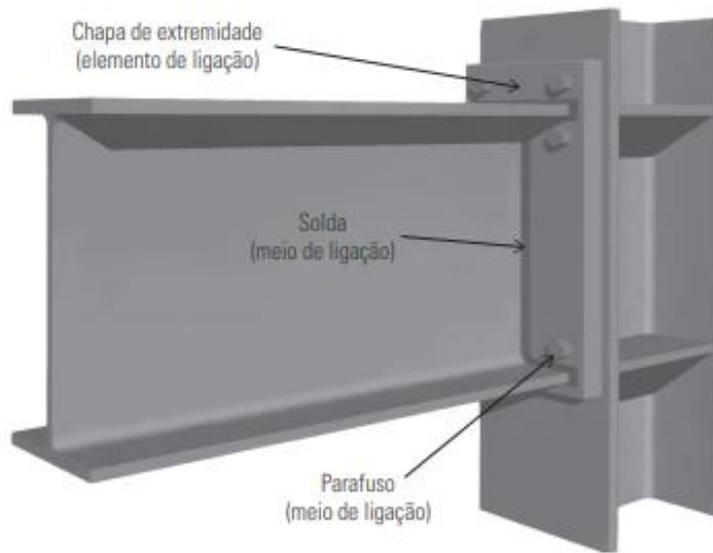
- a) O aço apresenta elevada resistência em comparação a outros materiais de construção;
- b) Seus elementos estruturais proporcionam uma ampla margem de segurança nas operações;
- c) Trata-se de um material homogêneo, cuja produção é realizada sob rigoroso controle de qualidade;
- d) Possui a vantagem de permitir a desmontagem das estruturas para posterior remontagem em outro local;
- e) Oferece a possibilidade de reaproveitamento do material em projetos futuros, caso não seja mais necessário na construção original;
- f) Destaca-se pela redução no prazo de execução das obras em comparação a outros sistemas construtivos;

Em contrapartida, Costa Júnior et al (2016) cita como desvantagens a sua suscetibilidade à corrosão, bem como ter precaução à flambagem de peças comprimidas devido à sua esbeltez, uma vez que estruturas esbeltas têm maior tendência a deformações laterais ou instabilidade quando submetidas a forças de compressão. Além disso, o aço possui baixa capacidade de resistência em situações de incêndio, o que demanda cuidados específicos.

2.5 Ligações Metálicas

De acordo com Bellei et al (2008) “Ligação é a união entre dois membros ou peças em qualquer tipo de estrutura”. Nas estruturas metálicas, essa ligação pode ser feita a partir de elementos como chapas, cantoneiras e enrijecedores, que servem para conectar as diferentes partes da estrutura, como vigas e pilares, por meio de parafusos ou soldas como ilustra a Figura 08: Ligações metálicas.

Figura 8 - Ligações Metálicas

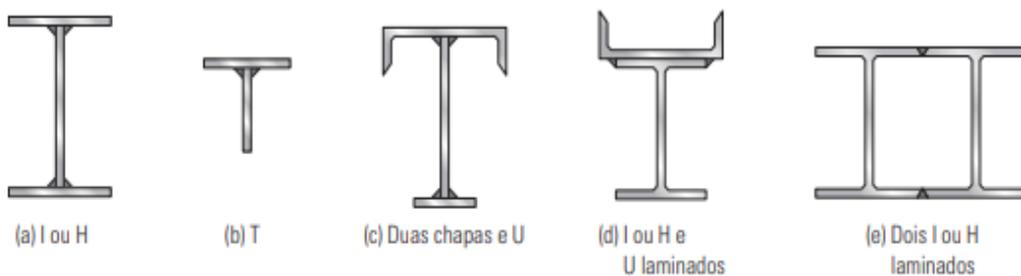


Fonte: Fakury (2016)

2.5.1 Ligações soldadas

As ligações soldadas em estruturas metálicas oferecem uma união robusta e durável entre os componentes. De acordo com Fakury (2016), os perfis soldados são compostos por dois ou mais perfis laminados, que são unidos por meio de soldagem elétrica. Este tipo de perfil é empregado quando há necessidade de seções transversais com dimensões superiores às dos perfis laminados convencionais. A figura 09: ilustra exemplos de perfis soldados, demonstrando como as junções realizadas por solda são empregadas para aumentar a capacidade estrutural das peças.

Figura 9 - Exemplos de Perfis Soldados



Fonte: Fakury (2016)

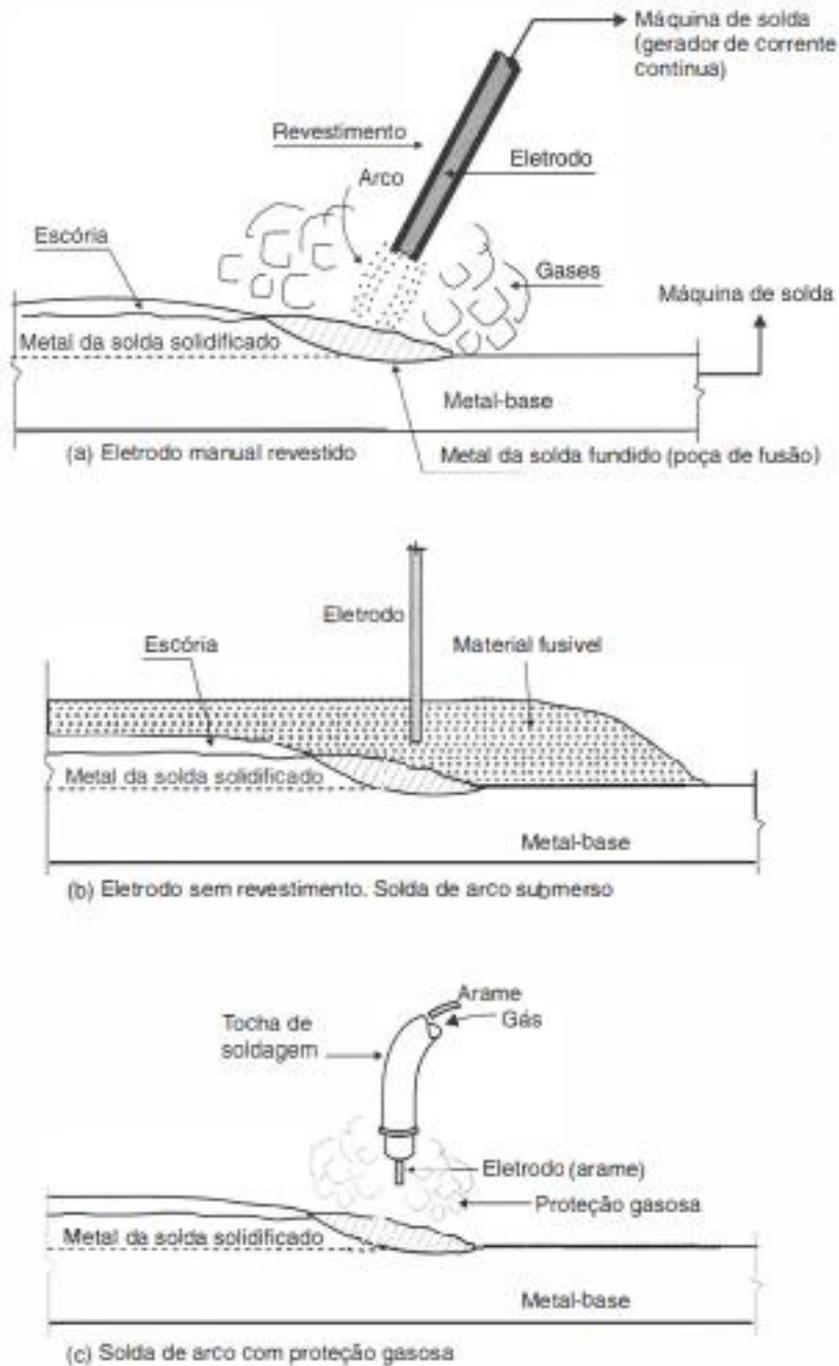
As ligações soldadas existem desde 1920, sendo amplamente utilizadas na engenharia estrutural, especialmente em edifícios e pontes. Dentre suas principais vantagens, destaca-se economia de material, pois a soldagem permite o aproveitamento integral do aço, sem desperdícios. Em algumas aplicações, como em estruturas de pontes e treliças, pode-se alcançar uma redução de até 15% ou mais no peso total da estrutura, resultando em uma economia significativa. Além disso, contudo a técnica apresenta desvantagens, como a redução do comprimento da estrutura devido aos efeitos cumulativos de retração (BELLEI et al, 2008).

2.5.1.1 Processos de Soldagens

As técnicas de soldagem variam de acordo com o tipo de eletrodo e o processo empregado, sendo cada uma adequada a diferentes materiais e exigências específicas. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), "o material fundido deve ser isolado da atmosfera para evitar a formação de impurezas na solda", o que pode ser realizado por diversos métodos, como ilustrado na Figura 10: Ligações soldadas. A seguir, apresentam-se os principais tipos de técnicas de soldagem:

- a) Eletrodo manual revestido: indicado para um número reduzido de emendas, este processo requer a utilização de eletrodos cujas características variam conforme o diâmetro das barras a serem soldadas e o tipo de aço empregado. A transmissão dos esforços entre as barras é feita de maneira direta e concêntrica através da solda, garantindo uma ligação sólida e eficaz;
- b) Arco submerso em material granular fusível: neste processo, utiliza-se um fio metálico sem revestimento como eletrodo, sendo que tanto o arco voltaico quanto o metal fundido são isolados por um material granular. Esse método oferece alta produtividade e qualidade nas soldagens, especialmente em espessuras maiores;
- c) Arco elétrico com proteção gasosa: o eletrodo é um arame sem revestimento, e a proteção da poça de fusão é realizada por um fluxo de gás, que é liberado pela tocha de soldagem. Esse tipo de soldagem é utilizado principalmente em ambientes controlados, garantindo a integridade da solda sem contaminação;
- d) Arco elétrico com fluxo no núcleo: o eletrodo utilizado é um tubo fino preenchido com um material que serve para proteger a poça de fusão. Esse processo é eficaz em termos de resistência e controle de qualidade da solda.

Figura 10 - Ligações soldadas



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.5.1.2 Tipos de Eletrodo

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), os eletrodos utilizados em soldagem por arco voltaico são geralmente compostos por varetas de aço-carbono ou aço de baixa liga. Baseando-

se na norma ASTM, os eletrodos revestidos são identificados por uma codificação do tipo E70XY, onde:

E = eletrodo;

70 = resistência à ruptura fw da solda em ksi;

X = número que se refere à posição de soldagem satisfatória;

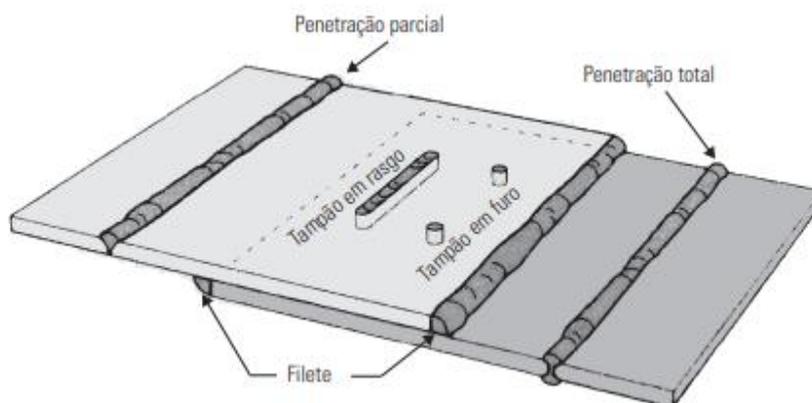
Y = número que indica tipo de corrente e de revestimento do eletrodo.

Os tipos mais comuns de eletrodos utilizados na indústria incluem o E60 (com resistência à ruptura fw = 60 ksi, equivalente a 415 MPa) e o E70 (com resistência à ruptura fw = 70 ksi, equivalente a 485 MPa) (PFEIL E PFEIL, 2009).

2.5.1.3 Tipos de Solda

Nas estruturas de aço, três tipos principais de solda são comumente empregados como, solda de penetração total ou parcial, solda de filete e solda de tampão aplicada em furos ou rasgos. A solda de penetração, geralmente, é indicada para juntas de topo, em "T", de canto e de aresta, garantindo elevada resistência e continuidade do material. Por outro lado, a solda de filete é amplamente utilizada em juntas com sobreposição e em "T", destacando-se por sua versatilidade e facilidade de aplicação. Já a solda de tampão é aplicada em juntas com trespasse, sendo especialmente útil para reforçar conexões e distribuir tensões de forma eficaz. Esses tipos de solda são fundamentais para atender às demandas estruturais e garantir a segurança e eficiência das construções metálicas, figura 11: Tipos de Solda.

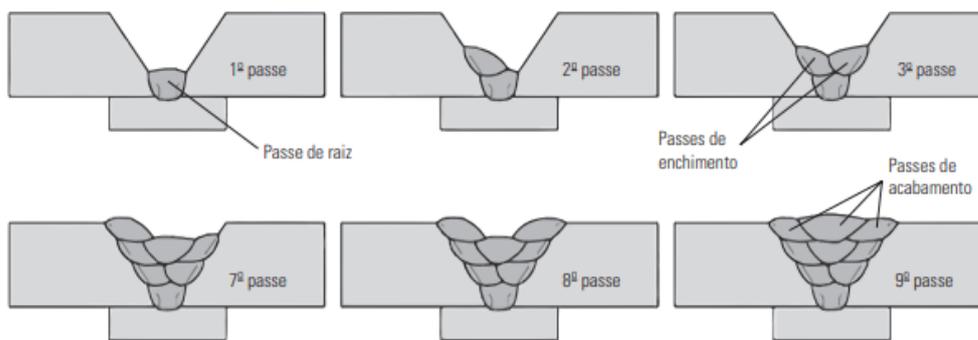
Figura 11 - Tipos de Solda



Fonte: Fakury (2016)

De acordo com Fakury (2016), a solda de penetração caracteriza-se pelo depósito do metal de solda diretamente entre as faces das peças a serem unidas, em chanfros. Quando o metal de solda atinge integralmente as duas faces das peças, proporcionando continuidade completa entre elas, a solda é classificada como de penetração total. Por outro lado, quando apenas uma parte da seção transversal das peças apresenta continuidade pela solda, trata-se de uma solda de penetração parcial, ambas ilustradas na Figura 12: Soldas de penetração.

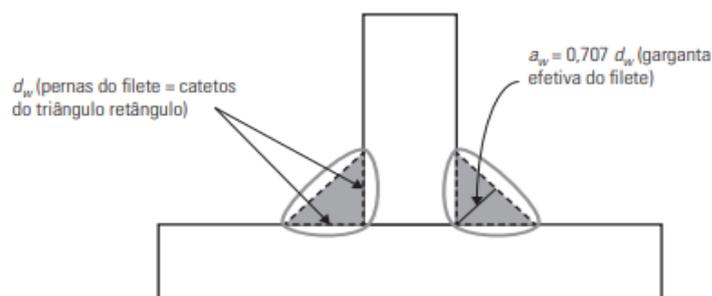
Figura 12 -Soldas de Penetração



Fonte: Fakury (2016)

Já a solda de filete é caracterizada por sua seção transversal aproximadamente triangular, posicionando-se externamente às superfícies, geralmente ortogonais, das peças de aço soldadas conforme Figura 13: Solda de filete. Os lados do filete, localizados ao longo das faces de fusão das peças, são denominadas pernas do filete (d_w) e podem ser iguais ou diferentes. A menor dimensão da seção transversal do filete, conhecida como espessura ou garganta efetiva (a_w), é um parâmetro essencial para o desempenho estrutural (FAKURY, 2016).

Figura 13 -Solda de filete



Fonte: Fakury (2016)

2.5.1.4 Simbologia solda

Com o objetivo de facilitar a representação nos desenhos técnicos dos diferentes tipos e dimensões de soldas, adotou-se uma simbologia convencional, baseado em Fakury (2016), os símbolos mais comuns empregados para indicação das soldas em projetos estão mostrados na Figura 14: Simbologia.

Figura 14 -Simbologia

Filete	Tampão	Chanfro			Cobre-junta	Solda em toda volta	Solda de campo	Acabamento	
		Reto	Meio V	V				Plano	Convexo
									

Fonte: Fakury (2016)

2.5.2 Ligações parafusadas

Conforme Bellei et al. (2008), as ligações parafusadas são amplamente utilizadas nas conexões de componentes estruturais, tanto em montagens finais no campo quanto nas realizadas em fábrica. Esse tipo de ligação apresenta diversas vantagens, destacando-se pela rapidez na fabricação das peças e pela maior resistência às tensões de fadiga. No entanto, suas desvantagens incluem a necessidade de verificação cuidadosa das áreas líquidas e esmagamento das peças, situações que frequentemente exigem o reforço das estruturas para garantir sua estabilidade e segurança.

Para a realização das ligações, os parafusos são empregados como meio de fixação. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), entre os tipos mais utilizados, destacam-se parafusos torneados, os parafusos ASTM A307 e os de alta resistência, que são escolhidos de acordo com as exigências estruturais e as condições de aplicação, de acordo a Figura 15: Parafusos Estruturais.

Figura 15 -Parafusos Estruturais

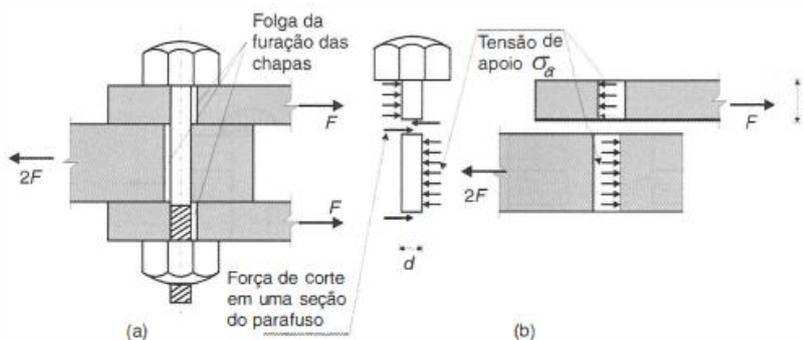
Tipo	Especificação	f_{yb} (MPa)	f_{ub} (MPa)	d_b	
				(mm)	(polegadas)
Comum	ASTM A307	–	415	–	1/2, 5/8, 3/4, 7/8, 1, 1 1/8, 1 1/4, 1 3/8, 1 1/2, 1 3/4, 2, 2 1/4, 2 1/2, 2 3/4, 3, 3 1/4, 3 1/2, 3 3/4, 4
	ISO Classe 4.6	235	400	12, 16, 20, 22, 24, 27, 30, 36	–
Alta resistência	ASTM A325	635	825	16, 20, 22, 24	1/2, 5/8, 3/4, 7/8, 1
		560	725	27, 30, 36	1 1/8, 1 1/4, 1 1/2
	ISO Classe 8.8	640	800	12, 16, 20, 22, 24, 27, 30, 36	–
	ASTM A490	895	1.035	16, 20, 22, 24, 27, 30, 36	1/2, 5/8, 3/4, 7/8, 1, 1 1/8, 1 1/4, 1 1/2
	ISO Classe 10.9	900	1.000	12, 16, 20, 22, 24, 27, 30, 36	–

Fonte: Fakury (2016)

2.5.2.1 Tipos de ligações parafusadas

Existem dois tipos principais de ligações em estruturas metálicas, o primeiro e mais comum, é a ligação do tipo apoio. Conforme descrito por Pfeil e Pfeil (2009), nesse tipo de ligação a transmissão do esforço F ocorre por meio do apoio das chapas no fuste do parafuso e do esforço de corte na seção transversal do parafuso, conforme ilustrado na Figura 16: Ligação do tipo apoio.

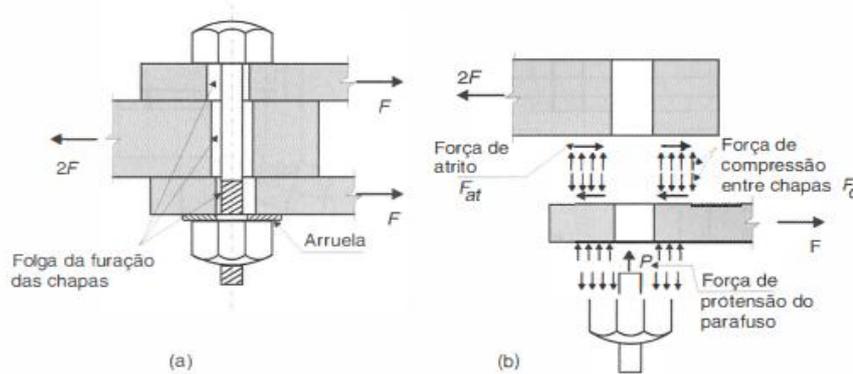
Figura 16 - Ligação do tipo apoio



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

O segundo tipo de ligação é a do tipo atrito. Nessa configuração, a transmissão do esforço F entre as chapas é realizada por atrito, sendo que o parafuso fica sujeito apenas à tração de instalação P , como mostrado na Figura 17: Ligação do tipo atrito.

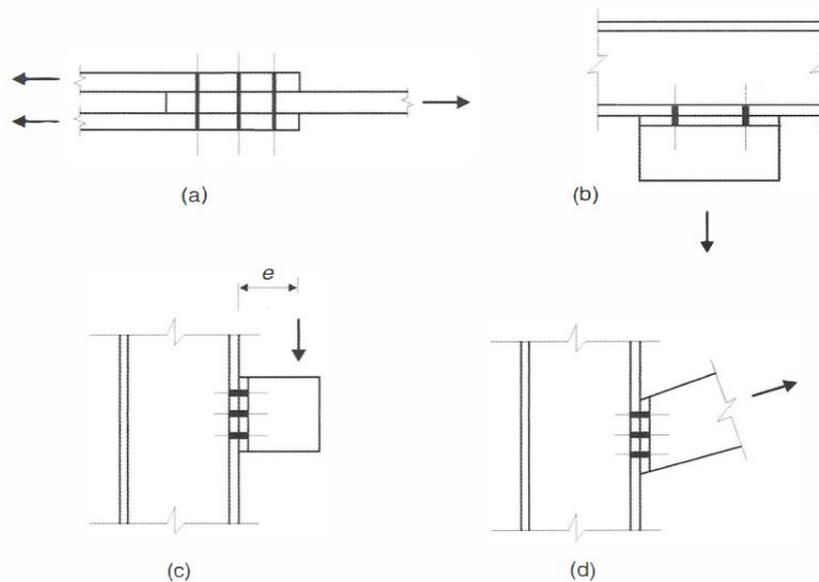
Figura 17 - Ligação do tipo atrito



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Além disso, as ligações podem ser classificadas quanto ao esforço solicitante dos conectores podendo ser (1) Esforço cortante (2) Tração axial e (3) Corte e tração como mostra a Figura 18: Classificação quanto ao esforço solicitante.

Figura 18 - Classificação quanto ao esforço solicitante



(a) Ligação por corte; (b) ligação por tração; (c) e (d) ligações a corte e tração dos conectores.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.6 Solicitações e Resistências de Projeto

Para iniciar o dimensionamento de uma estrutura, é necessário compreender os conceitos fundamentais que envolvem o comportamento dos materiais e as interações entre as forças aplicadas. A partir dessa compreensão, é possível determinar as solicitações e as resistências necessárias, garantindo a segurança e a eficiência da construção. Conforme NBR 8800 (ABNT, 2024) é necessário cumprir o seguinte parâmetro:

$$\text{Solicitação de projeto } (Sd) \leq \text{Resistência de projeto } (Rd)$$

Onde, a solicitação de projeto (Sd) ou solicitação de cálculo é obtida a partir de uma combinação das ações “ F_i ”, sendo cada uma delas majorada pelo coeficiente de segurança “ γ_{fi} ”. Já a resistência de projeto (Rd), por sua vez, é determinada com base na resistência característica do material (f_k), a qual é minorada pelo coeficiente de segurança “ γ_m ”.

A partir disso, os diversos valores dos coeficientes de ponderação das resistências como: γ_m do aço estrutural (γ_a), do concreto (γ_c) e do aço das armaduras (γ_s), são fornecidos na tabela a seguir Figura 19: Valores dos coeficientes de ponderação das resistências., em função da classificação da combinação última de ações. (ABNT,2024).

No caso do aço estrutural, que será aplicado na realização dos cálculos deste trabalho, são definidos dois coeficientes, γ_{a1} para estados-limites últimos relacionados ao escoamento, flambagem e instabilidade e γ_{a2} para a ruptura. (ABNT, 2024).

Figura 19 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.

Combinações últimas	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento 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

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: ABNT NBR 8800:2024

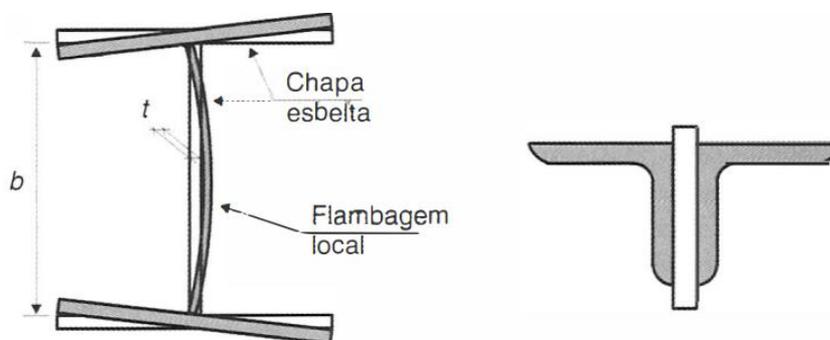
2.7 Comportamento do Aço Sob Esforço de Compressão

De acordo com Fakury (2016), no dimensionamento de barras submetidas à compressão, é essencial considerar os possíveis modos de colapso que podem comprometer a estabilidade estrutural. Dentre esses modos, destaca-se a instabilidade da barra, que ocorre devido à sua curvatura inicial e pode levar ao fenômeno conhecido como flambagem global.

Além disso, é necessário avaliar a possibilidade de flambagem local, que afeta os elementos individuais da seção transversal da barra, como a alma ou as mesas em seções do tipo "I" ou "H". A ocorrência dessa instabilidade está diretamente relacionada à esbeltez do elemento estrutural, expresso pela relação " b/t ", onde " b " se denomina pela altura da alma e, " t " pela largura da alma. (PFEIL e PFEIL, 2009). Esses fenômenos são fundamentais para a análise de desempenho estrutural e para o projeto seguro e eficiente de componentes metálicos

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), as peças comprimidas podem ser constituídas ou de seção simples ou de seção múltipla, conforme Figura 20: Seções. As peças de seção múltipla podem estar justapostas ou afastadas e ligadas por treliçados ao longo do comprimento.

Figura 20 – Seções

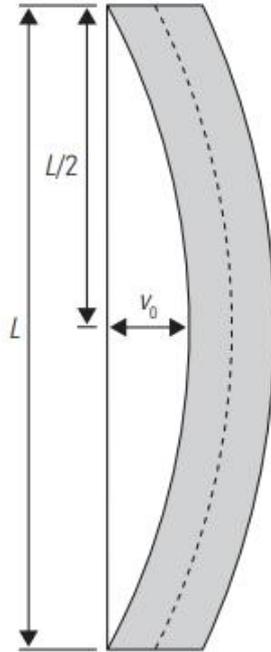


Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.7.1 Flambagem por Flexão

Conforme Pfeil e Pfeil (2009), o esforço de compressão intensifica o efeito da curvatura inicial presente nas peças. Os deslocamentos laterais resultantes caracterizam o fenômeno conhecido como flambagem por flexão, que provoca uma redução na capacidade de carga da barra comprimida, Figura 21: Flambagem Global por Flexão.

Figura 21 - Flambagem Global por Flexão



Fonte: Fakury (2016)

Os primeiros resultados teóricos sobre instabilidade foram obtidos pelo matemático suíço Leonhardt Euler (1707 - 1783), onde investigou o equilíbrio de uma coluna comprimida na posição deformada com deslocamentos laterais. O resultado obtido está ilustrado pelas duas retas identificadas na Figura 22: Análise do Comportamento de Colunas Sob Ação de Cargas Progressivas, por uma coluna idealmente perfeita pelas seguintes condições: (PFEIL e PFEIL, 2009).

- 1- Coluna isenta de imperfeições geométricas e tensões residuais.
- 2- Material de comportamento elástico linear.
- 3- Carga Perfeitamente centrada.

Nestas condições, a coluna se mantém sem deslocamentos laterais ($\delta = 0$), até atingir a carga crítica de Euler (eq. 01).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l^2} \quad (1)$$

Onde:

N_{cr} = Carga crítica;

E = Módulo de elasticidade = $E_a = 200.000$ MPa;

l = Largura do vão.

A partir dessa carga, o equilíbrio na configuração retilínea é perdido. Passam a ocorrer deslocamentos laterais, e a coluna fica submetida à flexocompressão. Ao dividir a carga crítica pela área da seção transversal da haste, calcula-se a tensão crítica (*eq. 02*).

$$f_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E l}{A l^2} = \frac{\pi^2 E}{(l/i)^2} \quad (2)$$

Onde:

l/i = Índice de esbeltez da haste;

$i = \sqrt{I/A}$ = Raio de giração da seção, em relação ao eixo de flambagem.

As colunas reais apresentam imperfeições geométricas decorrentes dos processos de fabricação, e na prática, nem sempre é possível assegurar a perfeita centralização do carregamento. Nas Figuras 22(b) e 22(c), são ilustrados os casos de imperfeição geométrica (δ_0) e de excentricidade de carga na coluna (e_0). Dessa forma, o fenômeno de flambagem ocorre com flexão desde o início do carregamento, conforme mostrado na Figura 22(d), (PFEIL e PFEIL, 2009).

O esforço normal em uma coluna com imperfeição geométrica gera uma excentricidade adicional δ , resultando em uma flecha total δ_t (*eq. 03*)

$$\delta_t = \frac{\delta_0}{1 - N/N_{cr}} \quad (3)$$

A coluna imperfeita de material elástico observa a ocorrência de flexocompressão em toda extensão do caminho de equilíbrio com as tensões máximas (*eq. 04*).

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{N \delta_t}{W} \quad (4)$$

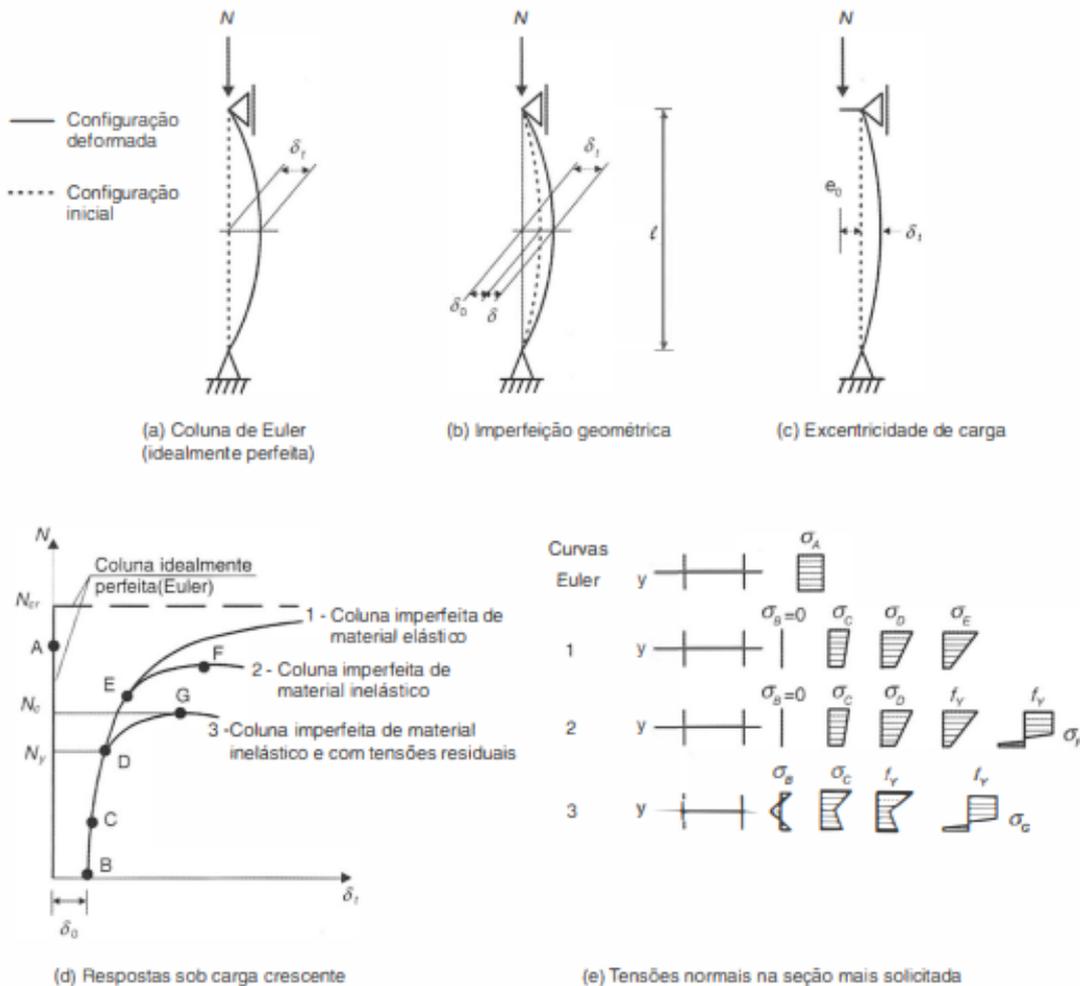
Onde:

$N\delta_t$ = Momento fletor atuante na seção do meio do vão;

W = Módulo elástico a flexão.

As colunas fabricadas em aço apresentam imperfeições geométricas e estão sujeitas a tensões residuais (σ) originadas durante os processos de fabricação. Essas tensões residuais se somam às tensões geradas pelo carregamento, o que pode induzir o início da plastificação sob a ação da carga N_y (representado pelo ponto D na Figura 22 (d)). A partir desse ponto, a coluna segue o trajeto da curva 3, atingindo sua resistência máxima sob a ação da carga N_c (ponto G na Figura 22(d)), (PFEIL e PFEIL, 2009).

Figura 22 - Análise do Comportamento de Colunas Sob Ação de Cargas Progressivas



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

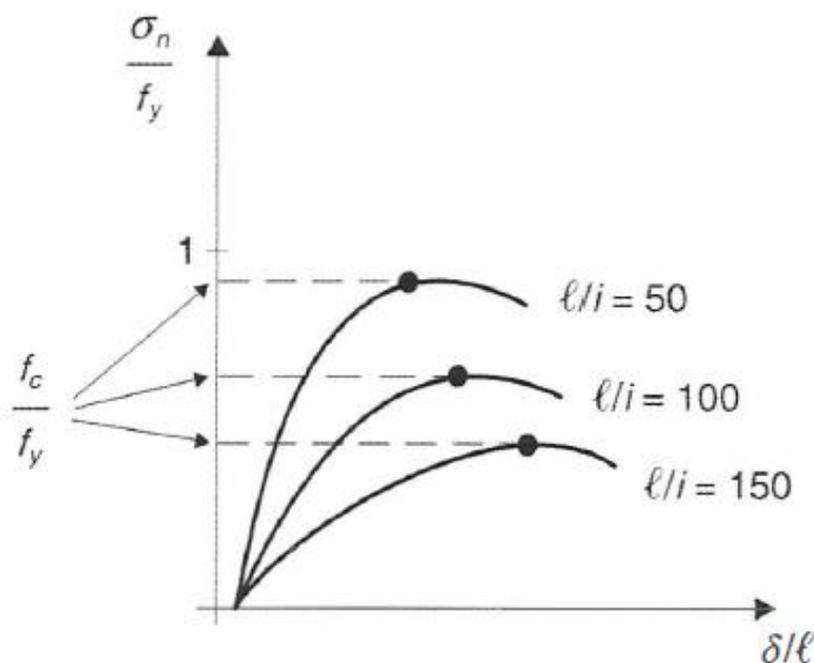
Por Pfeil e Pfeil (2009, a carga (N_c), é denominada carga última ou resistente, como mostra a figura 22(d) pode ser bem menor que a carga crítica (N_{cr}) da coluna de Euler

correspondente. A tensão última nominal (f_c) é obtida admitindo-se somente a ação do esforço normal (N_c) sem flexão na seção transversal da área A (eq. 05).

$$f_c = \frac{N_c}{A} \quad (5)$$

A tensão última (f_c) depende da esbeltez (l/i) da coluna em torno do eixo em que se dá a flambagem. Figura 23: Comportamento de Colunas com Diferentes Índices de Esbeltez. Quanto mais esbelta a coluna, mais deformável será seu comportamento e menor será a tensão última.

Figura 23 - Comportamento de Colunas com Diferentes Índices de Esbeltez



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

A Figura 24: Variação de Resistência de Uma Coluna Comprimida em Função do Índice de Esbeltez l/i . Apresenta a variação da tensão última f_c dividida pela tensão de escoamento f_y do material, em função do índice de esbeltez (l/i). A curva tracejada representa uma curva perfeita com material elástico perfeitamente plástico, onde notam-se duas regiões (PFEIL e PFEIL, 2009).

- a) Para $f_{cr} < f_y$ a tensão última f_c é a própria tensão crítica f_{cr} ;

b) Para $f_{cr} > f_y$ a tensão última f_c pode ser dada como igual a f_y .

Devido aos efeitos das imperfeições geométricas e das tensões residuais, o conjunto de valores de tensões últimas obtido a partir de resultados experimentais apresenta uma distribuição conforme mostrado na Figura 12, que é comparada à curva da coluna perfeita. Para colunas curtas, observa-se que os valores experimentais de σ_c são superiores a σ_y devido encurtamento do aço (PFEIL e PFEIL, 2009).

A curva em linha contínua na imagem do gráfico Figura 20 representa o critério de resistência de uma coluna, com a presença de três regiões distintas:

- Colunas muito esbeltas (valores elevados de esbeltez l/i) onde ocorre flambagem em regime elástico $f_{cr} < f_y$ e onde $f_c \approx f_{cr}$;
- Colunas de esbeltez intermediária, nas quais há maior influência das imperfeições geométricas e das tensões residuais;
- Colunas curtas (valores de esbeltez l/i baixos), nas quais a tensão última f_c é tomada igual à de escoamento do material f_y .

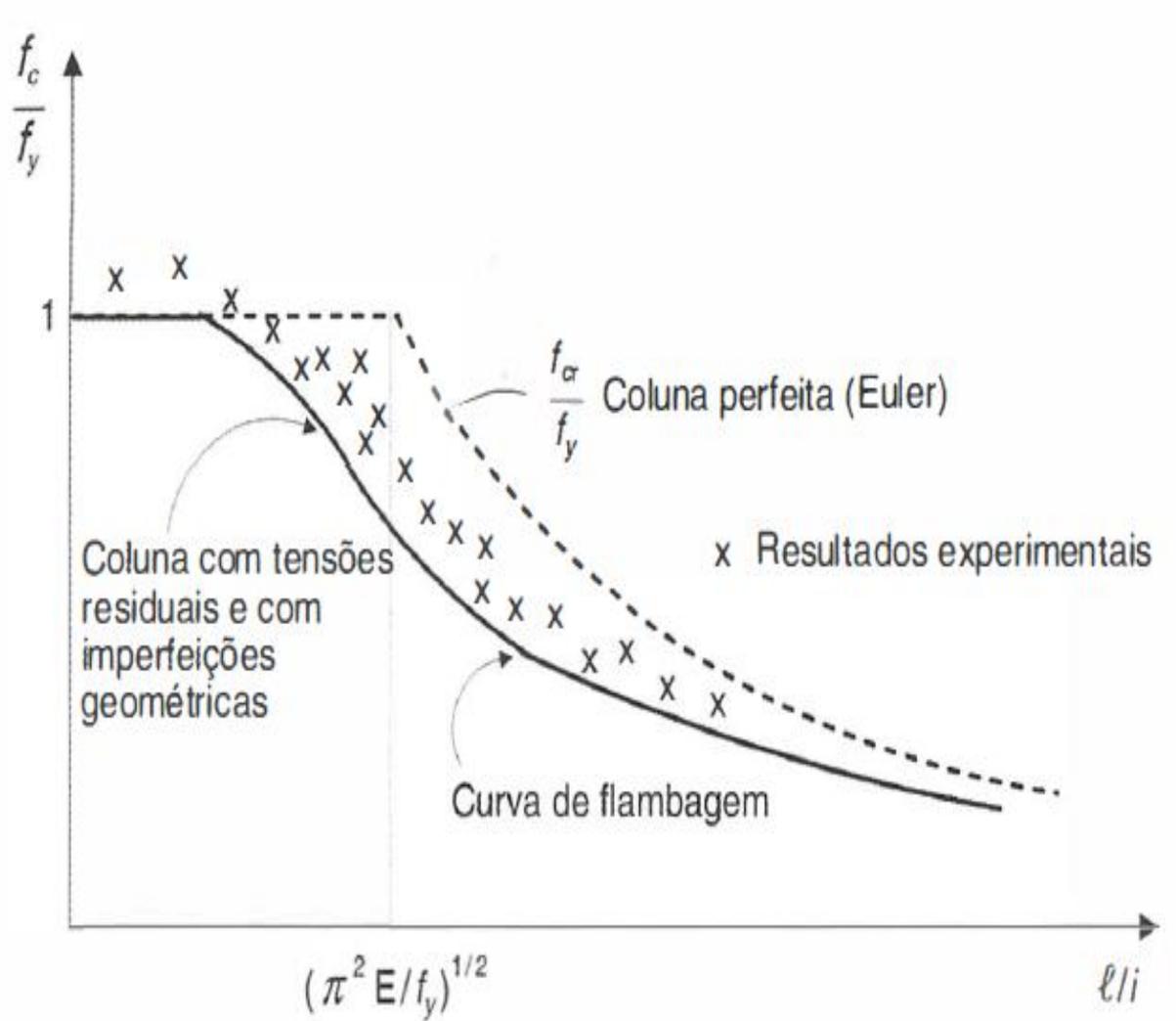
Fazendo uma comparação entre as resistências de perfis com diferentes aços, a curva em linha cheia da figura 12 deve ser apresentada com as coordenadas f_c/f_y e o índice de esbeltez reduzido, λ_0 (eq. 06).

$$\lambda_0 = \frac{Kl/i}{\left(\pi^2 E / F_y\right)^{1/2}} = \frac{Kl}{i} \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 E}} \quad (6)$$

Onde K é o coeficiente que define o comprimento efetivo de flambagem e índice de esbeltez reduzido pode ainda ser obtido pela Equação 07.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_{cr}}} \quad (7)$$

Figura 24 - Variação de Resistência de Uma Coluna Comprimida em Função do Índice de Esbeltez l/i .



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.7.1.1 Comprimento de Flambagem

Pfeil e Pfeil (2009) diz que, o comprimento de flambagem de uma haste corresponde à distância entre os pontos onde o momento é nulo na haste comprimida e deformada lateralmente. No caso de uma haste birrotulada, o comprimento de flambagem é igual ao comprimento total da haste.

Para elementos isolados com as seis condições de contorno mais comuns, o comprimento de flambagem por flexão, igual produto entre o coeficiente de flambagem por flexão K e o comprimento destravado L , é fornecido na figura 25: Comprimento de Flambagem

por Flexão de Elementos Isolados. Na Figura 25: Comprimento de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados, as linhas 2 e 3 mostram os valores teóricos de K e KL para as várias condições de contorno. Na prática quase nunca se executa o engastamento perfeito a ABNT NBR 8800:2024 prescreve a utilização dos valores recomendados nas linhas 4 e 5.

Figura 25 - Comprimento de Flambagem por Flexão de Elementos Isolados

1	CONDIÇÕES DE CONTORNO							
	OBS.: a) a linha tracejada mostra o eixo da barra após a flambagem b) comprimento reto das barras igual a L							
2	Valores teóricos	K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
3		KL	0,5 L	0,7 L	1,0 L	1,0 L	2,0 L	2,0 L
4	Valores recomendados	K	0,65	0,8	1,2	1,0	2,1	2,0
5		KL	0,65 L	0,8 L	1,2 L	1,0 L	2,1 L	2,0 L
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO				rotação e translação transversal impedidas				
				rotação livre e translação transversal impedida				
				rotação impedida e translação transversal livre				
				rotação e translação transversal livres				

Fonte: Fakury (2016)

Nos pontos de inflexão o momento fletor é nulo, assim, a carga crítica de uma haste, independentemente do tipo de apoio, equivale à carga crítica de uma haste birrotulada com comprimento efetivo l_{ft} . Em regime elástico, a carga crítica de qualquer haste pode ser determinada utilizando a Fórmula de Euler (eq. 08) (PFEIL E PFEIL, 2009).

$$N_{cr} = N_E = \frac{\pi^2 EI}{l_{ft}^2} \quad (8)$$

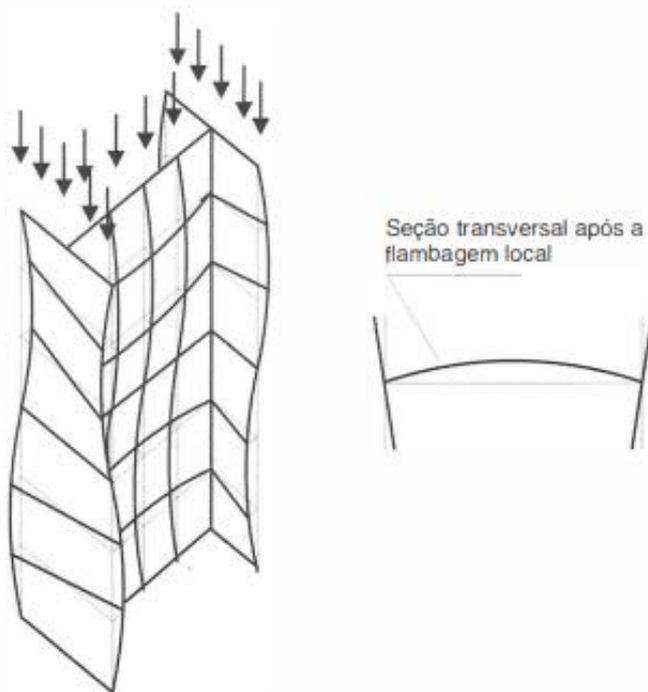
Onde,

$l_{ft} = K_i$, sendo K o parâmetro de flambagem.

2.7.2 Flambagem Local

A flambagem das placas que constituem um perfil comprimido pode ser observada em diferentes situações. Na Figura 26: Coluna Curta Após Flambagem Local, é apresentada uma coluna curta que não sofre flambagem global por flexão. Nesse caso, as placas comprimidas exibem deslocamentos laterais em forma de ondulações, caracterizando a flambagem local. Já em colunas esbeltas formadas por chapas igualmente esbeltas, ocorre uma interação entre os fenômenos de flambagem global por flexão e flambagem local das chapas, resultando em uma redução da carga última da coluna caso a flambagem local não seja considerada (PFEIL E PFEIL, 2009).

Figura 26 - Coluna Curta Após Flambagem Local



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.7.2.1 Flambagem da Placa Isolada

A flambagem pode ocorrer tanto em placas compactas quanto em placas esbeltas. Nas placas compactas, que apresentam uma baixa relação entre largura e espessura (b/t), o encurtamento (Δ) aumenta de forma linear com a carga (P) até que a seção atinja a plastificação ($P=P_y$). Por outro lado, em placas esbeltas, caracterizadas por um alto valor de b/t , ocorre

a flambagem local ($P=P_{cr}$), evidenciada pelo surgimento de deflexões laterais e pela consequente diminuição da rigidez da placa, (PFEIL E PFEIL, 2009).

Pfeil e Pfeil (2009) diz que, o intervalo de carga entre a carga crítica local (P_{cr}) e a carga última da placa (P_u) é denominado reserva de resistência pós-flambagem. Essa reserva tende a ser maior quanto mais esbelta for a placa. Na Figura 27: Comportamento da Placa Isolada, é ilustrado o comportamento de uma placa isolada submetida a compressão uniforme, com cargas permanentes e apoios nos bordos laterais.

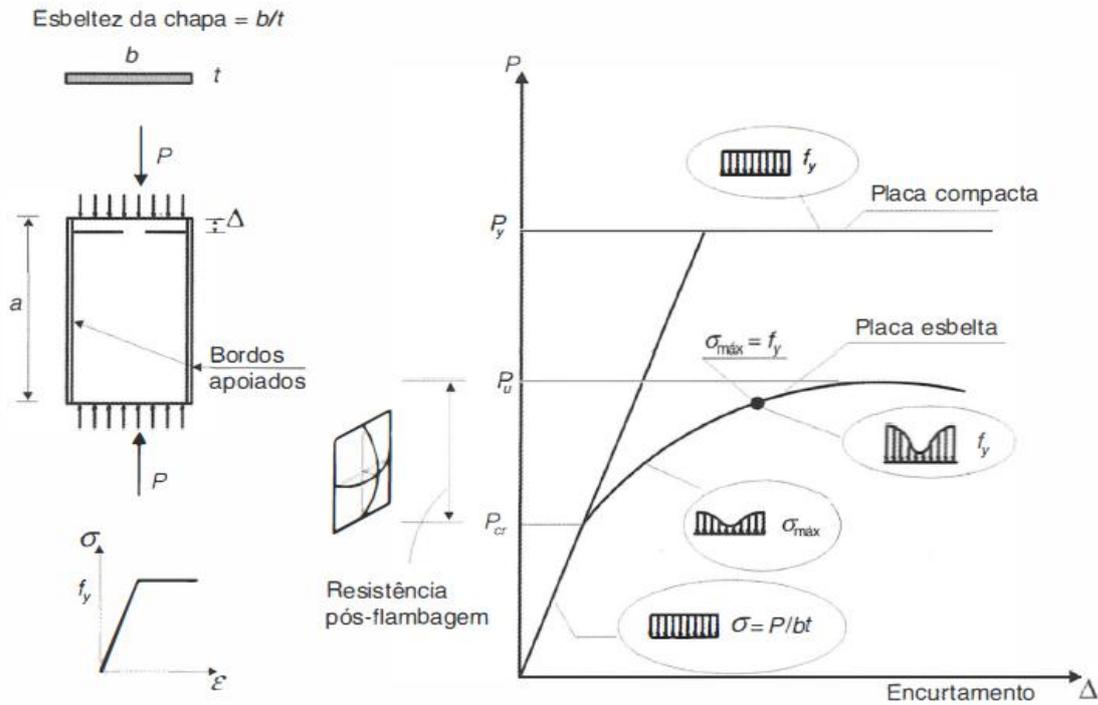
Destaca-se também na mesma figura a evolução da distribuição de tensões na seção transversal da placa. Antes de atingir a carga crítica local ($P > P_{cr}$), a distribuição de tensões é uniforme. Contudo, ao superar P_{cr} a distribuição torna-se não uniforme, caracterizada pela redução progressiva das tensões na região central da placa e pelo aumento nas regiões próximas aos bordos. Esse comportamento fundamenta o conceito de largura efetiva, amplamente utilizado no dimensionamento de colunas formadas por chapas esbeltas, (PFEIL e PFEIL, 2009).

A tensão crítica de flambagem local (eq.09) de uma placa perfeita foi obtida por Timoshenko (1959).

$$\left(\frac{b}{t}\right)_r = \sqrt{\frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)f_y}} = 0,95\sqrt{k} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (9)$$

Onde k é um coeficiente que depende das condições de apoio da placa e da relação largura/altura (b/a).

Figura 27 - Comportamento da Placa Isolada



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

2.7.2.2 Critérios para Impedir Flambagem Local

Para uma placa isolada considerada perfeita, o limite de esbeltez (b/t) necessário para evitar que a flambagem local ocorra antes da plastificação da seção é determinado ao igualar a tensão crítica elástica (σ_{cr}) à tensão de escoamento (f_y), (eq.10), (PFEIL e PFEIL, 2009).

$$(\sigma_{cr}) = \frac{P_{cr}}{bt} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (10)$$

Onde:

$k = 4$ para bordos apoiados;

$k = 0,425$ para um bordo apoiado e outro livre.

A ABNT NBR 8800:2024 expressa valores limites (b/t) a fim de considerar os efeitos de imperfeições e de tensões residuais, como demonstrado na Figura 28: Valores de $(b/t)_{lim}$. Os diferentes valores para os variados exemplos têm origem nas condições de apoio das placas.

Figura 28 - 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 (ver 5.1.3) - Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos 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-caixão - Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	- Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas espaçadoras		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> - Mesas de seções I, H, T ou U laminadas - Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas 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	- Mesas de seções I, H, T ou U soldadas ^a		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$
	6	- Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$, sendo $0,35 \leq k_c \leq 0,76$

Fonte: ABNT NBR 8800:2024

2.7.2.3 Barras Prismáticas Submetidas à Força Axial de Compressão

A ABNT NBR 8800:2024 entrega as condições de dimensionamento de barras prismáticas submetidas a compressão, que devem ser:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Sendo, $N_{c,Sd}$ a força axial de compressão solicitante no cálculo e $N_{c,Rd}$ a força de compressão solicitante no cálculo.

A força axial de compressão resistente no cálculo, sendo ela associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, torção, ou flexo torção e de instabilidade local deve ser determinada pela equação 11.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (11)$$

Onde:

χ – fator de redução associada à resistência de compressão;

A_{ef} – Área efetiva;

f_y – tensão de escoamento do material;

γ_{a1} – coeficiente de ponderação das resistências.

2.7.2.4 Fator de Redução χ

Segundo a ABNT NBR 8800:2024, o fator de redução associado à resistência de compressão χ , é calculado pelas seguintes equações 12 e 13.

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (12)$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (13)$$

Sendo λ_0 o índice de esbeltez reduzido (eq.14).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (14)$$

Onde:

A_g – área bruta da seção transversal da barra (dada pelo fornecedor).

f_y – tensão de escoamento do material.

N_e - é a força axial de flambagem.

2.7.2.5 Area Efetiva da Seção Transversal

A ABNT NBR 8800:2024 diz, que os elementos que fazem parte das seções transversais usuais, exceto tubulares e circulares, para efeito de flambagem são classificados em AA (duas bordas longitudinais apoiadas, grupos 1 e 2 da figura 28) e AL (uma borda longitudinal apoiada e outra livre, grupos de 3 a 6 da figura 28).

Considerar a área efetiva da seção transversal (A_{ef}) igual à área bruta (A_g), se todos os elementos componentes da seção transversal possuem relação entre largura e espessura (b/t) igual ou inferior ao valor de $(b/t)_{lim}$, fornecido na Figura 28: Valores de $(b/t)_{lim}$, caso contrário, devem ser calculadas as larguras efetivas de cada elemento (eq.15) e (eq.16), e depois calcular a área efetiva da seção (ABNT NBR 8800:2024).

$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow b_{ef} = b \quad (15)$$

$$\frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}} \rightarrow \quad (16)$$

$$b_{ef} = b \left(1 - C_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{X f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{X f_y}}$$

Onde:

b - Largura do elemento.

b_{ef} - Largura efetiva do elemento.

σ_{el} - Tensão de flambagem local (eq.17) a seguir ou por análise de estabilidade.

$$\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t} \right)^2 \quad (17)$$

C1 e C2 - São fatores dados na Figura 29: Fatores c1 e c2 Para Cálculo de Flambagem Local.

Figura 29 - Fatores c1 e c2 Para Cálculo de Flambagem Local.

Elemento	c ₁	c ₂
AA (exceto paredes de seções tubulares retangulares)	0,18	1,31
Paredes de seções tubulares retangulares	0,20	1,38
AL	0,22	1,49

Fonte: ABNT NBR 8800:2024

A área efetiva de seções tubulares é calculada conforme (eq.18) e (eq.19):

$$\frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \rightarrow A_{ef} = A_g \quad (18)$$

$$0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \rightarrow \quad (19)$$

$$A_{ef} = \left[\frac{0,038 E}{D/t f_y} + \frac{2}{3} \right] A_g$$

Onde:

D - Diâmetro externo da seção tubular circular.

t - Espessura da parede do tubo.

Não é prevista a utilização de seções tubulares circulares com relação D/t superior a 0,45 E/fy, (ABNT NBR 8800:2024).

2.7.3 Peças de Seção Múltipla

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), as peças conhecidas como de seção múltipla, também denominadas peças múltiplas, caracterizam-se por serem formadas a partir da associação de

diferentes peças simples. Essa composição ocorre por meio de ligações descontínuas, que permitem integrar os elementos individuais em uma estrutura única, ampliando sua funcionalidade e aplicabilidade em diversos contextos.

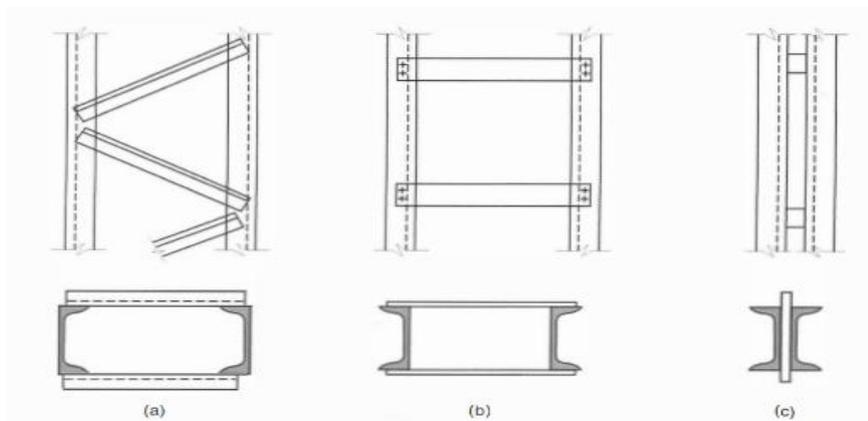
Em geral, identificam-se três tipos de colunas em seção múltipla conforme ilustrado na Figura 32: Peças de Seção Múltipla.

- a) Peças ligadas por arranjos treliçados;
- b) Peças ligadas por chapas igualmente espaçadas;
- c) Peças justapostas, com afastamento igual à espessura das chapas espaçadas.

A determinação do esforço normal de uma coluna de seção múltipla envolve três aspectos.

- A flambagem da coluna como um todo;
- A flambagem das peças componentes;
- As forças atuantes nas ligações.

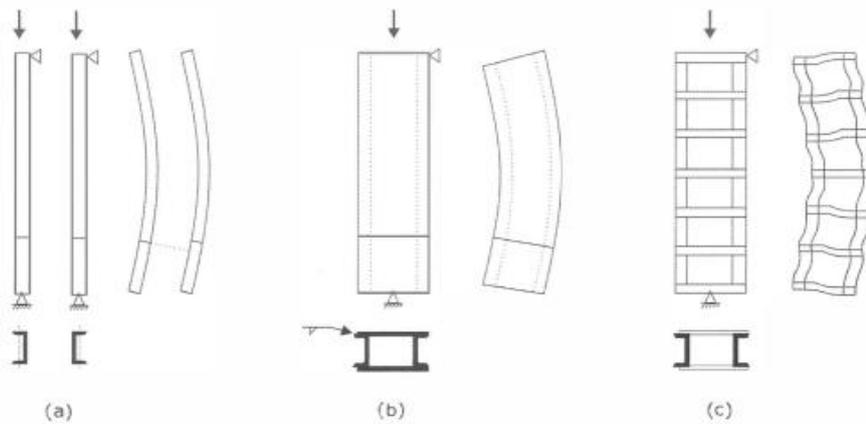
Figura 30 - Peças de Seção Múltipla



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

O comportamento estrutural de uma coluna como um todo depende da flexibilidade gerada tanto pela flexão quanto pelo cisalhamento, além da deformabilidade das ligações que integram seus componentes. No caso específico das colunas múltiplas, o efeito das deformações resultantes do cisalhamento torna-se ainda mais evidente, pois expõe uma distorção de uma seção inicialmente reta na flambagem de uma coluna múltipla, (PFEIL E PFEIL, 2009). Na Figura 31: Flambagem de Peças Múltiplas podemos observar a distorção de uma seção originalmente reta.

Figura 31 - Peças de Seção Múltipla



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Pfeil e Pfeil (2009), mostra que na Figura 31, ainda existem aspectos para serem analisados:

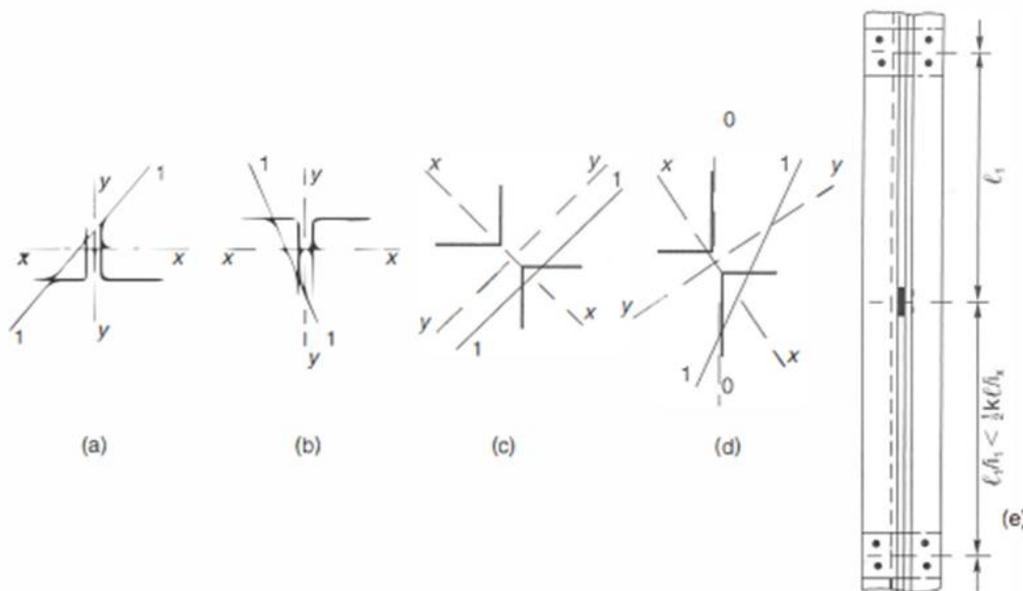
- Duas hastes, não conectadas entre si, são submetidas a uma compressão axial N , ocorre uma deformação lateral que transforma uma seção originalmente plana em dois planos distintos. Nesse contexto, a ausência de ligação entre as hastes resulta em comportamentos independentes para cada uma delas. A carga última da coluna, nesse caso, é calculada considerando o momento de inércia equivalente à soma dos momentos de inércia individuais das seções de cada haste. Essa abordagem reflete a contribuição isolada de cada haste para o desempenho global da coluna sob compressão.
- Quando as hastes possuem uma ligação contínua entre si, o momento de inércia do conjunto torna-se significativamente superior ao momento de inércia das seções isoladas, resultando em uma carga última mais elevada. Nesse cenário, uma seção inicialmente plana das duas hastes mantém-se plana mesmo após a ocorrência de deformações laterais. Essa configuração assegura que as hastes trabalhem de forma integrada, comportando-se como um único perfil simples.
- Quando duas hastes estão conectadas por barras horizontais, a análise dessa estrutura com ligações discretas, considerando-a como uma peça contínua e de seção uniforme, exige a consideração das deformações geradas pelo cisalhamento. Essas deformações resultam em distorções da seção reta original. Observando as hastes deformadas, nota-se que uma seção originalmente plana das duas hastes se transforma em dois planos

distintos. Contudo, o deslocamento relativo entre as hastes é significativamente menor do que no caso de hastes sem ligação.

2.7.3.1 Critério de Dimensionamento de Peças Múltiplas

Em estruturas compostas por peças múltiplas ligadas por barras ou cantoneiras, formando planos treliçados, a comparação entre diferentes arranjos treliçados revela que configurações em laços simples ou duplos podem apresentar um índice de esbeltez fictício (l_f/i) bastante similar ao índice de esbeltez de uma coluna com ligações contínuas, conforme Figura 32: Peças comprimidas formadas por associação de cantoneiras justapostas com ligações descontínuas. No entanto, para que essa equivalência seja alcançada, é fundamental que sejam respeitadas determinadas condições geométricas, garantindo a eficiência estrutural e a estabilidade do sistema (PFEIL E PFEIL, 2009).

Figura 32 - Peças comprimidas formadas por associação de cantoneiras justapostas com ligações descontínuas



Legenda: (a) cantoneiras de abas iguais; (b) cantoneiras de abas desiguais, lado a lado; (c) cantoneiras de abas iguais, opostas pelo vértice; (d) cantoneiras de abas desiguais, opostas pelo vértice; (e) vista longitudinal da coluna mostrando chapas de ligação.

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Os efeitos da excentricidade da força de compressão atuante em uma cantoneira simples podem ser considerados por meio de um comprimento destravado equivalente, desde que sejam

atendidas algumas condições específicas. Primeiramente, a cantoneira deve ser carregada nas extremidades através da mesma aba e conectada em cada extremidade por meio de solda ou com, no mínimo, dois parafusos posicionados na direção da solicitação. Além disso, a cantoneira não pode ser submetida a ações transversais intermediárias e deve apresentar uma relação $(L_{x1,eq}/r_{x1})$, que exceda 200. Também é necessário que a relação entre a largura da aba maior e a da aba menor não ultrapasse 1,7, e que a relação “b/t” não exceda $0,71\sqrt{E/F_y}$. O cumprimento dessas condições assegura a eficácia da consideração dos efeitos da excentricidade no comportamento estrutural da cantoneira, (ABNT NBR 8800:2024).

Neste caso, a força axial de flambagem da cantoneira, “Ne”, é calculada conforme (eq.20).

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_{x1}}{L_{x1,eq}^2} \quad (20)$$

Onde:

I_{x1} = Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$L_{x1,eq}$ = Comprimento destravado equivalente.

Conforme NBR 8800 (ABNT, 2024), para cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são barras individuais ou diagonais ou montantes de treliças planas com as barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas, segue as condições da (eq.21) e (eq.22).

$$L_{x1}/r_{x1} \leq 80 \rightarrow L_{x1,eq} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1} \quad (21)$$

$$L_{x1}/r_{x1} > 80 \rightarrow L_{x1,eq} = 32r_{x1} + 1,25L_{x1} \quad (22)$$

Onde:

L_{x1} = comprimento da cantoneira, considerado entre os pontos de trabalho situados nos eixos longitudinais das cordas da treliça;

r_{x1} = raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada.

Nas cantoneiras de abas desiguais com relação entre as larguras das abas de até 1,7 e conectadas na menor aba, “ $L_{x1,eq}$ ” não pode ser considerado inferior aos seguintes valores:

0,95 $L_{x1} \cdot r_{x1} / r_{min}$ ou as equações 20 e 21 aumentadas de $4[(be/bs)^2 - 1] r_{x1}$, (ABNT NBR 8800:2024).

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024). Para cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são diagonais ou montantes de treliças espaciais com as barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas, os critérios devem ser seguidos conforme (eq.23) e (eq.24)

$$L_{x1}/r_{x1} \leq 75 \rightarrow L_{x1,eq} = 60r_{x1} + 0,80L_{x1} \quad (23)$$

$$L_{x1}/r_{x1} \leq 75 \rightarrow L_{x1,eq} = 45r_{x1} + L_{x1} \quad (24)$$

Nas cantoneiras de abas desiguais com relação entre as larguras das abas de até 1,7 e conectadas na menor aba, “ $L_{x1,eq}$ ” não pode ser considerado inferior aos seguintes valores: $0,82L_{x1} \cdot r_{x1} / r_{min}$ ou as equações 23 e 24 aumentadas de $6[(be/bs)^2 - 1]r_{x1}$, (ABNT NBR 8800:2024).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em duas etapas, como etapa inicial, foi realizada uma pesquisa em fontes bibliográficas, artigos científicos e normas técnicas vigentes, tanto brasileiras quanto estrangeiras, com o objetivo de estabelecer um sólido referencial teórico para o estudo de elementos de aço submetidos a forças axiais de compressão. Esse levantamento buscou compreender o tema e identificar lacunas que pudessem ser exploradas para aprimorar o conhecimento sobre o comportamento desses materiais. Sua segunda etapa se dá por um estudo experimental presente no Laboratório de Construção Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, onde serão executados ensaios experimentais.

A partir dessa investigação, verificou-se que poucos modelos haviam sido testados em estudos anteriores, evidenciando a oportunidade de explorar diferentes composições de aço e avaliar seu desempenho. O objetivo principal foi investigar a viabilidade de aplicação gradual do aço em construções no país, especialmente em situações que demandam resistência elevada e estabilidade estrutural.

Serão testadas em laboratório barras de aço no formato de cantoneira (“L”), com dimensões de uma polegada por um oitavo (1”x1”x1/4”) e comprimento de cinquenta centímetros (50 cm), limitadas pela capacidade máxima de altura da prensa utilizada nos testes. Assim, serão realizados ensaios de compressão em três diferentes protótipos confeccionados com a mesma cantoneira (“L”), com o objetivo de analisar suas resistências sob carga axial e comparar os resultados experimentais com os cálculos teóricos prescritos pela NBR 8800:2024.

3.1 Materiais

A presente seção dedica-se à apresentação do material empregado na concepção dos modelos de teste para este estudo sobre aço. As propriedades mecânicas e características técnicas inerentes a esse material são de fundamental importância para a execução da análise estrutural proposta. Para tanto, as especificações do material foram estabelecidas em conformidade com os requisitos da norma ABNT NBR 8800:2024, a qual normatiza o projeto e o dimensionamento de estruturas de aço.

3.1.1 Perfis adotados

Foi adotado o perfil do tipo “L” – cantoneira com dimensões de 1.1/4”x 1.1/4”x 1/8” como base para os testes experimentais. O primeiro modelo consiste no perfil isolado, como ilustra a Figura 33: Perfil isolado. A partir dele, foram desenvolvidos mais dois modelos, unindo dois perfis idênticos por meio de solda de filete: um no formato retangular, conforme a Figura 34: Perfil Retangular. E outro em formato “X”, como mostra a Figura 35: Perfil formato “X”. Todos os modelos foram confeccionados com aço MR250, conforme classificação da norma ABNT, o que garante uniformidade nas propriedades do material analisado.

Figura 33 – Cantoneira Simples



Fonte: O autor (2025)

Figura 34 – Cantoneira retangular



Fonte: O autor (2025)

Figura 35 – Cantoneira formato “X”



Fonte: O autor (2025)

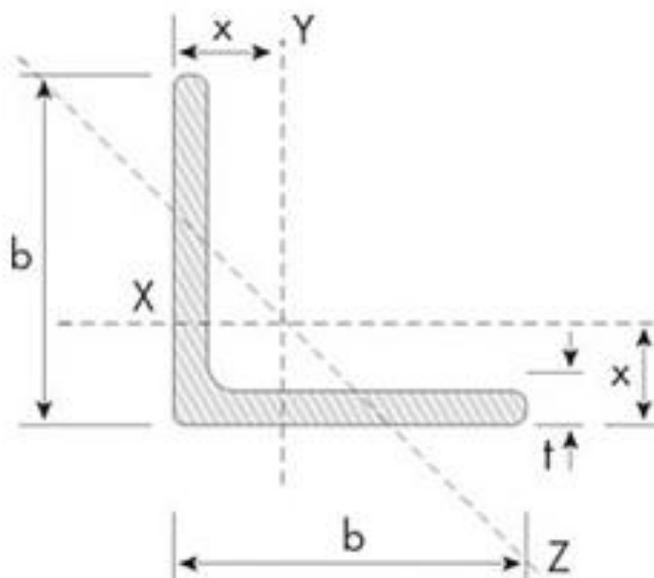
3.1.3 Características dos materiais

Os ensaios foram conduzidos utilizando a cantoneira de 1.1/4"x 1.1/4"x 1/8", cujas especificações técnicas estão apresentadas na Figura 36: Especificações técnicas. As características geométricas da cantoneira também são ilustradas na Figura 37: Características Geométricas. Além disso, a norma ABNT NBR 8800:2024 foi consultada para a determinação das tensões de projeto, que incluem:

Tensão de escoamento segundo NBR 8800:2024 (Tabela A.1, Página 129): $f_y = 250\text{MPa}$;

Tensão de ruptura segundo NBR 8800:2024 (Tabela A.1, Página 129): $f_u = 400-560\text{MPa}$;

Figura 36– Especificações técnicas



Legenda $b= 31,75$ $x=0,89$

Fonte: <https://gsn.gerdau.com/sites/gsn_gerdau/files/cantoneira_technical_image.png>

Figura 37 – Características Geométricas

b		Peso Nominal	t		Área	$I_x=I_y$	$W_x=W_y$	$r_x=r_y$	r_z mín.	x
pol	mm	kg/m	pol	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
5/8"	15,880	0,57		2,50						
3/4"	19,050	0,71		2,50						
1/2"	12,700	0,55	1/8"	3,18	0,70	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	15,880	0,71	1/8"	3,18	0,90	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	19,050	0,87	1/8"	3,18	1,11	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	22,200	1,04	1/8"	3,18	1,32	0,58	0,38	0,66	0,46	0,66
1"	25,400	1,19	1/8"	3,18	1,48	0,83	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	3/16"	4,76	2,19	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	1/4"	6,35	2,84	1,66	0,98	0,76	0,48	0,86
1.1/4"	31,750	1,50	1/8"	3,18	1,93	1,67	0,82	0,97	0,64	0,89
		2,20	3/16"	4,76	2,77	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	1/4"	6,35	3,62	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02

Fonte: <https://gsn.gerdau.com/sites/gsn_gerdau/files/downloadable_files/Barras-e-Perfis-Tabela-de-bolso.pdf>

3.1.4 Mecanismos e Equipamentos de ensaio

Para a condução dos ensaios de tração e compressão dos modelos em análise, empregou-se a máquina universal de ensaios disponível no laboratório do curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, conforme ilustrado na Figura 38: Máquina de ensaio universal Emic. Este equipamento, modelo DL 30.000 N - EMIC 23-300 da marca INSTRONE/EMIC, possui uma capacidade de carga de 300 kN. O software utilizado em conjunto com o equipamento é o Tesc 3.04.

Tais ensaios permitem verificar a conformidade das especificações do fabricante com as normas vigentes. Para a execução do ensaio, basta posicionar a amostra no local designado (parte superior para ensaios de tração e parte inferior para ensaios de compressão), onde um sistema autotravante e de pré-aperto pneumático assegura a estabilidade da amostra.

Após a conclusão do ensaio, o instrumento fornece o diagrama tensão-deformação do elemento, além de dados como força aplicada, valores de tensão de escoamento e tensão máxima suportada.

Figura 38 –Máquina universal de ensaio Emic



Fonte: O autor (2025)

3.2 Ensaio de tração do aço

Dada a indisponibilidade das tensões de escoamento e ruptura exatas do lote de aço adquirido, optou-se pela realização de ensaios de tração em três corpos de prova. A preparação desses corpos de prova está ilustrada na Figura 39: corpo de prova tração.

Figura 39 – Corpo de prova tração



Fonte: O autor (2025)

Para assegurar um encaixe satisfatório na máquina universal de ensaios (tração) e minimizar interferências no desempenho, foram utilizados perfis de 20 centímetros de altura. Nas extremidades dos perfis, a união com barras de aço de construção de 15 centímetros de comprimento e 16 milímetros de diâmetro foi realizada por meio de soldagem com eletrodo E6013, como ilustra a Figura 40: Eletrodo.

Figura 40 – Eletrodo



Fonte: O autor (2025)

As dimensões da barra de aço foram escolhidas (eq. 25) para garantir a fixação adequada. Com isso, foi adotado 5 centímetros de comprimento foram inseridos na parte interna do perfil e 10 centímetros permaneceram na parte externa.

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (25)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1,93}{\pi}}$$

$$D = 1,56cm = 15,6mm \cong 16mm$$

O ensaio de tração foi conduzido conforme ilustrado na Figura 41: Peça tracionada na máquina. Após a sua realização, os diagramas de tensão-deformação foram obtidos e estão detalhados no ANEXO A.

Figura 41 –Peça tracionada na máquina



Fonte: O autor (2025).

Adicionalmente, um relatório com as tensões de ruptura e escoamento de cada corpo de prova ensaiado foi gerado, conforme apresentado na Tabela 01: Tensões de escoamento e

ruptura. É importante ressaltar que os resultados referentes ao corpo de prova 3 foram desconsiderados para o cálculo da média, uma vez que a ruptura ocorreu na solda, e não no material da cantoneira, inviabilizando a análise de suas propriedades.

Tabela 1– Tensões de escoamento e ruptura

CPs	Tensão de Escoamento - f_y (kN/cm ²)	Tensão de Ruptura - f_u (kN/cm ²)
1	30,820	42,803
2	31,011	41,711
3	30,779	34,379
Média	30,915	41,897

Fonte: O autor (2025).

Após obtenção dos resultados do ensaio foi elaborado o cálculo para obtenção da real tensão de escoamento (eq. 26).

$$\begin{aligned}
 F &= \sigma * A \\
 F &= 30,915 * 2,016 \\
 F &= 62,1577 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Onde:

F = Força;

σ = Tensão de escoamento;

A = Área da barra utilizada em ensaio.

Após encontrar a maior força que o perfil suportou até se romper foi calculado a real tensão de escoamento da cantoneira (eq. 27).

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{F}{A} \\
 \sigma &= \frac{62,1577}{1,93} \\
 \sigma &= 32,20 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Onde:

σ = Tensão de escoamentos;

F = Força;

A= Área da cantoneira fornecida pelo fornecedor.

3.3 Ensaio de compressão das cantoneiras

Para a elaboração dos ensaios, três corpos de prova foram atribuídos a cada modelo desenvolvido. Na execução, os modelos retangulares e em xis tiveram sua união realizada por meio de solda de filete com eletrodo E6013. Cada união consistiu em um ponto de solda em cada extremidade, seguido por mais três pontos distribuídos ao longo da peça.

A sequência dos ensaios teve início com a cantoneira simples, como ilustrado na Figura 42: Ensaio cantoneira simples. Posteriormente, o trabalho prosseguiu com o ensaio da cantoneira retangular, conforme a Figura 43: Ensaio cantoneira retangular. Por fim, a cantoneira em xis foi ensaiada, como demonstra a Figura 44: Ensaio cantoneira em formato “X”.

Figura 42 – Ensaio cantoneira simples



Fonte: O autor (2025).

Figura 43 – Ensaio cantoneira retangular



Fonte: O Autor (2025).

Figura 44 – Ensaio cantoneira formato “X”



Fonte: O Autor (2025).

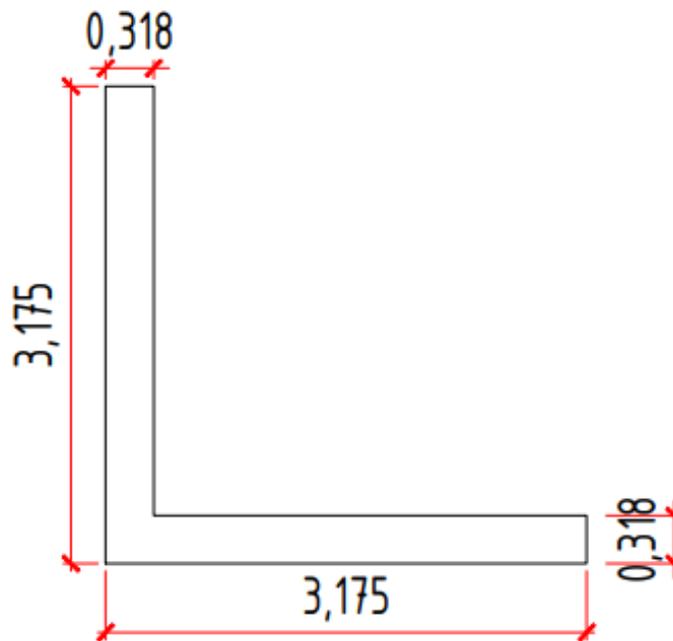
3.3.1 Cálculo de força normal de compressão resistida pelos perfis segundo NBR 8800:2024

A partir do método de cálculo apresentado nos itens referenciais, foram determinadas as resistências à compressão para cada modelo confeccionado.

3.3.1.1 Modelo 1- Cantoneira simples

Conforme especificado, o arranjo consiste na peça original cortada com altura de 50 centímetros, as dimensões do perfil estão especificadas como a figura abaixo, Figura 45: Perfil simples.

Figura 45 – Perfil simples



Fonte: O autor (2025)

- Cálculo índice de esbeltez (eq. 28):

$$\lambda = \frac{K * l}{i_x} \quad (28)$$

$$\lambda = \frac{1 * 50}{0,64}$$

$$\lambda = 78,125$$

Onde:

K = coeficiente de flambagem, sendo neste caso igual 1;

l = altura da peça;

i_x = raio de giração da cantoneira.

- Cálculo índice de esbeltez reduzido (eq. 29):

$$\lambda_0 = \lambda * \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 * E}} \quad (29)$$

$$\lambda_0 = \lambda * \sqrt{\frac{32,20}{\pi^2 * 20000}}$$

$$\lambda_0 = 0,997822$$

Onde:

λ = Índice de esbeltez da peça;

f_y = Tensão de ruptura;

E = módulo de elasticidade do aço (20.000 kN/cm²);

- Cálculo fator de redução χ de acordo com a NBR 8800/2024, para $\lambda_0 \leq 1,5$ (eq. 30):

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (30)$$

$$\chi = 0,658^{0,997822^2}$$

$$\chi = 0,6591$$

- Cálculo esbeltez limite (eq. 31):

$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{ef} = b \quad (31)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{31,75}{3,18}$$

$$\frac{b}{t} = 9,984$$

Onde:

b = largura do elemento;

b_{ef} = largura efetiva do elemento;

t = largura do elemento;

χ = fator de redução

A equação para encontrar o $(b/t)_{lim}$ (eq. 32) se encontra na tabela 04 da NBR 8800/2024.

A partir disso, referente a peça escolhida é possível encontrar conforme Figura 46: Valor de $(b/t)_{lim}$.

Figura 46 – Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
	3	- Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas espaçadoras		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800/2024

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{E/f_y} \quad (32)$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{20000/32,2}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{621,12}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45 * 24,922$$

$$(b/t)_{lim} = 11,215$$

Onde:

E = módulo de elasticidade do aço (20.000 kN/cm²);

F_y – tensão de escoamento real da peça (32,20kN/cm²).

$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{11,215}{\sqrt{0,6591}}$$

$$b/t \leq 13,8131$$

$$9,984 \leq 13,8131$$

Logo, a esbeltez limite deu maior que a esbeltez da peça, neste caso considera a área da seção transversal efetiva igual a área bruta.

- Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo e de segurança $N_{c,Rd}$ (eq. 33):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * A_{ef} * F_y}{\gamma_{a1}} \quad (33)$$

$$N_{c,Rup} = \frac{0,6591 * 1,93 * 32,2}{1}$$

$$N_{c,Rup} = 40,96666 \text{ kN}$$

$$R_{d,c} = \frac{0,6591 * 1,93 * 32,2}{1,10}$$

$$R_{d,c} = 37,2423 \text{ kN}$$

Onde:

$N_{c,,Rup}$ = resistente de Ruptura;

$R_{d,c}$ = resistente de cálculo;

χ = fator de redução associado à flambagem global

Q = fator de redução associado à flambagem local

A_g = área bruta da seção transversal da haste

F_y = tensão de escoamento do material

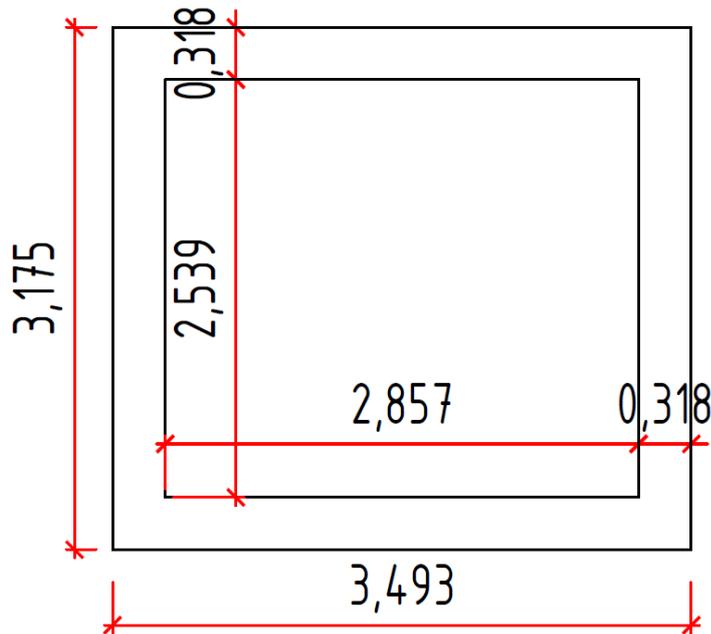
$\gamma_{a1} = 1,00$ para esforço normal solicitante decorrente de combinação normal de ações
(Tab. 3 NBR 8800/2024)

$\gamma_{a1} = 1,10$ para esforço normal solicitante de projeto (Tab. 3 NBR 8800/2024)

3.3.1.2 Modelo 2 - cantoneira retangular

Conforme especificado, o arranjo consiste na ligação de duas peças originais com altura de 50 centímetros, por meio de solda, formando um perfil retangular. As dimensões do perfil estão especificadas como a figura abaixo, Figura 47: Perfil peça retangular.

Figura 47 – Perfil peça retangular



Fonte: O autor (2025).

- Cálculo da inércia da cantoneira retangular (eq. 34):

$$I = \frac{b_{ext} * h_{ext}^3}{12} - \frac{b_{int} * h_{int}^3}{12} \quad (34)$$
$$I = \frac{3,493 * 3,175^3}{12} - \frac{2,857 * 2,539^3}{12}$$
$$I = 5,4195 \text{ cm}^4$$

Onde:

b_{ext} = base externa da peça;

h_{ext} = altura externa da peça;

b_{int} = base interna da peça;

h_{int} = altura interna da peça;

I = momento de inércia em cm^4 .

- Cálculo do raio de giração da peça retangular (eq. 35):

$$i_x = \left(\frac{I}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$
$$i_x = \left(\frac{5,4195}{3,86}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i_x = \left(\frac{5,4195}{3,836} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i_x = 1,188 \text{ cm}$$

Onde:

i_x = raio de giração em x da peça;

I = inércia da peça;

A = área.

- Cálculo Índice de esbeltez (eq. 36):

$$\lambda = \frac{K * l}{i_x} \quad (36)$$

$$\lambda = \frac{1 * 50}{1,1849}$$

$$\lambda = 42,068$$

- Cálculo índice de esbeltez reduzido (eq. 37):

$$\lambda_0 = \lambda * \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 * E}} \quad (37)$$

$$\lambda_0 = 42,068 * \sqrt{\frac{32,20}{\pi^2 * 20000}}$$

$$\lambda_0 = 0,5373$$

- Cálculo fator de redução χ (eq. 38):

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \rightarrow \lambda_0 \leq 1,5 \quad (38)$$

$$\chi = 0,658^{0,5373^2}$$

$$\chi = 0,8861$$

- Cálculo da esbeltez limite (eq. 39):

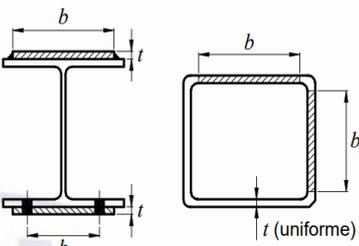
$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{ef} = b \quad (39)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{2,857}{0,318}$$

$$\frac{b}{t} = 8,98$$

A equação para encontrar o $(b/t)_{lim}$ se encontra na tabela 04 da NBR 8800/2024 (eq. 40). A partir disso, referente a peça escolhida é possível encontrar conforme figura 48: Valor de $(b/t)_{lim}$.

Figura 48 – Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	- Mesas ou almas de seções tubulares retangulares (ver 5.1.3) - Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800/2024

$$(b/t)_{lim} = 1,40 \sqrt{E/f_y} \quad (40)$$

$$(b/t)_{lim} = 1,40 \sqrt{20000/32,2}$$

$$(b/t)_{lim} = 1,40 \sqrt{621,12}$$

$$(b/t)_{lim} = 1,40 * 24,922$$

$$(b/t)_{lim} = 34,89$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{34,89}{\sqrt{0,8861}}$$

$$b/t \leq 37,064$$

$$8,98 \leq 37,064$$

Logo, a esbeltez limite deu maior que a esbeltez da peça, neste caso considera a área da seção transversal efetiva igual a área bruta.

- Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo e de segurança N_c (eq.41):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * A_{ef} * F_y}{\gamma_{a1}} \quad (41)$$

$$N_{c,Rup} = \frac{0,8861 * 3,836 * 32,2}{1}$$

$$N_{c,Rup} = 109,47 \text{ kN}$$

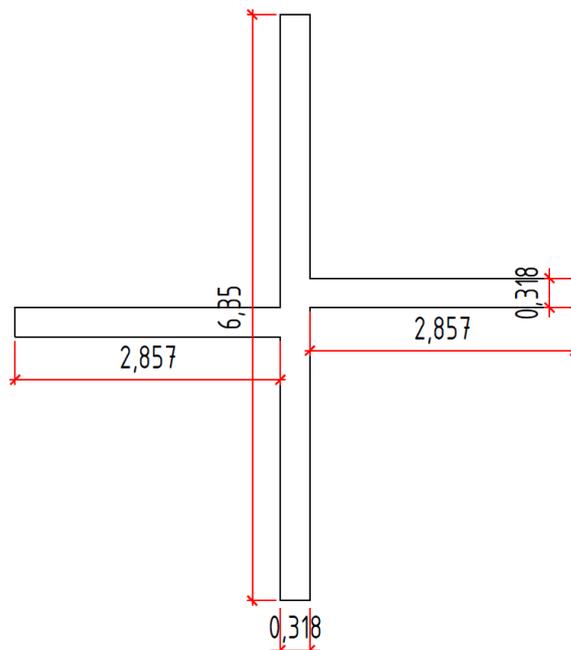
$$N_{c,rd} = \frac{0,8861 * 3,836 * 32,2}{1,10}$$

$$N_{c,rd} = 99,52 \text{ kN}$$

3.3.1.3 Modelo 3 - Cantoneira em formato “X”

Conforme especificado, o arranjo consiste na ligação de duas peças originais com altura de 50 centímetros, por meio de solda, formando um perfil com formato “X”. As dimensões do perfil estão especificadas como a figura abaixo, Figura 49: Perfil peça retangular.

Figura 49 – Perfil peça em “X”



Fonte: O autor (2025)

- Cálculo da inércia da cantoneira em formato “X” (eq. 42):

$$I = \frac{b_{ext} * h_{ext}^3}{12} + 2 * \left(\frac{b_{int} * h_{int}^3}{12} \right) + 2 * (a * (ad)^2) \quad (42)$$

$$I = \frac{0,318 * 6,35^3}{12} + 2 * \left(\frac{2,857 * 0,318^3}{12} \right) + 2 * (2,857 * 0,318) * \left(\frac{0,318}{2} \right)^2$$

$$I = 6,846 \text{ cm}^4$$

- Cálculo do raio de giração da peça em formato “X” (eq. 43):

$$i_x = \left(\frac{I}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

$$i_x = \left(\frac{6,846}{3,836} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i_x = 1,336 \text{ cm}$$

- Cálculo Índice de esbeltez (eq. 44):

$$\lambda = \frac{K * l}{i_x} \quad (44)$$

$$\lambda = \frac{1 * 50}{1,336}$$

$$\lambda = 37,4278$$

- Cálculo índice de esbeltez reduzido (eq. 45):

$$\lambda_0 = \lambda * \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 * E}} \quad (45)$$

$$\lambda_0 = 37,4278 * \sqrt{\frac{32,20}{\pi^2 * 20000}}$$

$$\lambda_0 = 0,478$$

- Cálculo fator de redução χ (eq. 46):

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \rightarrow \lambda_0 \leq 1,5 \quad (46)$$

$$\chi = 0,658^{0,478^2}$$

$$\chi = 0,908$$

- Cálculo da esbelteza limite (eq. 47 e eq. 48):

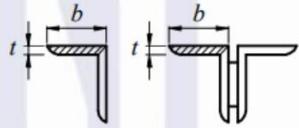
$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{ef} = b \quad (47)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{3,175}{0,318}$$

$$\frac{b}{t} = 9,984$$

A equação para encontrar o $(b/t)_{lim}$, se encontra na tabela 04 da NBR 8800/2024. A partir disso, referente a peça escolhida é possível encontrar conforme Figura 50: Valor de $(b/t)_{lim}$.

Figura 50 – Valores de $(b/t)_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
	3	- Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas espaçadoras		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: NBR 8800/2024

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{E/f_y} \quad (48)$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{E/f_y}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{20000/32,2}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45\sqrt{621,12}$$

$$(b/t)_{lim} = 0,45 * 24,9222$$

$$(b/t)_{lim} = 11,215$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{11,215}{\sqrt{0,908}}$$

$$b/t \leq 11,764$$

$$9,984 \leq 11,764$$

Logo, a esbeltez limite deu maior que a esbeltez da peça, neste caso considera a área da seção transversal efetiva igual a área bruta.

- Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo e de segurança N_c (eq.49):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * A_{ef} * F_y}{\gamma_{a1}} \quad (49)$$

$$N_{c,Rup} = \frac{0,928 * 3,836 * 32,2}{1}$$

$$N_{c,rup} = 112,26 \text{ kN}$$

$$N_{c,rd} = \frac{0,927 * 1 * 3,836 * 32,2}{1,10}$$

$$N_{c,rd} = 102,05 \text{ kN}$$

4 RESULTADOS

Este capítulo abordará a análise das forças de compressão, detalhando os cálculos realizados com base na norma ABNT NBR 8800:2024. Serão apresentados, também, os resultados obtidos nos ensaios experimentais desenvolvidos em laboratório para os três modelos em estudo.

4.1 Resultados Experimentais

Foram realizados ensaios de compressão em nove corpos de prova, distribuídos em três tipos distintos de perfis. Para cada modelo de perfil, foram confeccionados e testados três corpos de prova, totalizando assim nove amostras. Essa divisão permitiu a análise comparativa do comportamento mecânico entre os diferentes arranjos estruturais adotados.

4.1.1 Modelo 1 – Cantoneira simples

A partir da realização dos ensaios, observou-se que as cantoneiras apresentaram flambagem, bem como variações em sua rigidez, conforme ilustrado na Figura 51: Cantoneiras simples após o ensaio.

Figura 51 – Cantoneiras Simples após os ensaios



Fonte: O autor (2025)

Com base nos resultados obtidos, foram registradas as resistências à compressão para cada corpo de prova, conforme apresentado na Tabela 2: Resistência à compressão das cantoneiras simples. Em seguida, foi calculada a média dos valores obtidos, com o objetivo de compará-la ao valor teórico de cálculo.

Tabela 2 – Resistência a compressão cantoneira simples

CP'S (simples)	Resistência à Compressão (kN)
CP 1	54
CP 2	39
CP 3	58
Média	50,33

Fonte: O autor (2025)

Verificou-se que, em dois corpos de prova, os valores de resistência estiveram próximos da média obtida. Contudo, um dos ensaios apresentou resistência aproximadamente 22,5% inferior ao valor calculado levando em consideração a ruptura, o que pode ter sido ocasionado por um encaixe imperfeito do corpo de prova na máquina de compressão, comprometendo a uniformidade da carga aplicada.

4.1.2 Modelo 2 – Cantoneira retangular

Nos ensaios realizados com o segundo modelo, observou-se um comportamento estrutural mais padronizado por parte das cantoneiras. Em todas as amostras, a flambagem ocorreu predominantemente na região central da peça, conforme ilustrado na Figura 52: Cantoneiras retangulares após o ensaio.

Figura 52 – Cantoneiras retangulares após o ensaio



Fonte: O autor (2025)

Apesar da regularidade observada, um dos corpos de prova apresentou resistência à compressão aproximadamente 15% inferior à média dos resultados obtidos. Esse desvio pode indicar uma possível falha na aplicação da carga ou um pequeno desalinhamento no posicionamento do corpo de prova em sua montagem. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 3: Resistência à compressão das cantoneiras em arranjo retangular.

Tabela 3– Resistência à compressão das cantoneiras em arranjo retangular

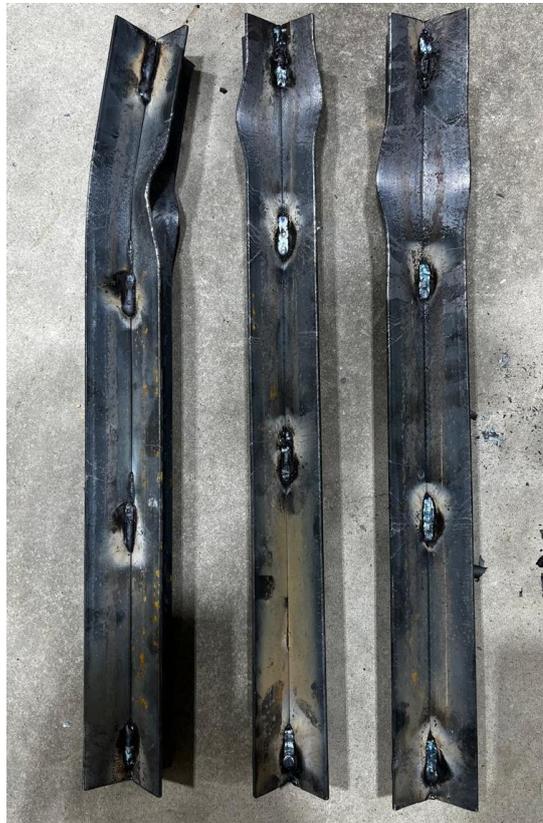
CP'S (retangular)	Resistência à Compressão (kN)
CP 1	103
CP 2	112
CP 3	86
Média	100,33

Fonte: do autor (2025)

4.1.3 Modelo 3 - Cantoneira em formato “X”

O terceiro e último modelo testado corresponde ao arranjo em “X”, configuração sobre a qual havia uma expectativa de desempenho superior em relação aos demais. Durante os ensaios, observou-se que todos os corpos de prova apresentaram flambagem de forma uniforme, concentrando-se na parte superior da peça, conforme ilustrado na Figura 53: Cantoneiras em formato “X” após o ensaio.

Figura 53 – Cantoneiras em formato “X” após o ensaio



Fonte: O autor (2025)

Embora se esperasse que este fosse o modelo com maior resistência à compressão, os resultados obtidos demonstraram um desempenho semelhante ao do modelo 2, em arranjo retangular. Novamente, observou-se uma discrepância em um dos corpos de prova, cujo valor de resistência foi aproximadamente 11% inferior à média obtida. Tal variação pode estar relacionada novamente a uma possível falha na aplicação da carga ou a um leve desalinhamento no posicionamento do corpo de prova durante a montagem para o ensaio.

Os valores obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4: Resistência à compressão das cantoneiras em formato “X”.

Tabela 4 – Resistência à compressão das cantoneiras em formato “X”

CP'S (“X”)	Resistência à Compressão (kN)
CP 1	107
CP 2	88
CP 3	104
Média	99,67

Fonte: Do autor (2025)

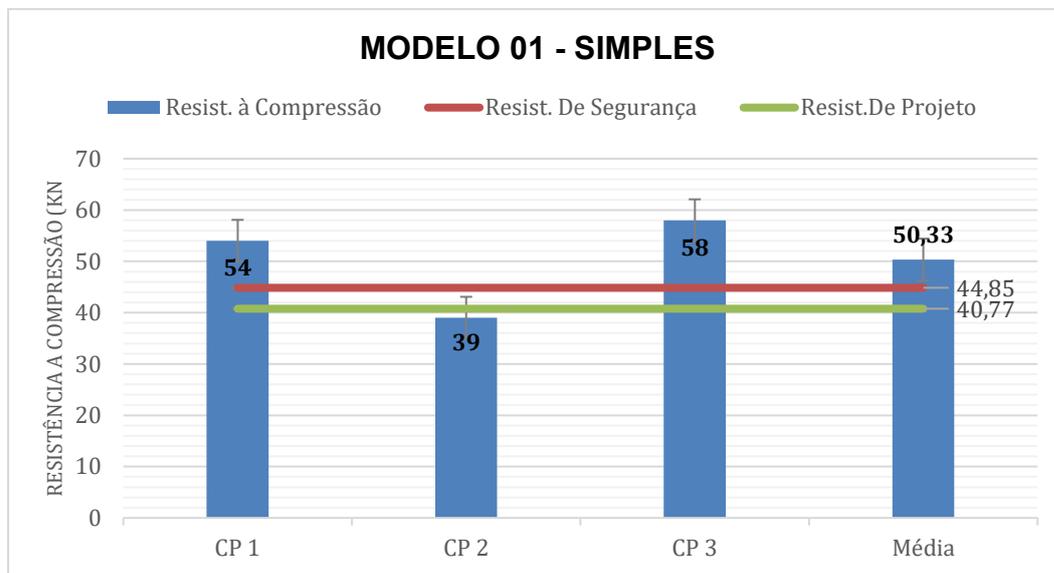
4.2 Análise dos resultados

Neste tópico, apresenta-se a comparação entre os valores teóricos calculados, com base nos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 8800:2024, e os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de compressão. A análise visa identificar a proximidade entre os resultados e justificar eventuais divergências, considerando aspectos como variações nos procedimentos experimentais, imperfeições geométricas e limitações junto ao processo de ensaio.

4.2.1 Análise modelo 1 – Cantoneira simples

O gráfico a seguir, Gráfico 1: Comparativo dos ensaios e resistências cantoneira simples. Apresenta a comparação entre os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente nos ensaios e os valores teóricos calculados conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 8800:2024.

Gráfico 1 – Comparativo dos ensaios e resistências da cantoneira simples



Fonte: O autor (2025)

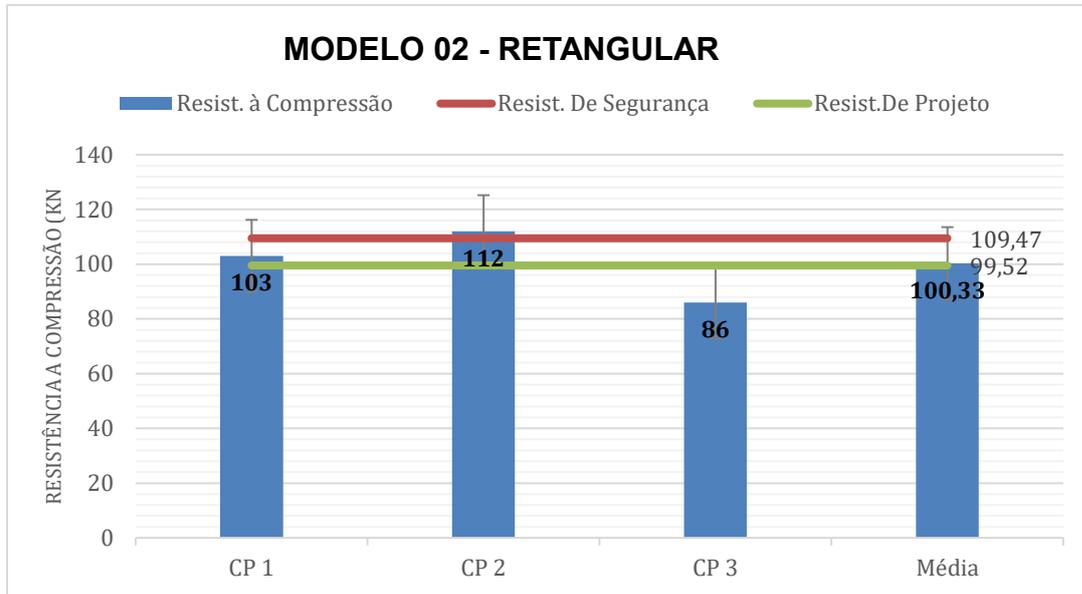
Ao analisar o gráfico referente ao Modelo 01 – Simples, observa-se que apenas um dos corpos de prova (CP2) apresentou resistência à compressão inferior aos valores teóricos calculados referente a ruptura, o que pode ser atribuído a um possível encaixe inadequado na máquina de ensaio. No entanto, superou a resistência de calculada de projeto.

Por outro lado, os demais corpos de prova (CP1 e CP3) demonstraram resultados superiores à resistência calculada, evidenciando um desempenho estrutural satisfatório. Considerando a média dos três ensaios, a resistência real foi aproximadamente 23% superior ao valor calculado quanto a segurança e cerca de 35% acima do valor de projeto, o que indica uma boa capacidade de carga do modelo em relação ao previsto pela norma, com um desvio padrão de 10,01.

4.2.2 Análise modelo 2 – Cantoneira retangular

O Gráfico 2: Comparativo dos ensaios e resistências cantoneira retangular, apresenta a comparação entre os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente nos ensaios e os valores teóricos calculados conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 8800:2024.

Gráfico 2 – Comparativo dos ensaios e resistências da cantoneira retangular



Fonte: O autor (2025)

A análise do gráfico referente ao Modelo 02 – Retangular revela que dois dos corpos de prova (CP1 e CP3) apresentaram resistências à compressão inferiores ao valor teórico de ruptura. Por outro lado, o corpo de prova 2 (CP2) demonstrou um desempenho superior ao valor projetado, aproximadamente 12% acima da resistência de projeto e 2% acima da resistência de ruptura.

Ao considerar a média dos três corpos de prova, a resistência obtida experimentalmente correspondeu a cerca de 92% do valor calculado para segurança e um excedente de aproximadamente 0,8% em relação à resistência de projeto. Estes resultados indicam uma proximidade significativa entre os dados teóricos e os resultados práticos, com um desvio padrão de 13,20.

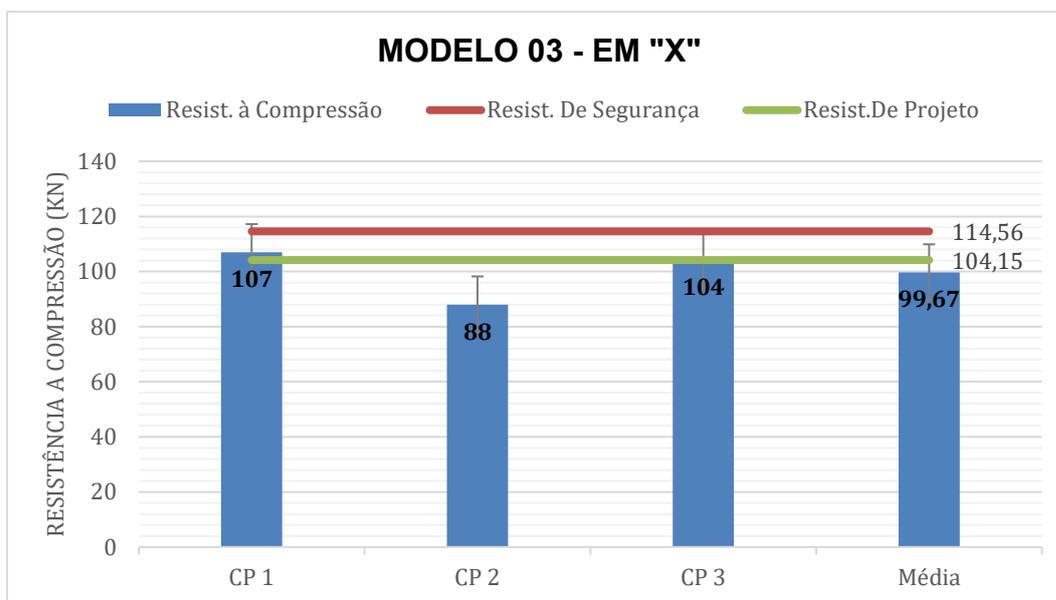
As discrepâncias observadas podem ser atribuídas a imperfeições no posicionamento do corpo de prova durante a montagem, o que pode ter gerado falhas na aplicação da carga, assim como a um posicionamento inadequado do arranjo na máquina de ensaio.

4.2.2 Análise modelo 3 – Cantoneira em “X”

O Gráfico 3: Comparativo dos ensaios e resistências cantoneira formato “X”, apresenta a comparação entre os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente nos

ensaios e os valores teóricos calculados conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 8800:2024.

Gráfico 3 – Comparativo dos ensaios e resistências cantoneira formato “X”



Fonte: O autor (2025)

A análise do gráfico referente ao Modelo 03 – Em “X” indica que os corpos de prova apresentaram, em geral, resistências à compressão ligeiramente inferiores ao valor teórico estabelecido pela norma. Especificamente, o corpo de prova 1 (CP1) atingiu 107 kN e o CP3, 104 kN. Ambos os valores se mostraram bastante próximos do cálculo de segurança, com o CP1 alcançando aproximadamente 95% do valor calculado, superando a resistência de projeto, e o CP3 atingindo um valor muito próximo.

Considerando a média dos três corpos de prova, o valor obtido experimentalmente foi de 99,67 kN, representando aproximadamente 89% da resistência de ruptura e aproximadamente 98% a resistência de projeto, com um desvio padrão de 10,21.

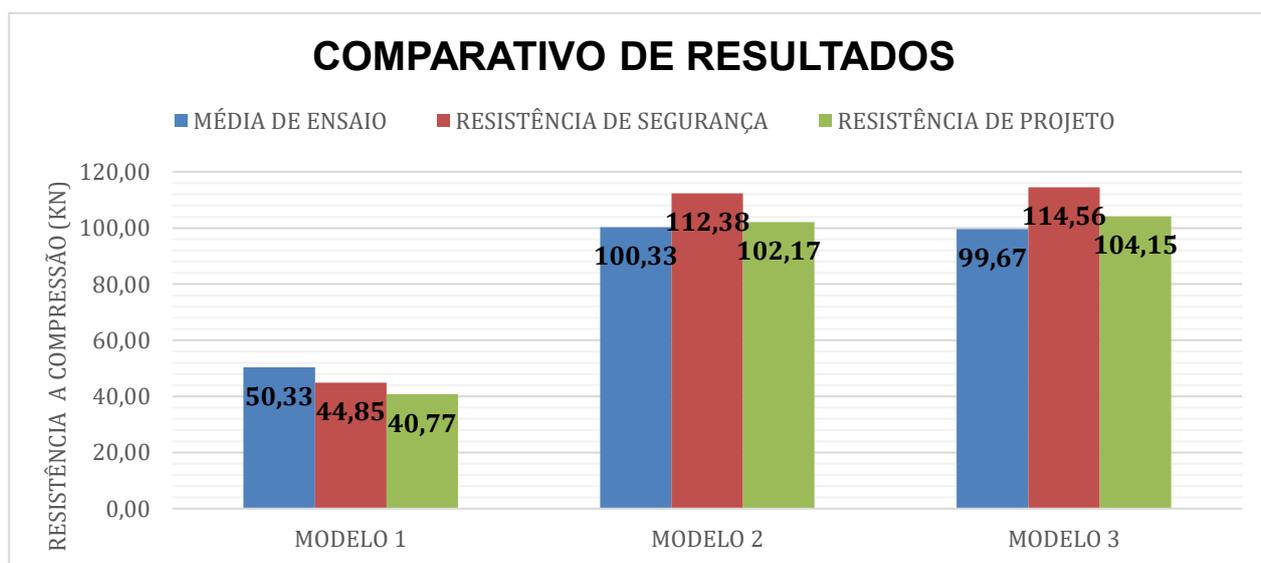
Conclui-se, novamente, que as discrepâncias relativas à segurança do arranjo podem ser atribuídas a imperfeições no posicionamento do corpo de prova durante a montagem, as quais podem ter gerado falhas na aplicação da carga, assim como posicionamento inadequado do arranjo na máquina.

4.3 Comparativo de resultados

As forças axiais de compressão, tanto as obtidas experimentalmente quanto aquelas calculadas com base nas prescrições da norma NBR 8800:2024, são comparadas com o objetivo de verificar a correlação entre os resultados práticos e os parâmetros normativos. O gráfico a seguir apresenta essa comparação, permitindo a análise dos valores de resistência de projeto e dos valores estimados para o colapso estrutural, conforme os cálculos teóricos realizados segundo a referida norma. Também estão representadas as médias dos valores obtidos nos ensaios experimentais para cada um dos modelos estudados, possibilitando uma avaliação crítica do desempenho real em relação ao comportamento previsto.

As forças axiais de compressão, tanto as obtidas experimentalmente quanto aquelas calculadas com base nas prescrições da norma NBR 8800:2024, são comparadas com o objetivo de verificar a correlação entre os dados experimentais e os parâmetros normativos. O gráfico abaixo, Gráfico 4: Comparação de resultados, apresenta essa comparação, permitindo a análise dos valores de resistência de projeto e dos valores estimados para o colapso estrutural, conforme os cálculos teóricos realizados segundo a referida norma. Também estão representadas as médias dos valores obtidos nos ensaios experimentais para cada um dos modelos estudados, possibilitando uma avaliação crítica do desempenho real em relação ao comportamento previsto.

Gráfico 4 –Comparação de resultados



Fonte: O autor (2025)

Dessa forma, é possível reconhecer que todos os modelos ensaiados apresentaram desempenhos relevantes, cada um com suas particularidades construtivas e estruturais. Embora os modelos compostos tenham demonstrado menos capacidade resistente em relação aos cálculos teóricos, o modelo simples se destacou positivamente por superar a resistência prevista pela norma, evidenciando a eficiência do mesmo. As variações entre os resultados reforçam a importância do cuidado na montagem dos corpos de prova e na aplicação das cargas, fatores que podem impactar diretamente no comportamento final da estrutura.

Além disso, sabendo-se que os modelos 2 e 3 têm exatamente o dobro da área bruta do modelo inicial e, que seus resultados de ensaio deram 50% no modelo 2 e 44% no modelo 3 e de cálculo 40% no modelo 2 e 39% no modelo 3, respectivamente, superiores ao modelo 1, pode-se afirmar que isto se deve à inércia decorrente das distintas geometrias das peças.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusão

De maneira geral, o presente trabalho alcançou os objetivos propostos, uma vez que permitiu analisar, de forma prática e teórica, o comportamento de perfis de aço submetidos à compressão axial, utilizando diferentes configurações da cantoneira 1.1/4"x 1.1/4"x 1/8". A partir da comparação entre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e os valores calculados com base na NBR 8800:2024, foi possível observar que, embora os modelos compostos apresentem maior resistência absoluta, o modelo simples demonstrou um melhor desempenho, comparado com o valor teórico calculado.

A análise do Modelo 01 – Cantoneira simples revelou que a resistência média obtida experimentalmente foi de 50,33 kN, superando os valores calculados de resistência de ruptura (40,97 kN) e de projeto (37,24 kN), evidenciando um desempenho satisfatório. Para o Modelo 02 – Retangular, a média experimental de 100,33 kN correspondeu a aproximadamente 92% da resistência de cálculo para segurança e cerca de 0,8% acima da resistência de projeto, indicando uma proximidade significativa entre teoria e prática. No Modelo 03 – Em formato 'X', a resistência média experimental de 99,67 kN representou cerca de 89% da resistência de ruptura e 98% da resistência de projeto.

Durante a realização dos ensaios, foram identificadas algumas falhas que podem ter influenciado nos resultados obtidos, como o posicionamento incorreto dos corpos de prova, pequenos desalinhamentos na montagem das peças e possíveis imperfeições no encaixe das amostras na máquina de ensaio. Tais fatores contribuíram para variações nos valores. Essas observações reforçam a importância do rigor na execução experimental, pois pequenos desvios podem impactar diretamente no desempenho das estruturas analisadas.

De modo geral, o estudo contribuiu para uma melhor compreensão da influência da geometria na resistência de elementos estruturais metálicos, aproximando teoria e prática e oferecendo subsídios valiosos para o dimensionamento seguro e eficiente de estruturas em aço. Além disso, destaca-se o valor da experimentação no processo de aprendizagem e desenvolvimento técnico na área da engenharia civil.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Para futuras pesquisas, recomenda-se a utilização de perfis alternativos, assim como a exploração de diferentes arranjos e configurações dos mesmos, além do aumento na variedade de modelos a serem testados. Ademais, torna-se fundamental a realização de um estudo aprofundado sobre a caracterização das tensões residuais, o que permitirá a formulação de conclusões mais precisas e definitivas acerca dos procedimentos empregados no dimensionamento de barras submetidas à compressão.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2024 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7007:2022 – Aços-carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASTM. E8M-04: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM international, 2004.

BELLEI, Ildony H. Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. Edifícios de múltiplos andares em aço. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2008.

COSTA JÚNIOR, Marcos Antônio; KELLY DA SILVA LIMA, Jhenef; SALVADOR SANTOS DE ARAÚJO, Mariana; HENRIQUE MIRANDA TAVARES, Pedro. Estudo preliminar comparativo entre estruturas de concreto armado e estruturas metálicas (aço). Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas. Alagoas. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cdgexatas/article/view/10800>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

DE SÁLES, J. J; MALITE, Maximiliano; GONÇALVES, Roberto M.; BONFÃ, José L. Z. Elementos de estruturas de aço - Dimensionamento. SET/EESC/USP, 2006.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro; CALDAS, Rodrigo Barreto Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

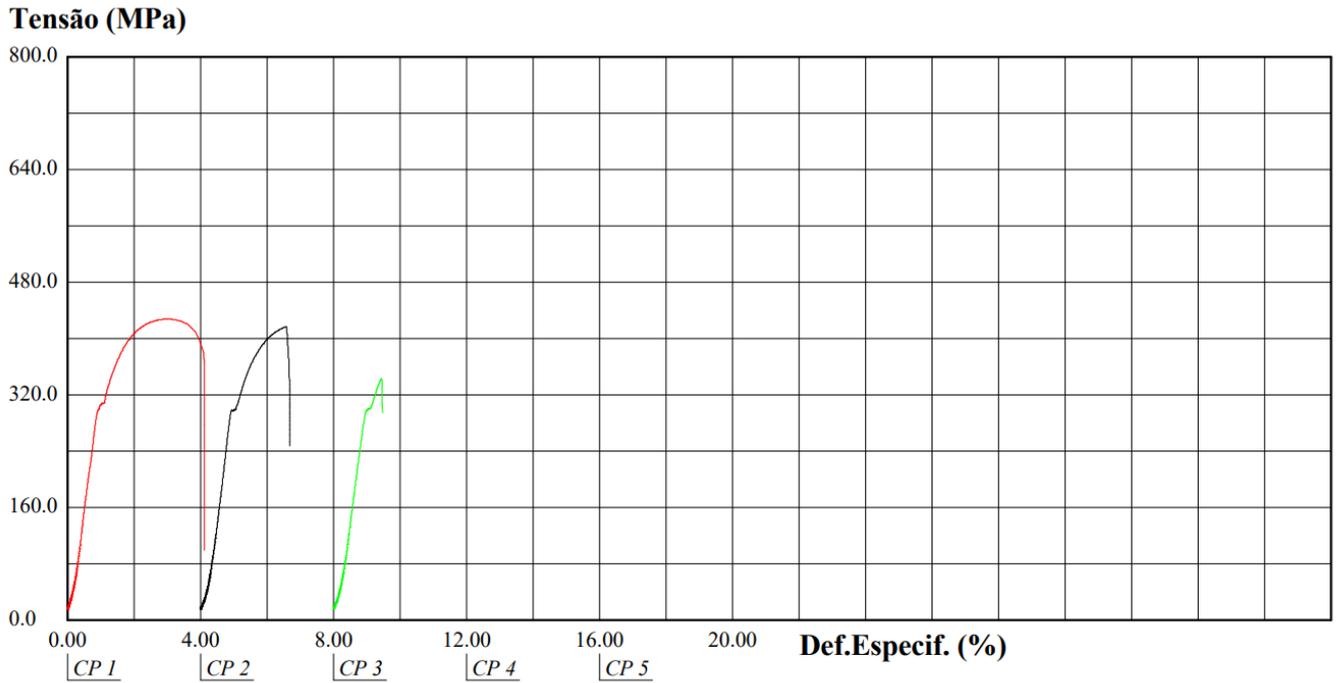
GERDAU S.A. Barras e Perfis: tabela de bolso. [S. l.]: Gerdau, 2018. Disponível em: https://gsn.gerdau.com/sites/gsn_gerdau/files/downloadable_files/Barras-e-Perfis-Tabela-de-bolso.pdf. Acesso em: 18 abril. 2025.

GERDAU S.A. Cantoneira Gerdau. [S. l.]: Gerdau GSN, 2024. Disponível em: <https://gsn.gerdau.com/pt-br/produtos/cantoneira-gerdau>. Acesso em: 18 abril. 2025.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2009. 382 p.

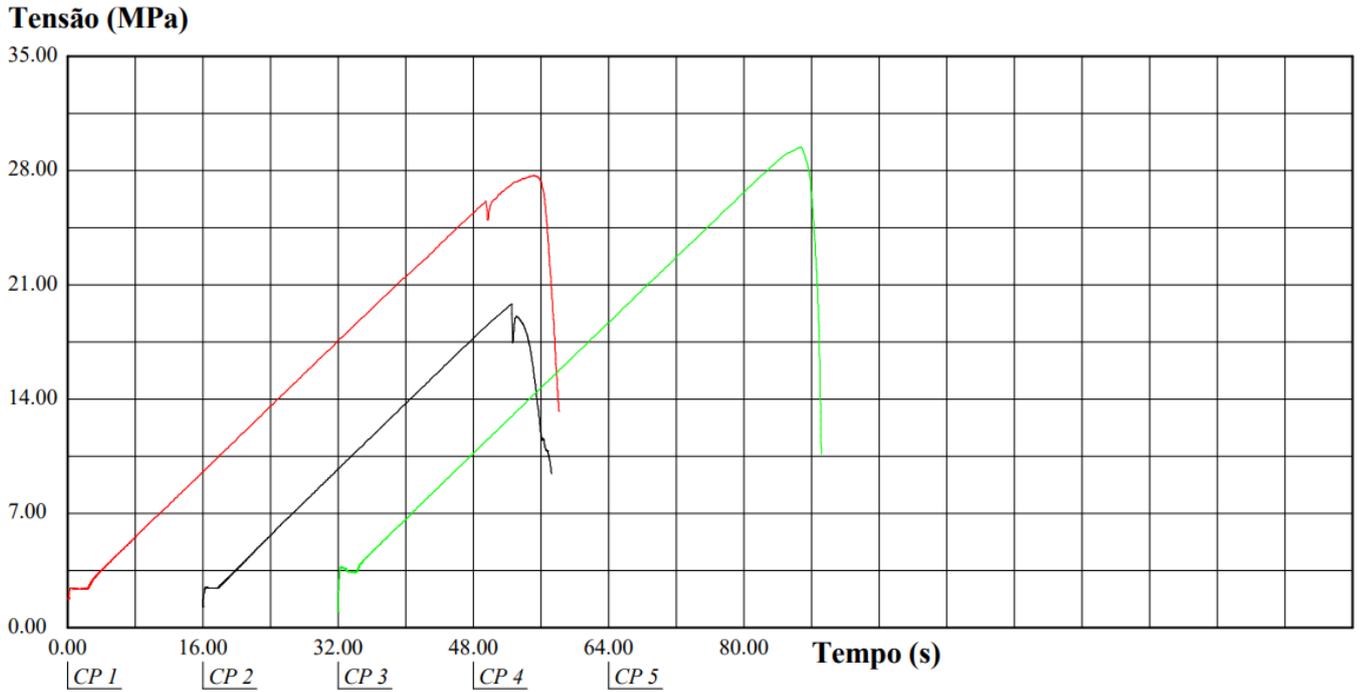
ANEXO A

Diagramas de Tensão x Deformação gerados pelo equipamento de ensaio para verificação das tensões de escoamento e ruptura do aço CP1, CP2 e CP3.



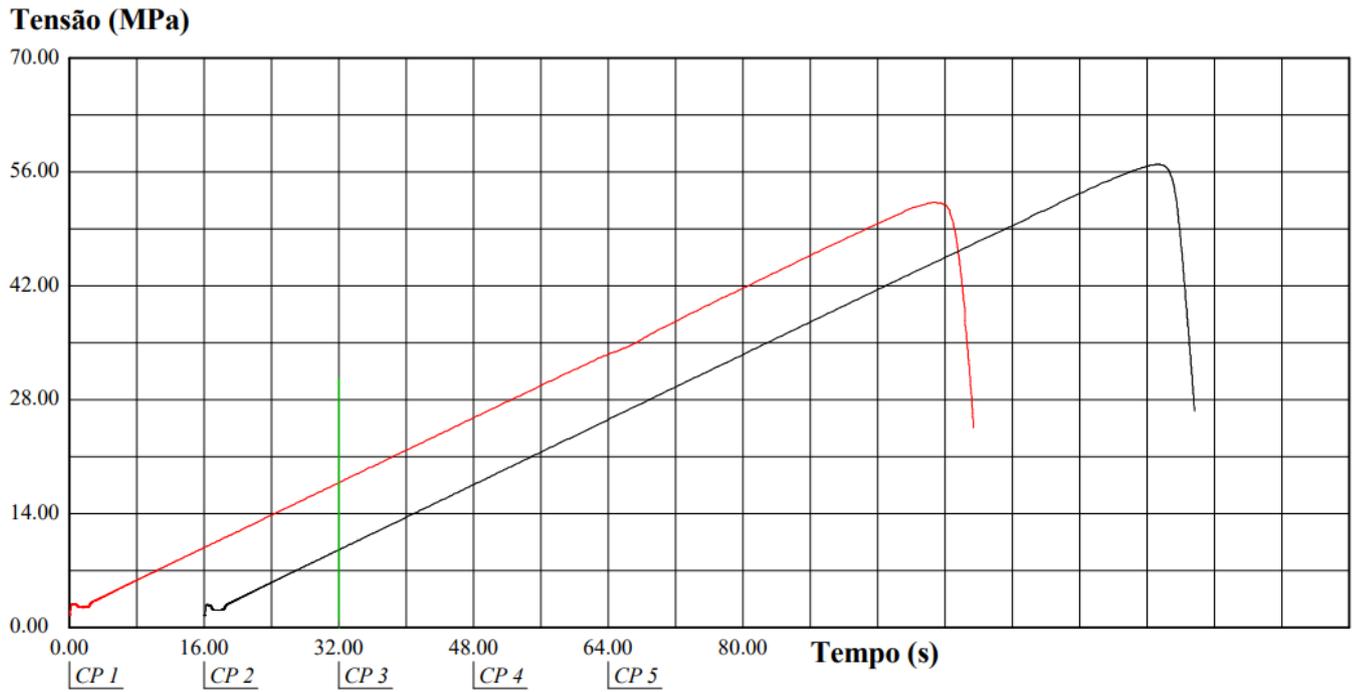
ANEXO B

Diagramas de Tensão x Deformação gerados pelo equipamento de ensaio para determinação das forças axiais de compressão do Modelo 1 – cantoneira simples CP1, CP2 e CP3.



ANEXO C

Diagramas de Tensão x Deformação gerados pelo equipamento de ensaio para determinação das forças axiais de compressão do Modelo 2 – cantoneira retangular CP1, CP2 e CP3.



ANEXO D

Diagramas de Tensão x Deformação gerados pelo equipamento de ensaio para determinação das forças axiais de compressão do Modelo 3 – cantoneira em formato “X” CP1, CP2 e CP3.

