

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Leonardo da Rosa de Almeida

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO EM FORMATO U
DOBRADO A FRIO SOB O EFEITO DE COMPRESSÃO AXIAL

Santa Cruz do Sul

2024

Leonardo da Rosa de Almeida

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO EM FORMATO U
DOBRADO A FRIO SOB O EFEITO DE COMPRESSÃO AXIAL

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Civil, da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2024

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e colaboração de várias pessoas, às quais deixo meu mais sincero agradecimento.

Primeiramente, agradeço ao meu professor orientador, Henrique Rupp, pela sua paciência, dedicação e pelo conhecimento transmitido ao longo deste processo. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e sou grato por todas as sugestões e correções, sempre oferecidas com atenção.

Aos meus colegas e professores do curso, agradeço pelas discussões enriquecedoras, pelo companheirismo e pela troca de experiências. Vocês contribuíram significativamente para minha formação.

À minha mãe, Serenita, meu profundo agradecimento por todo o apoio, amor e incentivo incondicionais. Obrigado por estar ao meu lado.

À minha esposa, Kássia, minha eterna gratidão por sua compreensão, paciência e apoio durante todas as fases deste projeto. Obrigado por estar ao meu lado, compreendendo as longas horas de estudo e apoiando-me nos momentos mais desafiadores.

Por fim, à minha filha, Laura, que é a minha maior motivação. Que permaneceu ao meu lado muitas vezes me fortalecendo e inspirando.

RESUMO

O presente trabalho investiga a resistência à compressão de perfis de aço formados a frio, utilizando uma análise teórico-experimental com foco em perfis de seção U. Inicialmente, foi realizado um estudo das propriedades do aço e conceitos básicos, seguindo as diretrizes das normas NBR 14762: 2010, que trata do dimensionamento de estruturas de aço formados a frio, e da norma NBR 8800: 2024 que trata do projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas e concreto de edificações, aplicáveis ao dimensionamento das estruturas de aço. Em seguida, foram realizados testes experimentais com três tipos de arranjos diferentes (U simples, “Caixão Fechado” e formato “I”), utilizando materiais disponíveis no mercado local para avaliar a resistência em função das características geométricas dos perfis. Observou-se que os perfis compostos apresentam resistência significativamente superior ao perfil U simples. Paralelamente, as equações e parâmetros normativos foram aplicados, confirmando a adequação das normas aos resultados laboratoriais. Foram observados estabilidades nos arranjos do perfil U simples e do “Caixão Fechado”, com valores acima dos estimados em projeto. O arranjo em formato “I” obteve a maior variabilidade de resultados, obtendo o maior valor de resistência, e a maior porcentagem abaixo do estimado. A variação nos resultados experimentais também evidenciou a importância de um processo de montagem cuidadoso, especialmente em arranjos mais complexos, como perfil em formato “I”.

Palavras-chave: Perfis de aço, resistência à compressão, análise teórico- experimental, normas NBR.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Problema da Pesquisa	7
1.2 Questão de Pesquisa	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo geral	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Justificativa	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Definições	10
2.2 Aço estrutural	11
2.2.1 Aço-Carbono.....	12
2.2.2 Aços de baixa liga	13
2.2.3 Propriedades dos Aços Estruturais	15
2.3 Ligações metálicas	18
2.4 Tipos de ligações	18
2.4.1 Ligações parafusadas	18
2.4.2 Ligações soldadas	23
2.4.3 Tipos de solda e juntas soldadas	27
2.5 Perfis dobrados a frio.....	28
2.5.1 Efeitos do dobramento	29
2.5.2 Padronização dos perfis	30
2.6 Comportamento Estrutural de Perfis Dobrados	33
2.6.1 Ações.....	34
2.6.2 Valores característicos	36
2.6.3 Combinações das ações	39
2.6.4 Resistências	41
2.6.5 Métodos de Dimensionamento de Barras.....	41

2.6.6 Flambagem Local	42
2.6.7 Força axial de compressão	47
2.7 Forças Resistentes de Cálculo das Soldas	51
2.7.1 Solda de filete em superfície plana.....	51
2.7.2 Solda de filete em superfícies curvas	53
2.7.3 Força resistente de cálculo conforme NBR 8800	55
3 Metodologia	57
3.1 Caracterização da Pesquisa.....	57
3.2 Delineamento da Pesquisa	57
3.4 Técnicas e Instrumentos de Coleta de Dados.....	61
3.4.1 Ensaio de tração do aço dos perfis	63
3.4.2 Ensaio de tração do aço dos perfis	64
3.5 Técnicas e Instrumentos de Análise de Dados	67
4 RESULTADOS	69
4.1 Cálculos de Força Axial de Compressão Perfil U Simples	69
4.1.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas	70
4.1.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido	71
4.1.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão	71
4.1.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica	72
4.1.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)	73
4.1.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo	73
4.2 Cálculos de Força de Compressão Perfil U em “Caixão Fechado”	74
4.2.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas	74
4.2.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido	75
4.2.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão	76
4.2.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica	76
4.2.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)	77
4.2.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo	77

4.3 Cálculos de Força Axial de Compressão para o perfil U em formato “I”	78
4.3.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas	79
4.3.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido	80
4.3.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão	80
4.3.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica	81
4.3.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)	82
4.3.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo	82
4.4 Cálculos da Forças Resistentes das Soldas	83
4.5 Resultados Experimentais	84
4.5.1 Corpos de prova seção U simples	85
4.5.2 Corpos de prova seção U em “Caixão Fechado”	86
4.5.3 Corpos de prova seção U em formato “I”	87
5 ANÁLISES DOS RESULTADOS	88
5.1 Análise do perfil U simples	88
5.2 Análise do perfil U em “Caixão Fechado”	89
5.3 Análise do perfil U em formato “I”	90
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
6.1 Conclusões	93
6.2 Recomendações futuras	94

1 INTRODUÇÃO

O setor da Construção Civil impulsiona o desenvolvimento social e econômico do país, projetando e ampliando os investimentos públicos e privados, gerando emprego e renda, influenciando diretamente na economia, sendo que entre 2011 e 2020 a construção civil foi responsável por 22% do PIB da Indústria (CBIC, 2021).

Entre os métodos construtivos, as estruturas metálicas fornecem algumas vantagens, como a alta resistência do aço aos diversos estados de tensão, permitindo que elementos estruturais suportem grandes esforços apesar de possuírem áreas relativamente pequenas, assim como oferecem grande margem de segurança no trabalho, sendo mais homogêneos, possuindo limites de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos (BELLEI, 2003).

Entre os elementos estruturais, encontram-se os perfis metálicos, como produtos siderúrgicos, que podem ser classificados de forma geral como perfis, barras e chapas (NETO, 2008). Por serem elementos fabricados industrialmente tendo suas dimensões padronizadas, ao realizar a escolha do elemento que é necessário para determinado projeto, o desafio se encontra em escolher o perfil que se adequa às demandas das solicitações necessárias (GUANABARA, 2010).

Este trabalho investigará o comportamento de perfis de aço tipo U dobrados a frio sob compressão axial, elaborando modelos para ensaios. Os resultados experimentais serão comparados com cálculos teóricos, de acordo com a norma ABNT NBR 14762:2010.

1.1 Problema da Pesquisa

No seguinte trabalho dentro da área de estruturas de aço, serão abordados os comportamentos dos perfis tipo U dobrados a frio, quando submetidos à força de compressão determinando os resultados através de ensaios e pelo desenvolvimento de seus conteúdos teóricos que envolvem seu dimensionamento. O estudo utilizará perfis U dobrados a frio disponíveis no mercado local de Santa Cruz do Sul, com base na sua ampla disponibilidade e aplicabilidade. A abordagem envolverá tanto uma revisão bibliográfica quanto análises teórico-experimentais.

1.2 Questão de Pesquisa

Quais são os efeitos, como a resistência de projeto e as deformações que ocorrem em um perfil U dobrado a frio quando este é submetido a cargas axiais de compressão e como esses resultados podem ser comparados com os cálculos teóricos previstos pela norma ABNT NBR 14762:2010?

1.3 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho estão classificados em geral e específicos e são apresentados nos itens seguintes.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de perfis U, com diferentes arranjos estruturais, dimensionados de acordo com a NBR 14762:2010 através de ensaios de compressão

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Descrever na revisão bibliográfica características, possíveis classificações, propriedades e utilizações das barras comprimidas, segundo a norma vigente e bibliografia técnica reconhecida;
- b) Analisar diferentes modelos de perfis, conforme a NBR 14762:2010, e submetê-los a ensaios de compressão, após a sua execução;
- c) Identificar e apresentar uma análise comparativa detalhada entre os resultados teóricos e experimentais.

1.4 Justificativa

Tendo em vista que ao se projetar uma edificação espera-se que as decisões envolvidas possam atender as especificações do projeto, reduzir custos e garantir as exigências normativas, a utilização das estruturas de aço tendem a apresentar soluções construtivas eficientes, considerando as características dos materiais bem definidas, assim como oferecem uma

margem de segurança devido a previsibilidade de suas características e seu processo produtivo industrializado. Pode ser considerado também a sua facilidade ao conseguir desmontar e substituir seus elementos com facilidade, o que agrega versatilidade e praticidade à construção.

O dimensionamento adequado das estruturas tendo como base o fim de sua utilização é essencial para que ocorra um projeto seguro e eficiente, garantindo desta forma que não ocorram excessos que possam resultar em prejuízos econômicos.

Este trabalho visa contribuir para o conhecimento na área de estruturas de aço, oferecendo uma análise detalhada do comportamento dos perfis U, com base em ensaios experimentais e cálculos teóricos, auxiliando engenheiros e projetistas na escolha e dimensionamento de perfis adequados para diferentes aplicações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definições

Ao iniciar os estudos é importante compreender alguns conceitos teóricos a respeito dos metais que ajudam a entender um pouco mais a respeito dos componentes estruturais. Eles representam cerca de dois terços da tabela periódica e aproximadamente 24% da massa do planeta (SIMÊNCIO, 2016).

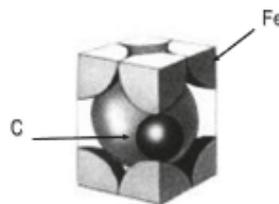
Os metais juntamente com as suas ligas apresentam muitas propriedades como resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e elétrica, entre várias outras (SHACKELFORD, 2008). Essas propriedades são fundamentais ao se pensar em características esperadas dos materiais no aspecto de projeto e dimensionamento de estruturas.

As formas mais usuais de metais ferrosos são o aço, o ferro fundido e o ferro laminado. O aço e o ferro fundido são ligas de ferro e carbono, com elementos adicionais, como silício, manganês, fósforo e enxofre (PFEIL, 1992).

O ferro fundido contém entre 1,8% e 4,5% de carbono, possuindo uma boa resistência à compressão sendo no mínimo 500MPa, porém uma resistência à tração de apenas 30% desta (PFEIL e PFEIL, 2009).

Os aços são ligas de ferro-carbono, contendo outros elementos químicos em sua composição, como por exemplo o cromo (Cr) e Níquel (Ni). As suas propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, ou seja, quanto maior a concentração de carbono maior será a sua dureza e menor a sua ductibilidade, sendo classificados como baixo, médio e alto quanto ao seu teor de carbono. Nos aços, os átomos de carbono ocupam os interstícios da estrutura cristalina do ferro, como mostra a representação da Figura 1, porém outros elementos são adicionados propositalmente para melhorar as propriedades mecânicas de acordo com a necessidade de utilização (SIMÊNCIO, 2016).

Figura 1 – Representação para estrutura CCC do Fe-C por meio de esferas rígidas.



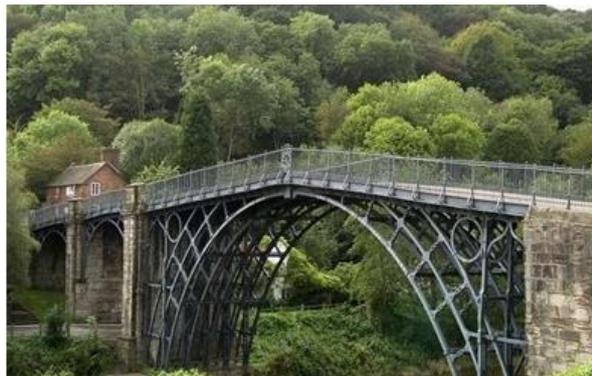
Fonte: Semêncio(2016).

O teor de carbono do aço varia entre 0,008% até 2,11% (CHIAVERINI, 1986). A resistência à ruptura por tração e compressão dos aços utilizados podem variar entre 300 MPa até valores maiores que 1200 MPa (SARDÁ, 2016).

2.2 Aço estrutural

O primeiro material siderúrgico utilizados na construção foi o ferro fundido, utilizados em pontes como elementos de compressão, sendo que a primeira ponte em ferro fundido foi a ponte Coalbrookdale, sobre o rio Severn, na Inglaterra, projetada pelo Arquiteto Thomas Pritchard e construída por Abraham Darby III, mostrado na Figura 2 possuindo mais de 30 metros de vão, sendo finalizado em 1779.

Figura 2 – Ponte sobre o rio Severn, Coalbrookdale.



Fonte: <https://coisasdaarquitetura.wordpress.com/2013/10/11/forma-estrutural-ii/#more-4371>. Acesso em : 23/09/2024

Em busca de maior segurança na construção, declinou-se a utilização do ferro fundido em favor do ferro forjado, durante o século XIX, porém em decorrência do número de acidentes observou-se que era necessário um maior estudo do material e suas características (PFEIL e PFEIL, 2009).

O aço já era conhecido da humanidade, porém não estava disponível a preços competitivos por não haver um processo siderúrgico industrial para sua fabricação. Com a demanda em decorrência da Revolução Industrial, o desenvolvimento de altos fornos permite o aumento da produtividade do aço. Em 1856 o inglês Henry Bessemer inventa o primeiro conversor para refino da gusa por sopro de ar, conhecido como processo Bessemer (GERDAU, 2024).

Para a transformação do aço, corresponde-se a um processo de oxidação, onde a porcentagem dos elementos é reduzida aos valores desejados, utilizando-se agentes oxidantes, que podem ser de natureza gasosa, como o ar e o oxigênio, ou de natureza sólida como minérios na forma de óxidos (CHIAVERINI, 1986).

Os aços com menor teor de carbono são os mais produzidos e não respondem eficientemente a tratamento térmico para aumento de resistência mecânica, mas pode ser possível através de tratamento a frio (SIMÊNCIO, 2016). Entre as características esperadas para os aços estruturais pode-se listar como uma boa ductibilidade, homogeneidade e soldabilidade, e uma relação entre a tensão resistente e a de escoamento elevada (PFEIL e PFEIL, 2009). Na Tabela 1 é possível analisar a especificação, o limite de resistência à tração, limite de escoamento e ductilidade de alguns aços-carbono comuns com baixo teor de carbono.

Tabela 1 – Composição e propriedades mecânicas de aços-carbono comuns.

Especificação	Composição (%p)			Propriedades Mecânicas		
	C	Mn	Outros	LRT* (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	%AL em 50 mm
Número AISI/SAE ou ASTM						
1010	0,10	0,45	-	325	180	28
1020	0,20	0,45	-	380	210	25
A36	0,29	1,00	0,20 Cu (min)	400	220	23
A516 Classe 70	0,31	1,00	0,25 Si	485	260	21

Fonte: Simêncio adaptado de Callister e Rethwisch (2016)

Durante o início do século XX, o aço utilizado nas construções possuía resistência à ruptura de 370MPa, sendo que a partir da década de 1960 começaram a utilizar aços de baixa liga, que possuíam uma resistência maior (PFEIL e PFEIL, 2009). Desta maneira, segundo sua composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga.

2.2.1 Aço-Carbono

Segundo Bellei (2003), os aços-carbono são os tipos mais usados, nos quais o aumento da resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono e, em menor escala, pelo manganês. Em aços estruturais utilizam um teor de carbono equivalente máximo de 4,5%, isso permite uma boa soldabilidade. Como o teor de carbono eleva a resistência e a dureza deste material, reduzindo a ductibilidade, desta forma, o aço se torna mais quebradiço. Entre aços

estruturais mais usuais em cita-se o ASTM A36 e A590, como os ABNT NBR 7007, 6648, 6649, 6650. Eles contêm as porcentagens máximas de elementos adicionais descritos na Tabela 2. Podem ainda ser subdivididos em quatro categorias quanto ao teor de carbono, conforme descrito na Tabela .

Tabela 2 – Porcentagens máximas de elementos adicionais.

Elemento	Quantidade (%)
Carbono	2
Silício	0,6
Manganês	1,65
Cobre	0,35

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Tabela 3 – Teor de carbono no aço.

Categoria	Teor de carbono
Baixo carbono	Menor que 0,29%
Médio carbono	0,3% - 0,59%
Alto carbono	0,6% - 2%

Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

2.2.2 Aços de baixa liga

Os aços de baixa liga são aqueles acrescidos de elementos de liga em pequenas quantidades, como o Nióbio (Nb), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Manganês (Mn), Silício (Si), Fósforo (P), Vanádio (V), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), entre outros, os quais melhoram algumas propriedades mecânicas (BELLEI, 2003). Na Tabela 4 são apresentados as principais funções de alguns dos elementos de liga citados acima.

Tabela 4 – Elementos de liga de aço e suas principais Funções.

Elemento	Principais Funções
Cr Cromo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta a resistência à corrosão 2. Aumenta a endurecibilidade 3. Melhora a resistência a altas temperaturas 4. Resiste ao desgaste (com alto teor de C)
Mn Manganês	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrabalança a fragilidade devida ao S 2. Aumenta a endurecibilidade economicamente
Mo Molibdênio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita 2. Produz maior profundidade de endurecimento 3. Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4. Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5. Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis 6. Forma partículas resistentes à abrasão
Ni Níquel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta a resistência de aços recozidos 2. Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas) 3. Torna austeníticas ligas Fe-Cr altas em Cr
P Fósforo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta a resistência de aços de baixo C 2. Aumenta a resistência à corrosão 3. Aumenta a usinabilidade em aços de usinagem fácil
Si Silício	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desoxidante 2. Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3. Aumenta a resistência à oxidação 4. Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes 5. Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga
V Vanádio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino do grão) 2. Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3. Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário

Fonte: Adaptado de Postal (1999).

Pode-se observar que algumas funções dos elementos de liga são para aumentar a resistência à corrosão, aumentar a resistência à abrasão e aumentar a tenacidade. Algumas dessas características acontecem devido a modificação para grãos finos (PFEIL e PFEIL, 2009). Segundo Bellei (2003), esses aços podem ter sua resistência à corrosão atmosférica aumentada de duas a quatro vezes. Esses são que possuem alta resistência mecânica e resistência à corrosão atmosférica são conhecidos como aços patináveis.

Todos os aços carbono quanto os de baixa liga podem ter suas resistências aumentadas pelo tratamento térmico, porém a soldagem desses aços torna-se mais difícil, tornando seu emprego pouco usual em estruturas correntes (PFEIL e PFEIL, 2009). Os parafusos de alta resistência utilizado nas conexões das estruturas são fabricados com aço carbono sujeito ao tratamento térmico (ASTM A325), bem como aços de baixa liga (ASTM A490). Os aços de baixa liga com tratamento térmico podem ser utilizados para protensão e parafusos. (BELLEI, 2003).

2.2.3 Propriedades dos Aços Estruturais

Para a compreensão do comportamento das estruturas de aço é essencial a familiaridade com as propriedades dos aços estruturais. De acordo com Bellei (2003), o conhecimento de características como a elasticidade, inelasticidade, fratura e fadiga de um metal é bom para avaliar a aplicação deste material em uma construção e para determinado uso particular.

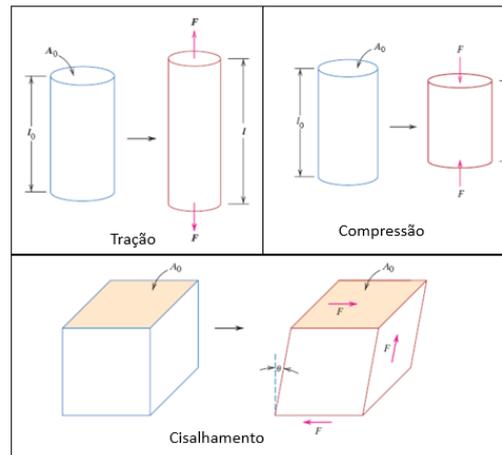
Abordando de forma sucinta para esclarecer os conceitos citados, entende-se por Elasticidade, a capacidade que os materiais possuem para retornar a sua forma original após sucessivos ciclos de carga e descarga. Quando determinado material é submetido a repetidas solicitações de tensões acima da sua capacidade limite com ciclos de carga e descarga têm-se a fadiga (BELLEI, 2003). A ductilidade é a capacidade de deformação de um material sem sofrer fraturas (BIOPDI, 2023).

Quando os aços estruturais são utilizados, sendo submetidos a forças ou cargas, é necessário conhecer como este material irá se comportar e quais serão suas características. Esse conhecimento é fundamental, pois pode-se verificar assim quais os valores de carga que podem ser submetidos os materiais, garantindo que a estrutura não cause deformação excessiva, causando assim, um possível colapso.

Essas propriedades podem ser verificadas através de experimentos em laboratório, de tal forma que reproduzam de forma mais fiel possível as condições de uso, considerando assim, a natureza da carga aplicada e sua duração em determinadas condições ambientais.

As cargas aplicadas podem ser de tração, compressão e cisalhamento, como demonstrado nas Figura 3. Se uma carga é estática ou se há variação lenta ao longo do tempo, sendo aplicada de forma uniforme sobre a seção transversal ou sobre a superfície do elemento, pode ser verificada através de um ensaio de tensão-deformação (CALLISTER & RETWISCH, 2016).

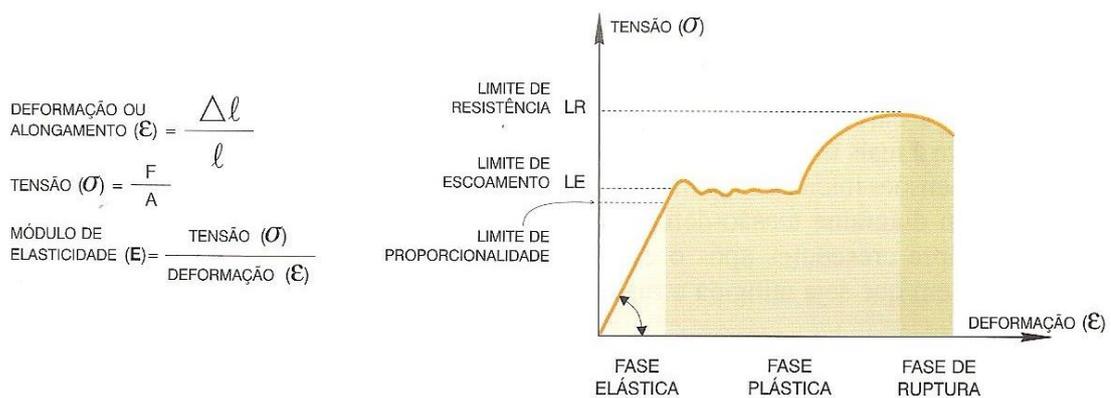
Figura 3 – Reações de Tração, Compressão e Cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

O grau de deformação de uma estrutura depende da magnitude da tensão aplicada. A tensão é determinada ao dividir a carga aplicada pela área da seção transversal do corpo de prova. Desta forma, mede-se a deformação ocasionada no elemento que está se realizando o ensaio. Quando esses valores são representados em uma curva, o eixo vertical é a tensão e o horizontal a deformação, sendo a curva resultante o diagrama tensão-deformação convencional como demonstrado na Figura 4 abaixo (HIBBELER,2018).

Figura 4 – Diagrama tensão-deformação de um aço.



Fonte: De Mattos Dias (2006).

Conforme a ABNT NBR 14762:2010, para efeitos de cálculo, deve-se considerar os seguintes valores de propriedades mecânicas dos aços:

- a) Módulo de elasticidade, $E = 200000 \text{ MPa}$;
- b) Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- c) Módulo de elasticidade transversal, $G = 77000 \text{ MPa}$;

- d) Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
 e) Massa específica, $\rho_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$.

Da mesma forma, a Tabela 5, de acordo com NBR 14762:2010, apresenta os valores nominais mínimos de resistência ao escoamento (f_y) e de resistência à ruptura (f_u) relacionados por Normas Brasileiras referente a chapas finas. Aços abaixo de 250 MPa não são relacionados abaixo por não serem utilizados na prática. A NBR 8800:2024 define que os aços de chapa grossa, podem possuir resistência ao escoamento máxima de 450 MPa com uma relação entre resistências à ruptura (f_u) e ao escoamento (f_y) não inferior a 1,18. Entretanto é importante ressaltar que a NBR 14762 especifica que esta relação f_u/f_y seja maior que 1,08 e que o alongamento após a ruptura não seja menor que 10% para base de medida igual a 50mm e 7% para base de medida igual a 200mm. Estes valores correspondem a ensaios de tração conforme ASTM A370.

É permitido a utilização de aços que não possuam qualificações estruturais desde que estes materiais tenham propriedades mecânicas para receber o trabalho a frio, neste caso não devendo ser adotados aços com valores superiores a 180 MPa para resistência ao escoamento e 300 MPa para resistência à ruptura (NBR 14762,2010).

Tabela 5 – Chapas finas de aço especificados por Normas para uso estrutural^a.

Especificação	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico ^b	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450
^a A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor de aço.			
^b Graus conforme ABNT NBR 7008.			

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

2.3 Ligações metálicas

As estruturas metálicas são fabricadas com dimensões transversais limitadas pela capacidade dos laminadores e com comprimentos limitados pela capacidade dos veículos de transporte. Sendo assim, as estruturas são formadas por associação de peças ligadas entre si. Esses meios de ligação são de importância fundamental. Existem dois tipos de ligação: por solda e por conectores.

Os conectores, aqui estudados em específico os parafusos, são colocados em furos que atravessam a peça a ligar. Já a conexão por solda consiste em fundir as partes em contato de modo a provocar a coalescência dos materiais. Nos últimos tempos a solda se tornou um elemento preponderante de ligação, muito em conta do desenvolvimento dos equipamentos (SARDÁ, 2016).

Conforme Bellei (2003), “é importante salientar que independente dos esforços a que uma ligação está sujeita, as normas recomendam uma resistência mínima como medida de segurança”. Toda ligação deve ser dimensionada levando em conta o seu estado limite último, o qual deve ser maior ou igual à solicitação de cálculo (NBR 8800, 2024).

2.4 Tipos de ligações

2.4.1 Ligações parafusadas

As ligações parafusadas são largamente utilizadas na montagem final, já em obra, quando a estrutura está próxima de sua consolidação final. Por se tratar de uma ligação com maior grau de flexibilidade, existe a necessidade de cuidados especiais na sua execução para que o estado in loco da estrutura se aproxime ao máximo das previsões de projeto. Embora necessitem da previsão anterior de material (parafusos e porcas), da fabricação com medidas exatas e do maior controle das áreas líquidas para evitar esmagamentos, elas trazem consigo vantagens como: rapidez nas ligações, economia em relação à energia empregada, exigência de qualificação inferior do operário se comparada à solda, maior suporte à fadiga (DE MATTOS DIAS, 2006).

As ligações parafusadas são empregadas em grande escala nas ligações de partes das estruturas. Os parafusos vieram substituir as ligações rebitadas utilizadas por muito tempo no Brasil, até 1969. Elas oferecem algumas vantagens como rapidez nas ligações de campo, economia no consumo de energia, uso de poucas pessoas, sem necessidade muita qualificação e obtém-se uma melhor resposta às tensões de fadiga. Há algumas desvantagens que podem ser

citadas, como a necessidade de verificação de áreas líquidas e esmagamento de peças, o que pode exigir o reforço destas partes, requer um planejamento de materiais para evitar a falta deles durante a execução da obra e em alguns casos é necessário uma pré-montagem de fábrica, tal que ocorra um alinhamento perfeito dos furos.

Os parafusos comuns são os feitos de aço-carbono de acordo ASTM A307, com baixo custo, porém podem produzir conexões que não sejam as mais econômicas por possuírem baixa resistência. Normalmente aplicados em estruturas leves em que as cargas são de pequena intensidade e de natureza estática. Uma de suas utilizações é de forma temporária durante a montagem da estrutura, nos casos em que os parafusos de alta resistência forem usados como permanentes (BELLEI, 2003).

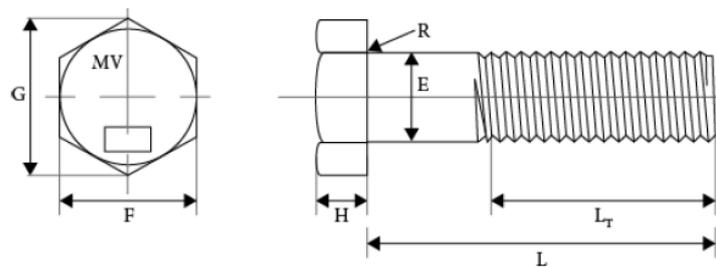
A principal diferença entre os parafusos comuns e os de alta resistência não é a resistência dos materiais utilizados, mas a forma de tensão que eles podem suportar. Os parafusos de alta resistências são projetados para aplicação de pré-carga e utilizar atrito estático para resistir ao cisalhamento, enquanto os parafusos normais podem não possuir essa capacidade. Os requisitos de desempenho mecânico para parafusos comuns, sendo do mesmo tipo, são ligeiramente superiores aos de alta resistência, porém os parafusos de alta resistência têm um requisito maior para aceitar a energia de impacto em comparação com os de uso comum. Quanto aos parafusos de alta resistência, quando a junta está em condições normais de trabalho, nenhum deslizamento relativo é permitido, o que significa que a deformação elástico-plástico é mínima e sua rigidez é elevada, permitindo uma maior reserva de segurança para a junta (MAGALHÃES, 2024). Recomenda-se, de acordo com a NBR 14762:2010, o uso dos parafusos com função estrutural, tanto comuns ou de alta resistência (Tabela 6).

Tabela 6 - Materiais usados em parafusos.

Especificação	Classe	Diâmetro nominal d		f_{ub} MPa
		milímetros	polegadas	
ASTM A307-07b	Comum	-	$1/4 \leq d < 1/2$	370
			$1/2 \leq d \leq 4$	415
ASTM A325M	Alta resistência	$16 \leq d \leq 24$	$1/2 \leq d \leq 1$	825
		$24 < d \leq 36$	$1 < d \leq 1\frac{1}{2}$	725
ASTM A354 (grau BD)	Alta resistência	-	$1/4 \leq d < 1/2$	930
ASTM A394 (tipo 0)	Comum	-	$1/2 \leq d \leq 1$	510
ASTM A394 (tipos 1,2 e 3)	Alta resistência	-	$1/2 \leq d \leq 1$	825
ASTM A449	Alta resistência	-	$1/4 \leq d < 1/2$	745
ASTM A490	Alta resistência	$16 \leq d \leq 36$	$1/2 \leq d \leq 1\frac{1}{2}$	1 035
ISO 898-1 classe 4.6	Comum	$6 \leq d \leq 36$	-	400
ISO 4016 – classe 8.8	Alta resistência	$6 \leq d \leq 36$	-	800
ISO 4016 – classe 10.9	Alta resistência	$6 \leq d \leq 36$	-	1 000

Fonte: ABNT NBR 14762 (2010).

Os parafusos comuns ASTM A307 são fabricados a partir de barras redondas de aço com resistência à ruptura de 415 MPa, normalmente possuem cabeça sextavada com rosca parcial ou ao longo de todo o seu comprimento (Figura 5), na Tabela 7 apresenta-se suas dimensões básicas (SOUZA. 2022). Os parafusos de alta resistência, fabricados com aço de médio carbono e tratamento térmico, seguem as especificações das normas ASTM e/ou ISO como mostrado na Tabela 8 com relação aos parafusos de alta resistência ASTM A325 e ASTM A490.

Figura 5 – Parafuso comum ASTM A307.

Fonte: Souza (2022).

Tabela 7 – Dimensões básicas para parafusos comuns.

Diâmetro nominal		E (mm) máx.	F (mm)		G (mm)		H (mm)		R (mm)		LT (mm)	
Pol.	mm		máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	L<6"	L>6"
1/2"	12,5	13,081	19,050	18,415	21,996	20,980	9,245	7,670	0,762	0,254	31,750	38,100
5/8"	16,0	16,306	23,812	23,012	27,508	26,238	11,277	9,601	1,524	0,508	38,100	44,450
3/4"	19,0	19,507	28,575	27,635	32,994	31,496	13,309	11,557	1,524	0,508	44,450	50,800
7/8"	22,0	22,733	33,324	32,232	38,506	36,753	15,341	13,487	1,524	0,508	50,800	57,150
1"	25,0	25,958	38,100	36,830	43,992	41,986	17,780	15,011	2,286	0,762	57,150	63,500

Fonte: Souza (2022).

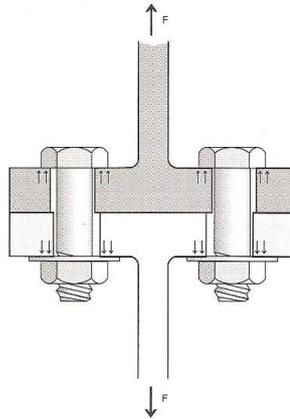
Tabela 8 – Dimensões básicas para parafusos ASTM A307 e ASTM A490.

Diâmetro nominal		E		F		G		H		R		L _T básico
Pol.	mm	máx.	mín.									
1/2"	12,5	13,08	12,24	22,22	21,59	25,65	24,61	8,20	7,67	0,787	0,228	25,40
5/8"	16,0	16,30	15,36	26,97	26,18	31,16	29,84	10,23	9,60	1,574	0,533	31,75
3/4"	19,0	19,50	18,51	31,75	30,78	36,65	35,12	12,26	11,55	1,574	0,533	35,05
7/8"	22,0	22,73	21,64	36,52	35,40	42,16	40,36	14,30	13,48	1,574	0,787	38,10
1"	25,0	25,95	24,79	41,27	40,00	47,65	45,61	15,92	15,01	2,362	1,574	44,45
1.1/4"	32,0	32,43	31,06	50,80	49,22	58,64	56,10	20,65	19,02	2,362	1,574	50,80

Fonte: Souza (2022).

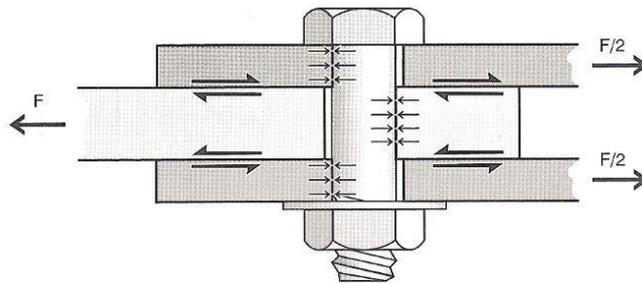
Pode-se classificar as ligações parafusadas como: ligações à tração (Figura 7), ligação à força cortante, subdividas em ligações por atrito (Figura 8) e por contato (Figura 9), e ligações sujeitas a esforços combinados de cortante e de tração. As ligações por contato acontecem quando apenas os parafusos resistem aos esforços da ligação, isso se dá em razão da folga que existe entre os furos das peças e cada parafuso. No entanto, nas ligações por atrito é aplicado uma força de protensão originada pelo torque nos parafusos, criando assim um atrito entre os elementos da ligação, impedindo que se desloquem (DE MATTOS DIAS, 2006).

Figura 7 – Ligação à força de tração.



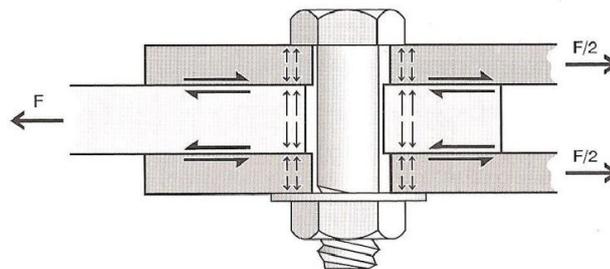
Fonte: De Mattos Dias (2006).

Figura 8 – Ligação à força de cortante por contato.



Fonte: De Mattos Dias (2006).

Figura 9 – Ligação à força cortante por atrito.



Fonte: De Mattos Dias (2006).

Segundo Bellei, Pinho e Pinho (2008), dentro das ligações parafusadas pode-se citar algumas vantagens:

- a) Rapidez nas fabricações das peças;
- b) Velocidade na execução das ligações em campo;
- c) Baixo consumo de energia, sendo possível executar em locais com pouca energia disponível;
- d) Necessidade de poucas pessoas, as quais não necessitam grandes qualificações;

- e) Melhor resposta às tensões de fadiga.

Assim como as facilidades que esse método de ligação traz pode-se, segundo Bellei, Pinho e Pinho (2008), pode-se citar alguns empecilhos como:

- a) Dificuldade de fazer alterações e correções de montagem;
- b) Necessidade de se verificar as áreas líquidas e esmagamentos das peças, podendo precisar reforços nesses pontos;
- c) Alguns casos se necessitam pré-montagens na fábrica para o casamento perfeito dos furos;
- d) Necessário que se tenha uma previsão antecipada, para que não haja falta de parafusos em obra.

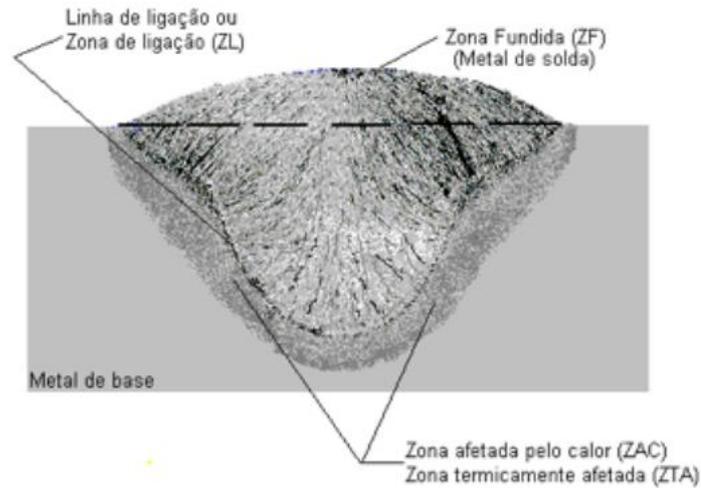
2.4.2 Ligações soldadas

A soldagem é a técnica de unir duas ou mais partes, assegurando entre elas continuidade do material e suas características mecânicas e químicas. A energia para provocar a fusão dos materiais pode ser de origem elétrica, química, óptica ou mecânica. As mais utilizadas na indústria são de energia elétrica, onde a fusão do aço é provocada pelo calor produzido por um arco voltaico (PFEIL e PFEIL, ,2009).

Atualmente é possível fazer uso de todas as vantagens que a solda oferece, pois através do desenvolvimento tecnológico é possível eliminar quase totalmente os antigos temores com relação a fissura e fadiga. As estruturas soldadas se tornam mais rígidas, ao contrário das ligações parafusadas. Claro que dependendo da aplicação precisa haver uma avaliação se essa rigidez não irá causar problemas onde há necessidade de conexões simples e com pouca resistência (BELLEI, 2003).

O processo de soldagem é classificado como a união de forças microscópicas, ou seja, ocorre a união das ligações químicas entre as partes a serem unidas, onde existe a aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, podendo ser utilizado um material intermediário nesse processo. As peças a serem unidas são chamadas de material base ou metal base (MB), já o material adicionado à junta é chamado de material de adição o metal de adição (MA). Após a solda ser executada, a junta é chamada de zona fundida (ZF). A Figura 10 demonstra a separação dessas partes.

Figura 10 – Vista Transversal de um cordão de solda sobre chapa.



Fonte: Felizardo (2016).

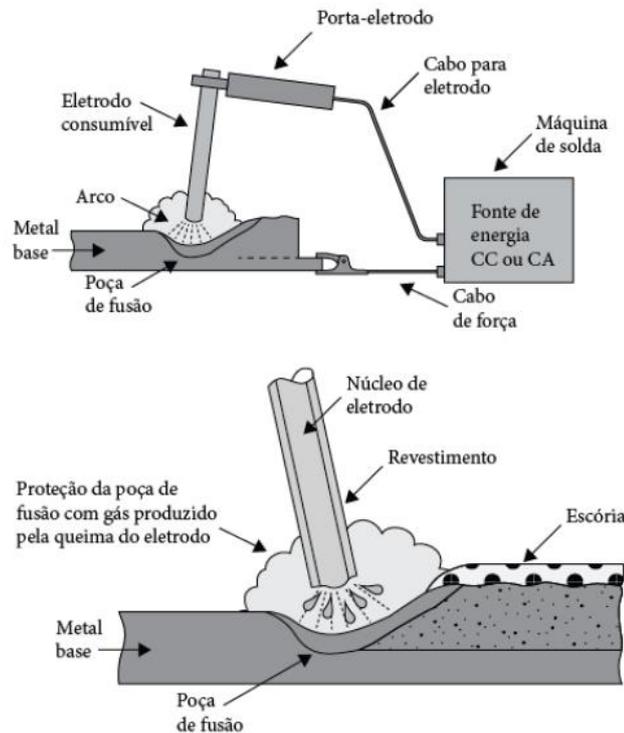
Segundo Pfeil e Pfeil (2009), o material que é fundido deve ser isolado da atmosfera, evitando assim a formação de impurezas na solda. Conforme NBR 14762 e NBR 8800 os eletrodos, arames e fluxos para soldagem deve obedecer às seguintes especificações:

- a) Para eletrodos de aço doce, revestido, para soldagem por arco elétrico :AWS A5.1;
- b) Para eletros de aço de baixa liga, revestidos, para soldagem por arco elétrico: AWS A5.5;
- c) Para eletrodos nus de aço doce e fluxo, para soldagem por arco submerso: AWS A5.17;
- d) Para eletrodos de aço doce, para soldagem por arco elétrico com proteção gasosa: AWS A5.18;
- e) Para eletrodos de aço doce, para soldagem por arco com fluxo no núcleo: AWS A5.20;
- f) Para eletrodos de baixa liga e fluxo, para soldagem por arco elétrico submerso: AWS A5.23;
- g) Para eletrodos de baixa liga, para soldagem por arco elétrico com proteção gasosa: AWS A5.28;
- h) Para eletrodos de baixa liga, para soldagem por arco com fluxo no núcleo: AWS A5.29;

O processo manual com eletrodo revestido tem como característica uma máquina de solda, podendo ser retificador, transformador ou gerador, onde se produz a corrente necessária para a obtenção do arco elétrico entre o eletrodo revestido com as partes a serem soldadas. Esse

processo depende inteiramente da habilidade manual do soldador durante todo o processo (BELLEI, 2003). Na Figura 11 representa-se uma imagem do sistema de soldagem por eletrodo revestido.

Figura 11 – Processo de Soldagem com eletrodo revestido.



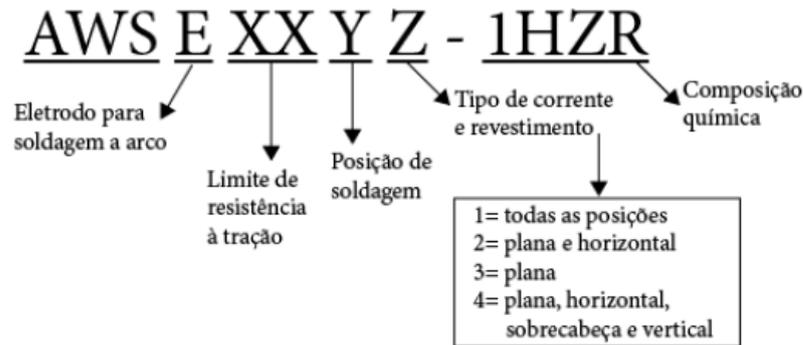
Fonte: Souza (2022).

O eletrodo é uma vareta mecânica com diâmetros que variam entre 1,5 mm e 8 mm com comprimento entre 20 cm e 45 cm. Possuem um revestimento constituído principalmente de material celulósico, onde durante o processo de soldagem o eletrodo é consumido, fornecendo o material de adição. A queima do revestimento produz gases que protegem a fusão, ajudando a estabilizar o arco elétrico. Existem no mercado diversas características específicas para as mais diversas aplicações, normalmente variando a composição do revestimento e o limite de resistência do material de adição (SOUZA, 2022).

A norma AWS utiliza um código contendo números e letras para especificar o tipo do eletrodo revestido conforme descrito na Figura 12. Neste código os primeiros dois números indicam a resistência à tração do eletrodo em psi, que em tradução literal significa Libras por Polegada Quadrada. Esses dois primeiros números são multiplicados por 1000 (mil) para indicar esse valor. O terceiro algarismo é referente a possível posição da soldagem. Já o quarto algarismo indica qual o tipo de revestimento utilizado no eletrodo, assim como a corrente elétrica de trabalho, sendo elas definidas como corrente contínua ou corrente alternada. Por fim,

as informações após o hífen estão indicando a composição química. Para requisitos de soldas estruturais, uma das características principais está relacionado ao limite de resistência. Os eletrodos mais utilizados são os dos modelos E60XX e E70XX (SOUZA, 2022).

Figura 12 – Sistema de classificação para eletrodos revestidos.

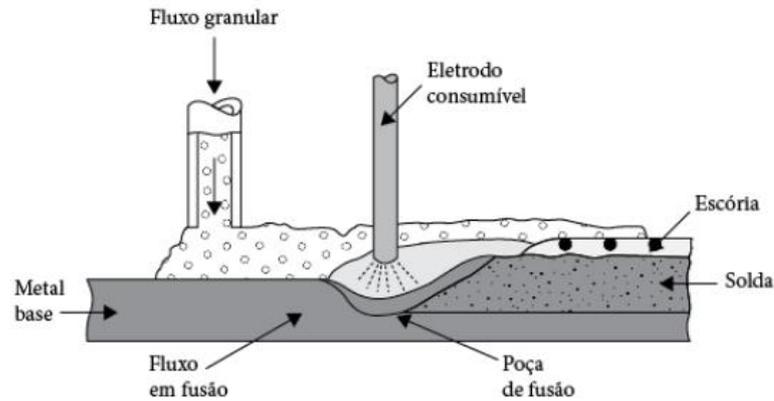


Fonte: Souza (2022).

O processo a arco submerso é um processo que utiliza equipamentos automáticos ou semiautomáticos que alimentam o eletrodo continuamente, tendo o arco submerso pelo fluxo, que substitui o revestimento do eletrodo, possuindo grande produtividade (BELLEI, 2003). Essa produtividade pode ser associada à alimentação do eletrodo automaticamente por uma bobina, dessa forma não está limitado ao comprimento do eletrodo a 45 cm como descrito anteriormente no eletrodo revestido. Para proteção da poça de fusão, o arco é submerso em um fluxo granular (Figura 13), de um material fusível também alimentado de forma automática.

Esse processo apresenta uma solda satisfatória, porém devido ao fluxo granular, só é possível utilizar o processo a arco submerso para execução de soldas no plano horizontal. Embora seja utilizada para chapas grossas, pode ser utilizada para uma variada gama de espessuras a partir de 5 mm (SOUZA, 2022).

Figura 13 – Processo de soldagem a arco submerso.



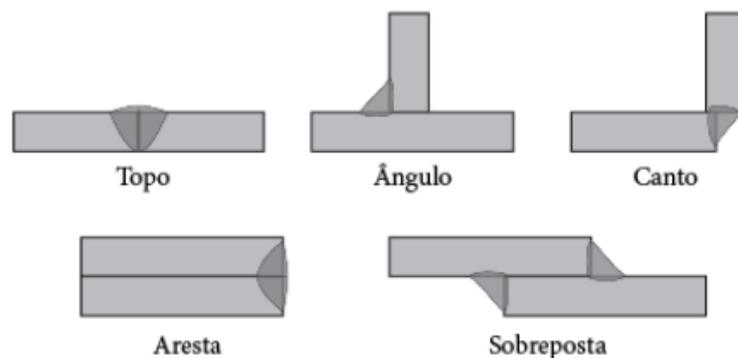
Fonte: Souza (2022).

2.4.3 Tipos de solda e juntas soldadas

As soldas podem ser classificadas como planas, horizontais e sobre a cabeça. Elas podem ser de filete, entalhe ou chanfro, ranhura e tampão. A mais utilizada é a solda de filete, pois para cargas de pouca intensidade é a mais econômica, devido a não necessitar de muita preparação do material. Já para cargas de maior intensidade, as soldas de entalhe, de penetração parcial ou total são mais aconselháveis por possuírem resistência elevada com menor volume de solda. A utilização de ranhura ou tampão está limitado a casos especiais onde a solda de filete ou entalhe não podem ser aplicadas (SOUZA, 2022).

Para definir a junta soldada pode-se dizer que é a região onde as peças são unidas, sendo que o comprimento dessa região é chamado comumente de cordão de solda. A posição das peças a serem soldadas dão origem a vários tipos de juntas. A Figura 14 mostra os tipos de juntas mais utilizados.

Figura 14 – Tipos de junta de solda.



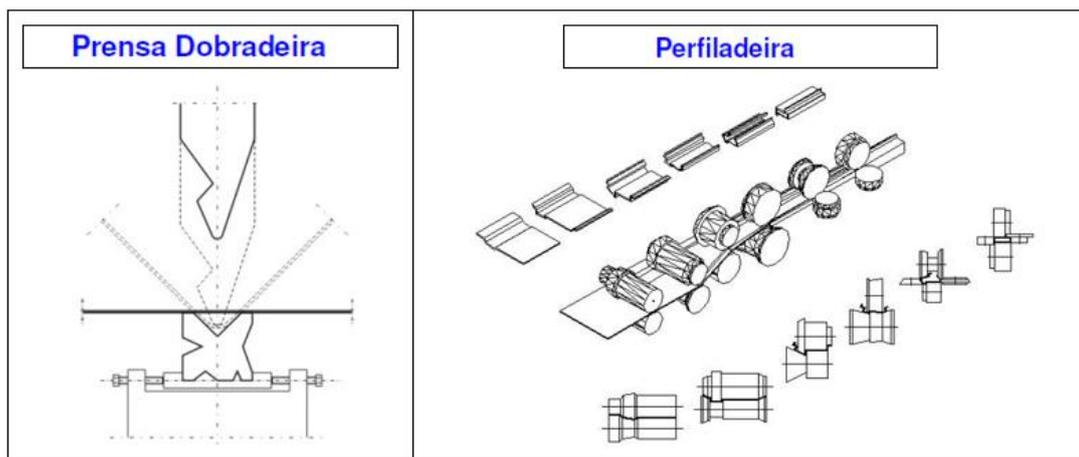
Fonte: Souza (2022).

2.5 Perfis dobrados a frio

Por definição da ABNT NBR 14762:2010, entende-se por perfil estrutural dobrado a frio aquele que é obtido por dobramento em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, utilizando bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo que estes procedimentos são realizados com o aço em temperatura ambiente (Figura 15).

Os perfis formados a frio tornam-se cada vez mais viáveis dentro da construção civil devido a rapidez e economia exigidas pelo mercado. Sua utilização pode ser aplicada em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, casas populares e edifícios de pequeno porte (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Figura 15 – Prensa dobradeira e perfiladeira.



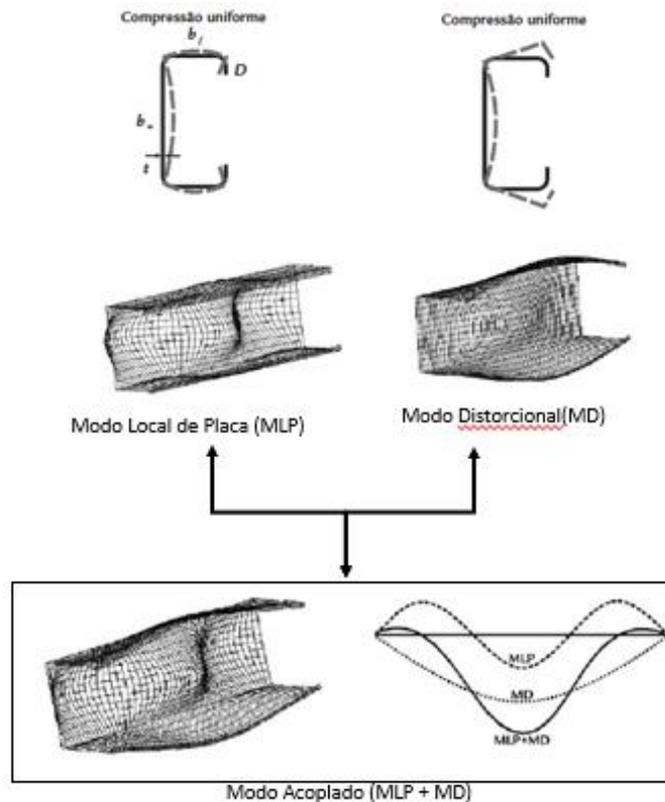
Fonte: Adaptado de Carvalho e Grigoletti (2014).

Para obras de grande porte a estrutura principal é constituída por perfis laminados e perfis soldados. Os perfis dobrados a frio quando utilizados, muitas vezes se encontram como estruturas secundárias, como terças, longarinas, apoios de forro e contraventamento. Devido à grande variedade das formas transversais das seções dos perfis dobrados a frio, e de sua boa relação massa/resistência, eles alcançam um lugar de destaque em obras de menor porte, pois podem ser obtidos mais facilmente em comparação aos perfis laminados, que precisam de maior prazo de entrega (JAVARONI, 1999).

Para o seu correto dimensionamento é necessário a compreensão de suas características, pois este material possui algumas peculiaridades, por serem constituídos de perfis de seção aberta e de sua espessura ser limitada a valores menores, as barras possuem baixa resistência à torção (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014). Santos, Nagahama e Gadéa (2013), explicam que

devido à essa seção aberta e por paredes muito esbeltas, acabam tornando os perfis mais suscetíveis aos fenômenos da flambagem local de placa (FLP) e flambagem distorcional (FD). Essas deformações ocorrem no plano da seção transversal, ao mesmo tempo em que o eixo do perfil permanece indeformado. Na Figura 16 pode-se observar como esses efeitos ocorrem no perfil U.

Figura 16 – Deformações por flambagem local de placa e distorcional.



Fonte: Adaptado de Santos, Nagahama e Gadéa (2013).

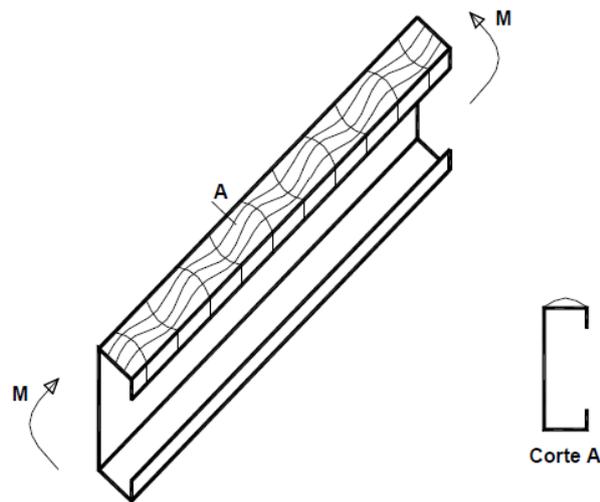
2.5.1 Efeitos do dobramento

O dobramento de uma chapa provoca uma estrição na região da dobra, no entanto a variação nas dimensões da seção decorrente dessa estrição pode ser desconsiderada para efeitos de dimensionamento. O dobramento de uma chapa, tanto por perfilação como utilizando dobradeira provoca um fenômeno conhecido como envelhecimento dado pelo carregamento até a zona plástica, descarregamento e posterior carregamento não imediato, gerando um aumento na resistência ao escoamento e da resistência à ruptura. O diagrama tensão-deformação sobre uma elevação na direção das resistências limites, acompanhado de um estreitamento no patamar de escoamento (SILVA, PIERIN & SILVA, 2014).

Esta redução de ductibilidade significa uma menor capacidade de o material se deformar, desta forma o raio do dobramento deve ser adequado ao material e a sua espessura. Isto para se evitar o aparecimento de fissuras. Este aumento das resistências ocorre na região das curvas quando o processo é descontínuo, pois neste processo apenas a região das curvas está sob o efeito do carregamento. Quando é um processo contínuo esse acréscimo ocorre em outras regiões do perfil. O aumento das resistências de escoamento e à ruptura pode ser utilizado no dimensionamento de barras submetidas à compressão e à flexão, desde que não estejam submetidas à redução de capacidade devido à instabilidade local (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Os perfis de chapa dobrada estão sujeitos ao modo de falha por instabilidade sob carregamentos frequentemente menores que aqueles correspondem à plastificação total ou parcial. Esta instabilidade pode ser classificada como global ou local, sendo que elas podem ocorrer simultaneamente, sendo que esta instabilidade está relacionada com as características geométricas dos perfis, vínculos e carregamentos. A Figura 17 ilustra o fenômeno de instabilidade local, onde neste caso, a mesa comprimida sofre deslocamentos na direção normal ao seu plano (JAVARONI, 1999).

Figura 17 – Flambagem local para mesa comprimida do perfil fletido.



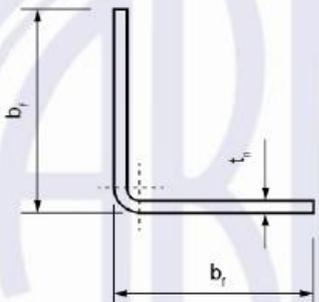
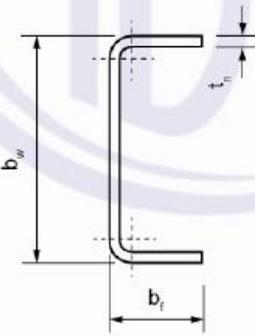
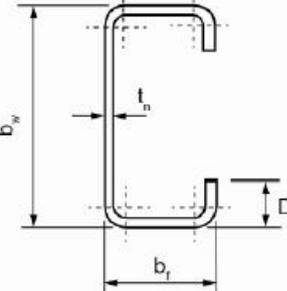
Fonte: Javaroni (1999).

2.5.2 Padronização dos perfis

A norma ABNT NBR 6355: 2012 define os requisitos exigíveis de perfis estruturais formados a frio com seção transversal aberta, assim com tolerâncias dimensionais, aspectos

superficiais, acondicionamento e inspeção. A designação normativa para os perfis é feita pela descrição do tipo do perfil \times dimensões dos lados \times espessuras, sendo que todas as dimensões são dadas em milímetros. A Tabela 9 mostra alguns dos tipos de perfis com sua nomenclatura normativa.

Tabela 9 – Perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012.

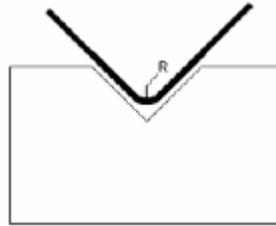
Série	Seção transversal	Designação ^a
Cantoneira de abas iguais		L $b_f \times t_n$ Exemplo: L 50 \times 3,00
U simples		U $b_w \times b_f \times t_n$ Exemplo: U 150 \times 50 \times 2,65
U enrijecido		Ue $b_w \times b_f \times D \times t_n$ Exemplo: Ue 150 \times 60 \times 20 \times 2,65

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6355 (2012).

No processo de dobragem, a chapa é pressionada contra a matriz da dobradeira, criando uma curvatura definida pelo raio interno de dobramento (Figura 18). O perfil gerado combina elementos planos, como mesas, almas e enrijecedores, com elementos curvos nas regiões de contorno ou esquinas. A norma define com elemento a parte constituída de um perfil formado a frio, o elemento com bordas vinculadas (AA) refere-se ao elemento plano com duas bordas

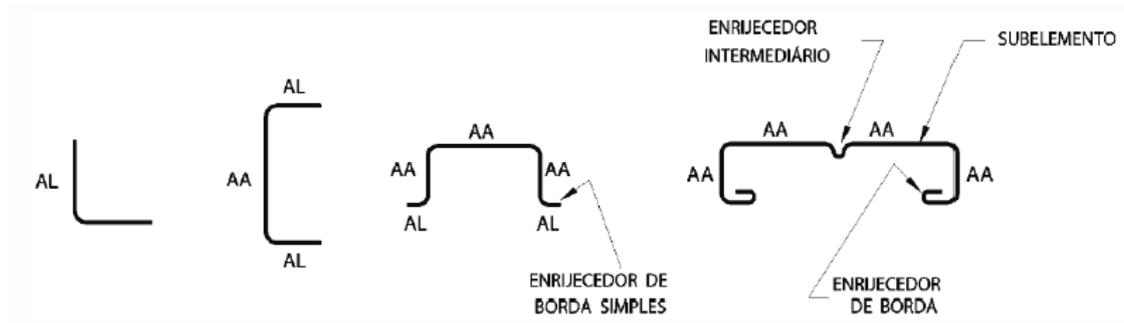
vinculadas a outros elementos na direção longitudinal do perfil, e o elemento com borda livre (AL) refere-se ao elemento plano vinculado a outro elemento em apenas uma borda na direção longitudinal do perfil, como mostrado na Figura 19 com alguns exemplos de perfis (CARVALHO e GRIGOLETTI, 2014).

Figura 18 – Demonstração do raio de dobra.



Fonte: Carvalho e Grigoletti (2014).

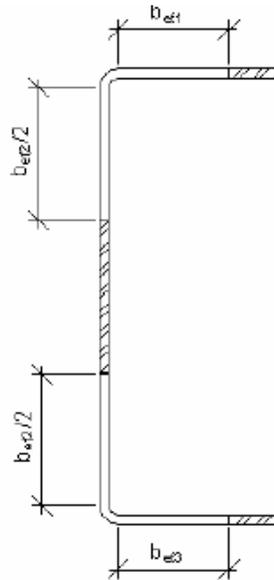
Figura 19 – Tipos de elementos componentes de perfis formados a frio.



Fonte: ABNT NBR 14762 (2010).

Outras dimensões especificadas pela NBR 14762 que podem ser definidas são a espessura (t), que se refere a espessura da chapa de aço, sem considerar o revestimento. A largura do elemento (b), considerando a largura da parte plana, medida no plano da seção transversal. A largura efetiva (b_{ef}) considera-se a largura de um elemento reduzida para efeitos de projeto, devido à flambagem local. Nos elementos AA a redução ocorre na parte central, e nos elementos AL ocorre na borda livre como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Demonstração da largura efetiva em perfil U.



Fonte: Carvalho e Grigoletti (2014).

2.6 Comportamento Estrutural de Perfis Dobrados

Os perfis de chapa dobrada estão sujeitos a falha por carregamento frequentemente menores aos que correspondem à plastificação total ou parcial de sua seção transversal. Essa instabilidade pode ser classificada como sendo do tipo local ou global, podendo as duas ocorrerem simultaneamente, sendo que a sua ocorrência está vinculada às características geométricas dos perfis, assim como às condições de vínculos e carregamentos (JAVARONI, 1999).

É importante entender o conceito relacionado à nomenclatura, antes de iniciar um estudo a respeito dos efeitos estruturais em perfis dobrados. Iniciando pela flambagem global, ao analisar um pilar ideal, absolutamente reto, sem imperfeições de fabricação sendo submetido a uma força aplicada perfeitamente centrada F . Ao incrementar a força gradativamente até atingir o que é chamada de força crítica de flambagem elástica F_e , este pilar pode permanecer na posição reta em um equilíbrio instável, ou havendo qualquer perturbação, procurar um posição de equilíbrio estável (Figura 21), havendo portanto, duas soluções teóricas de equilíbrio.

Figura 21 – Representação Força x Deslocamento para materiais elástico-linear.



Fonte: Silva, Pierin e Silva, (2014).

Ao se analisar um pilar com imperfeições geométricas, aplicando-se uma força perfeitamente axial, ao se incrementar o carregamento, a presença das imperfeições causará flexão, assim, o pilar real estará submetido à flexão-composta e o estado-limite último poderá ser alcançado por valores inferiores ao da força axial crítica. Conclui-se que há uma diferença conceitual entre a resposta estrutural de um pilar ideal e a de um pilar real, mesmo que estejam sujeitos apenas à força axial.

Para que não haja conflito de entendimento entre dois comportamentos distintos denomina-se flambagem ao fenômeno do aparecimento de um ponto de bifurcação no diagrama força x deslocamento de um ponto de uma barra ou chapa comprimida. Em elementos reais, quando há essas imperfeições geométricas, não ocorre esse ponto de bifurcação, portanto não ocorre flambagem, distinguindo-se a flambagem da flexão composta. Como essas imperfeições são de pequeno valor, os modos de deformação das barras de aço lembram os modos de flambagem. O fenômeno da ocorrência da flambagem em estruturas reais, de deformações transversais aos esforços aplicados, podem ser denominadas de instabilidade (SILVA, PIERIN e SILVA, 2014).

Uma placa comprimida entra em colapso de duas maneiras, sendo por escoamento, em placas muito espessas, onde a relação largura da placa/espessura é menor que 10, ou por flambagem.

2.6.1 Ações

Ao iniciar a análise das ações nas estruturas, primeiramente é necessário entender a diferença entre Estados-Limites Últimos (ELU) e Estados-Limites de Serviço (ELS). O ELU é

a máxima carga que a estrutura suporta antes de deformar, ou seja, está relacionado com o esgotamento da capacidade resistente e risco à segurança da estrutura. Os ELS estão relacionados aos critérios de segurança e conforto para os usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de modo geral (VIANA, 2018).

Os estados limites considerados nos projetos dependem dos tipos de materiais de construção empregados devendo ser especificados pelas normas referentes. Os ELU que devem ser considerados devem ser caracterizados por perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido, assim como para ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais. Outros limites últimos a se considerar são a transformação da estrutura, no todo ou em parte, em um sistema hipostático, e os limites de instabilidade por deformação e instabilidade dinâmica.

Com relação aos ELS, usualmente são considerados os danos ligeiros ou localizados, que comprometem o aspecto estético da construção ou mesmo a durabilidade da estrutura, assim como deformações excessivas, que afetam a utilização normal da construção, vibrações excessivas ou desconfortáveis. As combinações das ações de serviço podem ser três grandezas diferentes, como combinações quase permanentes que podem atuar durante grande parte da vida da estrutura, da ordem da metade deste período, combinações frequentes que se repetem muitas vezes durante o período da vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos ou com duração igual a uma parte não desprezível desse período em torno de 5% e combinações raras, que podem atuar no máximo algumas horas durante a vida da estrutura (NBR 8681, 2003).

As condições de segurança das ELU são expressas pela desigualdade mostrada na Equação 1, onde S_d representa valores de cálculo dos esforços atuantes, podendo ser em alguns casos específicos a representação das tensões atuantes, tendo como base as combinações últimas das ações e R_d representa os valores de cálculo dos esforços resistentes correspondentes, conforme tipo de situação descritos na NBR 14762:2010. Quando a segurança é verificada isoladamente em relação a cada um dos esforços atuantes, as condições de segurança tomam a forma simplificada de acordo com a Equação 2.

$$\theta(S_d, R_d) \geq 0 \quad (1)$$

$$S_d \geq R_d \quad (2)$$

Tendo esclarecido de forma geral, um fator a se considerar quando se fala a respeito do comportamento das estruturas, relaciona-se com as ações a que essa estrutura estará sujeita. Em

uma análise estrutural, devem ser consideradas as ações que podem produzir efeitos significativos para a estrutura, levando em conta os Estados-Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS).

Para melhor entendimento, pode-se entender as definições da norma relacionada as ações e segurança nas estruturas, a ABNT NBR 8681:2003. Nesta norma as ações são classificadas em três tipos segundo a sua variabilidade, sendo elas classificadas como as ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

São consideradas como ações permanentes diretas à estrutura, aquelas como os pesos próprios dos elementos da construção, considerando o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos, os pesos dos equipamentos, assim como empuxos devidos ao peso próprio de terras não removidas e outras ações permanentes aplicadas. A também as ações permanentes indiretas como o caso de protensões, recalques de apoio e retração de materiais.

As ações variáveis são aquelas consideradas acidentais das construções, assim como efeitos de forças de frenação, impacto e centrífugas, efeitos de vento, de variações de temperatura, de atrito dos aparelhos de apoio, assim como pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Em razão de sua probabilidade de ocorrência durante a vida útil da construção, as ações variáveis podem ser classificadas como normais, cuja probabilidade de ocorrência é suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas e como um dado de construção, ou podem ser ações variáveis especiais, como as ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza e intensidade especiais, onde devem ser definidas especificamente para situações especiais.

Por fim existem as ações excepcionais, como aquelas causadas por explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Ressalta-se que os incêndios podem ser levados em conta por meio de uma redução da resistência dos materiais construtivos da estrutura.

2.6.2 Valores característicos

Para definição de valores nominais característicos, são considerados para as ações que não tenham a sua variabilidade adequadamente expressa por distribuição de probabilidades, os valores característicos nominais (F_k). Para as ações permanentes os valores característicos (F_{gk}) são adotados iguais aos valores médios das respectivas distribuições. As ações variáveis características (F_{qk}) são estabelecidas por consenso, tendo uma probabilidade preestabelecida

de serem ultrapassadas no sentido desfavorável, durante um período projetado de 50 anos (NBR 14762, 2010).

As ações são representadas por seus valores representativos (F_r), que podem ser denominados como os valores característicos, valores convencionais excepcionais utilizados nas ações excepcionais e valores reduzidos, onde estes são em função de combinações. Neste último caso, nas verificações de ELU, quando a ação considerada se combina com a ação principal, determinada pela expressão ψF_k , e na ELS determinados pelas expressões $\psi_1 F_k$ e $\psi_2 F_k$ estimando valores frequentes e quase permanentes de uma ação principal. Os valores de cálculo das ações são obtidos a partir de F_r , multiplicando pelos respectivos coeficientes de ponderação (γ_f), sendo elas ponderadas de acordo com a Equação 3. Nesta equação γ_{f1} representa a parcela que considera a variabilidade das ações, γ_{f2} representa a parcela do coeficiente de simultaneidade de atuação das ações e γ_{f3} considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, podendo ser por problemas construtivos, por deficiência do método de cálculo empregado, de valor igual ou superior a 1,10. Estes valores podem ser encontrados nas Tabelas 10 e 11, sendo que na Tabela 10 estão representados os valores para o produto $\gamma_{f1} \gamma_{f3}$ sendo o produto representado por γ_g e γ_q . Já na Tabela 11 estão representados os valores para γ_{f2} , onde este coeficiente é igual ao fator de combinação ψ_0 (NBR 14762, 2010).

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3} \quad (3)$$

Tabela 10 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f2} \gamma_{f3}$.

Combinacões	Ações Permanentes (γ_g) ^{a,c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializado e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais de Construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_v) ^{a,d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Normais	1,20		1,40	1,20	1,50	
	Ações variáveis (γ_v) ^{a,d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Especiais de Construção	1,00		1,20	1,10	1,30	
Excepcionais	1,00		1,00	1,00	1,00	

a Os Valores ente parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50, quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a esse valor-limite.

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 11 – Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para ações variáveis.

Ações		γ_{fz}^a		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2^d
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 6.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

2.6.3 Combinações das ações

Os carregamentos são definidos pelas combinações das ações que têm probabilidade de atuarem simultaneamente sobre a estrutura durante um período preestabelecido. Essas combinações devem ser feitas para se considerar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. Os estados-limites últimos e de serviços devem ser verificados em função de combinações últimas e combinações de serviço.

As combinações últimas normais decorrem do uso previsto da edificação e devem ser consideradas tantas combinações de ações quanto for necessário para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos aplicáveis. Em cada uma destas combinações devem ser incluídas as ações permanentes, a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias reduzindo-se seus valores de combinação, aplicando-se a Equação 4 para cada combinação.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{Gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{Q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{Qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (4)$$

Nesta equação $F_{G_i,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes, $F_{Q_1,k}$ representa o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação e $F_{Q_j,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem ocorrer simultaneamente com a ação variável principal.

Há também as combinações últimas especiais que decorrem da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especial, em que os efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas nas combinações normais. Esses carregamentos são transitórios de duração muito pequena em relação a vida útil da estrutura. Cada carregamento especial corresponde a uma única combinação última, onde devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, com valores característicos e demais ações com probabilidade de ocorrência simultânea. Para tal utiliza-se a Equação 5 descrita abaixo.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G_i,k}) + \gamma_{q1} F_{Q_1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j,ef} F_{Q_j,k}) \quad (5)$$

Pode-se observar algumas semelhanças com a Equação 4, $F_{G_i,k}$ representando os valores característicos das ações permanentes, $F_{Q_1,k}$ representa o valor característico da ação variável especial para a combinação e $F_{Q_j,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem ocorrer simultaneamente com a ação variável especial. Existe também o fator $\psi_{0j,ef}$ representando os fatores de combinação efetivos de cada umas das ações que podem atuar simultaneamente com a ação variável F_{Q_1} .

Existem também as combinações últimas de construção, que devem ser levadas em consideração nas estruturas em que haja riscos de ocorrência de estados-limites últimos durante o processo de construção. Esse carregamento é transitório e deve ser definido em cada caso particular. A NBR 14762 ressalta que devem ser consideradas quantas ações forem necessárias para a verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos durante a fase de construção da estrutura. Há também as condições últimas excepcionais que devem ser consideradas no projeto de estrutura de determinados tipos de construção.

Além das condições últimas, devem ser consideradas também as ações de serviço, sendo classificadas de acordo com sua permanência na estrutura em quase permanentes, frequentes e raras. As combinações quase permanentes são aquelas que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade desse período, sendo usadas para os efeitos de longa duração e para a aparência da construção. As combinações frequentes são consideradas aquelas que se repetem durante o período de vida da estrutura na ordem de 10^5 vezes em 50

anos, sendo utilizadas para os estados-limites reversíveis, como os relacionados ao conforto dos usuários e ao funcionamento dos equipamentos, tais como vibrações excessivas ou movimentos laterais excessivos que podem comprometer vedações, empoçamentos em coberturas e o surgimento de fissuras. Por fim, as combinações raras são aquelas que atuam no máximo algumas horas durante o período projetado, onde são utilizados os estados-limites irreversíveis, pois deve-se considerar danos permanentes à estrutura e a outros componentes da construção.

2.6.4 Resistências

As resistências dos materiais, de acordo com a NBR 14762, são representados por valores característicos definidos, como aqueles em que em um lote de material, têm até 5% de probabilidade de não serem atingidos. O valor característico pode ser substituído pelo valor nominal. A resistência de cálculo do aço (f_d) é demonstrada pela Equação 6, onde f_k é a resistência característica ou nominal e γ_m é o coeficiente de ponderação, que é dado pela Equação 7.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (6)$$

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3} \quad (7)$$

Os coeficientes da Equação 7 são utilizadas para representar o coeficiente de ponderação da variabilidade da resistência do aço (γ_{m1}), o coeficiente de ponderação da diferença entre a resistência do aço no corpo de prova e na estrutura (γ_{m2}) e o coeficiente de ponderação dos desvios gerados na construção e as aproximações feitas em projeto, do ponto de vista das resistências (γ_{m3}). A norma também especifica que quando uma determinada resistência não depender de medidas feitas de forma convencional em ensaios de corpos de prova padronizados, podem ser utilizadas tensões resistentes de cálculo para se determinar as solicitações resistentes.

2.6.5 Métodos de Dimensionamento de Barras

A norma para os perfis formados a frio prevê três métodos de dimensionamento de barras, sendo eles o método da largura efetiva (MLE), o método da seção efetiva (MSE) e o método da resistência direta (MRD). A primeira etapa em que a norma começa a explicar a respeito do

dimensionamento das barras, trata a respeito da relação largura-espessura de um elemento, desconsiderando os enrijecedores intermediários, quando houver, e essa relação não pode ultrapassar os valores descritos na Tabela 12. Nota-se que nesta tabela de relação apontam-se itens dentro da norma respectivos a cada resultado de relação largura-espessura (NBR 14762, 2010).

Tabela 12 – Valores máximos de relação largura-espessura.

Caso a ser analisado	Valor máximo da relação largura-espessura ^a
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma ou mesa e a outra a enrijecedor de borda simples	$(b/t)_{\text{máx}} = 60$ ^b
Elemento comprimido AA, tendo uma borda vinculada a alma e a outra a mesa ou outro tipo de enrijecedor de borda com $I_s \geq I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Alma de perfis U não enrijecidos sujeita à compressão uniforme	$(b/t)_{\text{máx}} = 90$
Elemento comprimido com ambas as bordas vinculadas a elementos AA	$(b/t)_{\text{máx}} = 500$ ^c
Elemento comprimido AL ou AA com enrijecedor de borda tendo $I_s < I_a$ conforme 9.2.3	$(b/t)_{\text{máx}} = 60$ ^b
Alma de vigas sem enrijecedores transversais	$(b/t)_{\text{máx}} = 200$
Alma de vigas com enrijecedores transversais apenas nos apoios e satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\text{máx}} = 260$
Alma de vigas com enrijecedores transversais nos apoios e intermediários, satisfazendo as exigências de 9.5.1	$(b/t)_{\text{máx}} = 300$
^a b é a largura do elemento; t é a espessura. ^b Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 30$. ^c Para evitar deformações excessivas do elemento, recomenda-se $(b/t)_{\text{máx}} = 250$.	

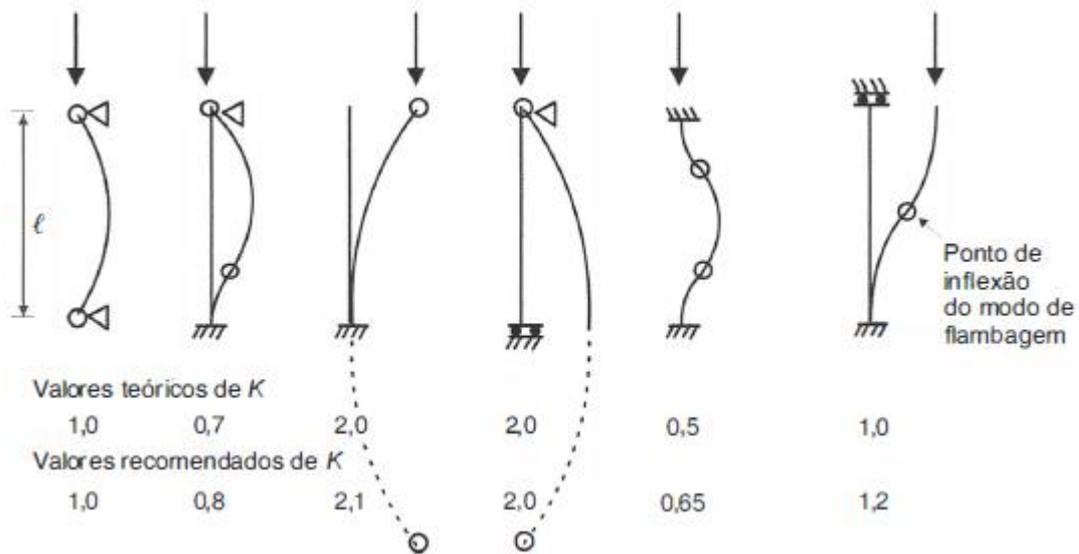
Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

2.6.6 Flambagem Local

Ao se projetar uma estrutura é necessário que esta satisfaça requisitos específicos de resistência, deflexão e estabilidade. Muito dos métodos usados para se determinar resistência e deflexão, consideram o elemento estrutural em equilíbrio estável, porém alguns elementos, ao receberem uma carga de compressão e a geometria deste elemento for esbelta o suficiente, dependendo da intensidade desta carga, poderá ocorrer uma deflexão ou uma oscilação lateral, essa deflexão lateral é chamada de flambagem. Esta carga máxima no eixo de uma coluna é denominada carga crítica, onde qualquer carga adicional provocará flambagem na coluna. Essa flambagem acontecerá em torno do eixo principal da seção que tenha o menor momento de inércia, ou seja, o eixo menos resistente (HIBBELER, 2010).

A distância entre os pontos de momento nula da haste comprimida é chamado de comprimento de flambagem (PFEIL e PFEIL, 2009). Dependendo do tipo de apoio, para previsões de cálculo esse comprimento prevê um coeficiente de flambagem por flexão K_x e K_y , que é utilizado para a determinação desse comprimento nos cálculos da NBR 14762:2010. Esse coeficiente K é multiplicado pelo comprimento da seção, onde para seis casos ideais de condições de contorno de elementos isolados, nos quais a rotação e a translação das extremidades são totalmente livres ou totalmente impedidas o valor de K sofre variação (Tabela 13).

Tabela 13 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

A flambagem local, segundo o dimensionamento previsto pela NBR 14762:2010 considera o método das larguras efetiva dos elementos AA e AL para elementos totalmente ou parcialmente comprimidos ou com base no método da seção efetiva, a partir das propriedades geométricas efetivas da seção transversal das barras calculadas.

Para o cálculo do esforço resistente considera uma largura efetiva b_{ef} onde devem ser considerado uma largura efetiva para os elementos AA e uma para os elementos AL. Para se descobrir qual a largura deve-se utilizar, inicia-se calculando um índice de esbeltez reduzido (λ_p) de acordo com a Equação 8.

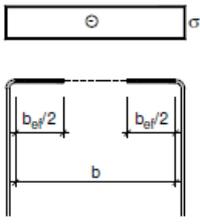
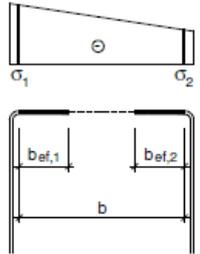
$$\lambda_p = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{0,5} = \frac{b/t}{0,95 \left(k \frac{E}{\sigma}\right)^{0,5}} \quad (8)$$

Nesta equação pode-se observar que o índice de esbeltez reduzido pode ser encontrado pela raiz da tensão normal de compressão (σ) sobre a tensão convencional de flambagem elástica do elemento (σ_{cr}). Pode se continuar para a próxima igualdade da equação expressa pela razão largura (b)/ espessura (t). Outro ponto importante é o produto utilizado na equação, onde há a constante 0,95 multiplicando pela raiz da razão entre o módulo de elasticidade (E) e a tensão normal de compressão (σ). A norma também fornece a Equação 9 onde descreve a forma de encontrar o valor da tensão convencional de flambagem elástica do elemento (σ_{cr}).

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12 (1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (9)$$

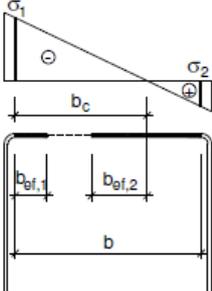
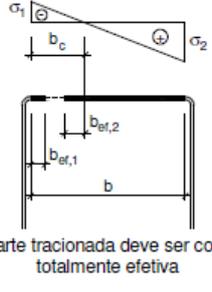
Aqui pode-se analisar alguns elementos que podem ajudar a compreender um pouco mais do processo de cálculo da tensão convencional. Elementos importantes a se destacar nesta equação são, primeiramente o elemento de Poisson (ν) como descrito nas características dos aços, o valor adotado é 0,3 e o coeficiente k que representa o coeficiente de flambagem local do elemento calculado. Para os elementos AA, pode-se utilizar os valores indicados na Tabela 14 e para os elementos AL utilizar os valores descritos na Tabela 15.

Tabela 14 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AA.

Caso a		$k = 4,0$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$

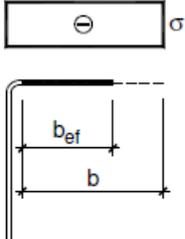
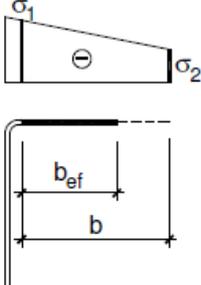
Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 14 – Continuação.

Caso c	 <p>Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$-0,236 < \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = b_{ef} - b_{ef,1}$ $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Caso d	 <p>Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq -0,236$ $b_{ef,1} = b_{ef} / (3-\psi)$ $b_{ef,2} = 0,5b_{ef}$ <p>sendo $b_{ef,1} + b_{ef,2} \leq b_c$</p> $k = 4 + 2(1-\psi) + 2(1-\psi)^3$
Nota: o sinal (-) indica compressão		

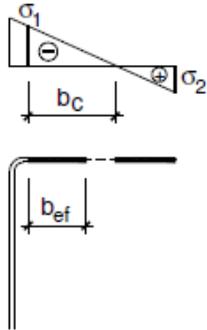
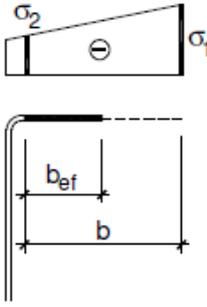
Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 15 – Largura efetiva e coeficiente de flambagem local para elementos AL.

Caso a		$k = 0,43$
Caso b		$0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 1,0$ $k = 0,578 / (\psi + 0,34)$

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 15 – Continuação.

Caso c	 <p data-bbox="459 651 900 696">Nota: a parte tracionada deve ser considerada totalmente efetiva</p>	$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 < 0$ $k = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
Caso d		$-1,0 \leq \psi = \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1,0$ $k = 0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
Nota: o sinal (-) indica compressão		

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Após encontrarem-se os valores das equações 8 ou 9, deve-se realizar uma comparação do índice de esbeltez reduzido (λ_p), onde se o valor encontrado for menor ou igual a 0,673 a largura efetiva é a própria largura do elemento (b) como demonstrado na Equação 10. Se o valor do índice de esbeltez reduzido for maior que 0,673 o valor da largura efetiva (b_{ef}) é dado pela Equação 11, onde o b_c representa a largura da região comprimida do elemento, calculada com base na largura efetiva.

$$b_{ef} = b \quad \text{para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (10)$$

$$b_{ef} = \frac{b_c(1 - \frac{0,22}{\lambda_p})}{\lambda_p} \quad \text{para } \lambda_p > 0,673 \quad (11)$$

De acordo com a NBR 14762:2010, para o estado-limite de escoamento da seção, para cada elemento totalmente ou parcialmente comprimido, σ representa a máxima tensão de

compressão, calculada para a seção efetiva. Isto ocorre quando a seção atinge o início do escoamento. Sendo σ uma carga de tração, pode-se considerar uma distribuição linear de tensões, sendo que a seção efetiva deve ser então determinada através de aproximações sucessivas. Para o estado-limite de instabilidade da barra, quando esta é submetida à compressão, σ é representado pela Equação 12, onde utiliza-se um fator de redução de força axial (χ) que será explanado mais adiante.

$$\sigma = \chi f_y \quad (12)$$

2.6.7 Força axial de compressão

A NBR 14762:2010, assim como a NBR 8800:2024 explicam que para o dimensionamento axial de compressão, deve-se atender a condição descrita na Equação 13, sendo $N_{c,Sd}$ a força axial de compressão solicitante de cálculo e $N_{c,Rd}$ a força axial de compressão resistente de cálculo associada ao menor valor calculado entre a flambagem global por flexão, por tração ou por flexo-torção (Equação 14) e a flambagem distorcional (Equação 15).

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (13)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,20 \quad (14)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi_{dist} A f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,20 \quad (15)$$

Para iniciar a compreensão destas equações, iniciando a análise pela Equação 14, onde calcula-se a força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$). O primeiro índice do produto descrito na equação é o fator de redução de força axial de compressão resistente (χ), que está associado à flambagem global. Ele pode ser calculado com será descrito na Equação 16 e na Equação 17, em função do índice reduzido de esbeltez associado à flambagem global (λ_0) ou pode ser obtido diretamente da Tabela 16 quando λ_0 não seja maior que 3,0.

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 : \chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (16)$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5 : \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (17)$$

A partir destas equações é preciso encontrar o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, que é dado pela Equação 18, onde A representa a área bruta da seção transversal da barra e N_e representa a força axial de flambagem global da barra.

$$\lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5} \quad (18)$$

Tabela 16 – Valores de χ em função do índice de esbeltez reduzido λ_0 .

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

De acordo com a NBR 14762:2010, para o método da largura efetiva (MLE) pode-se adotar a Equação 12, onde a máxima tensão de compressão é calculada pelo produto do índice de redução pela resistência ao escoamento do aço. Para o método da seção efetiva (MSE) pode-se calcular a área efetiva (A_{ef}) dependendo do valor do índice de esbeltez reduzido (λ_p), como demonstrado na Equação 19 e Equação 20.

$$A_{ef} = A \quad \lambda_p \leq 0,776 \quad (19)$$

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}}\right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \quad \lambda_p > 0,776 \quad (20)$$

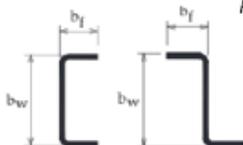
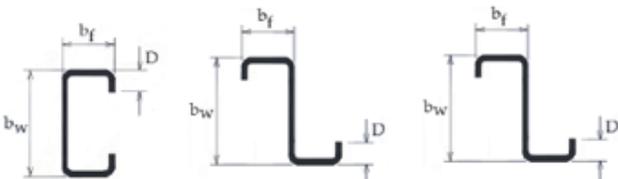
O índice de esbeltez reduzido pode ser encontrado também pela Equação 21, onde N_ℓ representa a força axial de flambagem local elástica, calculada por meio de análise de estabilidade elástica, ou de forma direta de acordo com a Equação 22.

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_\ell}\right)^{0,5} \quad (21)$$

$$N_\ell = k_\ell \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2}\right) A \quad (22)$$

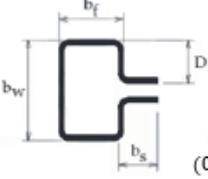
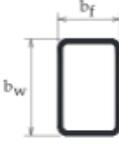
De acordo com as instruções da NBR 14762:2010 o coeficiente de flambagem local para a seção completa (k_ℓ) pode ser calculado pelas expressões indicadas na Tabela 17 ou obtidos diretamente da Tabela 18, sendo este último mais preciso do que os fornecidos pela Tabela 17, pois são valores obtidos diretamente de análises gerais de estabilidade estática.

Tabela 17 – Coeficiente de flambagem local k_ℓ para a seção completa em barras sob compressão centrada.

Seção U simples e Seção Z simples	
Caso a	 $k_\ell = 4,0 + 3,4 \eta + 21,8 \eta^2 - 174,3 \eta^3 + 319,9 \eta^4 - 237,6 \eta^5 + 63,6 \eta^6$ <p style="text-align: center;">(0,1 ≤ η ≤ 1,0)</p>
Caso b	<p style="text-align: center;">Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola</p>  $k_\ell = 6,8 - 5,8 \eta + 9,2 \eta^2 - 6,0 \eta^3$ <p style="text-align: center;">(0,1 ≤ η ≤ 1,0 e 0,1 ≤ D/b_w ≤ 0,3)</p>

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 17 – Continuação.

Caso c	 <p style="text-align: center;">Seção Rack</p> $k_\ell = 6,5 - 3,0 \eta + 2,8 \eta^2 - 1,6 \eta^3$ <p style="text-align: center;">(0,1 ≤ η ≤ 1,0 ; 0,1 ≤ D/b_w ≤ 0,3 e 0,1 ≤ b_s/b_w ≤ 0,4)</p>
Caso d	<p style="text-align: center;">Seção tubular retangular com solda de costura contínua (para seção tubular retangular formada por dois perfis U simples ou U enrijecido com solda de costura intermitente, k_ℓ deve ser calculado para cada perfil isoladamente)</p>  $k_\ell = 6,6 - 5,8 \eta + 8,6 \eta^2 - 5,4 \eta^3 \quad (0,1 \leq \eta \leq 1,0)$
<p>NOTA 1 b_f, b_w, b_s são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado na Figura correspondente</p> <p>NOTA 2 η = b_f/b_w,</p>	

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Tabela 18 – Valores do coeficiente de flambagem local k_ℓ para barras sob compressão centrada.

η = b_f / b_w	Caso a	Caso b	Caso c	Caso d
	Seção U simples e Seção Z simples	Seção U enrijecido, Seção Z enrijecido e Seção cartola	Seção rack	Seção tubular retangular (solda de costura contínua)
0,1	4,25	-	-	-
0,2	4,52	6,04	-	5,67
0,3	4,33	5,73	5,76	5,44
0,4	3,71	5,55	5,61	5,29
0,5	2,88	5,40	5,47	5,16
0,6	2,17	5,26	5,35	5,03
0,7	1,67	5,11	5,23	4,87
0,8	1,32	4,89	5,10	4,66
0,9	1,06	4,56	4,85	4,37
1,0	0,88	4,10	4,56	4,00

NOTA 1 b_f, b_w, b_s e D são as dimensões nominais dos elementos, conforme indicado nas Figuras da Tabela 9.

NOTA 2 Para o caso b, os valores são válidos para 0,1 ≤ D/b_w ≤ 0,3.

NOTA 3 Para o caso c, os valores são válidos para 0,1 ≤ D/b_w ≤ 0,3 e 0,1 ≤ b_s/b_w ≤ 0,4.

NOTA 4 Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Fonte: ABNT NBR 14762(2010).

Para perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto a força axial de flambagem elástica (N_e) é o menor valor calculado entre os eixos x (Equação 23), y (Equação 24) ou por torção (Equação 25).

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (23)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (24)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (25)$$

Nestas equações K_x , K_y e K_z são os coeficientes de flambagem por flexão retirados da Tabela 13 citada anteriormente. L_x , L_y e L_z refere-se ao comprimento total da estrutura que está sendo analisada. Os valores I_x e I_y referem-se aos momentos de inércia das seções nos seus respectivos eixos, e C_w é a constante de empenamento da seção.

2.7 Forças Resistentes de Cálculo das Soldas

Como parte da fundamentação teórica necessária para a execução deste trabalho é importante abordar o tema relacionado a força resistente de cálculo de uma solda (F_{Rd}). A norma NBR 14762:2010 é aplicável quando as ligações soldadas onde a espessura da parte mais fina não ultrapassa 4,75 mm. Se ultrapassar esta medida, devem ser seguidas as orientações da norma NBR 8800:2024.

Como forma de auxiliar os estudos específicos que se seguirão nos próximos itens, serão abordados especificamente as diretrizes para as forças resistentes de cálculo das soldas para superfície plana e curva, de modo a facilitar o dimensionamento destas durante a fase experimental (NBR 14762, 2010).

2.7.1 Solda de filete em superfície plana

Para o cálculo da força resistente de uma solda de filete com até 4,75 mm em superfície plana (F_{Rd}), devem ser seguidos as diretrizes exemplificadas abaixo. A norma NBR 14762:2010 considera três condições de cálculo para o estado-limite de ruptura, sendo a primeira para a

ruptura do metal-base para quando a sollicitação é paralela ao eixo da solda, a segunda para a ruptura do metal-base para quando a sollicitação é normal ao eixo da solda e a terceira para quando a ruptura é na solda.

Para quando o estado-limite último de ruptura do metal-base com a sollicitação paralela ao eixo da solda deve-se considerar a relação L/t , sendo L o comprimento do filete de solda e t o menor valor entre t_1 e t_2 conforme a Figura 22. Na figura abaixo w_1 e w_2 correspondem as pernas do filete, onde nas juntas de sobreposição $w_1 \leq t_1$. A Equação 26 e a Equação 27 demonstram o cálculo para a resistência de cálculo (NBR 14762, 2010).

Para $L/t < 25$:

$$F_{Rd} = \left[1 - \frac{0,1L}{t} \right] tL f_u / \gamma \quad (\gamma=1,65) \quad (26)$$

Para $L/t \geq 25$:

$$F_{Rd} = 0,75 tL f_u / \gamma \quad (\gamma=2,00) \quad (27)$$

Nestas equações f_u corresponde a resistência de ruptura do aço do metal-base. A Equação 28 demonstra o estado-limite último de ruptura do metal-base para quando a sollicitação normal é no eixo da solda.

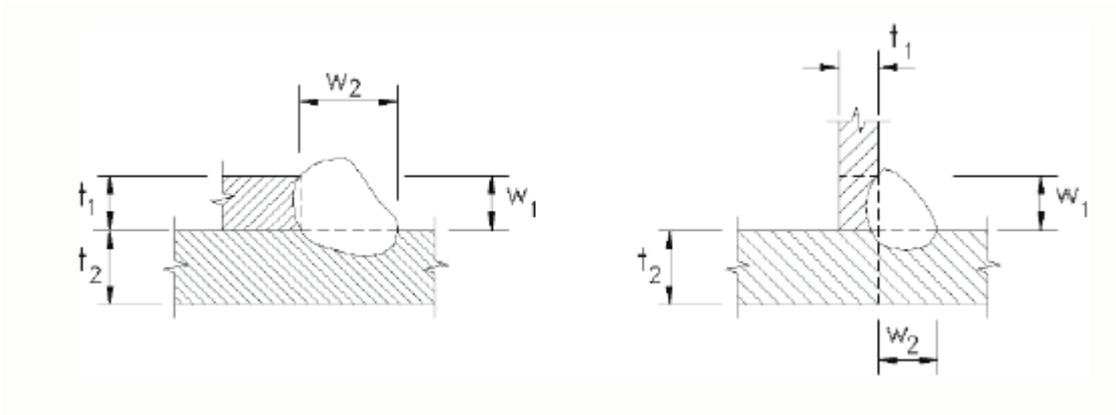
$$F_{Rd} = tL f_u / \gamma \quad (\gamma=1,55) \quad (28)$$

Para o cálculo do estado-limite último de ruptura da solda, além das forças resistentes obtidas com as equações anteriores, para a espessura $t > 2,5 \text{ mm}$ a força resistente de cálculo não deve exceder o valor encontrado na Equação 29.

$$F_{Rd} = 0,75 t_{ef} L f_w / \gamma \quad (\gamma=1,65) \quad (29)$$

Nesta última equação, o fator t_{ef} representa a dimensão efetiva, ou denominada garganta efetiva, da solda de filete, sendo considerado o menor valor entre $0,7w_1$ ou $0,7w_2$. O fator f_w representa a resistência à ruptura da solda.

Figura 22 – Solda de filete em superfície plana.



Fonte: ABNT NBR 14762 (2010).

2.7.2 Solda de filete em superfícies curvas

De acordo com a descrição presente na NBR 14762:2010, há três estados-limites últimos para cálculo, correspondendo como ao caso da superfície plano, onde se considera os estados-limites últimos para o metal base quando a sollicitação normal é ao eixo da solda, ou quando é paralela ao eixo da solda, assim como para a ruptura da solda em si.

Para quando o estado-limite último à ruptura para a sollicitação normal ao eixo da solda, representado na Equação 30 e na Figura 23(a).

$$F_{Rd} = 0,83tL f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,65) \quad (30)$$

Para o cálculo do estado-limite último de ruptura do metal-base quando a sollicitação é paralela ao eixo da solda, como demonstrado na Figura 23(b) a 23(g), pode-se considerar duas condições descritas na Equação 31 e na Equação 32. A Equação 31 pode ser vista na representação da Figura 23(d). e a Equação 32 pode ser vista na Figura 23(e).

Para $t_{ef} \geq 2t$ e se a dimensão h (altura do enrijecedor) maior ou igual ao comprimento da solda L , utilizar a Equação 31.

$$F_{Rd} = 1,50tL f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,80) \quad (31)$$

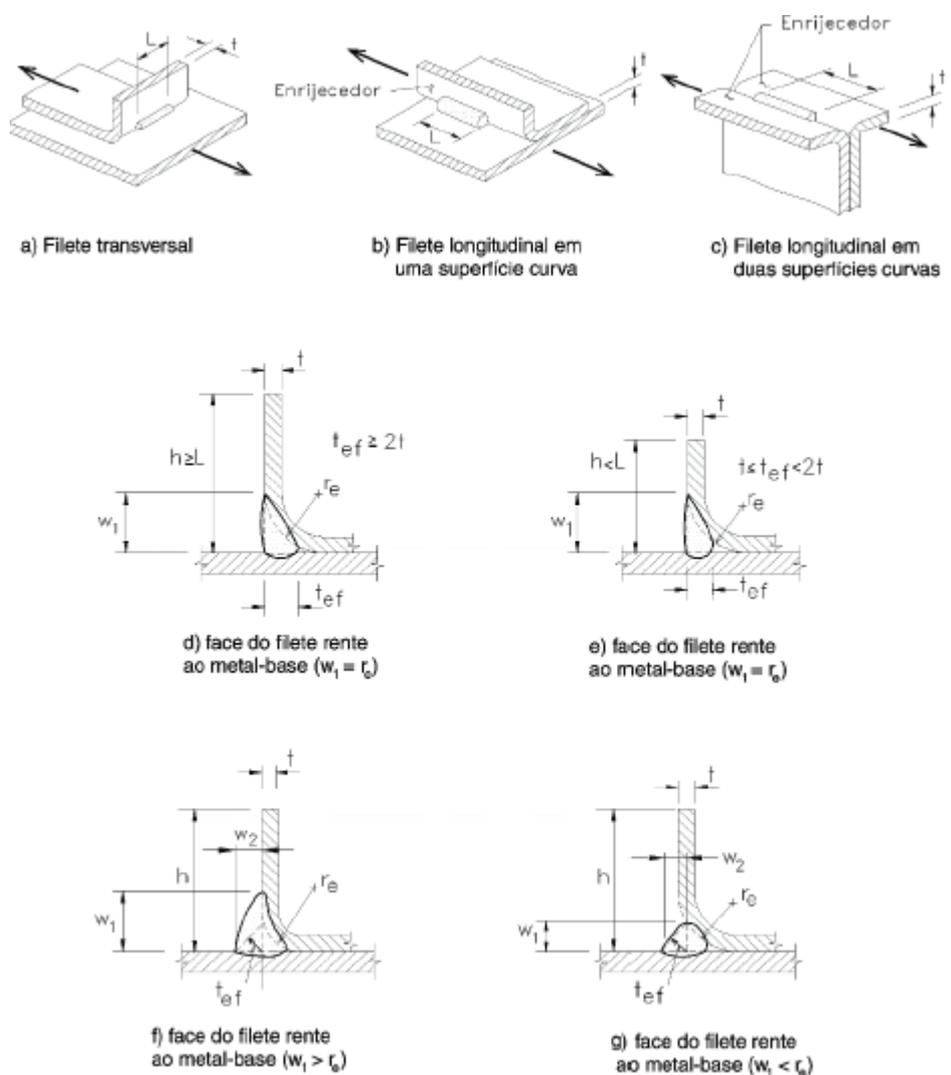
Para $t \leq t_{ef} \leq 2t$ ou se a dimensão h do enrijecedor for menor que o comprimento da solda L , utilizar a Equação 32.

$$F_{Rd} = 0,750tLf_u/\gamma \quad (\gamma=1,80) \quad (32)$$

Para a última situação de cálculo, referente ao estado-limite último de ruptura da solda, além de se utilizar os valores obtidos nas equações anteriores, para a espessura $t > 2,5$ mm, a força resistente de cálculo segue conforme descrito na Equação 33.

$$F_{Rd} = 0,75t_{ef}Lf_w/\gamma \quad (\gamma=1,65) \quad (33)$$

Figura 23 – Solda de filete em superfície plana.



Fonte: ABNT NBR 14762 (2010).

Informações a se considerar referente à Figura 23(d) e 23(g), r_e refere-se ao raio externo de dobramento e quando a solda é apenas em uma superfície curva $t_{ef} = 0,3r_e$ e quando a solda

está em duas superfícies curvas $t_{ef} = 0,5r_e$ ou para $r_e > 12,5$ mm $t_{ef} = 0,37r_e$ (NBR 14762,2010).

2.7.3 Força resistente de cálculo conforme NBR 8800

Como indicado na norma NBR 14762:2010, para quando a espessura da solda ultrapassa 4,75mm deve-se seguir as orientações da NBR 8800:2024. Nesta norma a força resistente de cálculo ($F_{w,Rd}$) dos diversos tipos de solda são indicados de acordo com a Tabela 19 descrita abaixo, onde A_w refere-se a área efetiva da solda, A_{MB} refere-se a área do metal-base, f_y representa a menor resistência ao escoamento entre os metais-base da junta e f_w representa a resistência mínima à tração do metal da solda, que pode ser encontrado na Tabela 20.

Tabela 19 – Força resistente de cálculo de soldas.

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}^{a b d}$
Penetração total ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{s1}^{e f i}$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60 A_{MB}f_y/\gamma_{s1}^i$
Penetração parcial ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{s1}^i$ b) Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w1}^{j)}$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}^k$
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}^{h k}$
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}^k$

Fonte: ABNT NBR 8800 (2024).

Tabela 19 – Continuação.

a	Para definição de áreas efetivas de soldas, ver 6.2.2.
b	O metal da solda a ser usado para cada metal-base é dado na Tabela 7.
c	Soldas de filete e soldas de penetração parcial, ligando os elementos componentes de perfis soldados (mesas e almas), podem ser calculadas sem considerar as tensões de tração ou de compressão nesses elementos, paralelas ao eixo da solda; devem ser consideradas, entretanto, as tensões de cisalhamento causadas pelas forças cortantes e os efeitos locais.
d	Em soldas sujeitas a tensões não-uniformes, as forças solicitante e resistente de cálculo são determinadas com base em comprimentos efetivos unitários.
e	Nesse caso, quando houver duas classes de resistência de metal da solda na Tabela 7, só pode ser usada a classe de maior resistência.
f	Para juntas de canto e em T, com chapa de espera não retirada do local da solda, o metal da solda deve ter uma tenacidade mínima de 27 J a 4 °C, no ensaio de Charpy com entalhe em V. Pode-se dispensar essa exigência de tenacidade, desde que a junta seja dimensionada usando-se o coeficiente de ponderação da resistência e a resistência nominal de uma solda de penetração parcial. A mesma exigência de tenacidade é aplicável a emendas soldadas de perfis soldados com espessura de mesa ou alma superior a 50 mm e de perfis laminados com mesas de espessura superior a 44 mm (nesse caso não há alternativa para dispensar tal exigência).
g	Em emendas soldadas de perfis soldados com espessura de mesa ou alma superior a 50 mm e de perfis laminados com mesas de espessura superior a 44 mm, deve ser aplicado um preaquecimento igual ou superior a 175 °C.
h	Ver também 6.2.5.2.
i	O valor de γ_{a1} é dado em 4.8.2.
j	O valor de γ_{w1} é igual a 1,25 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,05 para combinações excepcionais.
k	O valor de γ_{w2} é igual a 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,15 para combinações excepcionais.

Fonte: ABNT NBR 8800 (2024).

Tabela 20 – Resistência à tração do metal da solda

Metal da solda	f_w MPa
Todos os eletrodos com classe de resistência 6 ou 60	415
Todos os eletrodos com classe de resistência 7 ou 70	485
Todos os eletrodos com classe de resistência 8 ou 80	550

Fonte: ABNT NBR 8800 (2024).

3 METODOLOGIA

Segundo Prodanov e Freitas (2013), a metodologia é compreendida como uma disciplina que consiste em estudar, compreender e avaliar os vários métodos disponíveis para a realização de uma pesquisa acadêmica. No presente tópico será analisado os métodos utilizados para o desenvolvimento dos estudos referentes aos perfis dobrados a frio.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Sendo a pesquisa científica uma atividade humana, ela procura conhecer e explicar os fenômenos, fornecendo respostas significativas para a compreensão da natureza. Assim o pesquisador utiliza o conhecimento anterior e interage cuidadosamente com os diferentes métodos e técnicas para obter um resultado pertinente às suas indagações. (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Como parte do processo de pesquisa e aprendizado, foi realizada uma revisão abrangente da literatura, incluindo uma pesquisa em bibliografias, artigos científicos e normas técnicas nacionais e internacionais, com o objetivo de estabelecer uma base de referência teórica para o estudo dos elementos de aço conformados a frio submetidos a forças axiais de compressão.

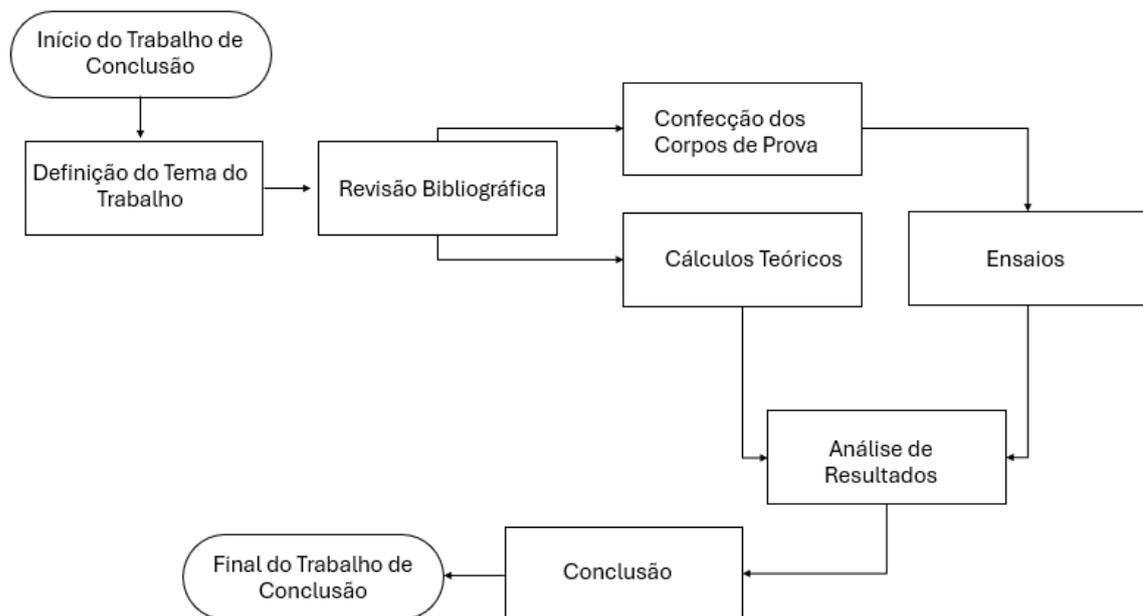
Com base nesta revisão bibliográfica, foi então desenvolvida um método experimental que inclui a fabricação de protótipos para a análise de compressão com diferentes modelos, procurando o maior controle das variáveis. O objetivo foi determinar as cargas máximas que esses perfis suportam antes da ruptura, comparando esses valores com os cálculos teóricos obtidos conforme as normas vigentes. Assim a pesquisa pode ser classificada como explicativa de natureza quantitativa.

3.2 Delineamento da Pesquisa

Neste item é apresentado o fluxograma (Figura 24) representando o processo utilizado para a realização do trabalho de conclusão. Neste fluxograma pode ser observado o início do trabalho, seguido logo após com a definição do tema abordado. Estando com o tema do trabalho definido, pode-se iniciar a revisão bibliográfica, a partir de normas e materiais à disposição para compreender de forma mais clara e eficiente como proceder para a próxima etapa. Após o estudo destas informações a próxima etapa pode ser feita em um conjunto de duas partes, uma delas relaciona-se com a confecção dos corpos de prova, desde sua compra até a sua conclusão

estando pronto para os ensaios. Paralelamente inicia-se os cálculos necessários para os dimensionamentos de todas as peças e elementos. Após a finalização dos corpos de prova podem ser realizados os ensaios de laboratório, para se identificar quais os resultados obtidos de cada corpos de prova. Finalizado estas duas etapas, parte-se para a análise destes resultados, criando correlações entre os cálculos teóricos e os ensaios experimentais, para então finalizar com as conclusões obtidas a partir destas análises e por fim finalizar o trabalho de conclusão.

Figura 24 – Fluxograma do processo do trabalho de conclusão.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

3.3 Delimitações

Para garantir a clareza e objetividade do trabalho acadêmico foram utilizados perfis dobrados a frio encontrados no mercado local. Inicialmente foram verificados vários modelos de perfil tipo U variando suas dimensões geométricas. Porém uma das limitações levadas em consideração foram os requisitos técnicos disponíveis na máquina de ensaios da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, que possui uma carga máxima de 30000 kgf (300kN) e uma dimensão de comprimento máximo de 70 cm, porém essas características serão apresentadas nos tópicos adiante.

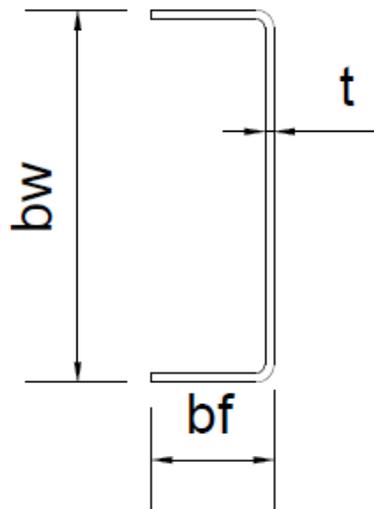
Tendo em vista essas limitações de ensaio devido ao equipamento, e procurando realizar um ensaio que produzisse resultados de ruptura do material abaixo do valor de 300kN, procurou-se utilizar um perfil que atendesse a esses requisitos, adotando-se um comprimento

de 50 cm para os corpos de prova. Devido a questões de disponibilidade de orçamento assim como o preço do aço no mercado local, foram realizadas a compra de 2 barras do perfil mencionado abaixo, produzindo 3 modelos de corpos de prova diferentes, sendo o primeiro modelo referente ao perfil U simples (Figura 25), o segundo modelo referente ao perfil U soldado em um formato de “caixão fechado” (Figura 26) e o terceiro formado do perfil soldado em um formato conhecido como I (Figura 27).

Adotou-se o modelo de perfil U com as dimensões 92x30x30x2,25 representando 92 milímetros na seção AA, 30 milímetros na seção AL com uma espessura de 2,25 milímetros. Esta não é uma das dimensões disponíveis por padronização da NBR 6355:2012, onde contém as tabelas com as propriedades geométricas como Área e Momento de Inércia para cada modelo de perfil, sendo estes fatores fundamentais para os cálculos de resistências das forças axiais de compressão. Desta maneira é necessário realizar os cálculos dos valores das características geométricas através das equações fornecidas através da NBR 6355:2012 para o perfil U simples. A partir desses valores encontrados é possível prosseguir os cálculos fornecidos pelas equações da NBR 14762:2010 para a resistência à compressão das forças axiais.

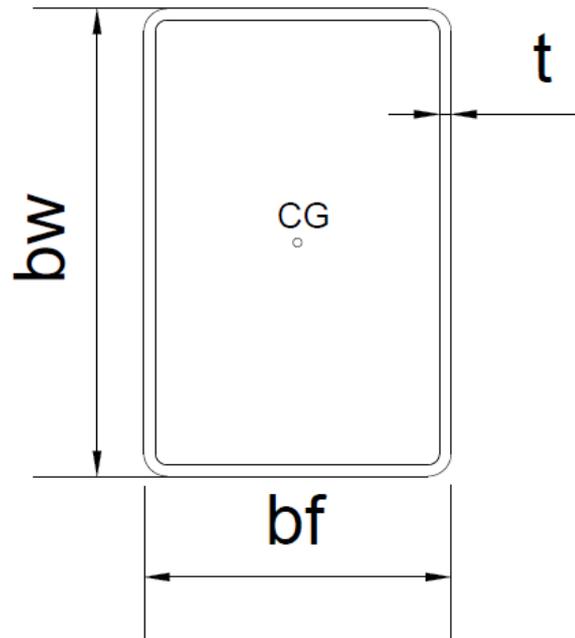
Outro ponto importante a se considerar, é que na compra dos materiais, o mercado local não informa nenhuma das características físicas dos metais, como por exemplo a tensão de escoamento do aço, sendo necessário realizar um ensaio de tração para determinar tal condição. Já para efeito de cálculos teóricos antes dos ensaios, considera-se uma tensão de escoamento padrão, ajustando-se esse valor após haver realizado o ensaio de tração.

Figura 25 – Representação do Perfil U simples.



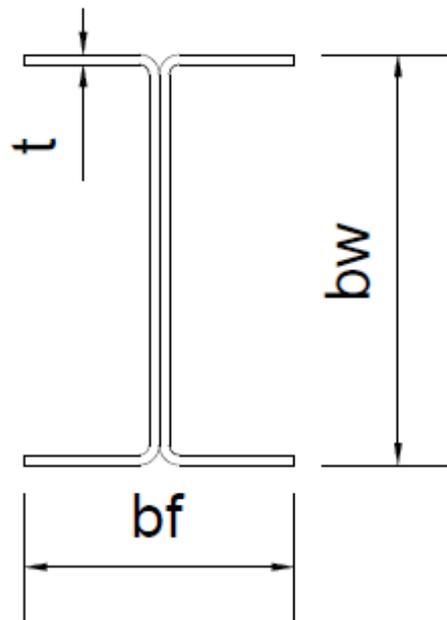
Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 26 – Representação Perfil U em formato “Caixão Fechado”



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 27 – Representação do perfil U em formato I.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

3.4 Técnicas e Instrumentos de Coleta de Dados

Para a realização dos ensaios de tração e compressão dos modelos em análise, foi utilizada a máquina universal de ensaios, disponível no laboratório do curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, possuindo uma capacidade de carga de 300 KN, sendo o seu modelo DL 30.000 N - EMIC GR048 da marca INSTRONE/EMIC. Este equipamento destina-se para ensaios de tração, compressão, flexão e dobramento, entre outros (Figura 28).

Figura 28 – Equipamento de Ensaios EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Este equipamento permite a avaliação segura e confiável dos valores de tensões e deformações, obtendo um maior controle dos resultados. Este equipamento possui duas áreas onde podem ser realizados ensaios, onde na parte superior (Figura 29) podem ser realizados os ensaios de tração, fixando-se a através de um sistema auto travante, e na parte inferior (Figura 30) podem ser realizado os ensaios de compressão, onde se posiciona o corpo de prova de forma

a receber a carga uniforme. O movimento no momento do ensaio ocorre no eixo vertical através de acionamento elétricos e hidráulicos.

Após o ensaio o equipamento fornece os diagramas de tensão \times deformação, assim como dados de força aplicada, valores de tensão de escoamento e tensão máxima suportada.

Figura 29 – Parte superior para ensaios de tração do equipamento EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 30 – Parte inferior para ensaios de compressão do equipamento EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

3.4.1 Ensaio de tração do aço dos perfis

Como citado anteriormente, ao realizar a compra dos perfis, não foram informados características das propriedades do aço, para se determinar a tensão de escoamento e ruptura do aço do perfil, foram realizados ensaios de tração. Para tal ensaio foi necessário a confecção três corpos de prova, em formato retangular, todos com 30 cm de altura e 4 cm de largura. Estes modelos foram cortados da alma do perfil, pois é a parte da seção com maior área. A Figura 31 demonstra os três corpos de prova confeccionados para o ensaio. Na Figura 32 estes corpos de prova foram posicionados na parte superior do equipamento de ensaios e fixado através do sistema auto travante do equipamento de ensaio.

Figura 31 – Corpos de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 32 – Corpos de prova fixado no equipamento EMC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Após a realização dos ensaios, foram gerados os valores de tensões de escoamento e de ruptura de cada corpo de prova coletados e seus valores médios, ambos representados na Tabela 21.

Tabela 21– Tensões de escoamento e ruptura.

CPs	Tensão de Escoamento - f_y (kN/cm ²)	Tensão de Ruptura - f_u (kN/cm ²)
1	43,404	47,960
2	43,387	47,996
3	43,099	48,316
Média	43,297	48,091

Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

3.4.2 Ensaio de tração do aço dos perfis

Para a realização dos ensaios de compressão foram confeccionados três modelos diferentes da barra de perfil U simples. Dos três modelos foram confeccionados três corpos de prova para cada modelo. O primeiro modelo (Figura 33) foi confeccionado a partir de um perfil U simples, cortado no comprimento de 50 cm. Para a realização do ensaio, cada corpo de prova foi posicionado de forma centralizada na área destinada no equipamento de ensaio (Figura 34).

Figura 33 – Corpos de prova de Perfil U simples.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

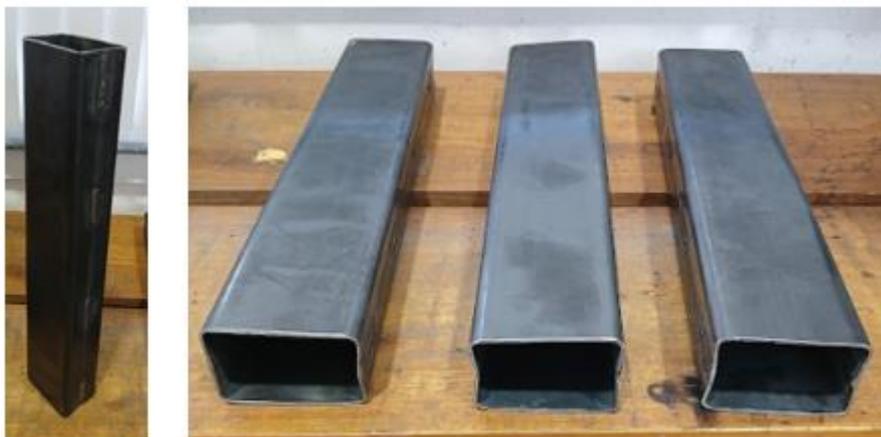
Figura 34 – Corpos de prova U simples fixado no equipamento EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Após o ensaio do primeiro modelo de corpo de prova, foi realizado o ensaio do segundo modelo de corpo de prova, o modelo “Caixão Fechado”. Para a confecção deste modelo foram utilizados dois perfis U soldados através das seções AL, adotando-se como padrão a solda através de eletrodo revestido, utilizando o eletrodo E6013 com diâmetro de 2,5 mm. Foram realizados quatro filetes de 5,0 centímetros de solda com um espaçamento entre filetes de 10 cm em cada lado da seção (Figura 35). Da mesma forma, os corpos de prova foram posicionados de forma centralizada no equipamento de ensaios (Figura 36).

Figura 35 – Corpos de prova de Perfil U Caixão Fechado.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

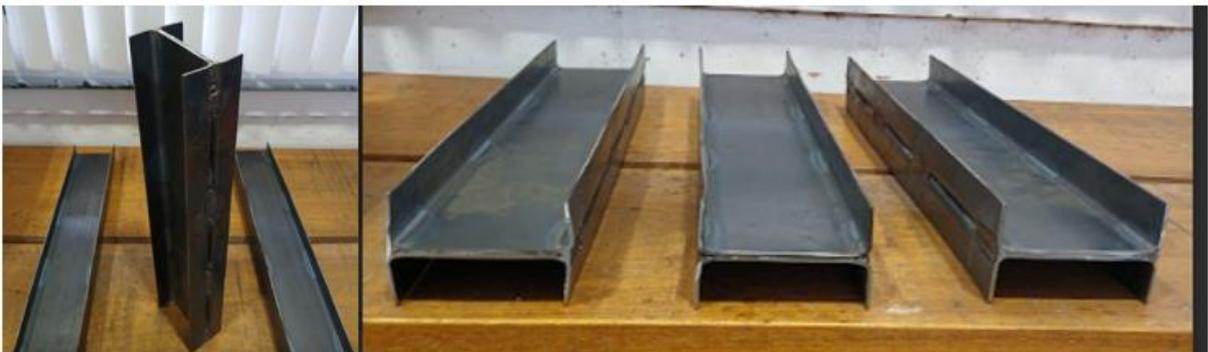
Figura 36 – Corpos de prova de perfil U caixão fechado para ensaio no equipamento EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Como o último modelo para o ensaio de compressão foi confeccionado o perfil U soldado em seção “I”, onde foram utilizados dois perfis U soldados na seção AA do perfil, adotando-se igualmente como padrão a solda através de eletrodo revestido, utilizando o eletrodo E6013 com diâmetro de 2,5 mm. Foram realizados quatro filetes de 5,0 centímetros de solda com um espaçamento entre filetes de 10 cm em cada lado da seção (Figura 37). Igualmente, os corpos de prova foram posicionados de forma centralizada no equipamento (Figura 38).

Figura 37 – Corpos de prova de Perfil U soldado em Seção “I”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 38 – Corpos de prova de perfil U soldado em seção “I” no equipamento EMIC GR048.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

3.5 Técnicas e Instrumentos de Análise de Dados

Ao se considerar a coleta de dados, serão utilizados os parâmetros normativos para a obtenção dos valores necessários para os cálculos referentes à força axial de compressão resistente, descritas no referencial teórico deste trabalho e presentes na seção 9.7.2 da norma NBR 14762:2010.

Devido às dimensões do perfil U escolhido para a análise não estar presente na lista de perfis padronizado pela NBR 6355:2012, não existe uma tabela específica na norma onde possam ser retirados os valores das propriedades geométricas do perfil, que são conseqüentemente necessários para a obtenção dos valores das forças axiais de compressão. Para tal, foram utilizadas as equações relacionadas as propriedades geométricas do perfil U simples, comparando-se o resultado com um perfil já padronizado. Serão apresentados somente o resultado dos valores necessários para o andamento das equações.

Como o equipamento de ensaio EMIC GR048 utiliza um software próprio para a análise de dados denominado “Tesc”, a obtenção dos resultados coletados pelo ensaio (Figura 39) são gerados através de um arquivo em formato “pdf”, onde informam os valores de tensões mínimas e máximas, assim como valores de tensões de escoamento e um gráfico com a relação tensão x deformação. A partir desses resultados pode-se utilizar as planilhas de Excel para comparar valores e analisar os resultados.

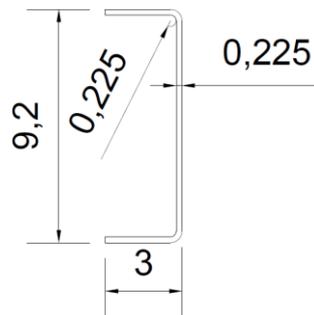
4 RESULTADOS

A seguir serão evidenciados os cálculos realizados para definição das forças axiais de compressão para cada modelo confeccionado do perfil U seguindo as diretrizes da norma NBR 14762:2010, assim como serão expostos os valores obtidos através do ensaio e os efeitos físicos que ocorreram nos corpos de prova devido a esses ensaios.

4.1 Cálculos de Força Axial de Compressão Perfil U Simples

A seguir seguem todas as informações relativas as propriedades geométricas da seção U simples que serão necessárias para os cálculos seguintes. A Figura 40 exemplifica o detalhamento das medias principais e logo abaixo seguem a relação dos valores adotados para a largura nominal da mesa (b_f), para a largura nominal da alma (b_w), para a área da seção transversal (A), para o raio interno de dobramento (r_i), para a espessura da chapa (t), para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo x (I_x), para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo y (I_y), para a constante de torção (J), para o raio de giração polar da seção transversal do perfil em relação ao centro de torção (r_0) e para a constante de empenamento da seção transversal do perfil (C_w).

Figura 40 – Dimensões geométricas do perfil U simples.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

$$b_f = 3 \text{ cm.}$$

$$b_w = 9,2 \text{ cm.}$$

$$A = 3,25 \text{ cm}^2.$$

$$t = 0,225 \text{ cm.}$$

$$r_i = 0,225 \text{ cm.}$$

$$r_0 = 3,86 \text{ cm.}$$

$$I_x = 38,46 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 2,52 \text{ cm}^4$$

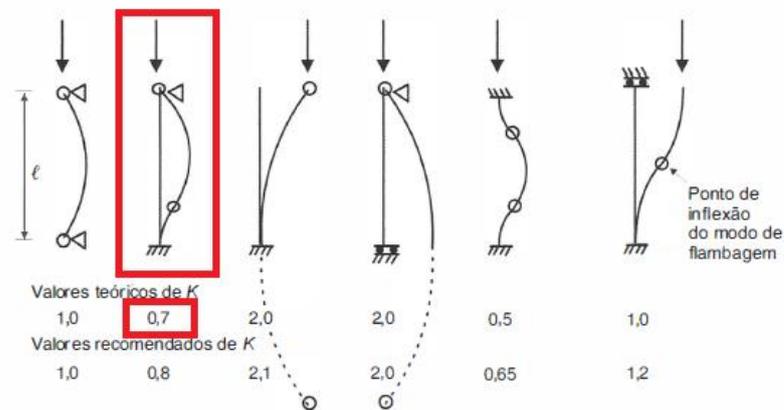
$$J = 0,05 \text{ cm}^4$$

$$C_w = 36,79 \text{ cm}^6$$

4.1.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas

A primeira etapa para descobrir os valores das forças de flambagem globais elásticas para cada um dos eixos, é a definição do coeficiente de flambagem, que neste caso, considerando a base do corpo de prova de forma engastada, e o topo como um apoio, retira-se o coeficiente de flambagem da Tabela 13 deste trabalho e demonstrado na Figura 41. Considerando o comprimento do corpo de prova com 50 cm seguem cálculos para as forças de flambagem globais:

Figura 41 – Definição do coeficiente de flambagem k.



Fonte: Adaptado da Pfeil e Pfeil (2009).

$$K = 0,7.$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2.$$

$$L = 50 \text{ cm.}$$

$$\pi = 3,1415.$$

$$G = 7.700 \text{ kN/cm}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 38,46 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 6.197,31 \text{ kN.}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2,52 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 406,06 \text{ kN.}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 Ec_W}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] = \frac{1}{3,86^2} \left[\frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 36,79 \text{ cm}^6}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} + 7.700 \text{ kN/cm}^2 \cdot 0,05 \text{ cm}^4 \right]$$

$$N_{ez} = 423,72 \text{ kN.}$$

Deve ser considerada o menor valor entre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} , de acordo com o item 9.7.2.1 da NBR 14762:2010. Portanto o valor a ser considerado será 406,06 kN para o andamento dos cálculos.

4.1.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido

Para realizar o cálculo do índice de esbeltez reduzido será necessário utilizar o valor encontrado através do ensaio de tração para a resistência de escoamento do aço (f_y). Segue definição:

$$f_y = 43,297$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2.$$

$$A = 3,25 \text{ cm}^2.$$

$$N_{ey} = 406,06 \text{ kN.}$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{3,25 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{406,06 \text{ kN}} \right)^{0,5} = 0,589$$

4.1.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão

Conforme parâmetros designados pela norma NBR 14762:2010, conforme o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_0), deve-se prosseguir com a definição do fator de redução. Abaixo demonstração do valor que deve ser adotado:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$ o cálculo para o fator de redução χ deve ser:

$$\chi = 0,658\lambda_0^2$$

$$\chi = 0,658^{0,589^2} = 0,865$$

A Tabela 16 deste trabalho também demonstra que através do índice de esbeltez reduzido (λ_0), pode-se encontrar o valor do fator de redução, conforme demonstrado na Figura 42, o

valor para o fator de redução seguindo esta tabela da norma, seria de 0,869. Para fins de cálculos o valor adotado será o calculado acima em 0,865.

Figura 42 – Definição fator de redução χ .

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

4.1.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica

Para se definir qual a força axial de flambagem local elástica, inicialmente é preciso definir o coeficiente de flambagem local (k_ℓ), encontrados na Tabela 18 deste trabalho, que de acordo com a norma NBR 14762:2010, são os valores mais precisos. Para definir este valor é necessário encontrar a relação entre as dimensões da mesa e da alma (b_f/b_w), de acordo com as informações a seguir:

$$\eta = b_f/b_w = \frac{3 \text{ cm}}{9,2 \text{ cm}} = 0,326$$

A Figura 43 demonstra que o valor entre esta reação se encontra entre 3,71 e 4,33. Para encontrar o valor deste coeficiente, faz-se uma interpolação como se segue:

Figura 43 – Definição do coeficiente de flambagem local (k_ℓ).

$\eta = b_f / b_w$	Caso a
	Seção U simples e Seção Z simples
0,3	4,33
0,4	3,71

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

$$0,3 = 4,33$$

$$0,326 = k_\ell$$

$$0,4 = 3,71$$

$$k_{\ell} = 4,2$$

Com este coeficiente pode ser definido então a força de flambagem local elástica:

$$N_{\ell} = k_{\ell} \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} \right) A = 4,2 \left(\frac{\pi^2 20000 \frac{kN}{cm^2}}{12(1-0,3^2) \left(\frac{9,2 \text{ cm}}{0,225 \text{ cm}} \right)^2} \right) 3,25 \text{ cm} = 147,74 \text{ kN}.$$

4.1.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)

Para se definir a área efetiva (A_{ef}) é preciso definir o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_p), conforme o andamento das equações a seguir:

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_{\ell}} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,865 \cdot 3,25 \text{ cm} \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{147,74} \right)^{0,5} = 0,908$$

Para $\lambda_p > 0,776$ adotar a seguinte equação para área efetiva:

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} = 3,25 \text{ cm}^2 \cdot \left(1 - \frac{0,15}{0,908^{0,8}} \right) \cdot \frac{1}{0,908^{0,8}} = 2,94 \text{ cm}^2$$

4.1.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo

Com todas as informações coletadas anteriormente pode-se então calcular qual a força axial de compressão que o perfil U selecionado suporta, como segue abaixo:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,20$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,865 \cdot 2,94 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,2} = 91,75 \text{ kN}$$

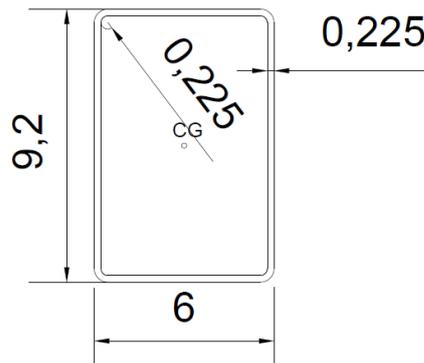
$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,00$$

$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{0,865 \cdot 2,94 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 110,11 \text{ kN}$$

4.2 Cálculos de Força de Compressão Perfil U em “Caixão Fechado”

A seguir seguem todas as informações relativas as propriedades geométricas da seção U para o formato em “Caixão Fechado” que serão necessárias para os cálculos seguintes. A Figura 44 exemplifica o detalhamento das medidas principais e logo abaixo seguem a relação dos valores adotados para a largura nominal da mesa (b_f), para a largura nominal da alma (b_w), para a área da seção transversal (A), para a espessura da chapa (t), para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo x (I_x) e para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo y (I_y), para a constante de torção (J), para o raio de giração polar da seção transversal do perfil em relação ao centro de torção (r_0) e para a constante de empenamento da seção transversal do perfil (C_w).

Figura 44 – Dimensões geométricas do perfil U em “Caixão Fechado”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

$$b_f = 6 \text{ cm.}$$

$$t = 0,225 \text{ cm.}$$

$$b_w = 9,2 \text{ cm.}$$

$$I_x = 76,82 \text{ cm}^4$$

$$A = 6,51 \text{ cm}^2.$$

$$I_y = 39,83 \text{ cm}^4$$

$$J = 116,65 \text{ cm}^4$$

$$C_w = 371,5 \text{ cm}^6$$

$$r_0 = 4,23 \text{ cm.}$$

4.2.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas

Como realizado com a primeira etapa do perfil U simples, igualmente para o perfil “Caixão Fechado”, serão calculados os valores das forças de flambagem globais elásticas para cada um dos eixos, e a definição do coeficiente de flambagem com o mesmo procedimento realizado anteriormente. Da mesma maneira que o modelo anterior, o coeficiente de flambagem

será o mesmo, sendo $k = 0,7$ e o comprimento do corpo de prova com 50 cm. A seguir os cálculos para as forças de flambagem globais:

$$K = 0,7.$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2.$$

$$L = 50 \text{ cm}.$$

$$\pi = 3,1415.$$

$$G = 7.700 \text{ kN/cm}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 76,82 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 12.378,5 \text{ kN}.$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 39,83 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 6.418,06 \text{ kN}.$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 Ec_W}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] = \frac{1}{4,23^2} \left[\frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 371,5 \text{ cm}^6}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} + 7.700 \text{ kN/cm}^2 \cdot 116,65 \text{ cm}^4 \right]$$

$$N_{ez} = 53.544,54 \text{ kN}.$$

Deve ser considera o menor valor entre N_{ex} , N_{ey} , e N_{ez} de acordo com o item 9.7.2.1 da NBR 14762:2010. Portanto o valor a se considerar será 6.418,06 kN para o andamento dos cálculos.

4.2.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido

Para realizar o cálculo do índice de esbeltez reduzido será necessário utilizar o valor encontrado através do ensaio de tração para a resistência de escoamento do aço (f_y). Segue definição:

$$f_y = 43,297 20000 \text{ kN/cm}^2.$$

$$A = 6,51 \text{ cm}^2.$$

$$N_{ey} = 6.418,06 \text{ kN}.$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{6,51 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{6.418,06 \text{ kN}} \right)^{0,5} = 0,210$$

4.2.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão

Conforme parâmetros designados pela norma NBR 14762:2010, conforme o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_0), deve-se prosseguir com a definição do fator de redução. Abaixo demonstração do valor que deve ser adotado:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$ o cálculo para o fator de redução χ deve ser:

$$\chi = 0,658\lambda_0^2$$

$$\chi = 0,658^{0,210^2} = 0,981$$

Como calculado no primeiro caso, a Tabela 16 deste trabalho demonstra que através do índice de esbeltes reduzido (λ_0), pode-se encontrar o valor do fator de redução, como observado na Figura 45, que o valor para o fator de redução seguindo esta tabela da norma, seria de 0,983. Devido a proximidade dos valores, percebe-se uma precisão desta tabela, porém para fins de cálculo será adotado o valor de 0,981.

Figura 45 – Definição fator de redução χ para modelo “Caixão Fechado”.

λ_0	0,00	0,01	
0,0	1,000	1,000	1
0,1	0,996	0,995	0
0,2	0,983	0,982	0
0,3	0,963	0,961	0
0,4	0,935	0,932	0

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

4.2.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica

Para se definir qual a força axial de flambagem local elástica, inicialmente é preciso definir o coeficiente de flambagem local (k_ρ). Este modelo se enquadra no caso “d” da Tabela 17 deste trabalho, como não foi adotado uma solda contínua em toda a seção do perfil, a norma NBR 14762:2010 indica que para o coeficiente de flambagem deve ser considerado cada perfil isoladamente, utilizando-se a Tabela 18 deste trabalho como no caso anterior. Para definir este valor é necessário encontrar a relação entre as dimensões da mesa e da alma (b_f/b_w), como se

considera cada perfil isoladamente, logo a relação continua a mesma, de acordo com as informações a seguir:

$$\eta = b_f/b_w = \frac{3 \text{ cm}}{9,2 \text{ cm}} = 0,326$$

Utilizando-se os mesmos valores encontrados no primeiro caso, que pode ser visualizado na Figura 40, abaixo segue o valor para o coeficiente de flambagem local:

$$k_\ell = 4,2$$

Com este coeficiente pode ser definido então a força de flambagem local elástica:

$$N\ell = k_\ell \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b_w/t)^2} \right) A = 4,2 \left(\frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{12(1-0,3^2) \left(\frac{9,2 \text{ cm}}{0,225} \right)^2} \right) 6,51 \text{ cm} = 295,56 \text{ kN}.$$

4.2.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)

Para se definir a área efetiva (A_{ef}) é preciso definir o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_p), conforme o andamento das equações a seguir:

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N\ell} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,981 \cdot 6,51 \text{ cm} \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{295,56} \right)^{0,5} = 0,967$$

Para $\lambda_p > 0,776$ adotar a seguinte equação para área efetiva:

$$A_{ef} = A \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} = 6,51 \text{ cm}^2 \cdot \left(1 - \frac{0,15}{0,967^{0,8}} \right) \cdot \frac{1}{0,967^{0,8}} = 5,65 \text{ cm}^2$$

4.2.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo

Com todas as informações coletadas anteriormente pode-se então calcular qual a força axial de compressão que o perfil U em “Caixão Fechado” selecionado suporta, como segue abaixo:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,20$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,981 \cdot 5,65 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,2} = 199,98 \text{ kN}$$

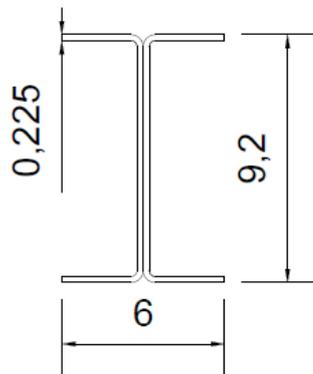
$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,00$$

$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{0,981 \cdot 5,65 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 239,98 \text{ kN}$$

4.3 Cálculos de Força Axial de Compressão para o perfil U em formato “I”

A seguir seguem todas as informações relativas as propriedades geométricas da seção U para o formato em “I” que serão necessárias para os cálculos seguintes. A Figura 46 exemplifica o detalhamento das medidas principais e logo abaixo seguem a relação dos valores adotados para a largura nominal da mesa (b_f), para a largura nominal da alma (b_w), para a área da seção transversal (A), para a espessura da chapa (t_1) e para a espessura da alma (t_2), para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo x (I_x) e para o momento de inércia da seção transversal do perfil com relação ao eixo y (I_y), para a constante de torção (J), para o raio de giração polar da seção transversal do perfil em relação ao centro de torção (r_0) e para a constante de empenamento da seção transversal do perfil (C_w).

Figura 46 – Dimensões geométricas do perfil U em formato “I”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

$$\begin{aligned}
 b_f &= 6 \text{ cm.} & t_2 &= 0,45 \text{ cm.} \\
 b_w &= 9,2 \text{ cm.} & I_x &= 76,82 \text{ cm}^4 \\
 A &= 6,51 \text{ cm}^2. & I_y &= 8,19 \text{ cm}^4 \\
 t_1 &= 0,225 \text{ cm.} & J &= 85,01 \text{ cm}^4 \\
 C_w &= 129 \text{ cm}^6. & r_0 &= 3,61 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

4.3.1 Cálculo das forças de flambagem globais elásticas

Como realizado com a primeira e a segunda etapa, novamente para o perfil “I”, serão calculados os valores das forças de flambagem globais elásticas para cada um dos eixos, e a definição do coeficiente de flambagem com o mesmo procedimento realizado anteriormente. O coeficiente de flambagem será o mesmo, sendo $k = 0,7$ e o comprimento do corpo de prova com 50 cm. A seguir os cálculos para as forças de flambagem globais:

$$K = 0,7.$$

$$E = 20000 \text{ kN/cm}^2.$$

$$L = 50 \text{ cm.}$$

$$\pi = 3,1415.$$

$$G = 7.700 \text{ kN/cm}$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 76,82 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 12.378,50 \text{ kN.}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} = \frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 8,19 \text{ cm}^4}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} = 1.319,71 \text{ kN.}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] = \frac{1}{3,61^2} \left[\frac{\pi^2 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 129 \text{ cm}^6}{(0,7 \cdot 50 \text{ cm})^2} + 7.700 \text{ kN/cm}^2 \cdot 85,01 \text{ cm}^4 \right]$$

$$N_{ez} = 51.823,08 \text{ kN.}$$

Nota-se que neste modelo, o momento de inercia no eixo x manteve-se o mesmo do modelo de “Caixão Fechado”, portanto as forças de flambagem neste eixo são as mesmas. Portanto o valor a se considerar será 1.319,71 kN para o andamento dos cálculos.

4.3.2 Cálculo do índice de esbeltez reduzido

Para realizar o cálculo do índice de esbeltez reduzido será necessário utilizar o valor encontrado através do ensaio de tração para a resistência de escoamento do aço (f_y). Segue definição:

$$f_y = 43,297 \text{ 20000 kN/cm}^2.$$

$$A = 6,51 \text{ cm}^2.$$

$$N_{ey} = 1.319,71 \text{ kN}.$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{Af_y}{N_e} \right)^{0,5} = \left(\frac{6,51 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1.319,71 \text{ kN}} \right)^{0,5} = 0,462$$

4.3.3 Definir o fator de redução da força axial de compressão

Conforme parâmetros designados pela norma NBR 14762:2010, conforme o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_0), deve-se prosseguir com a definição do fator de redução. Abaixo demonstração do valor que deve ser adotado:

Para $\lambda_0 \leq 1,5$ o cálculo para o fator de redução χ deve ser:

$$\chi = 0,658\lambda_0^2$$

$$\chi = 0,658^{0,462^2} = 0,915$$

Como calculado nos dois primeiros casos, a Tabela 16 deste trabalho demonstra que através do índice de esbeltez reduzido (λ_0), pode-se encontrar o valor do fator de redução, o que pode ser observado na Figura 47, que o valor para o fator de redução seguindo esta tabela da norma, seria de 0,915. Percebe-se que a Tabela 16 é bastante efetiva na determinação do fator de redução.

Figura 47 – Definição fator de redução χ para modelo em formato “I”.

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

4.3.4 Cálculo da força axial de flambagem local elástica

Para se definir qual a força axial de flambagem local elástica, inicialmente é preciso definir o coeficiente de flambagem local (k_ρ). Como este modelo em formato “I” não está descrito nas tabelas para determinação do coeficiente de flambagem, adotou-se a utilização da Tabela 18 deste trabalho considerando como se fosse o caso “a”. Para definir este valor é necessário encontrar a relação entre as dimensões da mesa e da alma (b_f/b_w), de acordo com as informações a seguir:

$$\eta = b_f/b_w = \frac{6 \text{ cm}}{9,2 \text{ cm}} = 0,652$$

A Figura 48 demonstra que o valor entre esta reação se encontra entre 1,67 e 2,17. Para encontrar o valor deste coeficiente, faz-se uma interpolação demonstrado a seguir:

Figura 48 – Definição do coeficiente de flambagem local (k_ρ) para seção em “I”.

$\eta = b_f / b_w$	Caso a
	Seção U simples e Seção Z simples
0,6	2,17
0,7	1,67

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

$$0,6 = 2,17$$

$$0,652 = k_\rho$$

$$0,7 = 1,67$$

$$k_\rho = 1,91$$

Com este coeficiente pode ser definido então a força de flambagem local elástica:

$$N_{\ell} = k_{\ell} \left(\frac{\pi^2 E}{12 (1-\nu^2) (b_w/t)^2} \right) A = 1,91 \left(\frac{\pi^2 20000 \frac{kN}{cm^2}}{12 (1-0,3^2) \left(\frac{9,2 \text{ cm}}{0,45 \text{ cm}} \right)^2} \right) 6,51 \text{ cm} = 537,77 \text{ kN}.$$

4.3.5 Cálculo pelo método da seção efetiva (MSE)

Para se definir a área efetiva (A_{ef}) é preciso definir o valor do índice de esbeltez reduzido (λ_p), conforme o andamento das equações a seguir:

$$\lambda_p = \left(\frac{\chi A f_y}{N_{\ell}} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,915 \cdot 6,51 \text{ cm} \cdot 43,597 \text{ kN/cm}^2}{537,77 \text{ kN}} \right)^{0,5} = 0,692.$$

Para $\lambda_p \leq 0,776$ adotar a seguinte equação para área efetiva:

$$A_{ef} = A = 6,51 \text{ cm}^2$$

4.3.6 Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo

Com todas as informações coletadas anteriormente pode-se então calcular qual a força axial de compressão que o perfil U em formato “I” selecionado suporta, como segue abaixo:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,20$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,915 \cdot 6,51 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,2} = 214,92 \text{ kN}$$

$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma} \quad \text{para } \gamma = 1,00$$

$$N_{c, \text{ Falha}} = \frac{0,915 \cdot 6,51 \text{ cm}^2 \cdot 43,297 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 257,90 \text{ kN}$$

4.4 Cálculos da Forças Resistentes das Soldas

De acordo com as informações fornecidas no referencial teórico a respeito dos cálculos relacionados às forças de resistência à ruptura das soldas, pode se então realizar os cálculos necessários para determinar se o filete de solda adotado nos corpos de prova irão resistir as cargas calculadas para o perfil “Caixão Fechado” e para o perfil em formato “I”.

Adotou-se como padrão na execução dos corpos de prova um filete de 5 cm de comprimento e aproximadamente 0,7 cm de largura. Como exposto, a norma NBR 14762:2010 indica que se a espessura da solda ultrapassar 4,75 mm, devem ser seguidas as indicações da norma NBR 8800, conforme o exposto na Tabela 19 deste trabalho e para a força resistente à tração do material da solda (f_w), o valor apresentado na Tabela 20 deste trabalho. Sendo considerado como material utilizado para a solda o eletrodo revestido E6013 com 2,5 mm de diâmetro, sendo assim, a resistência deste material corresponde a 415 MPa, ou 41,5 kN/cm², conforme será utilizado no cálculo abaixo. A Figura 49 indica qual das fórmulas presentes na Tabela 18 deve ser utilizada.

Como observado na Figura 49, conforme a equação destacada em vermelho, considerando A_w como a área utilizada da solda, f_w a resistência à tração do material da solda, já definido anteriormente e o fator de ponderação $\gamma_{w2} = 1,35$, pois para situações normais, esse é o valor recomendado pela NBR 8800:2024. A Figura 50 demonstra as duas linhas de solda, onde se considerou a largura da solda como a medida entre os dois perfis.

Figura 49 – Definição do coeficiente de flambagem local (k_ρ) para seção em “I”.

Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$ ^{b,k}

Fonte: Adaptado da NBR 14762(2010).

$$L = 5 \text{ cm.}$$

$$t = 0,7 \text{ cm.}$$

$$A_w = 0,7 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 3,5 \text{ cm}^2.$$

$$\gamma_{w2} = 1,35 \text{ para condições normais.}$$

$$f_w = 41,5 \text{ kN/cm}^2.$$

$$F_{w,Rd} = \frac{0,6 A_w f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,6 \cdot 3,5 \text{ cm}^2 \cdot 41,5 \text{ kN/cm}^2}{1,35} = 64,56 \text{ kN}$$

Figura 50 – Demonstração dos filetes de solda nos perfis compostos “Caixão Fechado” e em formato “I”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Para finalizar o cálculo, para um filete de solda com comprimento de 5 cm a resistência deste ponto é de 64,56 kN. Como nos dois casos os perfis são compostos por quatro filetes de solda em cada lado do perfil, devendo ser multiplicado o valor encontrado referente a resistência de um filete de solda por oito vezes, para encontrar a resistência de total das soldas realizadas, como segue abaixo:

$$F_{w,Rd} = 64,56 \text{ kN} \times 8 = 516,44 \text{ kN}.$$

4.5 Resultados Experimentais

A seguir serão demonstrados os resultados dos ensaios experimentais dos modelos de corpos de prova confeccionados. Foram realizados três ensaios com cada modelo, totalizando nove corpos de prova ensaiados.

4.5.1 Corpos de prova seção U simples

Foram realizados três ensaios com os corpos de prova do modelo da seção U simples. Não foram encontrados problemas para se realizar os ensaios e os corpos de prova resistiram aos valores de força de compressão axial demonstrados na Tabela 22. O efeito das forças de compressão foram variados nos três modelos, como demonstrado na Figura 51.

Figura 51 – Efeitos físicos das forças de compressão no perfil U simples.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Tabela 22 - Valores de resistência à compressão do corpo de prova seção U simples.

CP'S	Rd (KN)
1	102
2	112
3	109
Média	107,67

Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

4.5.2 Corpos de prova seção U em “Caixão Fechado”

Como demonstrado nos cálculos anteriores relacionados a seção U em “Caixão Fechado”, eram esperados valores praticamente duas vezes maiores que a seção U simples, e este foi o resultado obtido nos três corpos de prova, como demonstrado na Figura 52, onde novamente as ações de compressões tiveram efeitos em partes diferentes da seção. Outro ponto importante a se ressaltar, é que todas as rupturas foram entre os pontos de solda. Na Tabela 23 estão descritos os valores de resistência à compressão de cada um dos corpos de prova.

Figura 52 – Efeitos físicos das forças de compressão no perfil U em “Caixão Fechado”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Tabela 23 - Valores de resistência à compressão do corpo de prova seção U em “Caixão Fechado”.

CP'S	Rd (KN)
1	213
2	210
3	210
Média	211

Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

4.5.3 Corpos de prova seção U em formato “I”

Os valores da resistência a força axial de compressão do perfil U em formato “I” foram variados, assim como os efeitos das forças de compressão no perfil. A Figura 53 demonstra esses efeitos sob os corpos de prova, e a Tabela 24 contém os valores das cargas resistida por eles.

Figura 53 – Efeitos físicos das forças de compressão no perfil U em formato “I”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Tabela 24 - Valores de resistência à compressão do corpo de prova seção U em formato “I”.

CP'S	Rd (KN)
1	193
2	220
3	159
Média	190,67

Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

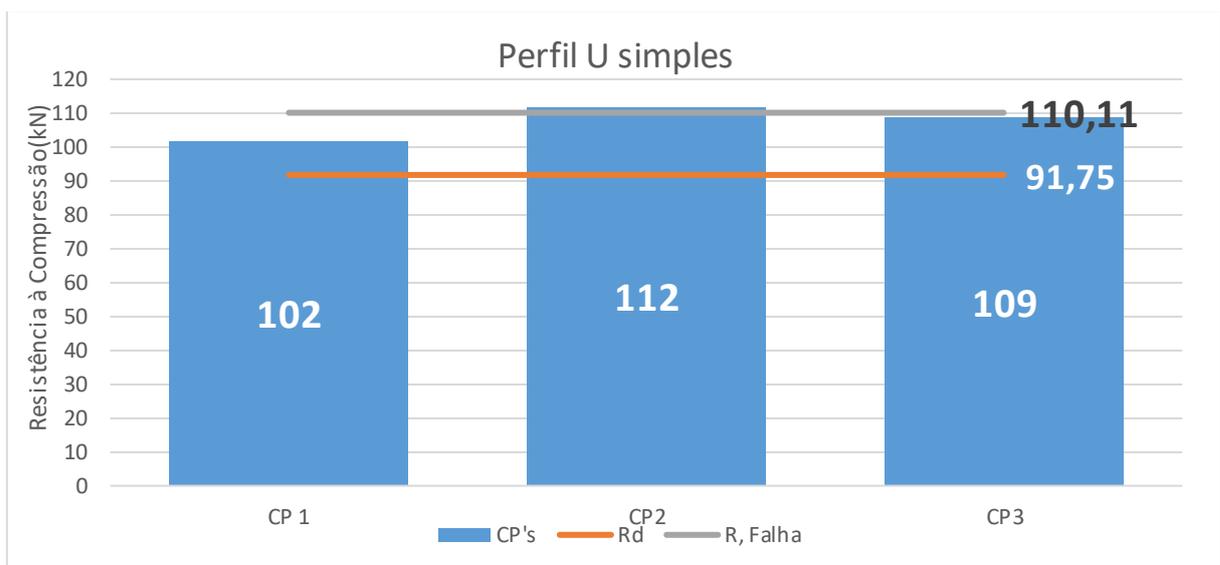
5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

A partir dos resultados teóricos e experimentais é possível realizar uma análise dos dados coletados para entender se os resultados foram como esperados, e se há fatores que possam ter influenciado na obtenção de tais valores. A seguir serão analisados os três modelos de acordo com os valores coletados em cada experimento.

5.1 Análise do perfil U simples

O Gráfico 1 a seguir expõe os resultados obtidos em ensaio e os valores estimados em cálculo de acordo com a NBR 14762:2010

Gráfico 1 – Análise dos Valores de Compressão do perfil U simples



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Conforme verificado nos cálculos teóricos, a estimativa de resistência à compressão esperada para o perfil U simples seria o valor de 91,9 kN, porém os valores de cada um dos corpos de prova ultrapassou o valor estipulado por cálculo. Sendo assim, as equações oferecidas pela norma NBR 14762:2010 foram confiáveis, fornecendo uma margem de segurança. Entre os corpos de prova, é observado que o corpo de prova 1 obteve um resultado de 11,17% de resistência de projeto acima da resistência de cálculo, da mesma forma o corpo de prova 2 obteve um valor de 22,07% de resistência acima do valor de cálculo e o corpo de prova 3 obteve um resultado de 18,80% de resistência acima do valor estipulado por cálculo.

Porém ao analisar a linha de corte para a resistência de falha do perfil, quando considerado o coeficiente de ponderação em 1,0 como demonstrado nos cálculos, o valor estimado para a falha ocorreria em torno de 110,11 kN. Foi observado que os corpos de prova ficaram ligeiramente abaixo do estipulado pelo cálculo da resistência a falha, como uma variação aproximada de 2,22% entre eles.

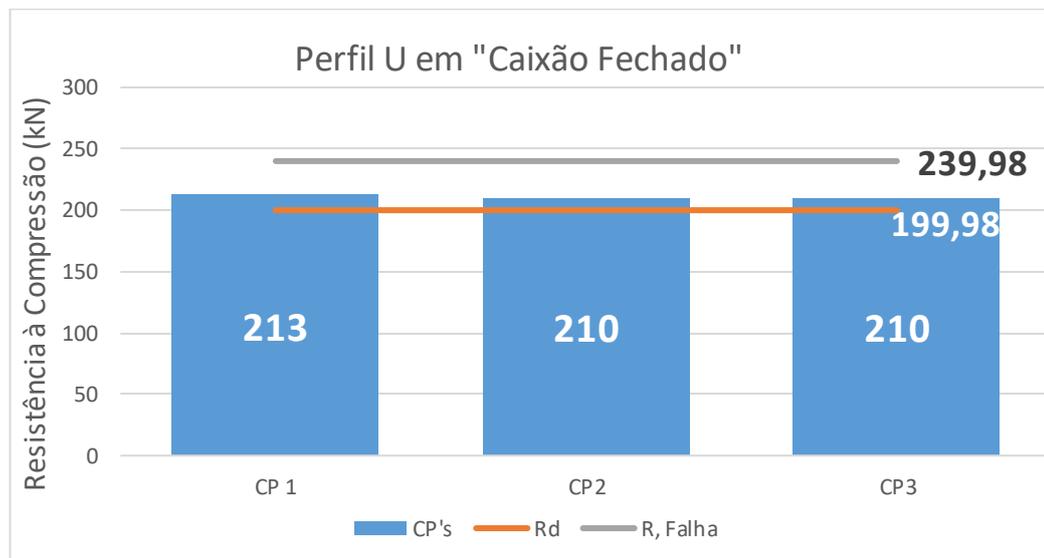
Devido aos bons resultados coletados durante os ensaios, conclui-se que não ocorreram problemas relacionados às amostras e que esses resultados referentes ao perfil U simples foram satisfatórios.

Com relação à ruptura dos corpos de prova, verificou-se que em nenhum dos casos ocorreu no mesmo ponto e devido ao pouco número de amostras, não foi possível definir uma relação direta para esta causa.

5.2 Análise do perfil U em “Caixão Fechado”

A seguir estão as informações referentes ao modelo do perfil U “Caixão Fechado”, relacionando os valores encontrados com o valor esperado de resistência à compressão de cálculo (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Análise dos Valores de Compressão do perfil U em “Caixão Fechado”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Conforme verificado, os resultados destes corpos de prova foram bastante estáveis, considerando que houve uma diferença menor que 2% entre os corpos de prova. O Gráfico 2 demonstra que a força de compressão resistente de cálculo é 199,98 kN e todos os corpos de

prova foram superiores a esse valor. Percebeu-se uma estabilidade maior neste modelo, pois existe um equilíbrio entre os momentos de inércia dos eixos x e y, demonstrados no item anterior.

Com referência ao resultado da resistência de ensaio com relação à resistência calculada, o corpo de prova 1 obteve uma resistência maior em 6,51% e os corpos de prova 2 e 3 obtiveram valores iguais de resistência, sendo 5,01% maior do que a resistência calculada.

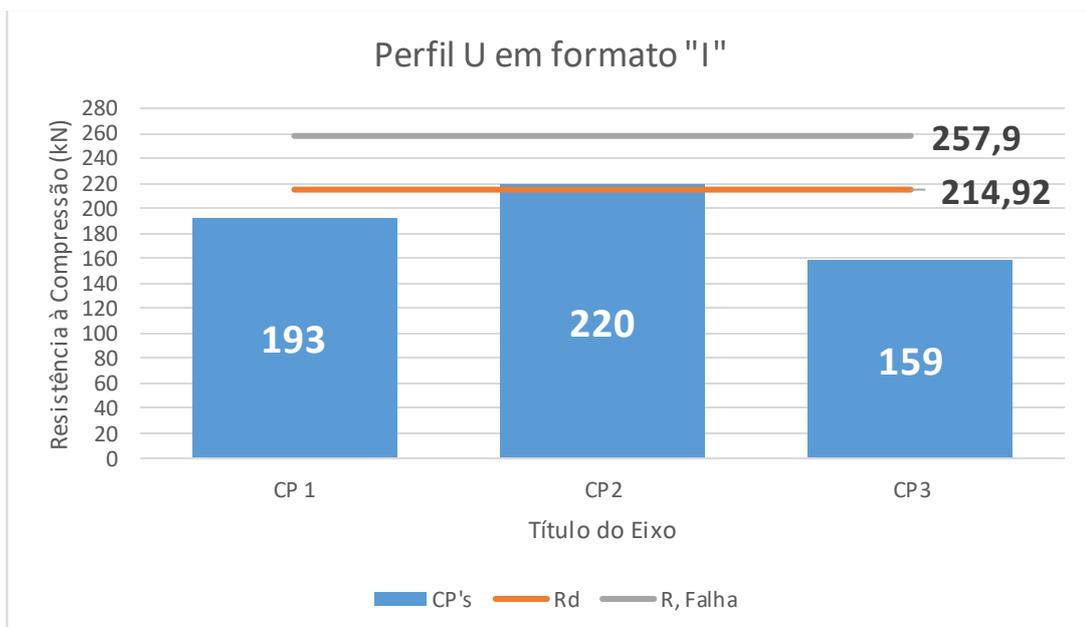
Com relação a estimativa de falha, que através do cálculo, foi obtido o valor de 239,98 kN, observa-se que o corpo de prova 1 resultou em uma falha 11,24% menor do que a estimada e os corpos de prova 2 e 3 obtiveram um resultado 12,49% menor do que a estimativa.

Foi observado que o efeito de flambagem ocorreu de forma semelhante nos três corpos de prova, e todos na parte superior do elemento, assim como entre os pontos de solda. Esse também é um indício de que a execução atendeu aos requisitos esperados e a norma atendeu às expectativas de cálculo de resistência do projeto

5.3 Análise do perfil U em formato "I"

Como último modelo de corpo de prova a ser ensaiado, o Gráfico 3 demonstra os valores encontrados e a expectativa de resistência à compressão de cálculo.

Gráfico 3 – Análise dos Valores de Compressão do perfil U em formato "I".



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

De todos os corpos de prova, os do modelo em formato “I” foram os mais variados, ocorrendo uma diferença de aproximadamente 38% entre o menor ao maior resultado. Nota-se que pelos resultados estimados de cálculo, a seção “I” obteve o maior valor de resistência à compressão, com um valor de 214,92 kN, da mesma forma, uma das amostras ultrapassou este valor, chegando a 220 kN, sendo também o corpo de prova 2 o que alcançou o maior valor entre todas as amostras, alcançando 2,36% mais do que o valor estimado. Porém, também é observado que o corpo de prova 3 obteve a maior variação nos resultados entre todos os modelos, obtendo um valor 35,16% menor do que a estimativa de cálculo. O corpo de prova 1 obteve um valor de 11,36% menor do que a estimativa de cálculo do projeto.

Com relação a estimativa de falha, todos os corpos de prova ficaram abaixo do valor estipulado por cálculo, sendo este 257,9 kN. O corpo de prova 1 obteve um resultado de 33,65% menor do que a estimativa, o corpo de prova 2 obteve um resultado de 17,275% menor do que a estimativa de falha e o corpo de prova 3 obteve um resultado de 62,20% menor do que a estimativa de falha.

Ao analisar essa variabilidade entre os resultados, um dos fatores que foi identificado é que esse modelo é o de execução mais difícil e o modelo que sofre maior influência de erros de execução. Na Figura 54 o efeito de flambagem ocorreu na parte superior do corpo de prova, onde também há uma diferença nas medidas de cada um dos perfis U, não estando totalmente alinhados. Esse efeito não ocorreu no corpo de prova 2, onde na Figura 55 há um alinhamento da superfície onde ocorreu o contato com o equipamento de ensaio. Essa estabilidade das bases de contato garante uma distribuição uniforme das cargas, que é influenciada diretamente na resistência do elemento as forças de compressão.

Figura 54 – Detalhe de diferença de alinhamento da base do corpo de prova em formato “I”



Fonte: Arquivo Pessoal (2024).

Figura 55 – Detalhe do alinhamento do corpo de prova 2 em formato “I”.



Fonte: Arquivo Pessoal (2024)

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

O presente trabalho abordou os esforços resistentes de compressão em perfis de aço formado a frio, com foco em perfis de seção transversal U simples, variando três modelos de execução distintos, procurando estabelecer relação entre as características geométricas do perfil com a sua capacidade de resistência à compressão axial.

O objetivo foi alcançado, ao se verificar que através da norma NBR 14762:2010 é possível calcular os valores que os elementos poderão suportar com segurança e confiabilidade. Igualmente constatou-se que alterando as características geométricas da seção os valores foram praticamente o dobro da seção original.

No caso do perfil U simples, verificou-se que a resistência à compressão no ensaio experimental foi cerca de 17% superior ao cálculo de projeto. O perfil em formato “Caixão Fechado” obteve os resultados mais estáveis com uma variação entre corpos de prova de apenas 2% dos valores encontrados. Neste modelo de perfil, igualmente foram encontrados valores de ensaio superiores, com uma diferença de aproximadamente 5,5% aos de cálculo de projeto.

O último modelo de perfil testado, com formato “I”, apresentou a maior variabilidade nos resultados. Segundo os cálculos de projeto, esse modelo de perfil deveria alcançar a maior resistência à compressão, e de fato, um dos corpos de prova atingiu um valor de 2% superior ao previsto. No entanto, este modelo também registrou valores significativamente inferiores ao esperado, com a menor resistência sendo 35% menor do que o esperado do cálculo de projeto.

Devida à variabilidade observada no modelo em formato “I”, foram investigados os fatores que podem influenciar a resposta aos ensaios. O perfil de “Caixão Fechado” por ser um modelo composto com processo de montagem mais simples de se executar, apresentou uma base de contato com o equipamento de ensaio torna-se mais estável, com um alinhamento de peças da estrutura de maior qualidade. Já o perfil em formato “I”, onde a sua conexão ocorre através das seções AA, devido as características do processo de montagem, sofre grande influência em variações de medidas, que foi um dos fatores observados durante o ensaio de compressão, onde a uma variação de comprimento entre as duas peças o torna mais suscetível a ser influenciado em uma distribuição de carga não uniforme, ocasionando uma resistência do conjunto abaixo do esperado.

Devido ao método de escolha de solda, utilizando eletrodo revestido, percebe-se que a execução exige mão de obra especializada, porém a solda com seus parâmetros de dimensões e

de projeto de cálculo atenderam as cargas solicitantes. Exemplo observado durante o ensaio do perfil em “Caixão Fechado”, onde os efeitos de flambagem são observados entre as áreas de solda. Como os modelos de ensaio foram fabricados em conjunto, e os ensaios foram realizados em um só momento, não havia informações a respeito das características do aço. Em cálculos preliminares, a estimativa da tensão de escoamento do aço seria menor do que a tensão de escoamento do material do eletrodo revestido, porém os ensaios de tração demonstraram uma tensão de escoamento superior ao material do eletrodo revestido. Neste caso, é indicado a utilização de um eletrodo com resistência superior ao do aço do metal base, para evitar possíveis colapsos da estrutura nos pontos de solda.

Em suma, o presente trabalho foi uma experiência enriquecedora, fornecendo conhecimentos importantes para a formação acadêmica, permitindo a compreensão de normas e desenvolvendo qualidades de pesquisa e interpretação. Da mesma forma, foi uma experiência que permitiu a compressão dos efeitos que as cargas de compressão têm sobre as estruturas.

6.2 Recomendações futuras

Para trabalhos futuros, recomenda-se a variação dos comprimentos dos perfis, uma vez que no presente estudo houve limitações impostas pelo equipamento de ensaio. Também é possível explorar variações nas dimensões do perfil, utilizando preferencialmente as dimensões padronizadas pela NBR 6355:2012, bem como testar diferentes espessuras e modelos, pois este trabalho foi limitado ao perfil em U.

Além disso, considerando que os perfis formados a frio possuem restrições de espessura, recomenda-se investigar o uso de diferentes tipos de solda, assim como a fabricação de uma base nos corpos de prova para garantir maior estabilidade durante os ensaios e permitir uma distribuição uniforme das cargas.

Por fim, destaca-se que no final do ano de 2024 ocorreu uma atualização na norma NBR 8800:2008. Embora esta não seja a norma principal de referência para o presente estudo, ela se relaciona diretamente com a NBR 14762:2010. Devido à proximidade da atualização, não foi possível analisar todas as modificações e realizar um paralelo com o presente trabalho, sendo assim pode-se realizar um estudo com base nas influências que as alterações da NBR 8800:2024 podem ter sobre o dimensionamento dos perfis formados a frio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Terceira Edição. Rio de Janeiro, ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2ª Edição. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, 2ª Edição. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 6355: Perfis de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento, Primeira Edição. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

AWS. D1.1: Structural welding code-steel. American Welding Society, 17th Edition. Washington, D.C. October 1999.

BELLEI, I. H. Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo. Pini, 2003. ISBN 8572661565.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. Edifícios de múltiplos andares em aço. Pini, 2008. ISBN 8572661840.

BIOPDI. Propriedades mecânicas dos materiais. Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/propriedades-mecanicas-dos-materiais/>>. Acesso em: 27/09/2024.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH., D. G. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. LTC, Rio de Janeiro, 2016. ISBN: 9781118324578.

CARVALHO, P. R. M. de; GRIGOLETTI, G. Projeto de estruturas de aço para edificações. Dimensionamento de estruturas com perfis de aço formados a frio. SENAI, Porto Alegre, 2014.

CBCA. Masterclass: dimensionamento de estruturas de aço. Disponível em: <<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/masterclass-teste/masterclass-dimensionamento-de-estruturas-de-acao?&et=0&msg=E0010&link=masterclass-dimensionamento-de-estruturas-de-acao>>. Acesso em: 16/09/ 2024.

CBIC. Enic: o papel da construção para o desenvolvimento econômico e social do Brasil. Disponível em: <<https://cbic.org.br/enic-o-papel-da-construcao-para-o-desenvolvimento-economico-e-social-do-brasil/#:~:text=O%20setor%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil,um%20plano%20de%20crescimento%20nacional>>. Acesso em: 16 /09/ 2024.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica, Processos de Fabricação e Tratamento, Volume 3, 2ª Edição. McGraw-Hill Ltda, São Paulo, 1986.

COISAS DA ARQUITETURA. Forma Estrutural II. 11 out. 2013. Disponível em: <https://coisasdaarquitetura.wordpress.com/2013/10/11/forma-estrutural-ii/#more-437>. Acesso em: 23/09/2024.

DE MATTOS DIAS, L. A. Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem. Zigurate Editora, 2006. ISBN 8585570024. Acesso em: 23/09/2024

EMIC, Manual de Apresentação Linha DL 30000 – Digital Line, 3ª edição, EMIC, 2003. Disponível em : < <https://pdfcoffee.com/manual-dl30000-tesc-pdf-free.html> >. Acesso em: 10/11/2024.

FELIZARDO, I. Apostila – Tecnologia da Soldagem. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2016. Disponível em: < <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf> >. Acesso em: 19/10/2024.

GERDAU. Início da fabricação do aço, 2024. Disponível em: <<https://voce.mais.gerdau.com.br/automotivo/inicio-da-fabricacao-do-aco>>. Acesso em: 23/09/2024.

GUANABARA, M. K. Dimensionamento de estruturas metálicas: rotina computacional para seleção de perfis metálicos. Trabalho de Conclusão em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em : < <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28583/000769204.pdf> >. Acesso em: 16/09/2024.

HIBBELER, R. C. Resistências dos Materiais, 7ª edição. Pearson, São Paulo, 2010.

HIBBELER, R. C. Resistências dos Materiais, 10ª edição. Pearson, São Paulo, 2018.

JAVARONI, C. E. Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Flexão: Análise Teórico-Experimental. Tese Doutorado (Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: < https://producaocientifica.eesc.usp.br/producao/1999DO_CarlosEduardoJavaroni.pdf >. Acesso em: 15/09/2024

NETO, A. C. Estruturas metálicas 1. Notas de Aula Engenharia Civil, PUC Campinas, São Paulo, 2008. Disponível em: < http://www.acn.eng.br/imagens/downloads_acad/EM%20I.pdf >. Acesso em: 24/09/2024.

MAGALHÃES, R. O que é parafuso de alta resistência? Compraco, 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/o-que-e-parafuso-de-alta-resistencia?srsltid=AfmBOoqFXqb2sdk4vScwlAxnuSsV704CjZtyiHU_JpWITjIvhREZoBuT>. Acesso em: 27/09/2024.

MARTINS, M. M. Estudo de bases de pilares metálicos pelo método dos elementos finitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2002.

PFEIL, W. Estruturas de Aço – Propriedades – Métodos de Cálculo – Ligações – Esforços Normais, vol 1, 5ª edição. Interciência, Rio de Janeiro, 1992.

PFEIL, W.; PFEIL, M. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de acordo com a NBR 8800:2008. Grupo Gen-LTC, 2009. ISBN 852162817X.

POSTAL, M. Materiais para construção mecânica. SENAI, São Paulo

PRODANOV, C. C. ; FREITAS, E. C. Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico, 2º edição. Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2013. Disponível em: < <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf> >. Acesso em: 11/10/2024.

SANTOS, P.; NAGAHAMA, K.; GADÉA, A. S. M. Formulação para tensão de flambagem distorcional em colunas com seção U enrijecido de chapa de aço dobrada a frio. Revista Escola de Minas, vol. 66. Minas Gerais, pp. 19 – 24, 2013. Disponível em: < <https://www.redalyc.org/pdf/564/56425762003.pdf> >. Acesso em: 16/09/2024.

SARDÁ, A. A. P. Estruturas Metálicas, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2016. Disponível em: < http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM370/EstruturasMet%C3%A1licas_aula1.pdf >. Acesso em: 19/10/2024.

SEBRAE. Construção civil no Brasil: uma análise do mercado para 2022. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/construcao-civil-no-brasil-uma-analise-do-mercado-para-2022,f178e360b0222810VgnVCM100000d701210aRCRD>>. Acesso em: 16/09/2024.

SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. Estruturas compostas por perfis formados a frio – dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme a ABNT NBR 14762: 2010 e ABNT 6355 :2012. IAB/CBCA, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em https://www.academia.edu/19844054/Estruturas_compostas_por_perfis_formados_a_frio_dimensionamento_pelo_m%C3%A9todo_das_larguras_efetivas_e_aplica%C3%A7%C3%A3o_conforme_ABNT_NBR_14762_2010_e_ABNT_NBR_6355_2012>. Acesso em: 01/10/2024.

SIMÊNCIO, É. C. A. Ciência dos materiais. Educacional S.A., Paraná, 2016.

SOUZA, A. S. C. Dimensionamento de elementos e ligações em estruturas de aço. São Carlos: EdUFSCar, 2022.