

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Demis Pessatto Faqui

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS EM
ESTRUTURAS DE AÇO SUBMETIDAS A ENSAIOS DE TRAÇÃO**

Santa Cruz do Sul

2019

Demis Pessatto Faqui

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS EM
ESTRUTURAS DE AÇO SUBMETIDAS A ENSAIOS DE TRAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Me. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu irmão Thiago e meus pais, Aldemir Paulo e Janice, por serem a maior referência de amor e dedicação, por propiciar o melhor ambiente possível para o meu crescimento e pelo auxílio prestado sem medir esforços em nenhum momento. À minha namorada Ana Laura, pelo carinho e apoio incondicional, e aos demais integrantes da família presentes durante a minha formação.

Aos colegas e amigos que fiz durante a graduação, especialmente àqueles participantes do projeto Kamikase, ao qual agradeço pelas oportunidades e experiências a mim proporcionadas.

Por último, aos meus mestres, em particular meu orientador Henrique Luiz Rupp, pelos ensinamentos transmitidos, pelo incentivo, paciência e ajuda na orientação deste trabalho.

RESUMO

A utilização do aço em estruturas metálicas, apesar de antiga, ganhou espaço à medida que seu processo produtivo se torna viável e confiável, e, por apresentar mais variabilidade, os pontos de ligação das peças acabam se tornando ponto crítico de análise. Diante disso, o presente trabalho aborda aspectos gerais da utilização do aço estrutural, com ênfase nas ligações entre peças feitas por processos de soldagem. Inicialmente, fundamenta-se a utilização de ligações soldadas em revisão bibliográfica acerca do tema, e, posteriormente, dimensiona-se estrutura metálica segundo as determinações da norma NBR 8800:2008, a qual é submetida a testes de tração com o objetivo de determinar as reais características da ligação quanto à resistência mecânica à ruptura do material da solda ou por escoamento do aço das peças. Por fim, comparam-se os resultados obtidos nos testes com o dimensionamento feito anteriormente, afim de comprovar a eficiência e compatibilidade do modelo de cálculo com a estrutura analisada. Os resultados de resistência obtidos experimentalmente, apesar de maiores do que os sugeridos pela norma, apresentam considerável variação entre os diferentes corpos de prova testados, portanto, os altos coeficientes normativos são justificáveis.

Palavras Chave: Estruturas metálicas, aço, solda, ensaios estruturais, dimensionamento.

ABSTRACT

The use of steel in metallic structures, although old, has gained space as its productive process becomes viable and trustworthy, and because of the greater variability, the connection points between pieces become a critical point of analysis. Therefore, the present work deals with general aspects of structural steel utilization, with emphasis on connections between parts made by welding processes. Initially, the work bases the use of welded connections in bibliographical revision and later, it's dimensioned a metallic structure according to the determinations of the Brazilian norm NBR 8800:2008, and then the structure is submitted to traction tests to determine the mechanical properties of the weld material and the steel flow of the parts. Finally, the results are compared with the previous design, in order to prove the efficiency and compatibility of the calculation model with the analyzed structure. The results of experimental resistance, although higher than those suggested by the standard, present considerable variation between the different tested specimen, therefore, the high normative coefficients are justifiable.

Keywords: Metallic structures, steel, welding, structural testing, project.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama do fluxo do processo siderúrgico	16
Figura 2 – Diagrama Tensão-Deformação de um aço	18
Figura 3 – Solda de entalhe	23
Figura 4 – Solda de filete	23
Figura 5 – Solda de tampão	23
Figura 6 – Solda contínua	24
Figura 7 – Solda intermitente	24
Figura 8 – Solda ponteadada	25
Figura 9 – Posições de soldagem	25
Figura 10 – Soldagem com eletrodo revestido	26
Figura 11 – Designação dos eletrodos	26
Figura 12 – Soldagem com proteção gasosa	27
Figura 13 – Soldagem a arco submerso	28
Figura 14 – Garganta efetiva em soldas com penetração total	29
Figura 15 – Garganta efetiva em soldas com penetração parcial	30
Figura 16 – Seções teórica e real (lados iguais)	30
Figura 17 – Seções teórica e real (lados diferentes)	31
Figura 18 – Comprimento de soldas tracionadas com filetes longitudinais	32
Figura 19 – Diagramação de projeto de pesquisa	38
Figura 20 – Diagrama da pesquisa	39
Figura 21 – Corpo de prova de aço para ensaio	40
Figura 22 – Teste dos CPs de aço	41
Figura 23 – Diagramas de tensão-deformação dos CPs	41
Figura 24 – Geometria chapa gusset	43
Figura 25 – Perfil em “L” utilizado	43
Figura 26 – Características para cálculos do perfil utilizado	44
Figura 27 – Detalhes barras de fixação	45
Figura 28 – Equipamento de ensaio Emic GR048	45
Figura 29 – Valores máximos para perna de filete	47
Figura 30 – Detalhes do modelo testado	49
Figura 31 – Modelo confeccionado	49
Figura 32 – Peças finais prontas	50

Figura 33 – Modelo posicionado na máquina.....	51
Figura 34 – Garganta efetiva real.....	53
Figura 35 – Deformação nos CPs	55
Figura 36 – Ruptura das peças	56
Figura 37 – Local de ruptura dos CPs.....	56
Figura 38 – Resultados teóricos.....	59
Figura 39 – Comparação dos resultados obtidos	60
Figura 40 – Comparativo (%) entre resultados teóricos e experimentais obtidos.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores residuais admissíveis	18
Tabela 2 – Teor de carbono	19
Tabela 3 – Dimensões mínimas para filetes de solda	32
Tabela 4 – Força resistente de cálculo das soldas.....	33
Tabela 5 – Resistência ao escoamento de aços comuns	35
Tabela 6 – Coeficientes de ponderação das resistências	35
Tabela 7 – Resultados obtidos dos testes do aço SAE 1020	42
Tabela 8 – Características do perfil utilizado.....	44
Tabela 9 – Valores de resistência e coeficientes utilizados para cálculo	53
Tabela 10 – Resistência dos componentes à tração.....	54
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração do modelo.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
SAE	Society of Automotive Engineers
CP	Corpo de Prova

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
kgf	Quilograma força
kN	Quilonewton
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
cm ²	Centímetro Quadrado
kgf/cm ²	Quilograma força por centímetro quadrado
kN/cm ²	Quilonewton por centímetro quadrado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Área e limitação do tema	12
1.2.	Justificativa	12
1.3.	Objetivo do Trabalho	12
1.3.1.	Objetivo Principal.....	12
1.3.2.	Objetivos Específicos	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	Breve Histórico.....	14
2.1.1.	A Construção Metálica no Brasil	14
2.2.	O Aço Estrutural.....	15
2.2.1.	Processo de Fabricação	15
2.2.2.	Vantagens e desvantagens das estruturas metálicas	16
2.2.3.	Aços Estruturais.....	16
2.2.4.	Aço-Carbono.....	18
2.2.5.	Aços de Baixa Liga	19
2.3.	Ligações Metálicas.....	19
2.4.	Tipos de Ligações	20
2.4.1.	Ligações Parafusadas	20
2.4.2.	Ligações Soldadas.....	21
2.5.	Classificação das Ligações Soldadas.....	22
2.5.1.	Quanto à Posição do Material de Solda em Relação ao Material-base .	22
2.5.2.	Quanto à Continuidade.....	24
2.5.3.	Quanto à Posição de Soldagem.....	25
2.6.	Processos de Soldagem.....	25
2.6.1.	Soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW)	25
2.6.2.	Soldagem com Proteção Gasosa (GMAW)	26
2.6.3.	Soldagem com Fluxo no Núcleo (FCAW).....	27
2.6.4.	Soldagem a Arco Submerso (SAW).....	27
2.7.	Dimensionamento de Ligações Soldadas.....	28
2.7.1.	Elementos construtivos de Projeto	29

2.7.2.	Resistência das Soldas	32
3.	METODOLOGIA.....	38
3.1.	Elaboração da Pesquisa	38
3.2.	Descrição dos Materiais e Métodos de obtenção de dados	39
3.2.1.	Perfis	39
3.2.2.	Chapa Gusset	42
3.2.3.	Perfil de aço em “L”	43
3.2.4.	Barras de fixação	44
3.3.	Mecanismos e equipamentos de ensaios	45
3.4.	Dimensionamento das ligações soldadas segundo NBR 8800:2008.....	46
3.4.1.	Dimensionamento – Solda	46
3.4.2.	Dimensionamento – Metal-base.....	47
3.4.3.	Dimensionamento – Barras de apoio para testes	48
3.4.4.	Dimensionamento – Seção efetiva da ligação	48
3.5.	Confecção dos modelos.....	48
4.	RESULTADOS.....	52
4.1.	Resultados teóricos	52
4.2.	Resultados experimentais.....	54
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	58
5.1.	Análise dos resultados teóricos	58
5.2.	Análise dos resultados experimentais	59
5.2.1.	Comparativo de resultados	60
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
6.1.	Conclusões.....	62
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros	63
7.	BIBLIOGRAFIA.....	64
8.	ANEXOS	66
8.1.	ANEXO I – Teste de resistência do aço – CP 1	66
8.2.	ANEXO II – Teste de resistência do aço – CP 2.....	67
8.3.	ANEXO III – Teste de resistência do aço – CP 3.....	68

8.4.	ANEXO IV – Teste de resistência do modelo completo – CP 1	69
8.5.	ANEXO V – Teste de resistência do modelo completo – CP 2	70
8.6.	ANEXO VI – Teste de resistência do modelo completo – CP 3	71

1. INTRODUÇÃO

A utilização de aço na concepção de estruturas apresenta uma alternativa efetiva em aplicações cada vez mais diversas, deixando de ser empregado somente em grandes edifícios industriais e coberturas, e, conforme SOUZA (2010), passou a ser competitivo em áreas como edificações comerciais, pontes, viadutos e vários outros propósitos, este avanço sendo especialmente atribuído ao melhor entendimento das características do material e seu emprego em estruturas.

As estruturas, segundo DIAS (2006), são responsáveis por receber, resistir e transmitir os esforços aos demais elementos estruturais por meio dos vínculos que os unem. No caso das estruturas metálicas, as ligações entre estes elementos estruturais são feitas através de conectores ou por solda.

Devido ao desenvolvimento do processo de produção do aço e dos equipamentos utilizados para a realização das soldas, esse meio de ligação tem se tornado muito efetivo e altamente difundido, especialmente se realizado em oficinas, aliando a utilização de conectores quando a ligação será realizada em campo (PFEIL e PFEIL, 2009).

Os pontos de ligação entre perfis de aço representam ponto crítico para análise, visto que o processo de produção das chapas e perfis metálicos proporciona grande confiabilidade na retenção de suas características mecânicas. Visando analisar tais variações, realizar-se-á revisão bibliográfica acerca do tema, além de dimensionamento de ligação metálica soldada conforme parâmetros descritos na NBR:8800:2008 e ensaios práticos de tração.

1.1. Área e limitação do tema

O presente projeto de pesquisa é realizado na área de estruturas metálicas, tendo como foco aprofundar o conhecimento sobre o assunto, especialmente no que diz respeito às ligações metálicas do tipo soldadas, visto que esse tipo de ligação, especialmente relacionadas à métodos executivos não confiáveis, proporciona alto grau de incerteza quanto às suas propriedades mecânicas. Portanto, pretende-se realizar pesquisa e revisão bibliográfica sobre o assunto, além de dimensionamento e execução de ligação metálica conforme moldes da NBR 8800:2008.

1.2. Justificativa

O dimensionamento das interfaces entre perfis metálicos, especialmente as ligações soldadas, apresenta alto grau de variabilidade no que se refere à confiabilidade do processo produtivo, portanto, são pontos suscetíveis a falhas, especialmente durante a execução de tais estruturas. Busca-se então, analisar tais pontos o mais detalhadamente possível.

O método de cálculo proposto pela norma considera a variabilidade do processo executivo das ligações soldadas nos coeficientes de ponderação que utiliza, portanto, através da realização do presente trabalho, torna-se possível a verificação da real coerência destes coeficientes aplicados.

Além disso, o modelo de testes proposto pelo presente trabalho considera a obtenção de parâmetros reais de resistência do aço, fazendo com que seja facilitada a comparação entre os resultados obtidos teoricamente com aqueles obtidos através de ensaios.

1.3. Objetivo do Trabalho

Os objetivos do trabalho estão discriminados entre principal e específicos nos tópicos subsequentes.

1.3.1. Objetivo Principal

O método de cálculo proposto pela norma considera a variabilidade do processo executivo das ligações soldadas nos coeficientes de ponderação que utiliza, portanto, analisando-se as diretrizes normativas, torna-se possível a verificação da real coerência destes coeficientes aplicados.

Além disso, o modelo de testes proposto pelo presente trabalho considera a obtenção de parâmetros reais de resistência do aço, fazendo com que seja facilitada a comparação entre os resultados obtidos teoricamente com aqueles obtidos através de ensaios.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Revisão bibliográfica sobre os métodos de dimensionamento de ligações soldadas;
- Dimensionar um modelo para testes de resistência de ligação soldada, conforme NBR 8800:2008;
- Execução de ligação soldada entre perfil metálico e chapa gusset, submetendo-a a ensaios de tração;
- Comparação dos resultados obtidos nos testes e parâmetros previstos no dimensionamento;
- Avaliação do método de cálculo proposto pela NBR 8800:2008.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se revisão bibliográfica acerca do tema este trabalho. Serão abordados: histórico; processo produtivo; considerações; propriedades; disposições normativas e classificações dos aços e ligações soldadas.

2.1. Breve Histórico

As primeiras obras utilizando metais datam de 1750, a partir da descoberta de um processo produtivo que permitiu a fabricação industrial dos materiais. Conforme BELLEI (1998), o seu emprego estrutural foi feito por volta de 1780, na escadaria do Louvre e no Teatro do Palais Royal, ambos na França. Outra obra característica do início da utilização de material metálico em estruturas foi a primeira ponte em ferro fundido de Coalbrookdale, na Inglaterra, vencendo um vão de 30 metros em 1779 (PFEIL e PFEIL, 2009).

A utilização em edifícios, em grande escala, foi nos Estados Unidos, ao final do século XIX. Porém, em meados do século XIX, o ferro fundido passou a ser substituído pelo ferro forjado (PFEIL e PFEIL, 2009), por oferecer maior segurança. No caso do aço, mesmo sendo conhecido desde a antiguidade, sua utilização demorou a ser efetiva por ser de difícil competitividade econômica na época, de acordo com PFEIL e PFEIL (2009). Este problema foi resolvido pelo inglês Henry Bessemer, que em 1856, criou um forno que permitia a produção de aço em larga escala.

Em 1885, nos Estados Unidos, a *Carnegie Steel Company* (posteriormente *United States Steel*) produziu as vigas em aço doce, substituindo as de ferro forjado, fazendo com que estas (de ferro forjado) caíssem na obsolescência (BELLEI, 2008).

2.1.1. A Construção Metálica no Brasil

No Brasil, a implementação e o uso de estruturas metálicas foram tardios por dificuldades sociais, políticas, econômicas e técnicas (SOUZA, 2010), e, conforme PINHEIRO (2005), o início de sua fabricação foi a partir do ano de 1812. Porém, segundo PFEIL e PFEIL (2009), a indústria siderúrgica no Brasil somente foi implantada após a Segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional).

Após, a construção metálica acompanhou os avanços da indústria siderúrgica, e o atual parque industrial possibilita a fabricação de produtos para estruturas de grande porte. Portanto, o aço deixou de ser utilizado somente em edifícios industriais e grandes coberturas, passando a ser viável na construção dos mais diversos tipos de obra, como edifícios residenciais, pontes, viadutos, *shopping centers* etc. (SOUZA, 2010).

Cita-se, no Brasil, os vãos da Ponte Rio-Niterói como um grande marco da utilização de estruturas metálicas no país, utilizando-se de vigas retas para vãos de até 300 m.

2.2. O Aço Estrutural

Importante material para emprego em estruturas, como é do conhecimento comum, o aço alia características como a resistência mecânica e trabalhabilidade em um material com alta disponibilidade e baixo custo (CHIAVERINI, 2005).

Em estruturas usuais, o teor de carbono do aço é o principal responsável pela elevação da resistência, e em menor escala, pelo manganês. Porém, o aumento da concentração desses materiais também altera propriedades como a ductilidade do aço, fazendo com que se torne um material mais frágil, quebradiço e de baixa soldabilidade (BELLEI, 1998). Ainda, outros materiais como o nióbio, cobre, silício e outros alteram as características do aço em favor da sua aplicabilidade.

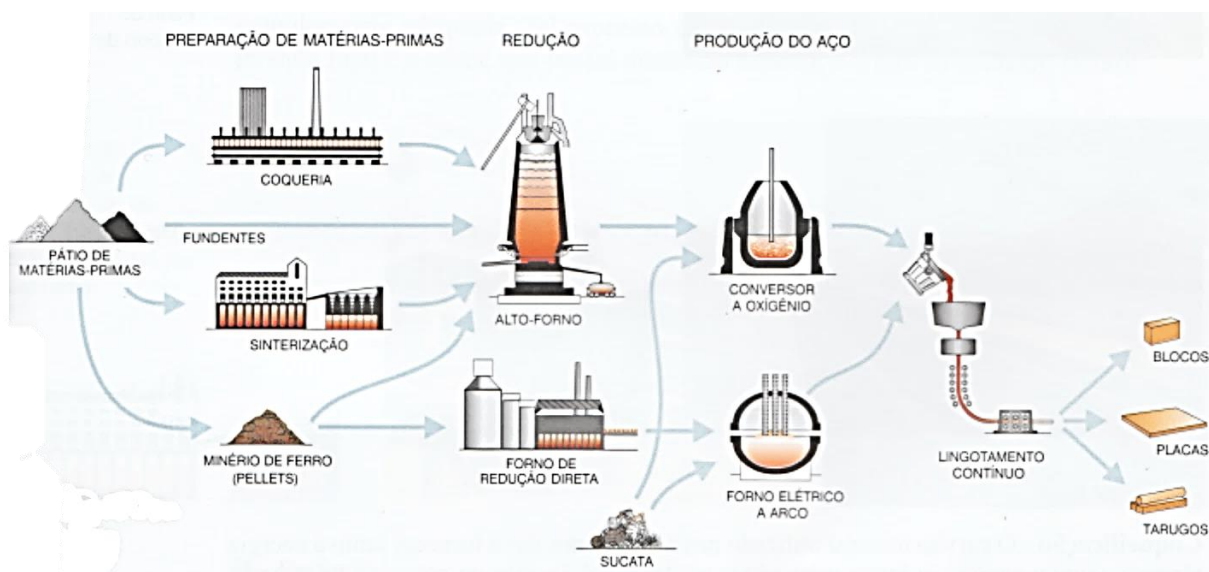
2.2.1. Processo de Fabricação

O processo siderúrgico para obtenção do aço, desde a chegada da matéria-prima (minério de ferro ou sucata) até os produtos finais da fabricação, pode ser resumido em três etapas, segundo DIAS (2006):

- I. Preparo das matérias-primas;
- II. Redução;
- III. Produção do aço.

Ainda segundo DIAS (2006), os processos acima citados são divididos e organizados conforme Figura 1.

Figura 1 – Diagrama do fluxo do processo siderúrgico



Fonte: DIAS, 2006

Com relação à presença de elementos adicionais, conforme DIAS (2006), no caso dos aços da construção civil, aceitam-se taxas mais altas de elementos estruturais residuais em sua composição, como é o caso do silício e fósforo, e elementos de liga adicionais como cromo e níquel. Para os aços utilizados em estruturas metálicas, buscam-se as ligas denominadas de aços-carbono de baixa liga, com mínimas concentrações de elementos estruturais adicionais e, segundo PFEIL e PFEIL (2009), elementos de liga (cobre, manganês, níquel, etc.) para modificação de propriedades mecânicas.

2.2.2. Vantagens e desvantagens das estruturas metálicas

Segundo PINHEIRO (2005) e BELLEI (1998), a utilização do aço em estruturas foi possibilitada por fatores como: precisão milimétrica; rapidez e limpeza nas obras; resistência a vibrações e choques; alta resistência estrutural, possibilitando execução de obras leves e a possibilidade de reaproveitamento do material.

Com relação às dificuldades encontradas, citam-se: transporte das peças da fábrica até a obra; necessidade de mão de obra e equipamentos especializados; necessidade de tratamento superficial contra oxidação e limitações quanto à disponibilidade e fornecimento dos perfis estruturais.

2.2.3. Aços Estruturais

As propriedades dos materiais, de acordo com DIAS (2006), são as características que possibilitam o melhor aproveitamento e dimensionamento eficiente do material a ser empregado, portanto, o seu conhecimento compreende importante parte durante o projeto de qualquer estrutura.

No caso dos aços estruturais, busca-se entender principalmente as propriedades mecânicas, que definem o comportamento do aço quando sujeitos ao ambiente e às solicitações durante a vida útil da estrutura.

Segundo CALLISTER (2013), DIAS (2006), e PFEIL e PFEIL (2009), dividem-se as propriedades mecânicas do aço nas seguintes:

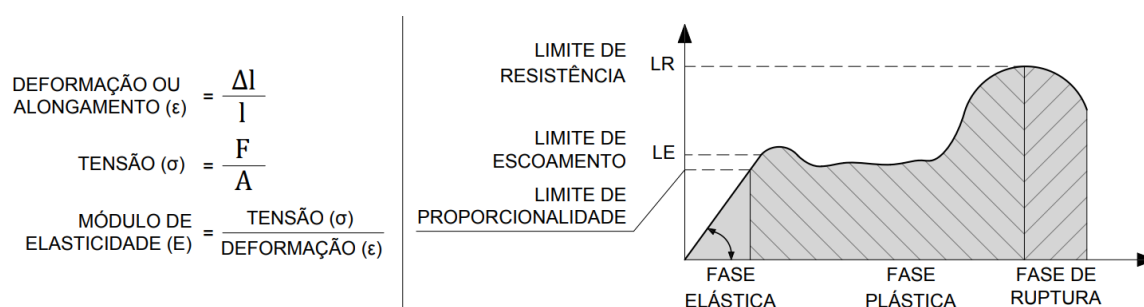
- **Ductilidade:** pode ser definida como a capacidade do material de se deformar sem romper. Essas deformações servem como indício da atuação de carga excessiva atuante. Materiais que se deformam pouco antes de romper são denominados materiais frágeis.

No caso dos aços, alta ductilidade permite a distribuição uniforme das cargas entre os parafusos resistentes, por exemplo;

- **Resiliência:** constitui absorção de energia durante a deformação elástica e a capacidade de recuperação dessa energia após a remoção da carga;
- **Tenacidade:** é um conceito de absorção de energia total durante a aplicação de carga que o material pode suportar antes de romper. Além disso, pode ser definida como a resistência à fratura em caso de presença de trinca ou entalhe, e considerando que os aços, principalmente em caso de ligações, apresentam esse tipo de situação, o conhecimento da tenacidade é de grande importância durante o dimensionamento;
- **Plasticidade:** compreende a deformação permanente do material provocada por solicitação igual ou superior ao limite de escoamento;
- **Elasticidade:** é a capacidade de retornar à forma original após aplicação de ciclos de carga e descarga. A relação entre a tensão aplicada e a deformação linear específica é conhecida como módulo de elasticidade. No caso dos aços o módulo de elasticidade médio é da ordem de 200.000 MPa;
- **Dureza:** está relacionada à resistência ao risco ou abrasão. A medição de dureza de um material, na prática, é feita através da resistência que a peça oferece à penetração de um material de maior dureza.

Algumas destas propriedades são obtidas através do diagrama de tensão-deformação dos materiais e este, por sua vez, é determinado por ensaio de tração. Traça-se o diagrama conhecendo-se a seção analisada, as tensões aplicadas e as deformações medidas durante o ensaio. A Figura 2 mostra um exemplo de diagrama de um aço, ficando evidente a presença das fases elástica e plástica, além do patamar de escoamento, onde o material deforma sem aumento significativo da tensão aplicada.

Figura 2 – Diagrama Tensão-Deformação de um aço



Fonte: Adaptado de DIAS, 2006

Quanto à composição, os aços são classificados entre aços-carbono e aços de baixa liga (platináveis).

2.2.4. Aço-Carbono

Os aços-carbono, segundo PFEIL e PFEIL (2009), são aqueles cujo aumento da resistência em relação ao ferro puro se dá especialmente pela adição do carbono e do manganês.

Como a adição de materiais diferentes altera as características do aço, foram definidos teores residuais máximos admissíveis, presentes na Tabela 1, retirados de DIAS (2006):

Tabela 1 – Teores residuais admissíveis

Carbono	2,00 %	Manganês	1,65 %
Silício	0,60 %	Cobre	0,40 %
Cromo	0,30 %	Níquel	0,30 %
Alumínio	0,30 %	Boro	0,0008 %

fonte: Adaptado de DIAS, 2006

Quanto ao teor de carbono, classificam-se em três classes (Tabela 2):

Tabela 2 – Teor de carbono

Baixo carbono	$C \leq 0,30\%$
Médio carbono	$0,30\% < C < 0,50\%$
Alto carbono	$C \geq 0,50\%$

Fonte: Adaptado de DIAS, 2006

Aumentando-se o teor de carbono é reduzido a ductilidade do material, dificultando o processo de soldagem, portanto, com o intuito de evitar problemas na soldagem, somente os aços-carbono com até 0,30 % de carbono podem ser soldados sem cuidados especiais (DIAS, 2006), fazendo com que estes sejam os mais empregados na construção civil.

2.2.5. Aços de Baixa Liga

Os aços de baixa liga são aços-carbono que recebem adição de elementos de liga, para que suas propriedades mecânicas sejam alteradas conforme sua aplicação (PFEIL e PFEIL, 2009). À medida que as atividades industriais evoluem e a poluição da atmosfera terrestre é alterada, as estruturas nela inseridas sofrem com o aumento de fenômenos como a corrosão (DIAS,2006), portanto, no caso das estruturas metálicas, busca-se a fabricação e utilização de aços que sejam resistentes a estas condições.

De acordo com CHIAVERINI (2005), os aços de baixa liga são de grande utilidade, uma vez que: acrescentem resistência mecânica, aumentando a carga resistente da estrutura e possibilitando diminuição proporcional das seções; melhorem a resistência à corrosão atmosférica, uma vez que a vulnerabilidade à corrosão diminui a vida da estrutura e melhorem a resistência à choques.

Segundo DIAS (2006), os aços de baixa liga são fabricados com teor de carbono de até 0,25 % e com teor de liga inferior a 2,0 %, fazendo com que além das propriedades supracitadas, mantenham a ductilidade e soldabilidade satisfatórias.

2.3. Ligações Metálicas

Segundo o INSTITUTO AÇO BRASIL (2011, p.10), uma ligação pode ser definida como “todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos a ela” e podem ser divididas em: elementos de ligação (enrijecedores, placas de ligação, consolos, cantoneiras, etc.), que são os componentes inseridos no conjunto para facilitar a transmissão de esforços e solicitações, e meios de ligação (soldas, parafusos, barras rosqueadas e pinos), que promovem a união das partes.

A NBR 8800:2008 determina que todos os elementos e meios de ligação devem ser dimensionados para que sua resistência de cálculo (para um estado limite último) seja igual ou superior à solicitação de cálculo da estrutura em análise, e esta deve ser determinada através de análise das combinações de cálculo das ações ou como uma porcentagem da resistência da barra a ser ligada.

A NBR 8800:2008 ainda estabelece que, assim como em qualquer estrutura, as ligações devem permitir a execução de forma a não comprometer as condições segurança, desde a fabricação até a montagem da estrutura.

2.4. Tipos de Ligações

Sabendo-se que, conforme supratranscrito, toda e qualquer união entre partes da estrutura são consideradas ligações, a análise minuciosa destas acaba por ser de grande importância durante o dimensionamento, visto que dependendo da complexidade do sistema, podem ser encontradas centenas de ligações dentro da estrutura.

Os principais métodos utilizados para realização de ligações em estruturas metálicas são os parafusos e a soldagem, sendo que as ligações rebitadas caíram em desuso, segundo DIAS (2006), devido à fatores como a baixa resistência mecânica, a necessidade de mão de obra especializada, a instalação lenta e a dificuldade de inspeção.

2.4.1. Ligações Parafusadas

As ligações parafusadas surgiram de forma a substituir as ligações rebitadas usadas anteriormente, e são amplamente utilizadas em estruturas, tendo como características do sistema, de acordo com BELLEI (2008):

- Rapidez na fabricação e montagem em campo;
- Economia de energia;
- Baixa necessidade de qualificação de mão de obra e número de operadores;
- Melhor comportamento quanto às tensões de fadiga.

Como dificuldades encontradas com a utilização de conexões parafusadas, citam-se:

- Necessidade de verificações quanto às áreas líquidas e esmagamento de peças;
- Necessidade de previsão de furação e número de parafusos na obra;
- Em alguns casos, faz-se necessário a realização de pré-montagens para alinhamento;
- Dificuldade de correções.

Com relação à classificação, os parafusos utilizados em estruturas dividem-se em parafusos comuns, ou de baixo carbono, e parafusos de alta resistência.

No caso dos parafusos comuns, utilizam-se conectores fabricados conforme especificação americana ASTM A 307 e apresentam resistência à ruptura por tração de 41,5 kN/cm². A vantagem da utilização desse tipo de parafuso está na facilidade de instalação, porém, como o torque pode ser variável justamente por esse processo manual, não são aplicados para elementos primários, já que podem permitir deslocamentos entre as estruturas. Portanto, são usados em corrimãos, guarda-corpos, terças etc. (DIAS, 2006).

Os parafusos de alta resistência seguem a especificação ASTM A 325 e apresentam resistência de 82,5 kN/cm² à ruptura por tração (DIAS, 2006). Sua utilização permite dois tipos de ligação, por atrito ou por apoio. A primeira em caso de intolerância à deslocamentos e a segunda permite pequenos deslizamentos, conforme PFEIL e PFEIL (2009).

2.4.2. Ligações Soldadas

Além das conexões parafusadas, outro processo que é utilizado para a realização de ligações em estruturas é a soldagem dos materiais, que conforme MARQUES (2007, p. 18), a partir de análise de diferentes definições para o processo, chega-se ao conceito final de que a soldagem é o:

Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.

Esse conceito engloba a soldagem de não-metals, que não é o foco do presente trabalho, bem como o processo de brasagem de materiais. BELLEI (2008) cita como vantagens das ligações soldadas:

- Economia de material, pois utiliza toda a área para ligação, reduzindo a necessidade de chapas de ligação em até 15% do peso de aço;
- Rigidez das estruturas;
- Facilidade de realizar modificações e corrigir erros;
- Menor quantidade de peças.

Como dificuldades encontradas, BELLEI (2008) cita:

- Reduções no comprimento das peças por efeitos de retração;
- Alta demanda de energia elétrica;
- Exigências maiores de análises de fadiga;
- Maior tempo de fabricação e montagem das peças.

2.5. Classificação das Ligações Soldadas

Segundo MARQUES (2007), classificam-se as ligações soldadas com relação ao tipo (posição do material de solda), continuidade a posição de soldagem.

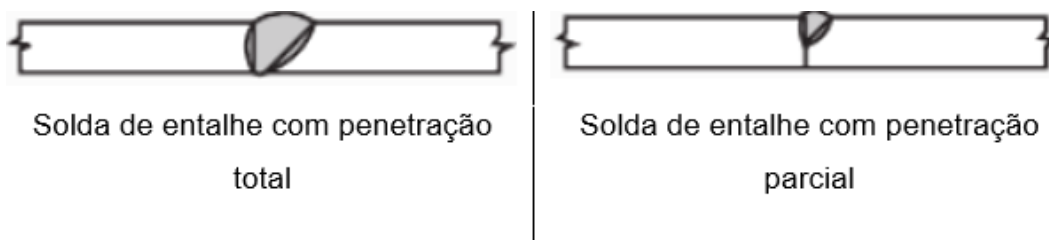
2.5.1. Quanto à Posição do Material de Solda em Relação ao Material-base

Segundo PFEIL e PFEIL (2009), dividem-se em:

- Solda de entalhe, também conhecida como solda de chanfro, na qual o material de solda é colocado entre as peças a serem unidas, podendo ainda

ser classificadas conforme a penetração, parcial ou total. A Figura 3 mostra uma solda de entalhe;

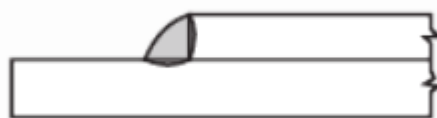
Figura 3 – Solda de entalhe



Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

- Solda de filete, onde utilizam-se as faces laterais dos elementos ligados para se depositar o material de solda, conforme Figura 4. De acordo com DIAS (2006), este é o tipo mais utilizado, dada a sua simplicidade de execução;

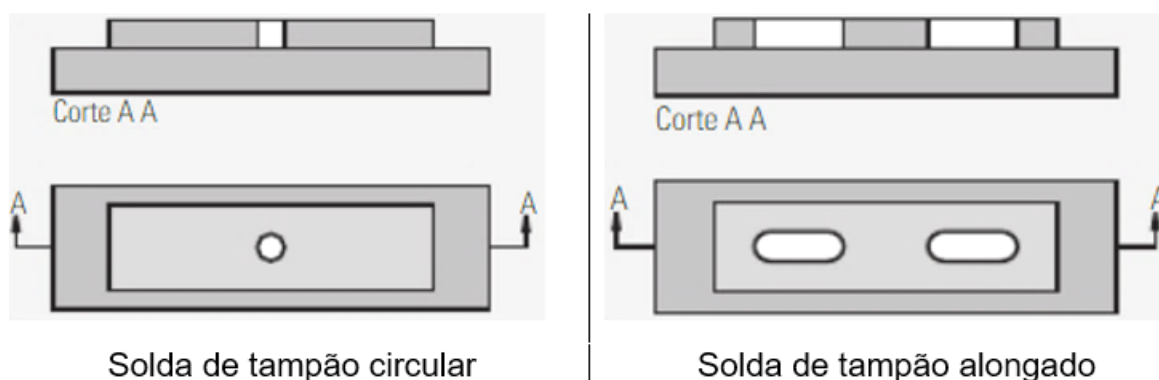
Figura 4 – Solda de filete



Fonte: PINHEIRO, 2005

- Solda de tampão, com a disposição do material de solda em orifícios circulares ou alongados feitos na chapa base, conforme Figura 5.

Figura 5 – Solda de tampão



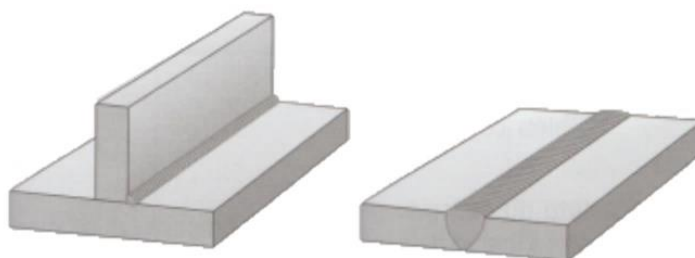
Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

2.5.2. Quanto à Continuidade

De acordo com PINHEIRO (2005), com relação à continuidade da solda, podem ser classificadas em:

- Soldas contínuas, com comprimento ininterrupto, com exemplo apresentado na Figura 6;

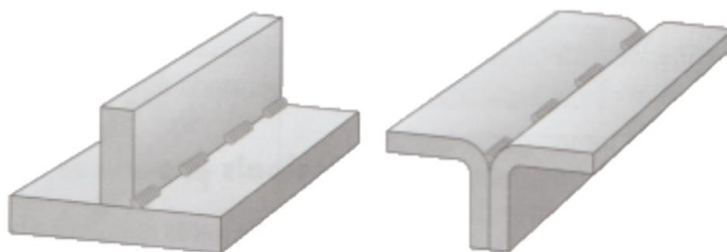
Figura 6 – Solda contínua



Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

- Soldas intermitentes, descontínuas em seu comprimento, conforme Figura 7;

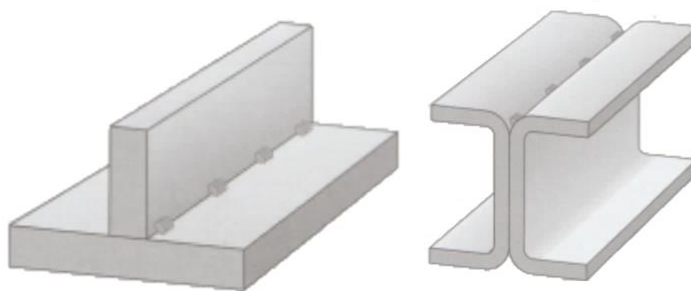
Figura 7 – Solda intermitente



Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

- Soldas ponteadas, servem para alinhar os componentes em espera de uma solda definitiva, portanto, não é estrutural. Apresenta-se um exemplo na Figura 8.

Figura 8 – Solda ponteadada

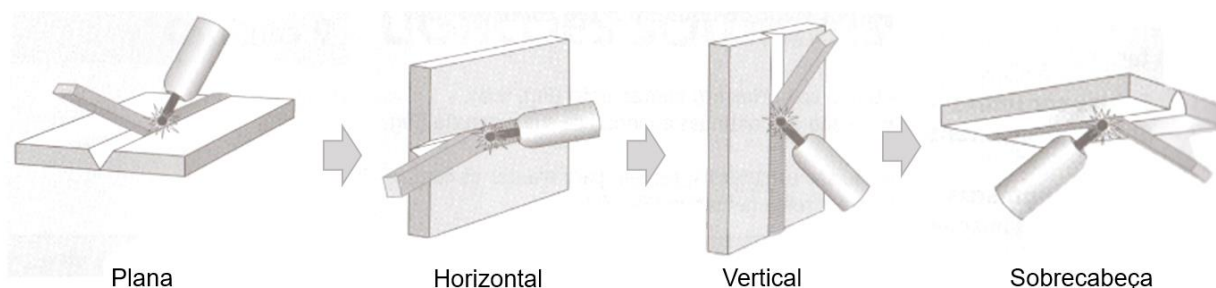


Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

2.5.3. Quanto à Posição de Soldagem

Quanto à posição de soldagem, dividem-se em quatro grupos, conforme PINHEIRO (2005), indicados na Figura 9, sendo que as posições estão organizadas em sequência crescente de custo.

Figura 9 – Posições de soldagem



Fonte: Adaptado de PINHEIRO, 2005

2.6. Processos de Soldagem

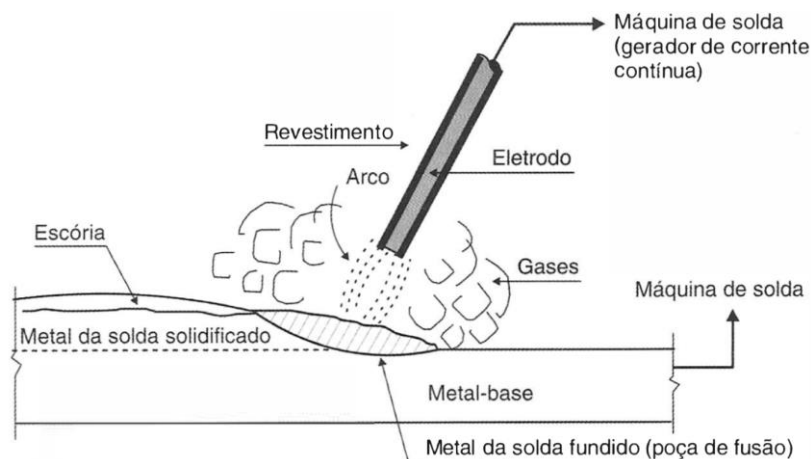
Quanto aos materiais e processos de soldagem, a NBR 8800:2008 recomenda a utilização das disposições da AWS e, considerando suas características técnicas de realização, dividem-se em quatro: Soldagem com eletrodo revestido, com proteção gasosa, com fluxo no núcleo e a arco submerso.

2.6.1. Soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW)

Consiste na utilização de arame consumível com revestimento que se funde sob a ação do arco elétrico, segundo DIAS (2006). Nesse caso, o arame constitui o material do enchimento e o revestimento se transforma em escória, que serve para

proteção da região soldada. A Figura 10 apresenta esquema explicativo do funcionamento de soldagem SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).

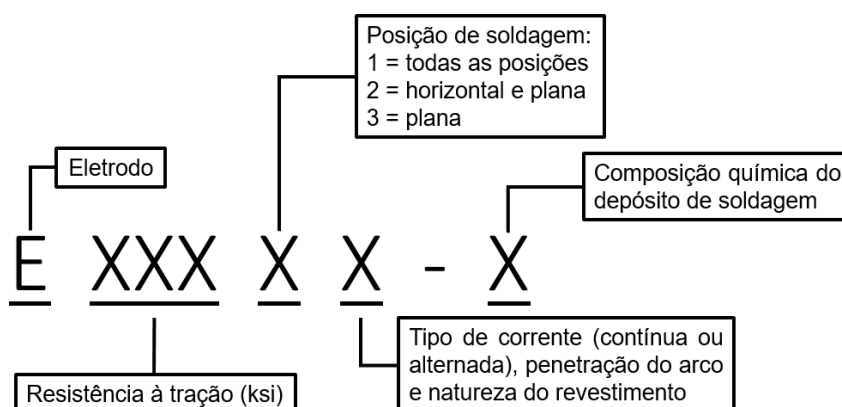
Figura 10 – Soldagem com eletrodo revestido



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009

Conforme INSTITUTO AÇO BRASIL (2011), é o processo mais utilizado, visto que apresenta: simplicidade dos equipamentos utilizados; resistência; qualidade da solda e custo de execução. A nomenclatura e especificação dos eletrodos segue as orientações da AWS, que são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Designação dos eletrodos

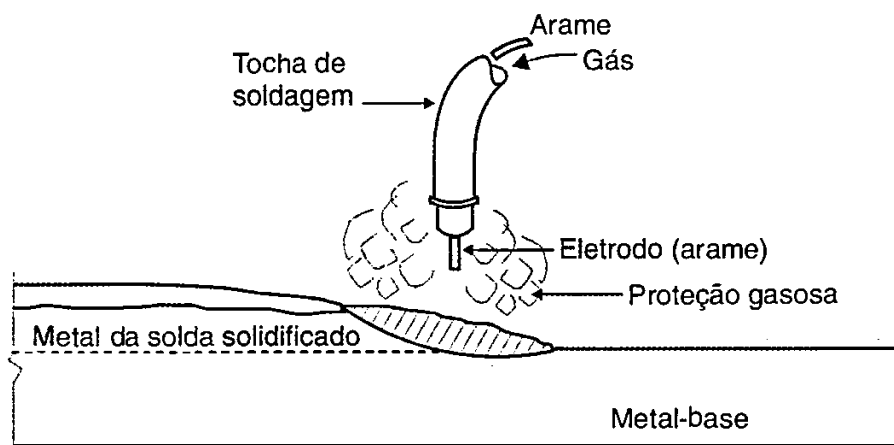


Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011

2.6.2. Soldagem com Proteção Gasosa (GMAW)

Na soldagem com proteção gasosa, o eletrodo é composto por um arame sem revestimento, e a proteção da poça de fusão é feita através do fluxo de um gás lançados pela tocha (PFEIL e PFEIL, 2009), conforme Figura 12.

Figura 12 – Soldagem com proteção gasosa



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009

Segundo INSTITUTO AÇO BRASIL (2011), a soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) também é conhecida por MIG/MAG, conforme o tipo de gás utilizado:

- MIG (*Metal Inert Gas*), a qual faz o uso de gases inertes para proteção, como Hélio e Argônio;
- MAG (*Metal Active Gas*), que utiliza os gases ativos como o Dióxido de Carbono, Oxigênio e Nitrogênio.

Devido à utilização desses gases, não se recomenda a utilização desse tipo de soldagem para serviços de campo.

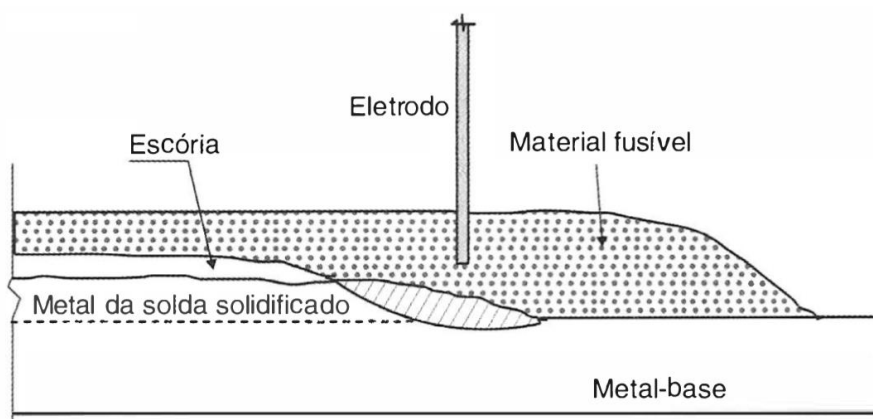
2.6.3. Soldagem com Fluxo no Núcleo (FCAW)

O processo de soldagem FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*), apesar de apresentar especificações e características próprias, pode ser considerado similar ao GMAW, segundo INSTITUTO AÇO BRASIL, exceto por utilizar eletrodo tubular e fluxo no seu interior.

2.6.4. Soldagem a Arco Submerso (SAW)

Conforme DIAS (2006), a soldagem a arco submerso utiliza-se de arame de aço sem revestimento, associado a dispositivo que provém fluxo fundente à peça, com a geração do arco elétrico, o arame é fundido e o fluxo é depositado sobre a solda de forma a protegê-la. O processo é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Soldagem a arco submerso



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009

O processo SAW (*Submerged Arc Welding*) apresenta uma maior qualidade da solda, devido à sua automatização e, portanto, é destinado a processos executados em fábrica (DIAS, 2006). O INSTITUTO AÇO BRASIL (2011) ainda cita outras vantagens desse tipo de soldagem como sendo a resistência mecânica, alta velocidade e pouca fumaça gerada.

2.7. Dimensionamento de Ligações Soldadas

A norma NBR 8800:2008, para efeito de cálculo, determina a utilização dos seguintes parâmetros para o aço de estruturas metálicas:

- Módulo de elasticidade, $E = E_a = 200.000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$;
- Módulo de elasticidade transversal, $G = 77.000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- Massa específica, $\rho_a = 7.850 \text{ kg/m}^3$.

Segundo o INSTITUTO DE AÇO BRASIL (2011), a resistência de cálculo em ligações soldadas é determinada através de análise de dois estados limites últimos:

- Ruptura da solda na seção efetiva;
- Ruptura do metal-base na face de fusão.

Além disso, os valores de resistência da solda jamais poderão ser considerados maiores do que a resistência do metal-base. No caso de soldas de filete ou entalhe,

pode se tomar a solicitação como sendo o cisalhamento na seção efetiva, causado pelo somatório de forças na junta.

2.7.1. Elementos construtivos de Projeto

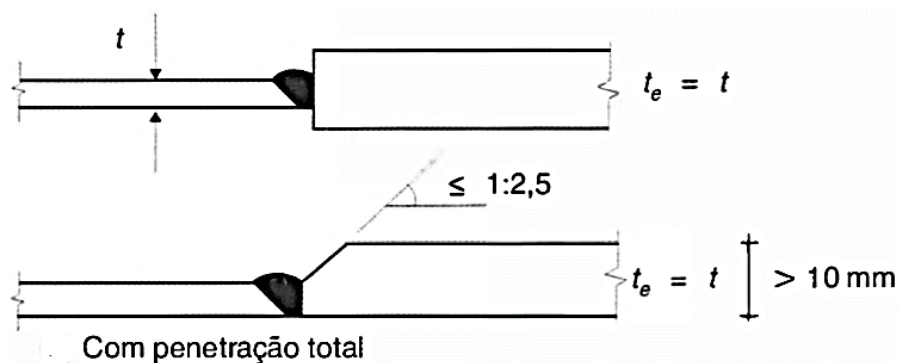
Nesta seção, apresentam-se as disposições normativas quanto aos requisitos de projeto para ligações soldadas de entalhe e de filete.

2.7.1.1. Solda de entalhe

A NBR 8800:2008 apresenta as seguintes disposições a respeito das soldas de entalhe, de penetração total e parcial:

Calcula-se a área efetiva como sendo o produto do comprimento efetivo¹ da solda pela espessura da garganta efetiva (t_e). No caso das soldas de penetração total, a espessura da garganta é igual à menor das espessuras das peças ligadas (Figura 14).

Figura 14 – Garganta efetiva em soldas com penetração total

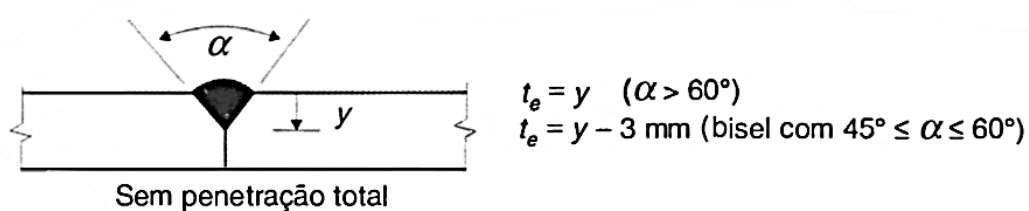


Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2009

Nas soldas com penetração parcial, utiliza-se como espessura da garganta a profundidade do chanfro, em caso de ângulos maiores que 60° , ou a profundidade do chanfro menos 3 mm, em caso de ângulos entre 45° e 60° , conforme Figura 15.

¹ Considera-se o comprimento efetivo igual ao comprimento real, no caso das soldas de penetração parcial ou total, o qual deve ser igual à largura da parte ligada.

Figura 15 – Garganta efetiva em soldas com penetração parcial



Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2009

2.7.1.2. Solda de filete

Segundo a norma NBR 8800:2008, as seguintes disposições são aplicáveis:

A área efetiva (A_w) para cálculo de uma solda de filete com lados iguais pode ser calculada através da equação abaixo, retirada de PFEIL e PFEIL (2009):

$$A_w = tl = 0,7bl \quad (2.1)$$

onde:

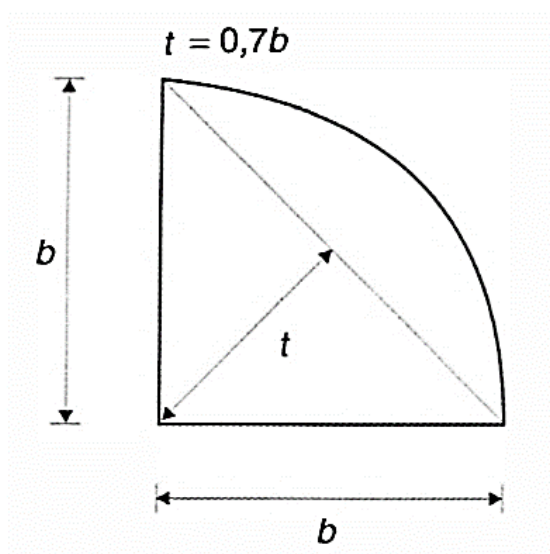
b é o tamanho da perna da solda;

l é o comprimento da solda;

t é a espessura da garganta.

O coeficiente utilizado (0,7) considera uma seção teórica de solda, conforme Figura 16 e, o valor da espessura da garganta do filete (t) é calculado considerando essa seção teórica.

Figura 16 – Seções teórica e real (lados iguais)



Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2009

Em soldas de arco submerso, devido à sua confiabilidade, pode-se adotar espessuras efetivas maiores, conforme equações (PFEIL e PFEIL, 2009):

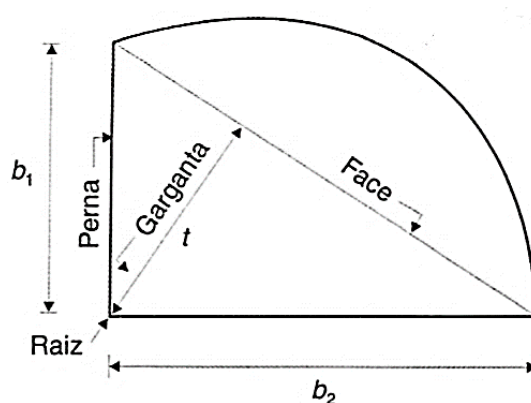
$$b \leq 10 \text{ mm} \quad te = b \quad (2.2)$$

$$b > 10 \text{ mm} \quad te = t + 3 \text{ mm} \quad (2.3)$$

Para soldas com lados diferentes, menos usuais, calcula-se a espessura da garganta efetiva através da equação abaixo (PFEIL e PFEIL, 2009), considerando os parâmetros da Figura 17.

$$t = \frac{b_1 b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}} \quad (2.4)$$

Figura 17 – Seções teórica e real (lados diferentes)



Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2009

Em caso de soldas de filete longitudinais de elementos axialmente solicitados, o comprimento efetivo deve ser calculado multiplicando-se o comprimento real por um fator de redução β , encontrado utilizando-se a equação da norma NBR8800:2008:

$$\beta = 1,2 - 0,002 \left(\frac{l_w}{d_w} \right), \text{ com } 0,6 \leq \beta \leq 1,0 \quad (2.5)$$

onde:

l_w é o comprimento total da solda;

d_w é o tamanho da dimensão (perna) do filete de solda.

Esta equação se aplica a soldas longas, de comprimento maior do que 100mm.

Com relação à dimensão mínima do filete, para evitar o resfriamento brusco (PFEIL e PFEIL, 2009) utiliza-se os valores encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões mínimas para filetes de solda

Espessura da chapa mais fina (mm)	Tamanho mínimo da perna da solda de filete
Até 6,35	3 mm
6,35 até 12,5	5 mm
12,5 até 19	6 mm
19 até 37,5	8 mm
37,5 até 57	10 mm
57 até 152	13 mm
Acima de 152	16 mm

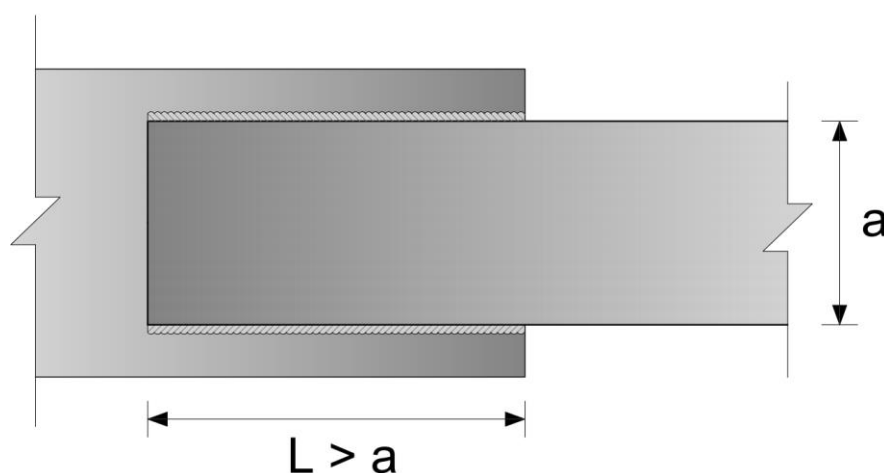
Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008

Quanto ao comprimento da solda (L), a norma NBR 8800:2008 estabelece valores mínimos (equação 2.6, de PFEIL e PFEIL, 2009), afim de considerar uma redução na garganta efetiva no final da solda, onde a espessura da garganta tende a cair a zero.

$$L \geq 4b \nlessgtr 40\text{mm} \quad (2.6)$$

Em ligações nas extremidades de peças tracionadas que utilizam unicamente de soldas em filete longitudinais, conforme mostrado na Figura 18, o comprimento da solda deve ser maior ou igual à largura da chapa a ser ligada (PFEIL e PFEIL,2009).

Figura 18 – Comprimento de soldas tracionadas com filetes longitudinais



Fonte: Adaptado de PFEIL e PFEIL, 2009

2.7.2. Resistência das Soldas

Nesta seção, apresentam-se as determinações da norma NBR 8800:2008 quanto à resistência mecânica das soldas de entalhe e de filete, com as equações utilizadas para o dimensionamento. A norma resume estas determinações em uma tabela (Tabela 4).

Tabela 4 – Força resistente de cálculo das soldas

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}$
Penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y / \gamma_{a1}$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60 A_{MB}f_y / \gamma_{a1}$
Penetração parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB}f_y / \gamma_{a1}$ b) Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w1}$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	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: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008

2.7.2.1. Resistência da ligação

A resistência da ligação, no que se refere à ruptura da seção efetiva da ligação, compreende uma redução na área bruta do perfil analisado, em casos de perfis de seção aberta (“L” e “C”, exemplo), considerando somente a área líquida efetiva do material, na qual são concentradas as tensões aplicadas (PFEIL e PFEIL, 2009).

O coeficiente de redução da área bruta é calculado através da equação 2.7, retirada de PFEIL e PFEIL (2009).

$$C_l = 1 - \frac{e_c}{l} \geq 0,60 \quad (2.7)$$

onde:

C_l = Coeficiente de redução de área;

e_c = Excentricidade do plano da ligação em relação ao centro geométrico da seção;

l = Comprimento do cordão de solda.

Portanto, segundo PFEIL e PFEIL (2009), a área líquida efetiva pode ser calculada utilizando-se da equação 2.8, retirada de PFEIL e PFEIL (2009).

$$A_{nef} = C_l \cdot A_g \quad (2.8)$$

onde:

C_l = Coeficiente de redução de área;

A_{nef} = Área líquida efetiva;

A_g = Área bruta do perfil.

Por fim, para se calcular a resistência da ligação, utiliza-se a equação 2.9, adaptada de PFEIL e PFEIL (2009).

$$N_{def} = \frac{A_{nef} f_u}{\gamma_{w2}} \quad (2.9)$$

onde:

$\gamma_{w2} = 1,35$ em combinações normais, especiais ou de construção;

$\gamma_{w2} = 1,15$ em combinações excepcionais.

2.7.2.2. Solda de Entalhe

A resistência das soldas de entalhe é calculada em função da área efetiva de solda e pela área do metal-base. A primeira é calculada através da equação 2.10, retirada de PFEIL e PFEIL (2009).

$$A_w = t_e l \quad (2.10)$$

onde:

t_e = espessura efetiva (Seção 2.7.1.1);

l = comprimento efetivo.

A área do metal-base (A_{MB}) é calculada através do produto do comprimento de solda pela espessura da peça mais fina.

Segundo PFEIL e PFEIL (2009), em soldas de entalhe com penetração total (Figura 14), sujeitas a tensões (de compressão ou tração) perpendiculares ao eixo da solda, são calculadas as resistências de cálculo (R_d) utilizando como base o estado limite de escoamento do metal-base, pela equação 2.11.

$$R_d = \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.11)$$

onde:

f_y = Resistência ao escoamento do aço, com valor retirado da Tabela 5 (NBR 8800:2008), englobando alguns dos aços utilizados normalmente;

Tabela 5 – Resistência ao escoamento de aços comuns

Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
MR 250	250	400-560
SAE 1020	350-400	470-500
AR 350	350	450
AR 350 COR	350	485
AR 415	415	520

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação das resistências, e é obtido através da Tabela 6, retirada da norma NBR 8800:2008.

Tabela 6 – Coeficientes de ponderação das resistências

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

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

Fonte: NBR 8800:2008

Para soldas de entalhe com penetração parcial, sob tração ou compressão perpendiculares ao eixo de solda), determina-se a resistência como sendo o menor valor entre os encontrados nas equações 2.12 e 2.13, retiradas de PFEIL e PFEIL (2009).

Metal-base

$$R_d = \frac{A_{MB} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.12)$$

Metal da solda

$$R_d = \frac{0,60A_w f_w}{\gamma_{w1}} \quad (2.13)$$

onde:

f_w = Tensão resistente do metal da solda;

$\gamma_{w1} = 1,25$ em combinações normais, especiais ou de construção;

$\gamma_{w1} = 1,05$ em combinações excepcionais.

O fator 0,60 compreende as incertezas na qualidade da solda na raiz e demais possíveis efeitos na ligação (PFEIL e PFEIL, 2009).

No caso de ligações onde as tensões de tração ou compressão são paralelas ao eixo de solda, não se faz necessária a verificação da resistência, segundo PFEIL e PFEIL (2009).

Para verificação quanto ao cisalhamento, a resistência de projeto R_d é calculada através das equações:

Penetração total: Metal-base

$$R_d = \frac{A_{MB}(0,6)f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.14)$$

Metal da solda

$$R_d = \frac{A_w(0,60)f_w}{\gamma_{w2}} \quad (2.15)$$

onde:

$\gamma_{w2} = 1,35$ em combinações normais, especiais ou de construção;

$\gamma_{w2} = 1,15$ em combinações excepcionais.

2.7.2.3. Solda de Filete

Em soldas de filete, as resistências são calculadas tendo como base a área efetiva encontrada na equação 2.1. Segundo PFEIL e PFEIL (2009), considera-se, no cálculo da resistência, a transferência de solicitações de uma chapa à outra por cisalhamento através da garganta, portanto, o estado limite considerado é o de ruptura do metal da solda.

Solicitações em qualquer direção no plano perpendicular do eixo longitudinal da solda são considerados como cisalhantes (PFEIL e PFEIL, 2009), e, portanto, a resistência é calculada através da equação 2.15.

$$R_d = \frac{A_w(0,60)f_w}{\gamma_{w2}} \quad (2.16)$$

Quando a solda estiver sob a ação de tensões não-uniformes, determina-se a resistência por unidade de comprimento:

$$R_d = \frac{t(0,60)f_w}{\gamma_{w2}} \quad (2.17)$$

A resistência das peças na região de ligação quanto ao escoamento do metal-base é calculada pela equação 2.18, retirada de PFEIL e PFEIL (2009).

$$R_d = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.18)$$

A área A_g é a área cisalhada, calculada com a espessura da peça ligada.

3. METODOLOGIA

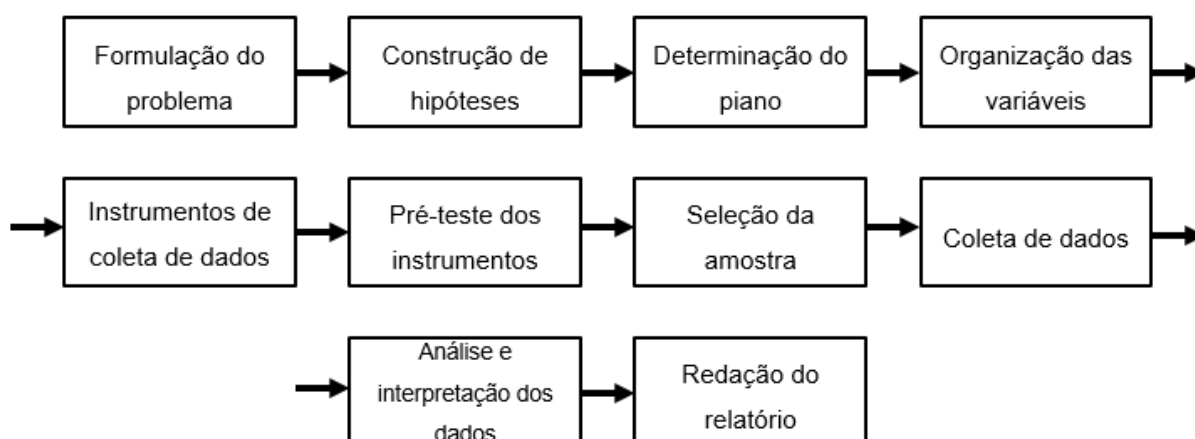
GIL (2008, p 8.) define método como “[...] caminho para se chegar a determinado fim” e apresenta como objetivo da ciência chegar à veracidade dos fatos. O presente trabalho almeja, a partir de embasamento teórico, encontrar tal veracidade.

Para tal, busca-se testar os métodos atualmente utilizados, no que diz respeito ao dimensionamento de ligações soldadas em estruturas de aço, utilizando-se das normas técnicas vigentes e bibliografia acerca do tema, tanto para o dimensionamento quanto para o teste das estruturas propostas, possibilitando a determinação mais fiel possível das propriedades mecânicas das peças que estão sob análise.

3.1. Elaboração da Pesquisa

Segundo GIL (2002), “[...] a elaboração de um projeto é feita mediante consideração das etapas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa”, e para tal, buscando elevar a confiabilidade e organização dos processos, sugere a utilização de diagramas de pesquisa, apresentado na Figura 19.

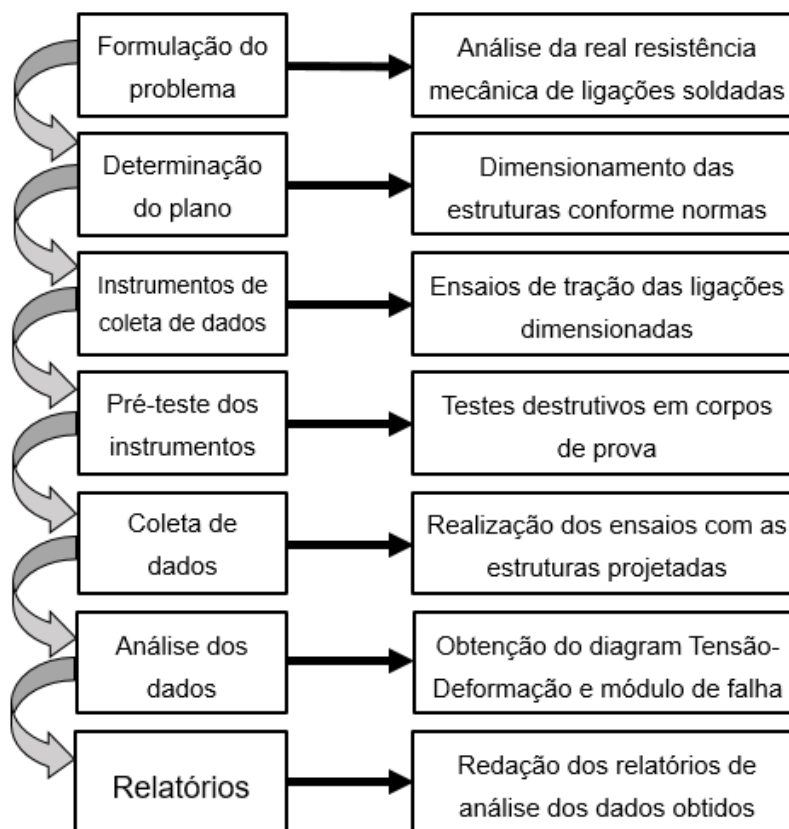
Figura 19 – Diagramação de projeto de pesquisa



Fonte: Adaptado de GIL (2002)

Aplicando-se ao presente trabalho, foram reorganizadas e explicadas as etapas propostas por GIL (2002), e o diagrama proposto acerca do projeto é o demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama da pesquisa



Fonte: Autor, 2018

3.2. Descrição dos Materiais e Métodos de obtenção de dados

Nesta seção, apresentam-se os materiais considerados no dimensionamento das estruturas e empregados na confecção das ligações soldadas analisadas, assim como suas características e propriedades mecânicas perante aos métodos de ensaio a serem utilizados.

3.2.1. Perfis

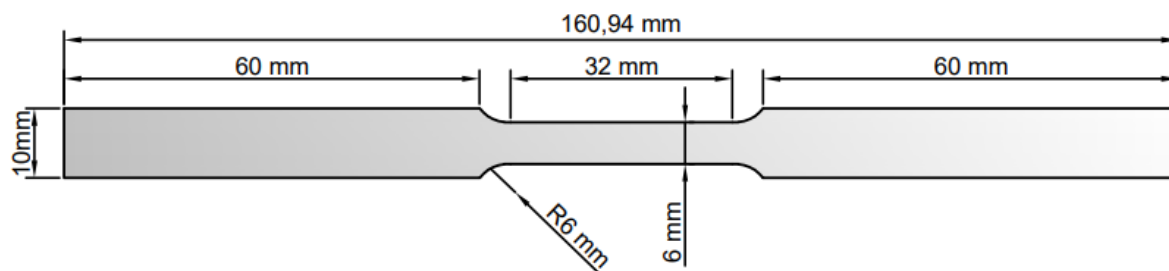
Os perfis escolhidos para análise são perfis constituídos de aço SAE 1020, sabendo-se que este é comumente utilizado na construção civil. Sendo assim, o aço é testado experimentalmente afim de determinar os valores reais de resistência à tração.

3.2.1.1. Ensaio de Tração do Aço dos Perfis

Buscando conhecimento das características reais do aço utilizado, são utilizados corpos de prova com dimensões normatizados conforme norma ASTM E 8M – 04. Quanto à manufatura dos mesmos, foram usinados em CNC, visando garantir a máxima perícia das dimensões e, portanto, a confiabilidade dos resultados obtidos.

Os corpos de prova são ensaiados à tração, para determinação dos valores de tensão de escoamento e ruptura do aço que será utilizado nos perfis soldados. Após realização dos ensaios, são traçados os diagramas de Tensão-Deformação do aço, que são os parâmetros utilizados para o dimensionamento da estrutura final. A Figura 21 apresenta a geometria utilizada nos corpos de prova utilizados.

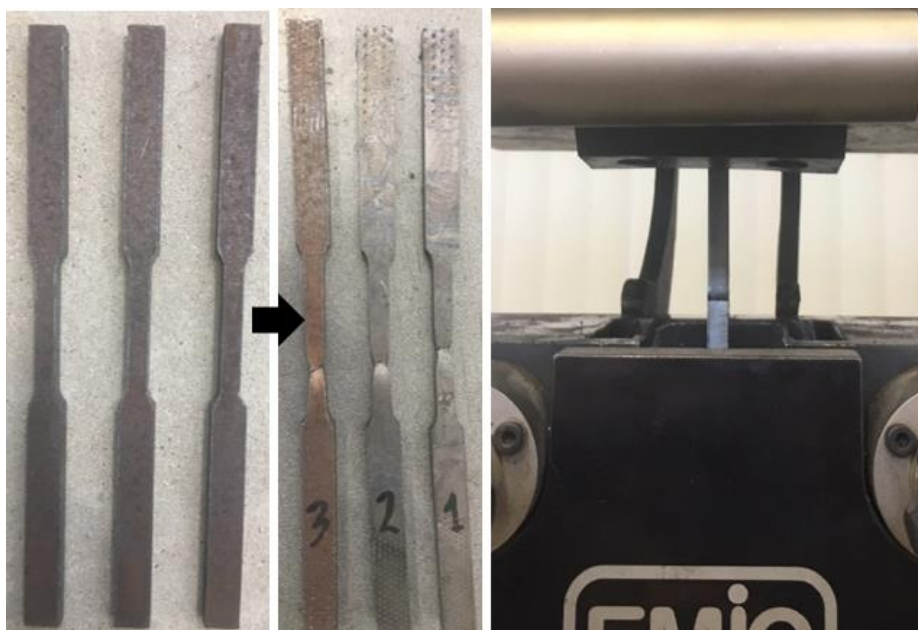
Figura 21 – Corpo de prova de aço para ensaio



Fonte: Autor, 2019

Foram testados 3 CPs de aço de 6mm de espessura através de testes de tração, possibilitando a determinação do diagrama de tensão por deformação. A Figura 22 mostra os corpos de prova utilizados, bem como sua instalação no equipamento de testes.

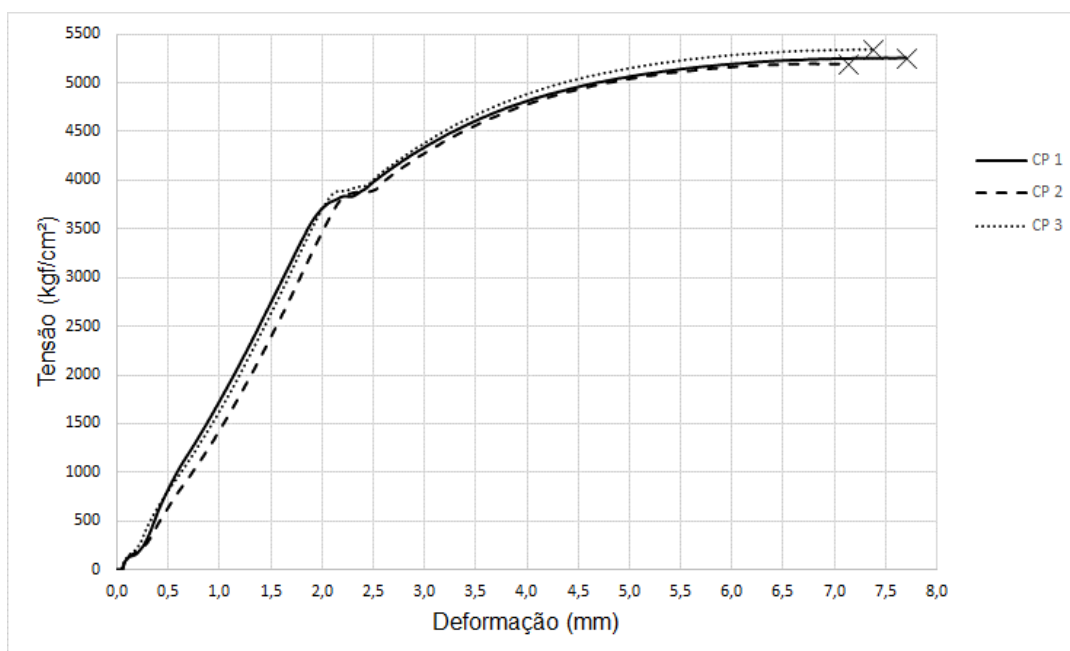
Figura 22 – Teste dos CPs de aço



Fonte: Autor, 2019

Retiram-se dos testes os valores de deformação e tensão aplicada, e a partir destes dados, são traçadas as curvas do diagrama tensão-deformação, possibilitando análise de resultados e retirada de dados. Apresentam-se, na Figura 23, os diagramas de tensão-deformação dos corpos de prova testados.

Figura 23 – Diagramas de tensão-deformação dos CPs



Fonte: Autor, 2019

Retirados os dados pertinentes, apresentam-se na Tabela 7 os resultados de tensão de escoamento e ruptura do aço SAE 1020 testado e utilizado para todas as peças.

Tabela 7 – Resultados obtidos dos testes do aço SAE 1020

CPs	Tensão de escoamento kN/cm²	Tensão de ruptura kN/cm²
01	37,80	51,55
02	37,85	50,97
03	38,37	52,40
Média	38,01	51,64
Desvio padrão	0,316	0,719
Média (kgf/cm²)	3875,93	5266,15

Fonte: Autor, 2019

Observa-se baixa variação tanto nos resultados obtidos, como nos modos de falha dos CPs testados, validando o método utilizado.

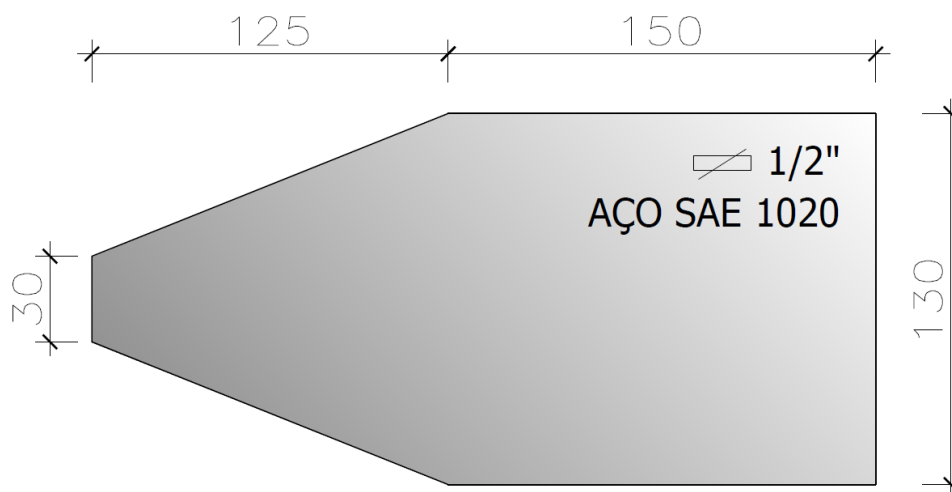
3.2.2. Chapa Gusset

A chapa gusset serve para dar rigidez ao conjunto e servir como base para fixação de componentes e transmissão de esforços entre eles, possibilitando a realização dos testes e análise do conjunto como um todo.

Para o presente trabalho, optou-se pela utilização de chapa gusset plana trapezoidal do mesmo aço dos demais componentes, buscando maior uniformidade entre as peças do conjunto.

Como restrições geométricas, procurou-se um dimensionar a chapa de forma que os demais componentes coubessem na estrutura, tendo como limite máximo as dimensões do equipamento de ensaio. Na Figura 24, apresenta-se a geometria da chapa escolhida.

Figura 24 – Geometria chapa gusset



Fonte: Autor, 2019

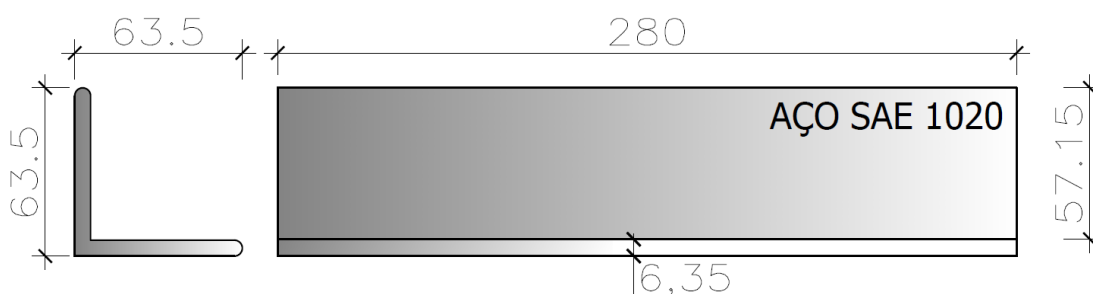
3.2.3. Perfil de aço em “L”

Para o perfil testado, sendo o metal-base para a solda, optou-se pelo perfil em “L”, ou cantoneira, de $\frac{1}{4}$ " (6,35mm) de espessura e 63,5mm de largura.

Este perfil foi escolhido a partir de dimensionamento preliminar, analisando-se a capacidade de aplicação de carga do equipamento e considerando as disposições normativas quanto às geometrias, tanto do perfil como do filete de solda a ser testado.

Com isso, buscou-se escolher um perfil (e demais componentes) que permitissem que a resistência estimada, ou estimativa de ruptura, da peça montada ficasse dentro do intervalo de ação do equipamento.

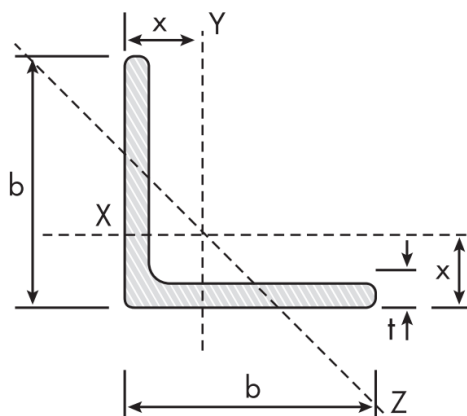
Figura 25 – Perfil em “L” utilizado



Fonte: Autor, 2019

As características do perfil utilizado estão apresentadas na Figura 25, Figura 26 e na Tabela 8, sendo que as informações geométricas, de área e excentricidade do centro geométrico foram indicadas pelo fabricante e conferidas através de cálculos e revisão bibliográfica em PFEIL e PFEIL (2009).

Figura 26 – Características para cálculos do perfil utilizado



Fonte: Adaptado de GERDAU, 2019. Disponível em <https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-cantoneira.pdf>, acesso em junho de 2019.

Tabela 8 – Características do perfil utilizado

b		Peso Nominal	t	Área	x	
pol.	mm.	kg/m	pol.	mm.	m ²	cm
2.1/2"	63,50	6,10	¼"	6,35	7,68	1,83

Fonte: Adaptado de GERDAU, 2019. Disponível em <https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-cantoneira.pdf>, acesso em junho de 2019.

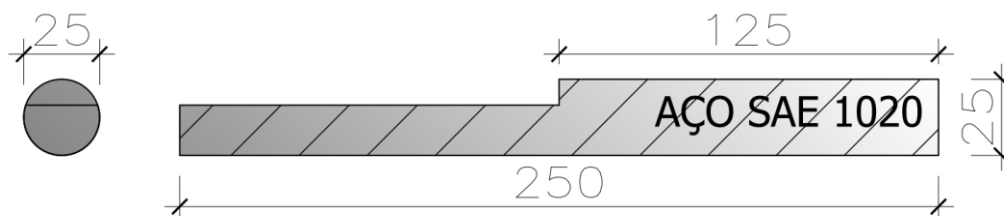
3.2.4. Barras de fixação

Por fim, através de análise da fixação dos componentes no equipamento de ensaio, utilizou-se de barras cilíndricas de aço SAE 1020 de diâmetro 25 mm nas duas extremidades das peças, que serviram como apoio à máquina na aplicação das cargas nos testes experimentais.

Estas barras cilíndricas foram soldadas aos demais componentes para fixá-las à estrutura e, para isso, uma parte delas foi retirada, para que fossem diminuídas as

excentricidades na aplicação das forças de tração durante os testes, como mostra o detalhamento apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Detalhes barras de fixação



Fonte: Autor, 2019

3.3. Mecanismos e equipamentos de ensaios

Para a realização dos ensaios de tração dos corpos de prova do aço, bem como nos ensaios da ligação da estrutura como um todo, foi utilizado equipamento Emic GR048, contando com capacidade máxima de carga de 30.000 kgf (300 kN), com sistema pneumático para autotravamento e pré-aperto. O equipamento utilizado encontra-se na Figura 28.

Figura 28 – Equipamento de ensaio Emic GR048



Fonte: Autor, 2018

O equipamento permite exportação dos dados em formato de diagrama Tensão-Deformação semelhante ao apresentado na Figura 2, pg.18, possibilitando análise do real comportamento dos materiais testados.

3.4. Dimensionamento das ligações soldadas segundo NBR 8800:2008

A partir dos métodos apresentados nos itens referentes ao dimensionamento, foram determinadas as forças resistentes da ligação soldada a ser testada, como forma de prever os resultados dos testes práticos realizados. Para tal, foram utilizadas as equações apresentadas no item 2.7.2.3 pg. 36.

3.4.1. Dimensionamento – Solda

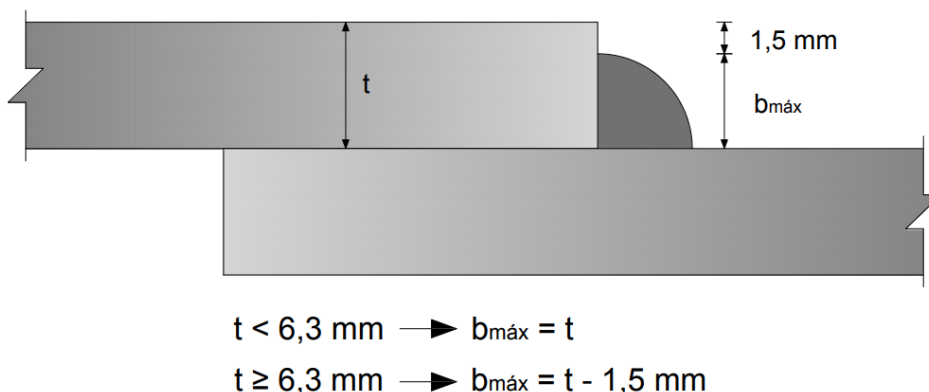
O dimensionamento da região da solda seguiu as diretrizes apresentadas anteriormente, compreendendo as determinações normativas.

O comprimento de solda foi definido utilizando como base o parâmetro mínimo, conforme seção 2.7.1.2 pg. 32, que restringe o limite inferior como sendo a largura do perfil a ser soldado. O limite máximo estipulado foi de 100 mm, garantindo uma uniformidade das tensões ao longo do comprimento da solda. O comprimento de solda definido foi de 63,5 mm.

A dimensão da perna do filete de solda foi determinada com base nos valores mínimos normativos para soldas de filete, que levam em consideração a espessura da chapa mais fina. A Tabela 3 pg. 32, retirada da NBR 8800:2008 apresenta as dimensões mínimas da perna dos filetes para diferentes espessuras de chapas.

No caso da dimensão máxima, conforme PFEIL E PFEIL (2009), esta deve obedecer aos parâmetros da Figura 29. Considerou-se a chapa mais fina, do perfil em “L” utilizado, de espessura 6,35mm.

Figura 29 – Valores máximos para perna de filete



Fonte: PFEIL e PFEIL, 2009

Por fim, considerando os parâmetros necessários para a chapa mais fina, de 6,35 mm (perfil cantoneira), definiu-se como a espessura da perna do filete 4mm.

Após definida a geometria da solda, calculou-se a resistência normativa do elemento utilizando equação apresentada pela norma NBR 8800:2008.

$$R_d = \frac{A_w(0,60)f_w}{\gamma_{w2}} = \frac{0,7 \cdot 0,4 \cdot 12,7 \cdot (0,60) \cdot 41,5}{1,35} = 65,59 \text{ kN}$$

Acima, foram utilizados os coeficientes recomendados por norma e, portanto, para realização dos testes, a equação utilizada foi sem tais coeficientes, gerando assim uma estimativa de ruptura dos corpos de prova.

3.4.2. Dimensionamento – Metal-base

O metal-base foi dimensionado de forma a resistir às forças de tração dos testes de forma a não influenciarem nos resultados, e para tal, foram escolhidos perfil e chapa gusset que apresentassem resistência ao escoamento maiores do que a resistência à ruptura da região da solda.

A chapa gusset utilizada é de 1/2" polegada de espessura, aço SAE 1020, com resistência ao escoamento calculada através da equação 2.18 pg 36, e deve ser rígida o suficiente para evitar que possíveis excentricidades influenciem nos resultados.

$$R_d = \frac{A_{MB}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{(30 \cdot 1,27) \cdot 38,4}{1,10} = 1330,06 \text{ kN}$$

Com relação ao perfil "L" utilizado, com as características apresentadas na seção 3.2.3 pg. 43, foi dimensionado, assim como a chapa gusset, para resistir mais

do que a solda, fazendo com que os testes fossem encerrados quando ocorresse a ruptura na solda.

O primeiro modo de ruptura do perfil “L” considerado foi quanto ao escoamento da área bruta, utilizando-se de toda a área do perfil e limites de escoamento. Para tal, utilizou-se de equação 2.15, retirada do item 2.7.2.3 pg. 37.

$$R_d = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{(7,68) \cdot 38,4}{1,10} = 168,10 \text{ kN}$$

onde:

A_g = área bruta do perfil, informada pelo fornecedor;

3.4.3. Dimensionamento – Barras de apoio para testes

Para o dimensionamento das barras de apoio, conforme caracterização explicada no item 3.2.4 pg. 44, considerou-se redução da seção circular das mesmas, realizadas para uma diminuição nas excentricidades das forças.

Para fins de cálculo, visto os valores reais medidos, foi utilizada uma redução de 30% da área original, ficando com 70% da área original como área bruta resistente de cálculo.

$$R_d = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,7 \cdot (4,91) \cdot 38,4}{1,10} = 119,95 \text{ kN}$$

3.4.4. Dimensionamento – Seção efetiva da ligação

Por fim, dimensionou-se a ligação soldada considerando o coeficiente de redução da área do perfil, conforme equação 2.7 pg. 33.

$$C_l = 1 - \left(\frac{G}{l} \right) = 1 - \left(\frac{1,38}{6,35} \right) = 0,712$$

A partir desse coeficiente, reduziu-se a área bruta do perfil, para enfim calcular a resistência à ruptura da seção. Para tal, utilizou-se equação 2.9 pg. 34.

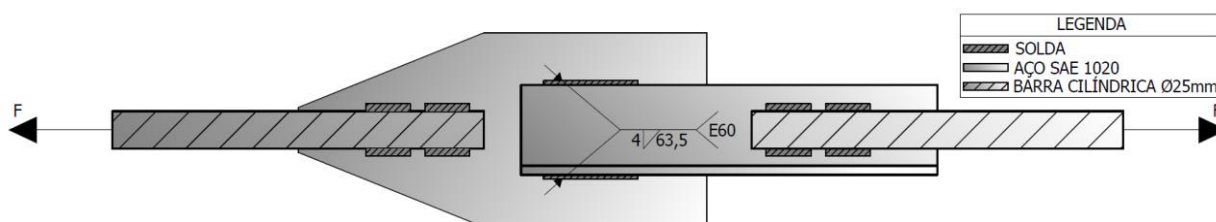
$$N_{dres} = \frac{C_l \cdot A_g \cdot f_u}{\gamma_{w2}} = \frac{(3,68) \cdot 47,2}{1,35} = 191,13 \text{ kN}$$

3.5. Confecção dos modelos

Utilizando-se dos métodos descritos em itens anteriores e recomendações normativas, o modelo testado, apresentado na Figura 30, respeita o eixo de aplicação das forças, evitando que excentricidades ocorram. Além disso, as peças foram dimensionadas para que, além de satisfazerem as características do dimensionamento, apresentassem dimensões que fossem comportadas pelos equipamentos utilizados para testá-las.

A configuração utilizada segue o modelo proposto por ROSSATO (2016), adaptado a ligações soldadas.

Figura 30 – Detalhes do modelo testado



Fonte: Autor, 2019

Na Figura 31, o modelo final já construído, respeitando-se ao máximo as dimensões especificadas, em busca de maior confiabilidade e regularidade na execução dos testes. As peças foram produzidas utilizando-se de CNC e fresa, e o processo de execução de solda escolhido foi a soldagem com proteção gasosa, ou solda MIG (*Metal Inert Gas*).

Figura 31 – Modelo confeccionado



Fonte: Autor, 2019

O modelo é constituído de quatro peças:

- Uma chapa gusset padrão, com $\frac{1}{2}$ " de espessura com geometria especificada na Figura 24, pg. 43;

- Um perfil cantoneira central, que juntamente com a chapa plana são os metais base para a solda, com especificações da Figura 25, pg. 43;
- Duas barras cilíndricas (\varnothing 25mm) soldadas às extremidades para servir de apoio para o equipamento na aplicação das forças.

Por fim, como demonstra a Figura 32, os perfis foi soldado às chapas e as barras de apoio foram soldadas nas extremidades da peça com solda mais resistente que a central, de tal forma que a solda central rompesse com menor carga no teste, possibilitando sua melhor análise. Para o presente trabalho, por limitações externas, foram produzidos três corpos de prova.

Figura 32 – Peças finais prontas



Fonte: Autor, 2019

Após confecção dos modelos e conferência de suas dimensões, cada corpo de prova foi posicionado no equipamento do teste, conforme Figura 33, e após, foram aplicadas forças de tração crescentes nos elementos.

Figura 33 – Modelo posicionado na máquina



Fonte: Autor, 2019

4. RESULTADOS

Utilizando-se dos métodos descritos anteriormente, foram obtidos os resultados teóricos e experimentais apresentados nesta seção.

4.1. Resultados teóricos

Afim de realizar comparação entre os resultados teóricos com os obtidos experimentalmente, foram considerados três métodos de cálculo para as estimativas, todos considerando as prerrogativas determinadas pela NBR 8800:2008.

- a) **Método 1** - Cálculo normativo, resistências tabeladas: Nesse caso, calculam-se as resistências de projeto utilizando-se os valores e parâmetros estabelecidos pela norma, considerando os coeficientes de majoração das cargas, minoração das resistências e coeficientes de incertezas quanto ao método construtivo proposto. Também foram considerados aqui os valores de resistência tabelados do aço, afim de evidenciar a diferença destes com os obtidos através de testes de tração.
- b) **Método 2** - Cálculo normativo, resistências ensaiadas: Da mesma forma que o primeiro, este método considera todos os coeficientes propostos por norma, mas substitui os valores tabelados de resistência do aço do metal-base pela média obtida nos testes dos CPs.
- c) **Método 3** - Estimativa de ruína: Diferentemente dos métodos anteriores, são removidos os coeficientes pertinentes, para que se estabeleça um patamar provável de ruína dos modelos, além de serem utilizados os valores de resistência à tração do aço obtidos através de ensaios experimentais.

Apresentam-se, na Tabela 9, os valores de resistência e coeficientes utilizados nos cálculos para os diferentes métodos.

Tabela 9 – Valores de resistência e coeficientes utilizados para cálculo

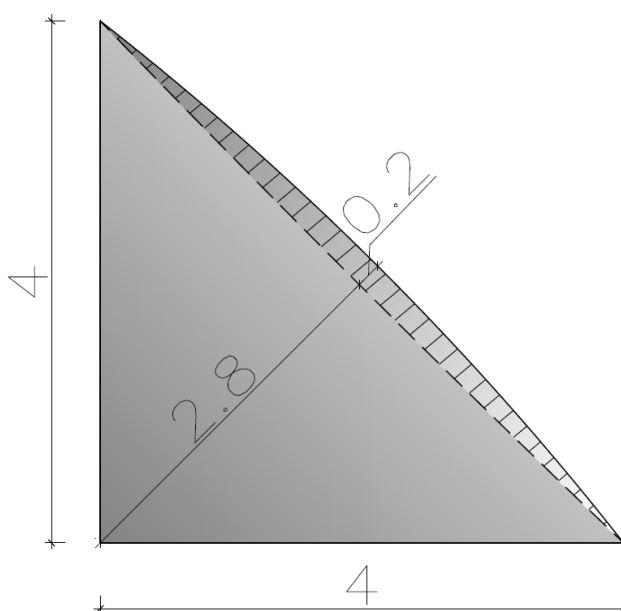
Método	Tensão do aço dos perfis		Coeficientes		
	f_y kN/cm ²	f_u kN/cm ²	γ_{a1}	γ_{w2}	Incertezas
1	38,4	47,2	1,1	1,35	0,60
2	38,01	51,64	1,1	1,35	0,60
3	38,01	51,64	1,0	1,0	1,0

Fonte: Autor, 2019

Além disso, com relação ao método 3, uma alteração foi feita em relação à equação proposta pela norma. Após conferência de geométrica dos corpos de prova, observou-se diferença quanto à garganta efetiva do filete de solda.

Conforme Figura 16, pág 30, a NBR 8800:2008 estipula um coeficiente de 0,7 para determinação da área teórica de solda e, após medição, esse valor foi alterado para 0,75, conforme apresentado na Figura 34, por se aproximar mais fielmente aos valores medidos dos CPs reais.

Figura 34 – Garganta efetiva real



Fonte: Autor, 2019

Por fim, considerando os valores supracitados, foram calculadas as resistências, do metal-base e da região da solda, para os diferentes métodos apresentados, e os resultados encontrados estão na Tabela 10.

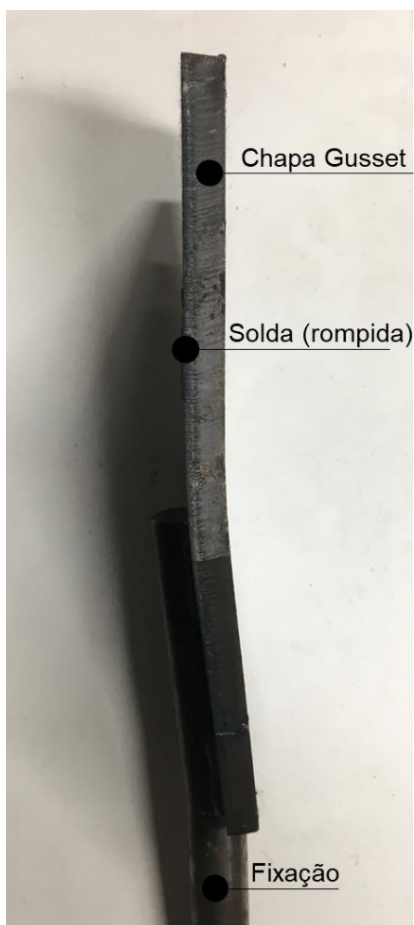
Tabela 10 – Resistência dos componentes à tração

Método	Escoamento do metal-base kN	Ruptura da seção efetiva kN	Escoamento da fixação kN	Ruptura do metal da solda kN
1	268,10	191,13	119,95	65,59
2	360,56	209,13	161,32	65,59
3	396,32	282,32	177,45	158,12

Fonte: Autor, 2019

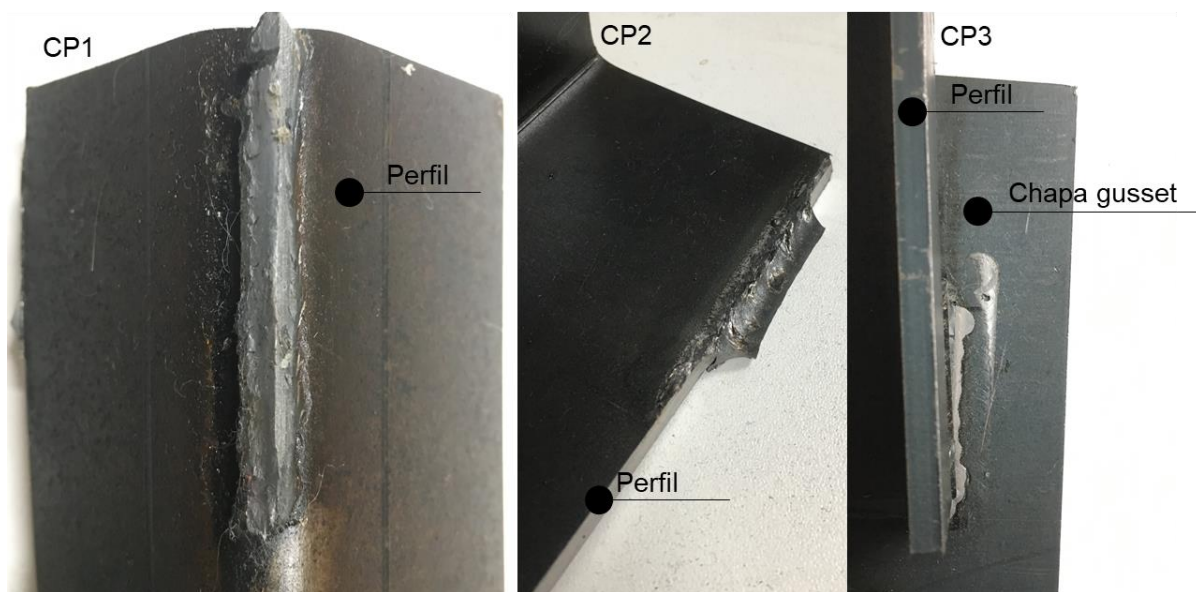
4.2. Resultados experimentais

Os resultados obtidos a partir dos testes, bem como o comportamento da estrutura ao longo dos mesmos servem como referência para as conclusões tomadas. Durante a realização dos ensaios, notou-se a excentricidade da ação das forças na estrutura, por mais que tenha se tomado cuidado para dimensioná-la de forma a diminuir o fenômeno. Na Figura 35, apresenta-se a deformação na estrutura após aplicação das forças.

Figura 35 – Deformação nos CPs

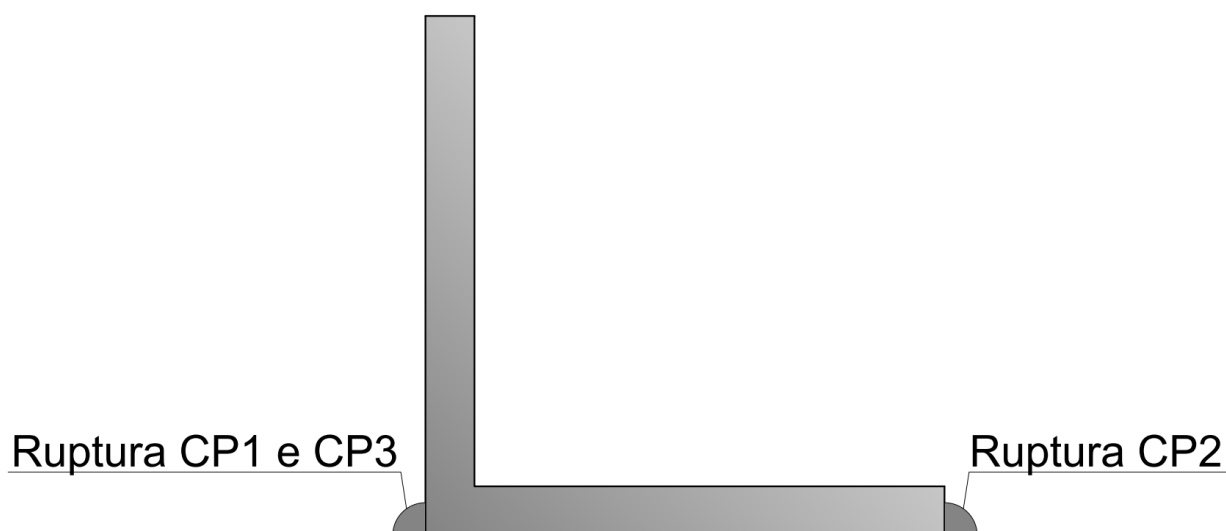
Fonte: Autor, 2019

Quanto ao modo de ruptura, todos os corpos de prova se comportaram de forma semelhante, apesar das diferenças nos valores de força máxima, sendo que todos os CPs romperam pela ruptura do metal da solda, de forma brusca. Na Figura 36, são mostrados, através de registros fotográficos, os corpos de prova rompidos na perna de solda.

Figura 36 – Ruptura das peças

Fonte: Autor, 2019

Nota-se que o CP2 foi o único dos corpos de prova que apresentou ruptura da solda no lado plano no perfil, conforme esquema da Figura 37.

Figura 37 – Local de ruptura dos CPs

Fonte: Autor, 2019

Quanto aos valores retirados dos testes, são fornecidos pelo equipamento do ensaio as forças máximas resistidas pelo modelo, que são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração do modelo

CPs	Força máxima resistida (kN)	Tipo de rompimento
CP1	209,25	Ruptura do metal da solda
CP2	170,76	Ruptura do metal da solda
CP3	191,87	Ruptura do metal da solda
Média	190,63	

Fonte: Autor, 2019

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

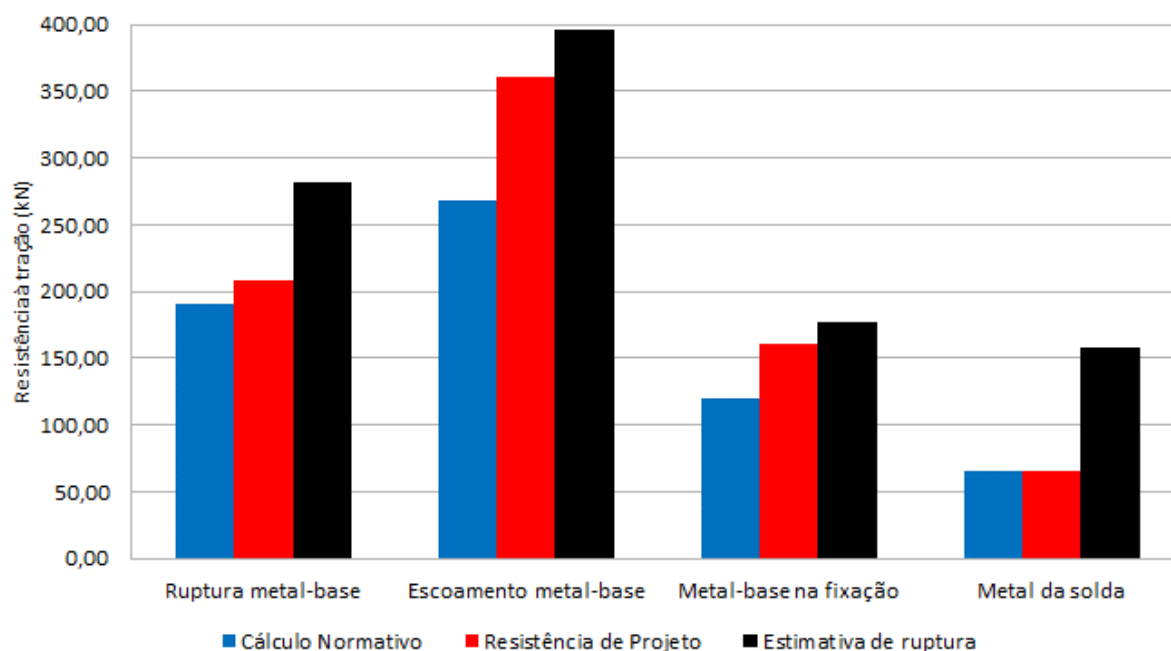
Com base nos cálculos realizados nos diferentes métodos, além dos resultados obtidos experimentalmente, foi possível a realização de comparação entre os valores esperados e os obtidos.

5.1. Análise dos resultados teóricos

Os valores apresentados em destaque (negrito) na Tabela 10 são os menores valores encontrados dentre os calculados nos diferentes métodos, portanto, são os valores máximos de resistência da peça testada, e são o principal objeto de análise. Salienta-se que o modelo apresentou menor resistência no modo de ruína por ruptura do metal da solda.

Para o modo de ruptura em questão, foram verificadas as resistências pelos 3 métodos de cálculo, e os resultados obtidos são apresentados na Figura 38, sendo que os valores encontrados para cálculo normativo, resistência de projeto e estimativa de ruptura são, respectivamente, 65,59 kN, 65,59 kN e 158,12 kN. Neste caso, os valores de resistência de projeto e cálculo normativo são iguais pois não foram obtidos dados experimentais de resistência à tração do eletrodo utilizado para solda, portanto, no cálculo utiliza-se a mesma resistência (41,5 kN/cm²) para ambos os métodos.

Figura 38 – Resultados teóricos



Fonte: Autor, 2019

Nota-se que, teoricamente, os valores esperados de ruína são consideravelmente menores do que os calculados através das prerrogativas da NBR 8800:2008, sendo justificado pela utilização dos coeficientes de minoração de resistências (1,35) e o coeficiente de incertezas quanto ao processo de solda (0,6).

5.2. Análise dos resultados experimentais

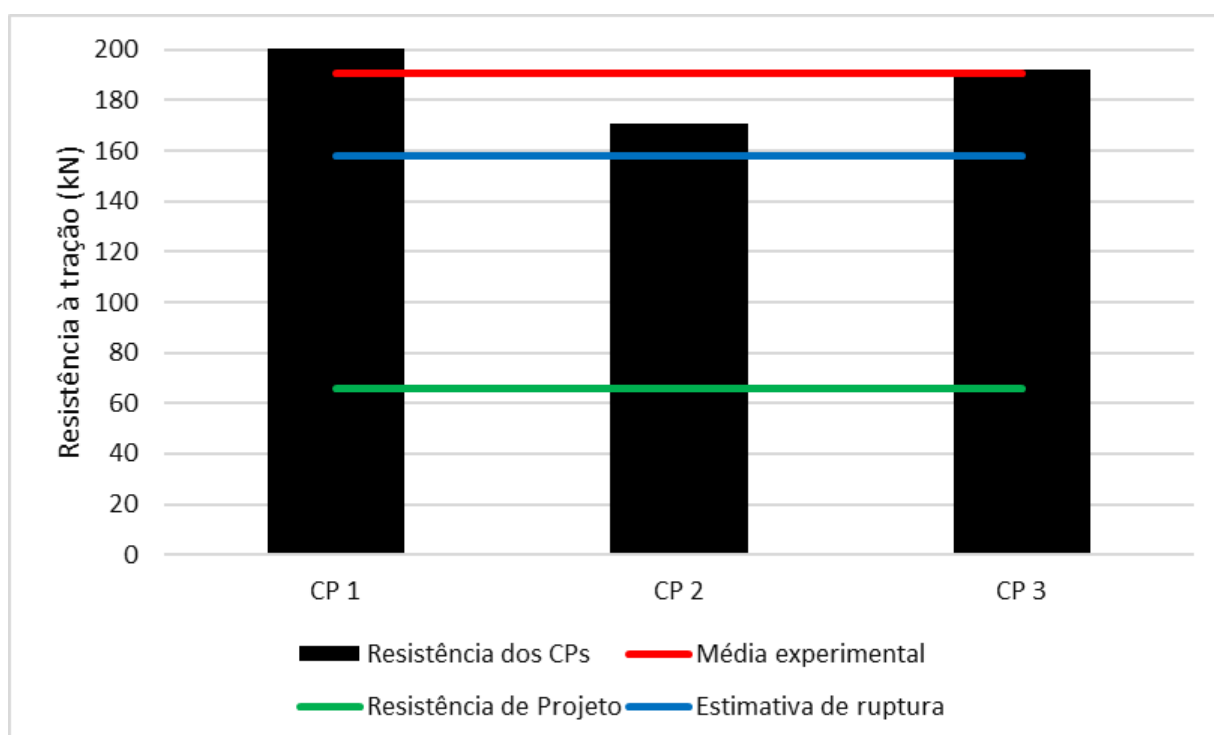
Analisando os resultados obtidos, quanto à força de ruptura, notou-se que o modo de ruptura dos 3 corpos de prova testados são os mesmos (ruptura do metal da solda). O valor da média experimental foi de 190,63 kN, gerando um desvio padrão de 19,27 kN, e coeficiente de variação de 10,11%.

O alto coeficiente de variação obtido é justificado pelo baixo número de corpos-de-prova analisado, impossibilitando o descarte dos resultados que apresentassem alto desvio. Além disso, o coeficiente pode ser atribuído a possíveis patologias e falhas internas na solda, de difícil diagnóstico à inspeção visual, sendo que testes aprofundados para identificação de patologias internas na solda estão fora do escopo do trabalho.

5.2.1. Comparativo de resultados

Com a obtenção dos dados, torna-se viável a comparação entre os valores calculados utilizando-se das prerrogativas da NBR 8800:2008 com os dados obtidos experimentalmente. A comparação entre os resultados está apresentada na figura Figura 39.

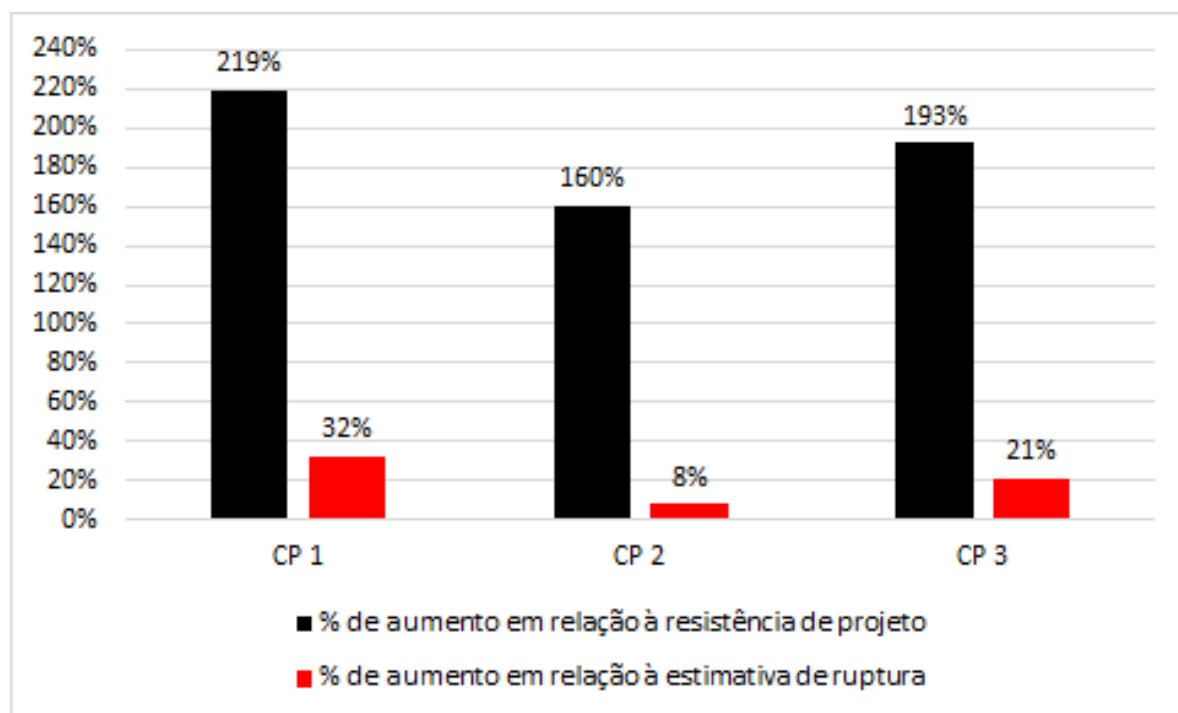
Figura 39 – Comparação dos resultados obtidos



Fonte: Autor, 2019

Nota-se, analisando o gráfico, que os valores de ruptura obtidos são significativamente maiores que os calculados, mesmo comparando com o método de cálculo de estimativa de ruína.

Para melhor visualização, a Figura 40 apresenta gráfico comparativo do aumento percentual das resistências estimadas com as experimentais.

Figura 40 – Comparativo (%) entre resultados teóricos e experimentais obtidos

Fonte: Autor, 2019

Analisando a Figura 40, fica visível que quando se utiliza os coeficientes recomendados por norma, são encontrados experimentalmente valores muito acima dos esperados, sendo de 160% a 219% a mais do que a resistência de projeto calculada pela norma para ruptura do metal da solda. Já quando analisados os valores esperados de ruína, o aumento em relação ao esperado é de 8% a 32%, o que demonstra o grande impacto dos coeficientes determinados pela NBR 8800:2008.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

O presente trabalho buscou abordar a resistência das ligações soldadas em estruturas metálicas, utilizando-se de perfis e aços comumente aplicados na construção civil. Nesta seção, a partir dos resultados obtidos, tanto com os cálculos segundo a NBR 8800:2008 como pelos ensaios experimentais, apresentam-se as conclusões acerca destes resultados obtidos e do trabalho como um todo.

Primeiramente, quanto aos testes de tração em corpos de prova padronizados para determinação da resistência real do aço, avalia-se como um método válido, visto o baixo desvio padrão encontrado e baixa diferença no modo de ruptura entre os corpos de prova.

Quanto ao modelo para testes da resistência da solda, os valores encontrados para ruptura são superiores aos encontrados quando estimados através das diretrizes normativas, de 32%, 8% e 21%. São atribuídas estas diferenças para possíveis simplificações utilizadas pela norma, variações nas dimensões das peças e no filete de solda.

Com relação ao método de cálculo de projeto, os valores experimentais são de 219%, 160% e 193% superiores aos encontrados pela norma, mesmo utilizando para cálculo os valores reais de resistência à tração do aço. Estas diferenças se devem ao fato, além dos pontos supracitados, à utilização dos coeficientes de majoração e minoração recomendados pela norma, que partem do princípio de que o processo de soldagem não é rigorosamente controlado, especialmente se feito em campo e, portanto, não oferece regularidade suficiente para redução da utilização de tais coeficientes.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos, sugere-se um aumento na quantidade corpos de prova testados para maior uniformidade de resultados, testes de perfis e aços diferentes, além de outros métodos de solda. Além disso, quanto ao modelo produzido, sugere-se aprimoramento do sistema de fixação da peça no equipamento de testes, que não seja necessária a redução da área bruta das barras cilíndricas, evitando a criação de possíveis falhas na estrutura e excentricidades na aplicação das forças de tração.

7. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, E 8M - 04. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, 2003.

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

BELLEI, Ildony Hélio. *Edifícios Industriais em Aço*. 2ª Edição. São Paulo: Editora Pini, 1998.

BELLEI, Ildony, Fernando O. Pinho, e Mauro O. Pinho. *Edifícios de Múltiplos Andares em Aço*. 2ª Edição. São Paulo: Editora Pini, 2008.

CALLISTER, Jr. William D., e David G. RETHWISCH. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8ª Edição. Tradução: Sergio Murillo Stamile SOARES. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e Ferros Fundidos*. 7ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. *Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem*. 5ª Edição. São Paulo: Editora Zigurante, 2006.

GERDAU. *Cantoneiras de abas iguais Gerdau*. 2019? <https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-cantoneira.pdf> (acesso em 03 de Junho de 2019).

GIL, Antonio Carlos. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 4ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

—. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 6ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL, CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Manual de Construção em Aço: Ligações em Estruturas Metálicas*. 4ª Edição. Vol. 2. Rio de Janeiro: Editora CBCA, 2011.

INSTITUTO AÇO BRASIL, CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO. *Manual de Construção em Aço: Ligações em Estruturas Metálicas*. 4ª Edição. Vol. 1. Rio de Janeiro: Editora CBCA, 2011.

MARQUES, Paulo Villani, Paulo José MODENESI, e Alexandre Queiroz BRACARENSE. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 2ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

PFEIL, Walter, e Michèle PFEIL. *Estruturas de aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008*. 8ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. *Estrutura Metálicas: Cálculos, Detalhes, Exercícios e Projetos*. 2ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.

ROSSATO, Otaner Vidal. *Análise teórica e experimental de ligações em estruturas de aço*. Santa Cruz do Sul: UNISC, 2016.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. *Dimensionamento de Elementos Estruturais em Aço: Segundo a NBR 8800:2008*. São Carlos: Editora EdUDSCar, 2010.

