



**Mauri Gehrke**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PERFIS  
ESTRUTURAIS SOBRE A RESISTÊNCIA A FLEXÃO DO AÇO STRENX 700MC  
PLUS SOLDADO PELO PROCESSO LASER**

Horizontina-RS

2024

**Mauri Gehrke**

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PERFIS  
ESTRUTURAIS SOBRE A RESISTÊNCIA A FLEXÃO DO AÇO STRENX 700MC  
PLUS SOLDADO PELO PROCESSO LASER**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Horizontina-RS

2024

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso  
“Influência da Geometria da Seção Transversal de Perfis Estruturais sobre a  
Resistência a Flexão do Aço Strenx 700MC Plus Soldado pelo Processo Laser”**

**Elaborada por:**

**Mauri Gehrke**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: entre 26/06/2024

Pela Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Prof. Dr. Luis Carlos Wachholz

FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Prof. Dr. Tiago Sinigaglia

FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS**

**2024**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de realizar este trabalho com saúde e forças para chegar até o final.

À minha esposa Marcia e meus filhos Milena e Murilo que sempre estiveram do meu lado, me dando todo apoio e cuidado, me motivando em todos os momentos difíceis, e me fazendo acreditar que seria possível, pela compreensão e paciência demonstrada durante o período.

A Metalúrgica Marques por disponibilizar o material e a Jardinox por realizar o processo de soldagem laser.

Aos professores que se disponibilizaram a auxiliar neste trabalho e ao longo de toda a graduação e em especial ao Prof. Dr. Rafael Dalcin que foi o orientador deste trabalho.

## RESUMO

Os perfis tubulares são componentes estruturais usados em um grande portfólio de produtos, como chassis de caminhão, máquinas agrícolas, guindastes, pontes, entre outros. A resistência à flexão é destacada como uma propriedade essencial para determinar a capacidade de um componente estrutural e suportar cargas aplicadas. O trabalho tem por objetivo avaliar a resistência a flexão de geometrias de seções transversais, como quadrado, retangular, triangular, “U” e “C”. Os perfis estruturais foram soldados pelo processo laser. Posteriormente os conjuntos soldados foram fixados em um pórtico e submetido a ensaios de flexão. Nos resultados do ensaio de flexão foi possível verificar que o perfil “U” apresentou 2% de resistência a mais que o perfil retangular, 19% a mais que o quadrado, 26% a mais que o “C” e 37% a mais que o perfil triangular.

**Palavras-chaves:** Soldagem laser autógena. Perfis estruturais. Aço Strenx 700. Carregamento estático. Resistência à flexão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva típica do aço DOMEX 700MC (tensão versus alongamento) .....	13
Figura 2 – Diagrama de Graville.....	14
Figura 3 – Perfil de dureza típica de uma junta soldada de aço Domex .....	15
Figura 4 – Desenho esquemático dos modos de soldagem a laser. a) condução - semicircular e b) “keyhole”. .....	17
Figura 5 – Desenho esquemático do princípio da soldagem a laser “keyhole” .....	17
Figura 6 – Característica do modo de feixe.....	19
Figura 7 – Variação do perfil da solda em função da velocidade. a) normal; b) com depressão; c) sobreposto sem penetração - seção longitudinal e d) concavidade excessiva.....	20
Figura 8 – Zona afetada termicamente em uma chapa de aço baixo carbono.....	22
Figura 9 – Barras de diferentes seções transversais sujeitas ao ensaio de flexão pelo método engastado.....	24
Figura 10 – Representação do circuito de ponte de <i>Wheatstone</i> .....	25
Figura 11 – Ponte completa de <i>Wheatstone</i> .....	27
Figura 12 – Fluxo de trabalho.....	28
Figura 13 – Sentido do esforço de flexão .....	29
Figura 14 – Microestrutura do metal base .....	30
Figura 15 – Posição e parâmetros de soldagem: (a) Soldagem das amostras; (b) Fonte de soldagem.....	31
Figura 16 – Juntas soldadas na posição plana em todo o contorno.....	31
Figura 17 – Configuração do eDAQ .....	33
Figura 18 – Vista geral do sistema montado para o ensaio de flexão simples .....	34
Figura 19 – Vista geral do eDAQ: (a) Sistema de aquisição de dados;(b) selo de calibração .....	34
Figura 20 – Selo de validade da célula de carga.....	35
Figura 21 – Conjunto montado no pórtico de fixação, sendo submetido à flexão simples .....	36
Figura 22 – Macrografia e gráfico de dureza: (a) Junta soldada por laser; (b) Análise de dureza .....	38
Figura 23 – Força e deformação do perfil “C”, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2 .....	39

Figura 24 – Força e deformação do perfil “U”, obtido durante o ensaio de flexão: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2 .....	40
Figura 25 – Força e deformação do perfil quadrado, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2 .....	40
Figura 26 – Força e deformação do perfil retangular, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2 .....	41
Figura 27 – Força e deformação do perfil triangular, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2 .....	41
Figura 28 – Juntas transversal soldadas nos perfis: Triangular, "C", Retangular, "U" e Quadrado .....	42
Figura 29 – Juntas longitudinal soldadas nos perfis: Triangular, "C", Retangular, "U" e Quadrado .....	43
Figura 30 – Deformação plástica.....	43
Figura 31 – Força máxima suportada pelos perfis nos ensaios de flexão .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química medida do metal base.....	29
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 TEMA .....	9
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	10
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	10
1.4 OBJETIVOS .....	10
<b>1.4.1 Objetivo geral</b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>10</b>
1.5 JUSTIFICATIVA .....	11
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
2.1 AÇOS STREX 700MC PLUS.....	12
<b>2.1.1 Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga</b> .....	<b>13</b>
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM LASER .....	15
<b>2.2.1 Solda laser autógena</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.2 Parâmetros da fonte laser</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.3 Gás de proteção</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.4 Efeitos da velocidade de soldagem a laser</b> .....	<b>20</b>
2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM.....	20
<b>2.3.1 Zona termicamente afetada (ZTA)</b> .....	<b>21</b>
2.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM ESTRUTURAS SOLDADAS .....	22
2.5 PONTES DE <i>WHEATSTONE</i> .....	25
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>28</b>
3.1 METAL BASE.....	28
3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM .....	30
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS.....	32
3.4 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	32
3.5 PROCEDIMENTOS USADOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO.....	33
3.6 ANÁLISES FEITAS APÓS OS ENSAIOS DE FLEXÃO .....	37
<b>4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	38
<b>4.1.1 Análise das macrofotografias e dureza das juntas soldadas</b> .....	<b>38</b>
4.2 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS JUNTAS “T” SOLDADAS NOS PERFIS TUBULARES.....	39
<b>4.2.1 Força e deformação obtidas durante os ensaios de flexão</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2.2 Região de ruptura dos corpos de prova</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2.3 Discussão geral dos resultados</b> .....	<b>44</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente as indústrias em geral estão em constante evolução e buscam cada vez mais materiais de qualidade metalúrgica para a redução de peso, ganho de desempenho e segurança de seus produtos. Devido a esta necessidade e o avanço da tecnologia na ciência dos materiais, tem surgido constantes melhorias nos aços para atender as demandas por materiais mais leves, sustentáveis, duráveis e resistentes. Dentre estas melhorias foi desenvolvido os aços STRENX 700MC PLUS que oferecem todas estas características, e estes são fabricadas pela empresa Sueca SSAB líder mundial na produção de aços resistentes (SSAB Tunnpilat, 2004), sendo que um dos processos é a laminação a quente e o resfriamento controlado que garantem a qualidade do aço (SSAB Tunnpilat, 2004).

Os perfis tubulares possuem diferentes geometria da seção transversal, tais como: quadradas, "C", circulares, triangulares, retangulares e "U", que tornam possível a elaboração de vários projetos com soluções arrojadas e econômicas. Cada projeto oferece uma combinação única de resistência, eficiência e estética em todos os tipos de estruturas sob diferentes tipos de carregamentos, atingindo uma ampla gama de aplicação tais como vigas, colunas, pilares, conexões e até mesmo componentes automotivos. Grande parte dos componentes estruturais de engenharia está atribuído a carregamentos (curvatura ou deformação) também denominada flexão que quando aplicada em uma viga ou coluna tende a se curvar (Shigley; Mischke; Budynas, 2005). A resistência a flexão do aço é uma propriedade essencial que determina a capacidade de um conjunto estrutural suportar cargas aplicadas que resultam em uma deformação ou até mesmo o cisalhamento (Machado, 2013). Esta resistência é influenciada por várias propriedades do material, incluindo sua resistência ao limite de escoamento (Machado, 2011). Este trabalho teve por objetivo avaliar a resistência a flexão de perfis estruturais com diferentes geometrias da seção transversal, soldadas pelo processo a laser.

### 1.1 TEMA

O tema deste estudo se refere a aplicação de ensaio de flexão pelo método engastado em tubos de diferentes geometrias de seções transversais soldados pelo processo a laser.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este estudo delimitou-se em apenas juntas em “T”, geometrias tubulares quadradas, triangulares, “C”, “U” e retangulares, aços STREX 700MC PLUS e um único parâmetro de soldagem pelo processo a laser autógena.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A resistência a flexão em componentes soldados é uma propriedade crítica em um projeto de conjuntos de aços, como vigas ou colunas. As juntas soldadas nos modelos de projetos são consideradas componentes estruturais, tais como colunas e vigas, com propriedades de rigidez, resistência e capacidade de deformação (Machado, 2011). Em geral a máxima tensão de cisalhamento, para os casos de flexão, ocorre na posição da linha neutra da seção transversal do corpo de prova (Garcia; Spim; Santos, 2012). Os perfis de geometrias incluindo a seção transversal, altura, largura e forma, podem ter um impacto significativo na capacidade de suportar cargas de flexão. No entanto há uma lacuna no entendimento de como diferentes aspectos da geometria dos perfis soldados podem influenciar na resistência a flexão.

Em vista disto a seguinte questão se faz necessária para o desenvolvimento do trabalho: Como a forma da seção transversal de perfil soldado, por exemplo quadrada, “C”, triangular, retangular e “U” afetam na resistência a flexão?

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência a flexão de perfis estruturais com diferentes geometrias da seção transversal, soldadas pelo processo a laser.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- a) Medir e comparara os valores de resistência a flexão pelo menos em cinco diferentes tipos de perfis estruturais soldado pelo processo a laser;
- b) Realizar testes experimentais em uma bancada para determinar os perfis estruturais mais resistentes ao carregamento de peso, considerando critérios de resistência à flexão;

- c) Contribuir para o desenvolvimento de técnicas avançadas de soldagem e para a otimização do uso de perfis estruturais em projetos industriais e de engenharia civil;
- d) Concluir a avaliação da resistência a flexão dos perfis estruturais soldados até o final do semestre acadêmico atual e com os resultados publicados;

### 1.5 JUSTIFICATIVA

Os perfis tubulares de seção transversal são amplamente utilizados em diversas aplicações, tais como engenharia civil, automotiva, aeroespacial e naval, ao qual a forma da seção transversal de um perfil soldado pode variar dependendo da aplicação, apresentando características únicas que influenciam a maneira como a peça vai resistir a flexão.

O aço STRENX 700MC PLUS é conhecido por suas propriedades mecânicas avançadas, como alta resistência e tenacidade (SSAB Tunnpilat, 2004), alinhado com a geometria da seção transversal desses perfis, isso pode fornecer informações cruciais para a otimização do uso desses materiais e tecnologias em aplicações relacionadas. A otimização dessas estruturas para o máximo desempenho é importante para garantir a segurança, durabilidade e a eficácia dessas aplicações.

A justificativa do estudo é aprimorar o entendimento do comportamento estrutural dos perfis com diferentes formas da seção transversal, desenvolvidos em aços STRENX 700MC PLUS e soldado pelo processo a laser que terão capacidades diferentes de suportar cargas de flexão devido á variações na distribuição da tensão. Também contribuirá para a inovação em design, validação de processo e um avanço geral no campo da engenharia estrutural aumentando a eficiência, segurança das estruturas e o avanço das tecnologias da soldagem a laser.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

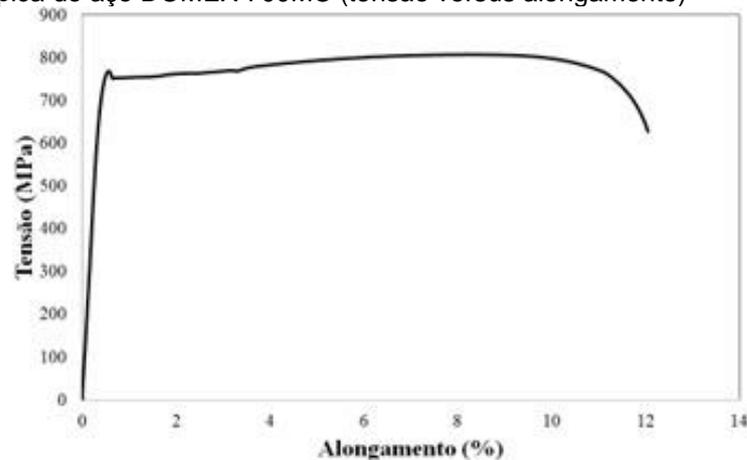
A partir deste capítulo, os referenciais teóricos serão de extrema importância para o estudo e desenvolvimento de análise de flexão nas diferentes geometrias de seções transversais. Para isso, buscou-se bibliografias, com títulos de aços STRENX 700MC PLUS, soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga (TMCP), processo de soldagem a laser e consumíveis, parâmetros de soldagem, metalurgia da soldagem, transferência de calor, zona termicamente afetada, ensaios de flexão, perfis tubulares e ponte de *Wheatstone*.

### 2.1 AÇOS STRENX 700MC PLUS

Este aço é de alta resistência e baixa liga, que por meio de pequenas adições de elementos de liga, se obtém limite de escoamento acima de 101,5ksi (700 MPa) na condição laminado, tendo como característica uma boa resistência mecânica e tenacidade. Estes materiais possuem baixo teor de carbono, garantindo assim boa soldabilidade, quando comparados aos aços carbono convencionais, para a mesma resistência mecânica (Soeiro Junior; Rocha; Brandi, 2013).

O aço STRENX 700MC PLUS, conhecido como aço DOMEX 700 MPa produzidos pelo processo TMCP (*Thermo-Mechanically Controlled process*) fabricado pela SSAB que utiliza esse processo em sua linha de produção para garantir as propriedades mecânicas superiores, com alta resistência, tenacidade, juntamente com boa conformabilidade. Este processo é uma etapa de fabricação que envolve um controle preciso da temperatura e da deformação mecânica durante a laminação do aço. É um aço estrutural que possui um limite de escoamento mínimo de 700 MPa, para proporcionar estruturas mais resistentes e leves que atende ou supera os requisitos do grau S700MC na norma EN 10149-2 (1995). Dentre as aplicações típicas, temos uma ampla variedade de peças e componentes de estruturas críticas de sustentação de carga com bom desempenho de soldagem, conformação a frio e no corte (SSAB, 2021). A Figura 1 mostra a curva típica do aço DOMEX 700MC (tensão versus alongamento) com a tensão de escoamento definido de 700Mpa com limite de escoamento de 750 a 950 Mpa e alongamento de 12%.

Figura 1 – Curva típica do aço DOMEX 700MC (tensão versus alongamento)



Fonte: Dalcin, 2016.

### 2.1.1 Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga

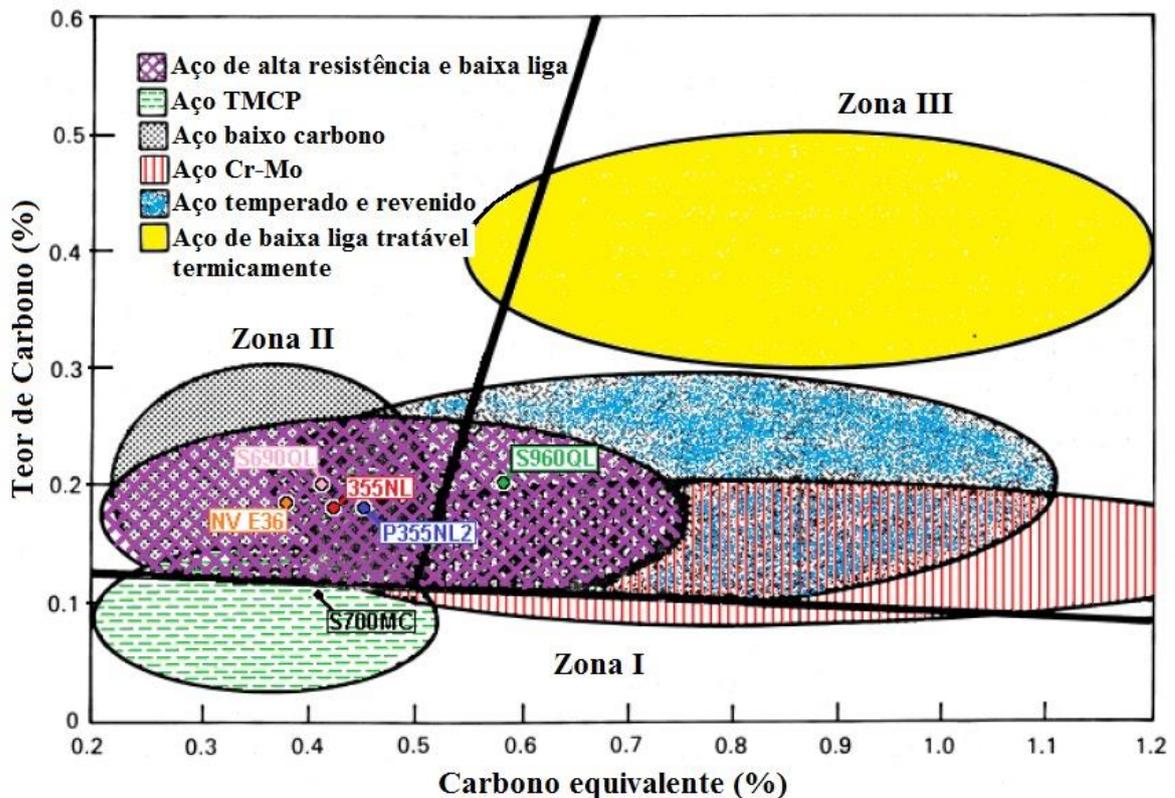
Segundo a *American Welding Society* (AWS, 2002) a soldabilidade é a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço (Modenesi, 2011). A boa soldabilidade de um aço é associada a pouca transformação da estrutura cristalina na execução da solda. Em geral, como regra básica pode-se dizer que o aumento do teor de carbono reduz a soldabilidade. Altos teores de enxofre também são prejudiciais à soldagem (CIMM, 2021).

A soldabilidade de um aço geralmente está ligada à sua propensão à formação de trincas e a tenacidade na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Diversas normas estabelecem limites para o carbono equivalente visando reduzir a ocorrência de ZTA excessivamente duras e a fissuração a frio. O carbono equivalente é uma medida que permite relacionar a composição química de um aço com sua tendência a apresentar estruturas frágeis. O teor de carbono equivalente é especificado pela *International Institute of Welding* (IIW), e a fórmula utilizada para o seu cálculo está expressa na Equação 1, conforme descrito em referências como (SSAB Tunplatt, 2004; American Society For Metal, 2005). Onde: “ $CE_{IIW}$ ” é a % do carbono equivalente, “C” % de carbono, “Mn” % de manganês, “Cr” % de cromo, “Mo” % de molibdênio, “V” % de vanádio, “Cu” % de cobre e “Ni” % de níquel.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (1)$$

Outro método gráfico para verificar a estimativa de soldabilidade dos aços é através do diagrama de Graville apresentado na Figura 2, que faz a comparação do teor de carbono com a porcentagem de carbono equivalente (Davis, 2006). De acordo com o diagrama de Graville, os aços TMCP (S700MC) estão na zona I, indicando um baixo teor de carbono e baixa temperabilidade, portanto esses aços não são propensos a trincas a frio, tornando desnecessária o pré-aquecimento antes da soldagem, conforme discutido por Tamura *et al.* (1988), SSAB Tunplatt (2004) e Davis (2006).

Figura 2 – Diagrama de Graville



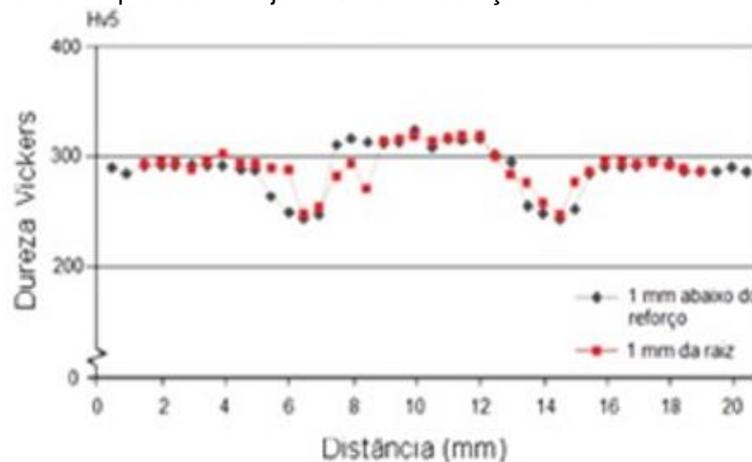
Fonte: Davis, 2006

Para melhorar a tenacidade da (ZTA) dos aços produzidos pelo processo TMCP, evitando a formação de microestruturas mistas que incluem grãos grosseiros de ferrita pró-eutetóide e bainita superior dentro dos grãos, são adicionados elementos de liga como nióbio, titânio, vanádio e boro. Esses elementos têm o objetivo de suprimir o crescimento de grãos austeníticos durante o ciclo térmico da soldagem, formando precipitados dispersos na matriz bainítica, aumentando a quantidade de sítios de nucleação da ferrita. Além disso, os baixos teores de carbono e nitrogênio nos aços TMCP contribuem para aumentar a tenacidade da ZTA, fortalecendo a matriz

e prevenindo a formação de martensita (Gladman, 1997; American Society For Metal, 2005; Bhadeshia; Honeycombe, 2006; Tamura *et al.*, 1988).

Durante a soldagem dos aços DOMEX 700 MCTM são formadas na ZTA devido às alterações da microestrutura (decorrentes das temperaturas e tempos que a junta soldada fica exposta), além disso, a dureza e a microestrutura podem ser afetadas pela composição química do MB e do MS (SSAB TUNNPLAT, 2004). A Figura 3 exibe a curva típica de dureza da junta soldada do aço DOMEX 700 MCTM.

Figura 3 – Perfil de dureza típica de uma junta soldada de aço Domex



Fonte: SSAB, 2004

O metal de base sofre variações de dureza durante o processo de fabricação do aço, dado pelo processo termomecânico controlado durante a criação da segunda fase, essa chamada de martensita (Demeri, 2013). A fabricante SSAB, por meio do datasheet, apresenta uma dureza mínima de 250 HV, a qual pode crescer devido ao resfriamento durante o processo de fabricação.

## 2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM LASER

O desenvolvimento do *laser* iniciou no ano de 1917 a partir dos trabalhos de Albert Einstein sobre fenômenos físicos de emissão espontânea e estimulada (Einstein, 1917). Em 1954, Gordon, Zeiger e Townes (1955) e Shimoda, Wang e Townes (1956) confirmaram com experiências o fenômeno teorizado por Einstein por meio da geração e aplicação de ondas eletromagnéticas via emissão estimulada. Isto permitiu que Maimann (1960) desenvolvesse o primeiro *laser*, utilizando um cilindro de rubi sintético excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal. Pouco tempo depois pesquisadores do *AT&T Bell Labs*

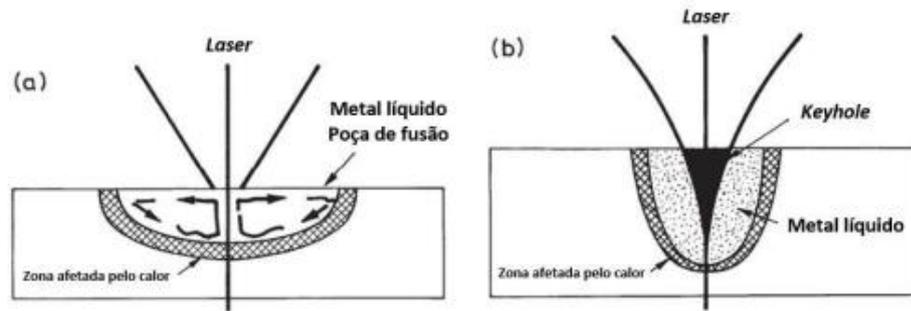
construíram um *laser* gasoso de He-Ne, o primeiro a gerar um feixe contínuo de luz. Somente após alguns anos surgiu um *laser* de CO<sub>2</sub> (Ion, 2005).

O laser pode ser usado como uma fonte de calor em soldagem e é composto de um feixe de luz coerente de alta energia com um comprimento de onda constante. A palavra *laser* é o sinônimo do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation* ou “amplificação da luz via emissão estimulada de radiação” e o meio em que ele é gerado pode ser líquido, gasoso ou sólido (Majumdar; Manna, 2003). Os gases hélio/neônio (He-Ne) e o CO<sub>2</sub> são frequentemente utilizados como base dos sistemas gasosos, enquanto o rubi e neodímio dopado com *garnets* de ítrio e alumínio (Nd:YAG) são usados em *laser* de estado sólido. Os dois *lasers* mais usados nas aplicações de soldagem são os de gás CO<sub>2</sub> e do sólido Nd:YAG. Os estudos incluem a disponibilidade de lasers de diodo de alta potência e lasers de fibra (Norrish, 2006).

Quando um feixe de laser incide na superfície de um material, a energia absorvida provoca aquecimento, fusão e dependendo da densidade de potência absorvida a evaporação do material. Em geral, durante o processo de soldagem a laser, o feixe de laser cria uma poça de fusão na superfície do material, que se desenvolve em direção ao seu interior. Esse processo pode ser conduzido de duas maneiras distintas. O primeiro modo é conhecido como soldagem por condução, Figura 4(a), no qual as condições de processamento são ajustadas de forma que a poça de fusão permaneça estável. Nesse modo, a transferência de energia para o interior do material ocorre principalmente por condução térmica (Ion, 2005). O segundo modo, mais significativo, é a soldagem por penetração ou “*keyhole*” Figura 4(b), no qual as condições de processamento com o laser resultam na formação de um “*keyhole*” na poça de fusão. Transição está relacionada ao aumento da potência ou ao tempo de irradiação (Svenungsson; Choquet; Kaplan, 2015).

No modo de soldagem a laser “*keyhole*” o feixe é para gerar uma densidade de potência suficientemente alta na superfície da peça, iniciando assim a vaporização do material. Esse processo cria uma cavidade estreita e penetrante de vapor, chamada “*keyhole*”, mantida por múltiplas reflexões internas do feixe, a Figura 5 (Sokolov *et al.*, 2012). O “*keyhole*” é cercado por material fundido, resultando na formação de um cordão de solda estreito com uma alta razão de aspecto (profundidade/largura). O equilíbrio entre as forças exercidas pela pressão de vapor e pelo material fundido circundante mantém o “*keyhole*” durante a soldagem (Sokolov *et al.*, 2012). Em soldas totalmente penetrantes a (ZTA) é estreita e paralela ao cordão de solda.

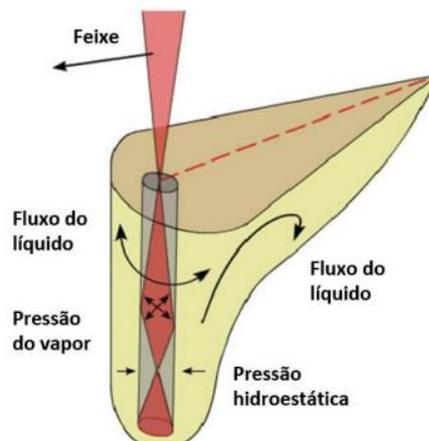
Figura 4 – Desenho esquemático dos modos de soldagem a laser. a) condução - semicircular e b) “keyhole”.



**Fonte:** Adaptado de Majumdar; Manna, 2011

Os lasers podem ser utilizados tanto para a soldagem por fusão, de um modo semelhante ao processo TIG, ou no modo direto sem a adição de material (Cho; Cho; Na., 2014; Kong *et al.*, 2009). Na soldagem a laser, o feixe de energia incidente na peça é dissipado principalmente por reflexão e absorção. A perda de energia por reflexão pode ser significativa, dependendo da refletividade da superfície do material, podendo ultrapassar 90% da energia incidente, no entanto, a refletividade diminui à medida que a temperatura da superfície aumenta, o que melhora a eficiência do processo. A energia absorvida é conduzida através da superfície do metal, e se for suficiente para formar uma poça de fusão, a convecção em seu interior também pode contribuir para a transferência de energia. Com a vaporização dentro da poça de fusão, as perdas por reflexão podem ser reduzidas significativamente, devido ao aumento da eficiência na absorção de energia proporcionada pelo “keyhole”. Enquanto a soldagem por condução é limitada e produz cordões de solda com uma relação aproximada de profundidade para largura de unidade, no modo “keyhole” pode ser alcançadas razões de até 10:1 (Norrish, 2006).

Figura 5 – Desenho esquemático do princípio da soldagem a laser “keyhole”



**Fonte:** Adaptado de Sokolov *et al.*, 2012

### **2.2.1 Solda laser autógena**

A solda autógena a laser é um processo de soldagem que utiliza um feixe de laser para fundir as peças a serem unidas, sem a necessidade de adição de materiais de solda externo, no caso arame. Para a realização desta solda é necessário seguir alguns cuidados, como preparar as peças de forma que as mesmas tenham um pequeno espaço entre elas permitindo assim uma boa penetração do feixe de laser, um controle dos parâmetros como a potência, a velocidade de movimento e a posição do feixe. O laser é focalizado para produzir um ponto de alta energia na superfície do material, aquecendo rapidamente o material, fundindo-o. A fusão ocorre sem a necessidade de adição de material de solda externo. A solda autógena a laser é frequentemente utilizada em aplicações que requerem precisão, alta produtividade e mínima distorção, como na indústria aeroespacial, automotiva e eletrônica. Ela oferece vantagens como uma zona afetada pelo calor pequena, alta velocidade de soldagem e a capacidade de soldar materiais de diferentes espessuras e composições (Goldak; Mazumder, 2002).

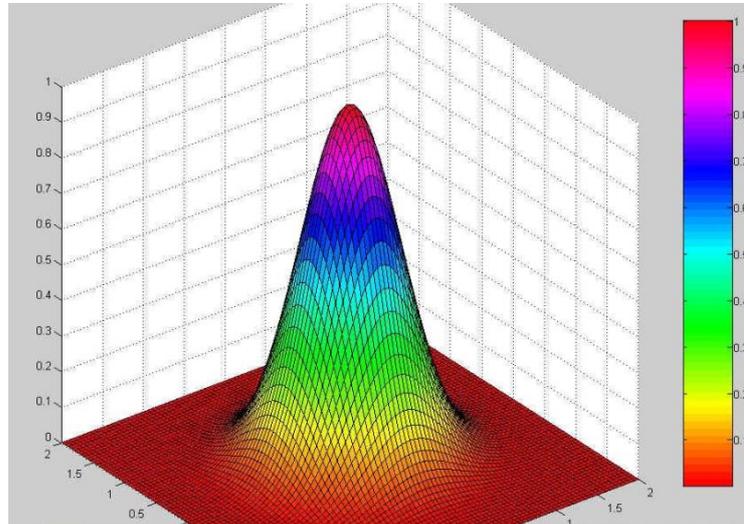
### **2.2.2 Parâmetros da fonte laser**

A potência do feixe é o fator mais importante a ser considerado, uma vez que este está diretamente ligado à espessura máxima a ser soldada. Além deste também é importante conhecer o comprimento de onda da radiação emitida sendo que um mesmo comprimento de onda apresentará facilidade em soldar alguns materiais e dificuldade em outros. Já o sistema ótico é o que determinará a diferença entre a potência gerada e a que efetivamente vai atingir a peça, uma vez que o feixe perde potência em cada espelho refletor (Liang; Almeida, 2013).

O modo do feixe é a forma como a potência é distribuída ao longo do feixe, e para melhor determinar o diâmetro incidente, é necessário conhecer as características e estrutura do modo, sendo que na cavidade ressonante existe o modo axial e transversal. As ondas axiais circulam exatamente ao longo do eixo dos espelhos, nos transversais as ondas giram circularmente a este eixo, refletindo indiretamente entre os espelhos. No modo axial todos estão no centro, já no transversal tem várias variáveis, para determinar este modo convencionou-se como TEM<sub>mn</sub> (modo transversal eletromagnético), e a identificação dos dois dígitos “m” e “n” de como essa

energia se distribui. Na Figura 6 temos o TEM00, com uma distribuição gaussiana, com a qualidade do raio bem definida (Liang; Almeida, 2013).

Figura 6 – Característica do modo de feixe



Fonte: Liang; Almeida, 2013

### 2.2.3 Gás de proteção

O gás de proteção na soldagem a laser é chamado de gás de assistência e é essencial para remover o plasma, gerado durante a fusão do material. Sem essa remoção, o plasma pode desviar o raio laser, interferindo no processo. O tipo de gás e sua composição afetam a interação feixe-matéria e a penetração (Oliveira Júnior, 2013). O nitrogênio é frequentemente utilizado como gás de proteção na soldagem a laser para evitar a oxidação do metal durante o processo. Ao criar um ambiente inerte ao redor da zona de soldagem, o nitrogênio impede a reação do metal com o oxigênio atmosférico, evitando assim a formação de óxidos indesejados na superfície da solda. O ambiente inerte criado pelo nitrogênio contribui para a estabilidade do processo de fusão do metal, minimizando assim a ocorrência de respingos. (Oliveira Júnior, 2013).

Em alguns casos, o nitrogênio pode melhorar a penetração da solda, isso ocorre porque o nitrogênio é mais eficaz na absorção de energia do laser do que o ar atmosférico, o que resulta em uma maior absorção de calor na zona de fusão e, conseqüentemente, em uma penetração mais profunda. O nitrogênio também desempenha um papel no controle do resfriamento da poça de fusão durante a soldagem pois o resfriamento rápido proporcionado pelo nitrogênio pode ajudar a minimizar a zona afetada pelo calor e reduzir a deformação e as tensões residuais na peça soldada (Sales; Westin; Colegrove, 2016).

### 2.2.4 Efeitos da velocidade de soldagem a laser

Quando a velocidade de soldagem for aumentada, o padrão e o tamanho da poça de fusão são alterados (Krasnoperov; Pieters; Richardson, 2004). Na soldagem com baixa velocidade, há um acréscimo do volume da poça de fusão que também fica mais larga, transformando-se num perfil demasiadamente côncavo em decorrência da contração da solda Figura 7(d). Nesta situação, a pressão metalostática é maior que a tensão superficial responsável por manter a poça de fusão no lugar, provocando o desabamento da solda caracterizado por uma depressão ou orifício. A soldagem com alta velocidade causa forte fluxo de metal em direção ao centro da poça de fusão na vizinhança do *keyhole* não tendo tempo para a redistribuição, solidificando como um pico central com depressões ao lado Figura 7(b), contudo, se a potência for suficientemente elevada e a poça de fusão for suficientemente larga, uma depressão semelhante pode surgir dependendo das pressões envolvidas, que são função da tensão superficial e da curvatura. A incerteza das pressões ao longo da poça de fusão causa um efeito de contração nas regiões de elevado grau de curvatura que flui para as regiões de menor curvatura, causando uma sobreposição vista na Figura 7(c). Já a Figura 7(a) mostra uma solda sem defeitos (Steen; Mazumder, 2010).

Figura 7 – Variação do perfil da solda em função da velocidade. a) normal; b) com depressão; c) sobreposto sem penetração - seção longitudinal e d) concavidade excessiva



Fonte: Steen; Mazumder, 2010

### 2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM

O calor é a essencial forma de energia responsável pela soldagem (Messler Jr, 2004). As transformações de fase são em síntese, a microestrutura e as propriedades mecânicas da junta soldada são diretamente afetadas pelo fluxo de calor. O calor também é responsável pelas tensões residuais e distorções inerentes da soldagem (Kou, 2003). Tais efeitos são resultados dos ciclos térmicos e das temperaturas a que a zona de solda é submetida, mostrando a relevância do estudo dos fenômenos térmicos que ocorrem durante a soldagem. O parecer destes fenômenos ajuda a

promover um melhor controle das variáveis que afetam o processo de soldagem (Wainer; Brandi; Mello, 1992).

### **2.3.1 Zona termicamente afetada (ZTA)**

Segundo Villani, Modanesi e Bracarense (2011) a maioria dos processos de soldagem resulta em um aquecimento localizado e/ou deformação plástica. Como resultado disso, ocorre a formação de estruturas ou mudanças estruturais que não são desejadas em juntas soldadas. A maioria destas transformações depende da solidificação e do resfriamento após o processo de soldagem, e por isso o entendimento destes fenômenos metalúrgicos é muito importante para a realização de processos de soldagem. Na soldagem a laser autógena, a (ZTA) geralmente é pequena devido à natureza concentrada pelo feixe de laser se comparado com outros processos de soldagens. No entanto, ainda pode haver alguma influência térmica na área circundante a solda, importante a serem consideradas devido às implicações nas propriedades da junta (Shravan *et al.*, 2023).

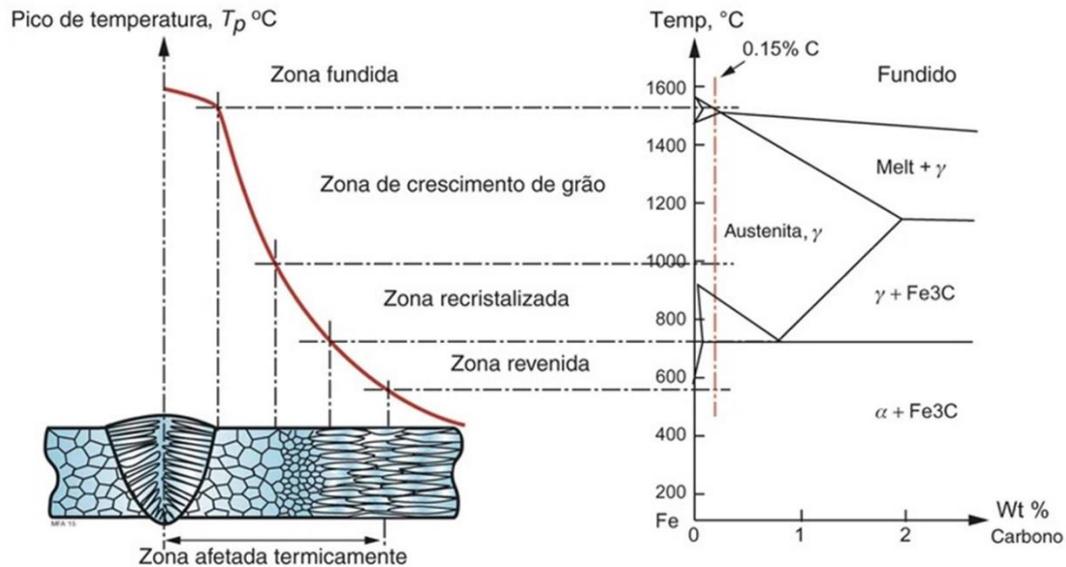
A área afetada pelo calor é apresentada em relação ao diagrama de fase ferro-carbono. No núcleo, encontra-se a região de fusão, onde uma estrutura colunar se forma durante o processo de solidificação da massa fundida. Nos lados adjacentes, a uma região de recristalização com um intervalo de crescimento intensa de grãos. Após essas áreas, as temperaturas são demasiadamente baixas para permitir a recristalização, porém ainda suficientemente elevadas para originar uma zona revenida amolecida conforme Figura 8. Compreender essa configuração e seu impacto nas propriedades locais é crucial para a correta gestão do processo de soldagem (Ashby, M. 2019).

Conforme Machado (2000), a velocidade de resfriamento depende apenas da temperatura inicial da peça a ser soldada, quanto maior a temperatura, mais larga será a curva de repartição térmica. Já a repartição térmica depende de alguns fatores, sendo eles:

- Tipo de material base – especificamente a capacidade de condução térmica;
- Geometria da junta – geometria de perfil em T possuem mais direções para condução de calor do que juntas de topo, sendo que o a velocidade de resfriamento neste tipo de junta é mais rápida;

- Espessura da junta – quanto maior a espessura, maior a velocidade de transferência de calor até a espessura crítica, onde a taxa de transferência de calor passa a ser independente da espessura.

Figura 8 – Zona afetada termicamente em uma chapa de aço baixo carbono



Fonte: Ashby, 2019

Conforme Weman (2012) a ZTA é a região do material de base que não sofre fusão durante a soldagem, mas que teve suas propriedades mecânicas e arranjos estruturais modificados. No ponto muito próximo do material que sofreu fusão, a região da ZTA teve um grande aumento de temperatura, possibilitando a formação de austenita, e após a solda, há um rápido resfriamento possibilitando a formação de martensita na soldagem de aços.

Nas regiões da ZTA onde houve altas temperaturas, tem-se o crescimento de grãos, e em uma região mais distante do centro do cordão de solda, onde houve energia suficiente para transformação, porém não ocorreu formação de austenita, houve refino de grãos. Nas regiões mais distantes, onde a temperatura foi menor, não há alteração no tamanho de grãos, porém foi recebido calor suficiente para reduzir a dureza da região e eliminar os efeitos do encruamento (Weman, 2012).

## 2.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM ESTRUTURAS SOLDADAS

Segundo Souza (1982), o corpo de prova para o ensaio de flexão pode ser constituído de uma barra de seção qualquer, preferivelmente circulares ou retangulares para facilitar os cálculos, com comprimento previsto na norma de acordo

com o material ensaiado. O esforço de flexão, gerado por carregamentos transversais, é habitual em diversos tipos de estruturas como em prédios, escadas e inúmeras outras situações, e as vigas em questão necessitam suportar as forças de tração e compressão (Mendes; Silveira, 2018). Entender e testar esse fenômeno é fundamental para garantir projetos de engenharia resistentes. As barras geralmente estudadas em ensaios de flexão podem ter diferentes seções transversais, como mostra a Figura 7 (Garcia; Spim; Santos, 2012). O Método Engastado é realizado com o engaste de uma das extremidades do corpo de prova, com a aplicação de carga na extremidade oposta, medindo-se o deslocamento da extremidade de aplicação da carga conforme a Figura 9 (Garcia; Spim; Santos, 2012).

Quando uma carga externa é submetida sobre uma viga as mesmas reagem nos apoios ou pontos de contatos. A carga externa pode ser concentrada em uma pequena área ou distribuída linearmente ao longo da área da seção transversal que é representada pelas setas (Mendes; Silveira, 2018).

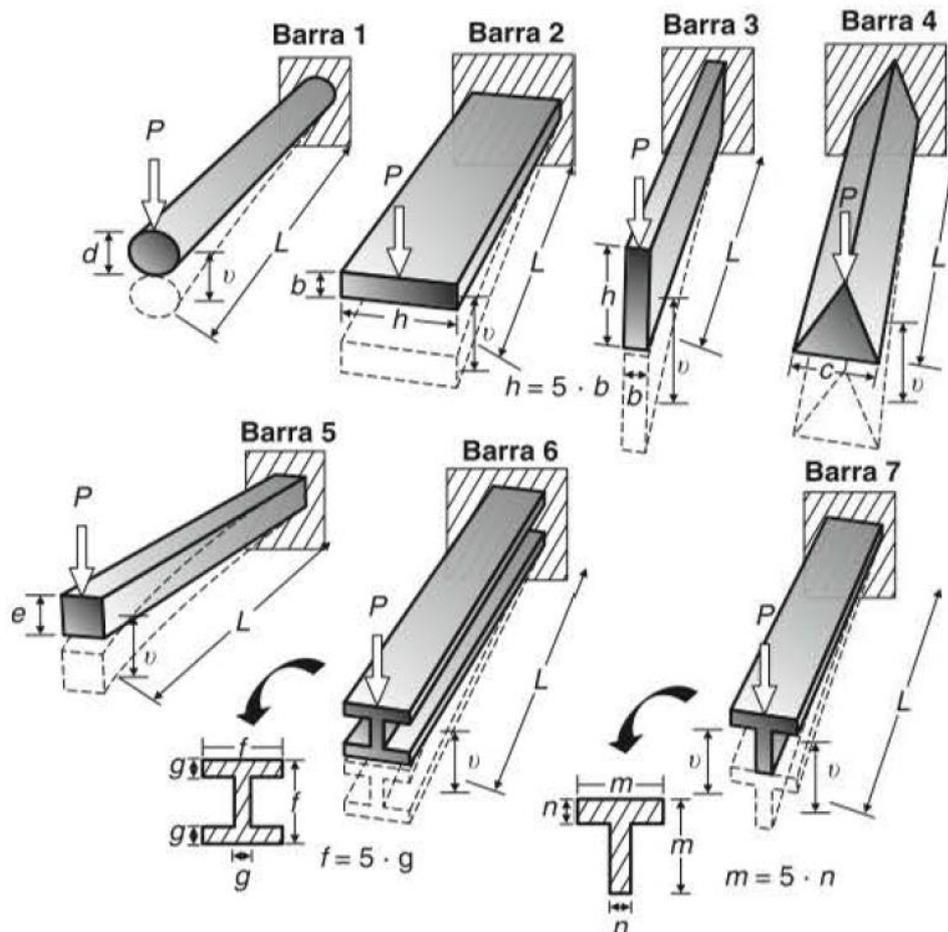
Foi desenvolvido um trabalho por Gho, Gao e Yang (2005) que consistiu na investigação de concentração de tensão e deformação em ligações com barras tubulares circulares submetidas à combinação de ações. Essa combinação foi composta de força axial e momentos fletores no plano da ligação e fora dele. Este estudo foi realizado por meio de ensaios experimentais seguidos de análises numéricas em elementos finitos. Os resultados experimentais mostraram que os ajustes das curvas dos valores de deformação dentro da região de extrapolação nas superfícies externas dos membros são lineares.

Estudos paramétricos foram realizados por Lima et al. (2005) em ligações T com perfis tubulares em aço através de modelo de elementos finitos. Foram comparados os limites de deformação propostos na literatura para avaliar a resistência da ligação e plasticidade de acordo com o Eurocode 3 (2005). Os resultados obtidos mostraram que determinados limites considerados podem fornecer valores contra a segurança para conjuntos soldados formados por perfis de seção transversal quadrado.

Um estudo teórico e experimental foi realizado por Freitas, Mendes e Freitas (2008) em ligações soldadas tipo "T", formadas por perfis tubulares estruturais de aço, com seções retangulares no banzo e circulares no montante. A análise teórica foi feita de acordo com as prescrições da Eurocode 3 (2005), conforme a configuração da ligação. Pelos ensaios experimentais, analisou-se o comportamento da ligação, a

carga última e o modo de falha. A análise numérica em elementos finitos envolveu a análise, geração e calibração de modelos numéricos, com a utilização do *software* ANSYS 11.0, onde foram desenvolvidos vários modelos com diferentes características, com o objetivo de obter um modelo semelhante ao modelo real.

Figura 9 – Barras de diferentes seções transversais sujeitas ao ensaio de flexão pelo método engastado



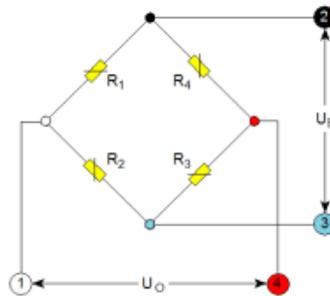
**Fonte:** Garcia; Spim; Santos, 2012

Em estudos realizados por Dalcin (2016) foram utilizados ensaios de flexão em juntas soldadas sobre perfis tubulares quadrados de aço altamente resistentes mecanicamente, no qual foram utilizadas seis energias de soldagem diferentes (0,3 kJ/mm até 1,6 kJ/mm) a fim de comparação e análise, assim como dois metais de adição, AWS ER80S-G e AWS ER120S-G. A partir desse cenário, o autor concluiu que com a energia de soldagem de 1,2 kJ/mm obtém-se melhores resultados para os dois consumíveis, além de que o uso de maiores energias não é suficiente para a elevação da resistência à flexão das juntas em questão.

## 2.5 PONTES DE *WHEATSTONE*

A ponte de *Wheatstone* é um circuito que pode ser empregado para determinar a alteração da resistência elétrica que passa por um extensômetro, quando este é submetido a uma tensão (Dally; Riley, 1978). As mudanças relativas de resistência em um extensômetro são geralmente em torno da ordem  $10^{-6}$  e de  $10^{-2}$ . Para ser capaz de transformar estas pequenas alterações em tensões mensuráveis, o circuito de ponte de *Wheatstone* é usado para facilitar a leitura dos ERE (Laible, 2000). A Figura 8 mostra a representação esquemática da ponte de *Wheatstone*.

Figura 10 – Representação do circuito de ponte de *Wheatstone*



**Fonte:** Laible, 2000

Os braços da ponte são formados pelas resistências R1, R2, R3 e R4. A ponte pode ser alimentada com corrente contínua ou alternada. Se os pontos 2 e 3 da ponte estão ligados a uma tensão de excitação ponte “ $U_e$ ”, em seguida, uma tensão de saída “ $U_o$ ” aparece entre os pontos 1 e 4. A sua quantidade depende dos valores das resistências. A tensão de saída relativa, ou também chamado de desequilíbrio “ $V$ ”, é calculado de acordo com a equação 2 (Laible, 2000):

$$V = \frac{U_o}{U_e} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (2)$$

A resistência dos pares R1, R2 e R3, R4 dos extensômetros devem ter o mesmo valor: [R1=R2 e R3=R4]. A tensão produz no extensômetro uma variação relativa na resistência. A sensibilidade do extensômetro é representada pelo fator do *gage* “ $k$ ”, que é determinada experimentalmente pelo fabricante (Laible, 2000). Isto leva a equação 3:

$$\frac{U_o}{U_e} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3)$$

Através de um arranjo elétrico em um circuito do tipo ponte de *Wheatstone*, alimentado por uma fonte externa de tensão, a variação de resistência elétrica é convertida em variação de tensão na sua saída. A partir da Equação (3) pode ser visto que a tensão de saída da ponte “ $U_o$ ” é proporcional à variação relativa da resistência do extensômetro. Assim fica claro que “ $U_o$ ” é proporcional a deformação “ $\epsilon$ ”. Portanto para determinar o valor de deformação, é necessário apenas medir a tensão de saída da ponte. Dependendo se as alterações de resistência ocorrem em um ou mais braços e em qual braço da ponte, existem diferentes versões do circuito (Dally; Riley, 1978; Window; Holister, 1982; Hoffmann, 1989; Laible, 2000).

Existem várias combinações que podem ser feitas entre os extensômetros de uma ponte, tornando-os ativos ou não, atuando no sentido da deformação ou oposto a ela ou mesmo perpendicular à deformação. Em um circuito de ponte de *wheatstone* sempre haverá quatro braços em sua configuração. As ligações em ponte de *wheatstone* são feitas substituindo seus braços pelos extensômetros “ativos”, através dos quais desejamos efetuar as medidas. Conforme o número de braços ocupados, teremos ligações de  $\frac{1}{4}$  de ponte,  $\frac{1}{2}$  ponte ou ponte completa (HBM, 2006; Fialho, 2007).

A técnica de medição de  $\frac{1}{4}$  de ponte consiste na utilização de um extensômetro posicionado em um dos braços, o qual estará colado no material a ser ensaiado, e de resistores de precisão nos outros três braços. Também existe a configuração de  $\frac{1}{4}$  de ponte que utiliza dois extensômetros em dois braços distintos da ponte, porém um deles é instalado em um corpo de prova semelhante ao que será ensaiado de mesmo material, mas que não sofrerá nenhuma deformação devido ao carregamento. Esse extensômetro é chamado de compensador enquanto que o outro é chamado de extensômetro ativo. Esse tipo de ligação é interessante, pois anula as variações no extensômetro com relação à variação de temperatura sofrida pelo corpo de prova (Andolfato; Camacho; Brito, 2004).

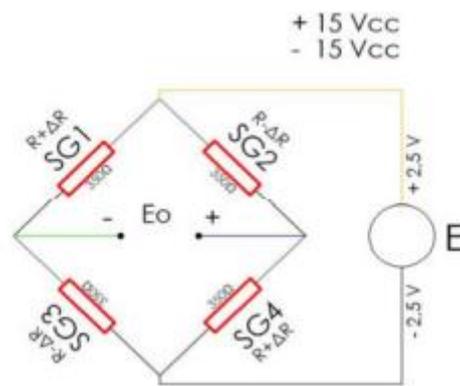
A técnica de medida de  $\frac{1}{2}$  ponte utiliza dois extensômetros em dois braços diferentes da ponte. Além do mais, existe a técnica de medida que utiliza os quatro extensômetros ligados em cada um dos braços da ponte, chamada de ponte completa (Andolfato; Camacho; Brito, 2004).

A técnica da ponte completa o circuito é formado por quatro resistores, uma fonte de tensão e um galvanômetro, sendo que destes quatro resistores, apenas três destes sejam conhecidos e para se conhecer a resistência do último resistor, os outros

três devem ser ajustados até que sua corrente no galvanômetro caia a zero, neste tipo de circuito é o mais apropriado para ser utilizado para determinar a deformação de um corpo, tanto em compressão, flexão e tração (Carer; Carraro, 2010).

Neste trabalho optou-se em utilizar a configuração de ponte completa conforme Figura 9, pois desta maneira é possível saber exatamente a deformação do componente. Quando a ponte está equilibrada, a diferença de potencial entre dois pontos da ponte é zero, o que permite determinar a mudança na resistência do resistor variável (Carer; Carraro, 2010).

Figura 11 – Ponte completa de *Wheatstone*

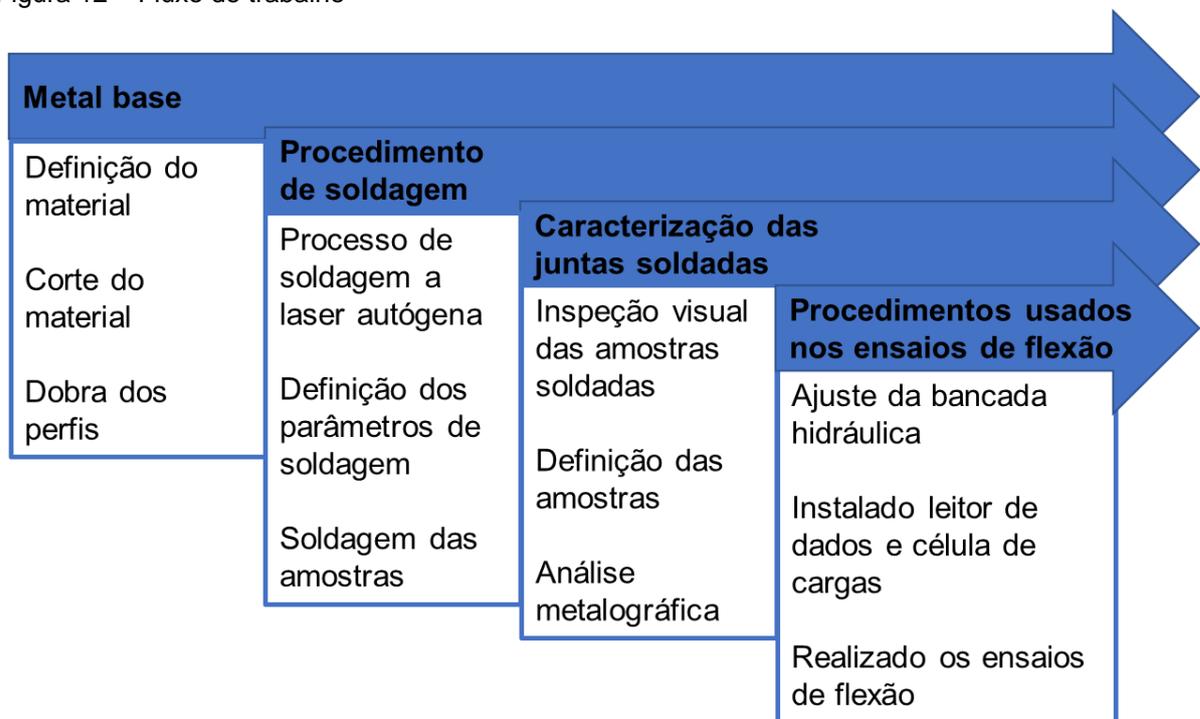


**Fonte:** Carer; Carraro, 2010

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este estudo foi realizado como uma pesquisa experimental que de acordo com Demo (1985), a metodologia é uma preocupação instrumental, que trata de o caminho para a ciência debater a realidade teórica e prática e concentra-se geralmente no esforço de transmitir uma iniciação aos procedimentos lógicos voltados para a questão da procedência, dos princípios formais da identidade, da dedução e da indução, da objetividade, etc. Na Figura 10 está demonstrado o fluxo do trabalho.

Figura 12 – Fluxo de trabalho

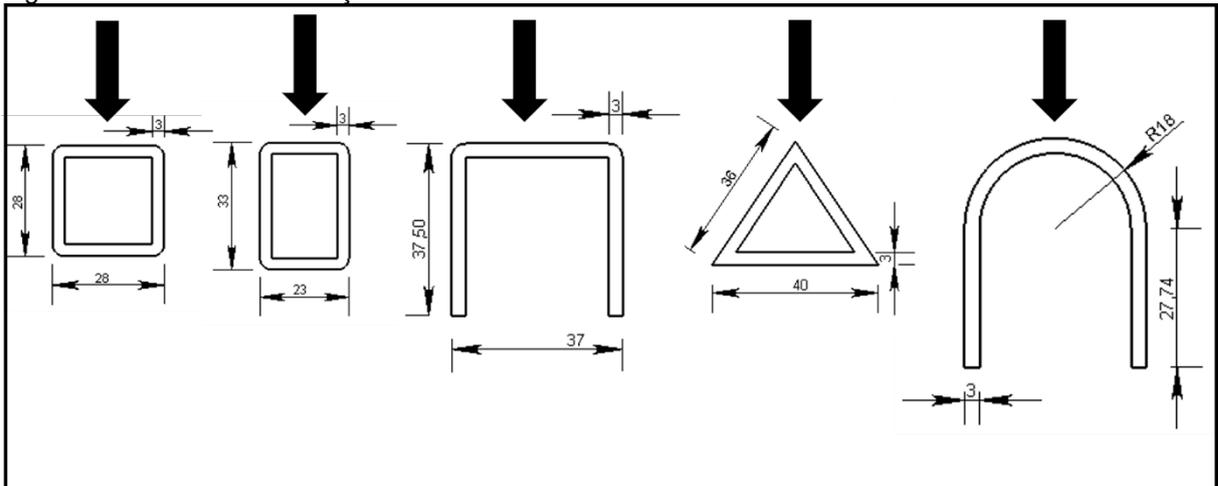


Fonte: Autor, 2024

#### 3.1 METAL BASE

Perfis tubulares quadrado, retangular e triangular foram soldados com costura (soldados longitudinalmente) em aço STRENX 700MC PLUS, um perfil em U e um perfil em C que foram apenas dobrados, ambos possuem o mesmo perímetro de 112 mm. O tubo quadrado possui 28 mm de lado, o retângulo 33 mm x 23 mm, triângulo retângulo de 36 mm x 36 mm x 40 mm, “U” de 37 mm x 37,5 mm x 37,5 mm e o perfil em “C” de 27,74 mm e raio de 18 mm. A Figura 13 mostra a posição em que os perfis foram submetidos ao esforço de flexão.

Figura 13 – Sentido do esforço de flexão



Fonte: Autor, 2024

Na Tabela 1 mostra-se a composição química realizada no metal base em. Pode-se verificar que o percentual de elementos químicos está de acordo com os valores disponibilizado pela SSAB (2021) conforme a norma EN10149-2 (1995) caracterizando o mesmo como aço STRENX 700MC PLUS da SSAB.

Tabela 1 - Composição química medida do metal base

Elementos Químicos (% de massa)					
C	Si	Mn	P	S	Ni
0,0667	0,0565	1,4666	0,0079	0,00567	0,3131
Cr	Mo	Cu	Al	Nb	Ti
0,0216	0,0279	0,00785	0,1125	0,0327	0,1229

Fonte: Autor, 2024

Além da composição química do aço, o teor de carbono equivalente (CE) também influencia na soldabilidade do material. O valor do CE foi calculado através da Equação 1, utilizando cada elemento obtido na análise química do material de base (MB). A amostra analisada apresentou um teor de CE de 0,338. Conforme indicado no diagrama de Graville (Figura 2) o aço demonstra boa soldabilidade, não necessário pré-aquecimento antes da soldagem.

A Figura 14 mostra a microestrutura do metal base revelada por microscopia de luz ampliada em 200 X. A microestrutura do aço STRENX 700MC PLUS é composta por ferrita (região clara), disposta em grãos irregulares muito finos que estão alongados na direção de laminação. Também contém uma pequena quantidade de perlita (região escura). Esta microestrutura refinada é consequência da presença de finos precipitados, que durante a laminação controlada retardam o crescimento dos

grãos (Tamura *et al.*, 1988; Kou, 2003; Bhadeshia; Honeycombe, 2006; Costa *et al.*, 2012).

Figura 14 – Microestrutura do metal base



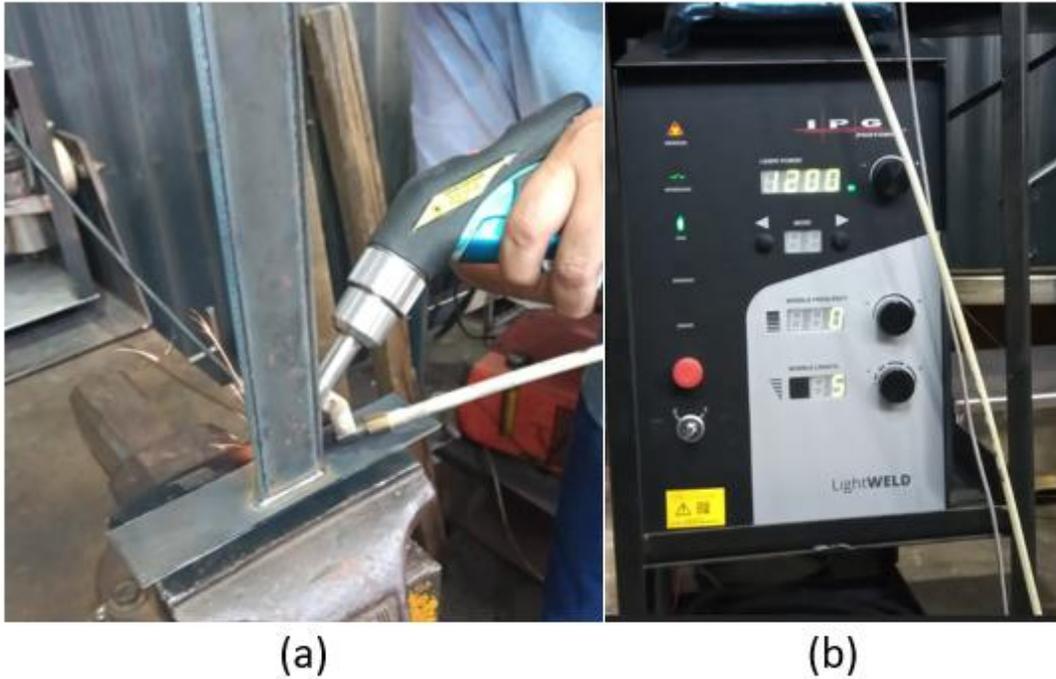
**Fonte:** Autor, 2024

### 3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Os perfis foram soldados na posição plana, através do processo a laser sem adição de material (autógena), manualmente, com gás de proteção nitrogênio e com vazão de 15 l/min. Todos os cordões foram realizados com bico de contato indicado pelo fabricante IPG para junta em “T”, com uma potência de 1,2 kW com velocidade de 3 mm/s, comprimento de oscilação de 0,5mm, e modo OC (*Oscillation Control*), E8 para chapas de 3 mm indicado pelo fabricante. A Figura 15(a, b) mostra os corpos de provas sendo soldados.

As soldas foram realizadas em todo o contorno do perfil, longitudinal e transversal em direção a aplicação da carga, formando um conjunto em “T” onde a chapa da diagonal é o mesmo material dos perfis com dimensões de 60 mm x 60 mm e espessura de 3 mm.

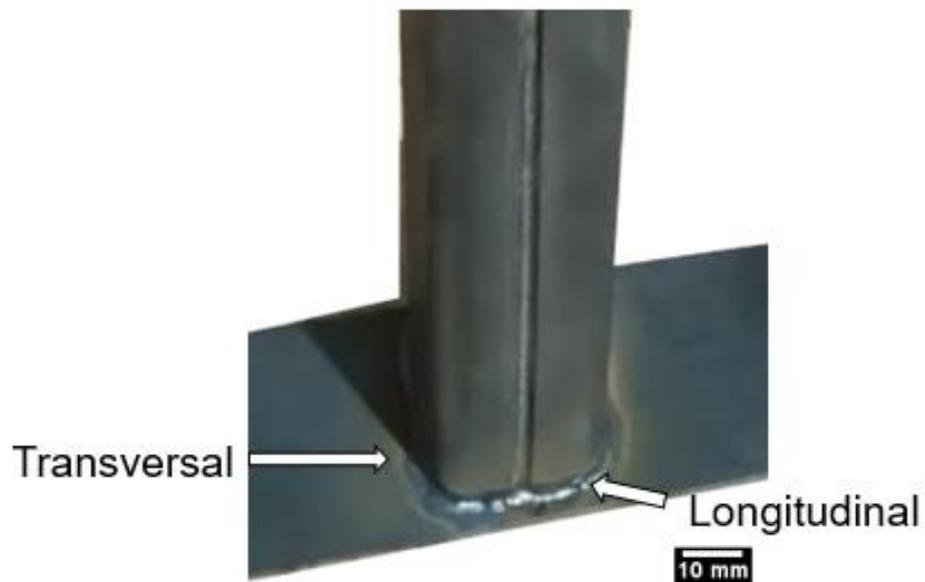
Figura 15 – Posição e parâmetros de soldagem: (a) Soldagem das amostras; (b) Fonte de soldagem



Fonte: Autor, 2024

Na Figura 16 está representada a solda no contorno do perfil tanto transversalmente quanto longitudinalmente, com a emenda da solda realizado no lado longitudinal, evitando que a mesma fosse realizada no canto, onde poderá ser um iniciador de trincas.

Figura 16 – Juntas soldadas na posição plana em todo o contorno



Fonte: Autor, 2024

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS

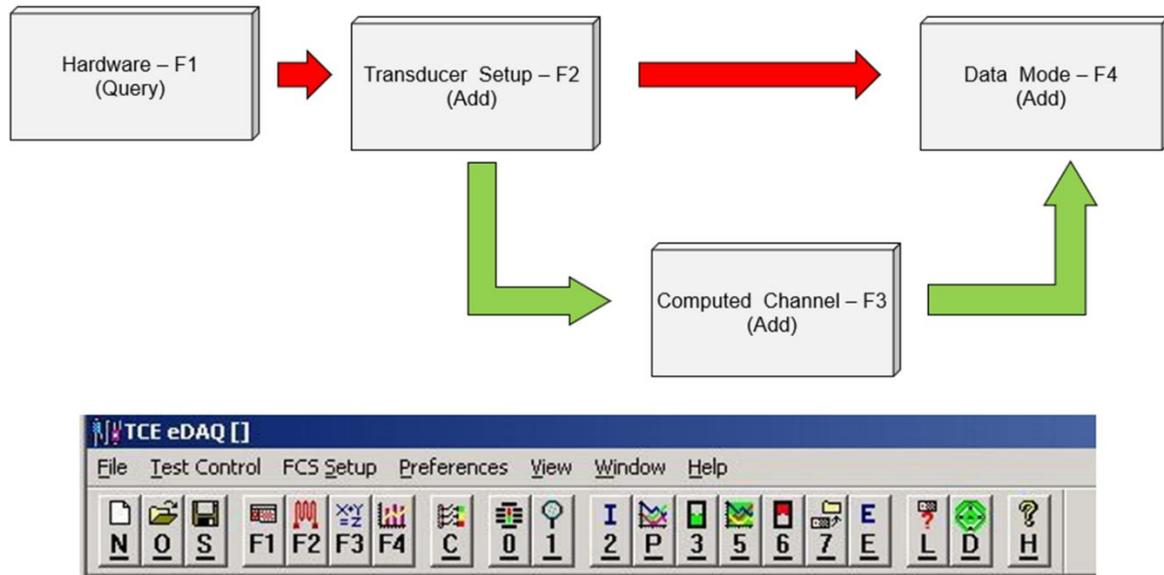
Foram seccionadas duas amostras a fim de verificar as diferentes condições de penetração do cordão de solda, designados como amostra 1 e 2 para a realização de ensaios metalográficos, pois como foi usado um único parâmetro de soldagem para ambos os perfis, os resultados serão o mesmo para todos, seguindo a norma ASTM E3-95 (1995). Os corpos de prova foram abundantemente refrigerados e cortados em uma cortadora metalográfica com fluido refrigerante para garantir a integridade da microestrutura e dureza do material, os tamanhos das amostras de 30 mm. As amostras foram embutidas, onde é colocado pó desmoldante e em seguida a resina acrílica (cor branca), após 13 min é adicionado calor e pressão para a resina compactar e ficar uma amostra transparente. A preparação metalográfica com lixas diamantadas e pano de polimento, seguindo da limpeza das amostras com álcool etílico e secador para retirar qualquer resíduo que possa ter ficado. Após o lixamento, as peças foram atacadas com Nital 2%, em tempos de aproximadamente 15 s. Em seguida, as amostras foram lavadas em água corrente e secadas. As macrofotografias das juntas foram registradas no estereoscópio, e a geometria das juntas foram medidas com o software "Image J".

Posteriormente utilizando as mesmas amostras, foram realizados os perfis de microdureza *Vickers* nas juntas soldadas aplicando uma carga de 300 gf durante 10s, seguindo recomendações da norma ASTM E384-11 (2011). As distintas regiões da junta foram identificadas por meio das macrofotografias e dos perfis de microdureza.

### 3.4 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A calibração e configuração foi realizado pelo TCE que é o software de configuração e coleta de dados do *eDAQ*, que é usado para programar, iniciar e finalizar a coleta de dados, e além de baixar todos os dados coletados pelo *eDAQ* conforme a Figura 17. O mesmo é composto por 5 abas, *Hardware setup*, *Test ID/Network Setup*, *Transducer Setup*, *Computer Channel Setup* e *Data mode Setup*.

Figura 17 – Configuração do eDAQ



Fonte: Autor, 2024

### 3.5 PROCEDIMENTOS USADOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO

O comportamento das juntas soldadas em ambos os perfis quando submetidos a esforços de flexão foram avaliados através de uma bancada. Este foi equipado com um sistema hidráulico automatizado para a transmissão de esforços, um pórtico em perfil rígido de aço soldado para fixação das estruturas a serem ensaiadas e uma célula de carga. Para garantir a rigidez da estrutura, a coluna foi bi engastada. Foi soldado uma chapa de 6,3 mm na extremidade do perfil para uma melhor fixação, com 4 parafusos M16 fazendo com que a estrutura ficasse rígida e não comprometesse o ensaio na solda. Para transmitir a carga na estrutura foi montado e soldado um suporte (pino 20mm de diâmetro e 100mm de comprimento) na extremidade da viga para facilitar a aquisição dos dados através da célula de carga conforme a Figura 18.

Também faz parte desta bancada o leitor de dados o eDAQ Figura 19 que é um equipamento para coletas de dados em campo e nos mais variados tipos de ambiente sendo resistente a vibração, poeira e choques mecânicos equipado com 8 portas e possui uma fonte de alimentação de 12V DC e com selo de calibração até 01/2026 conforme a Figura 19(b). O sistema de aquisição de dados utilizado no decorrer do ensaio estático se comunica através de protocolos de comunicação *Ethernet 10/100 BASE-T* padrão e é armazenada em seu próprio servidor web com um endereço IP configurável Figura 19(a).

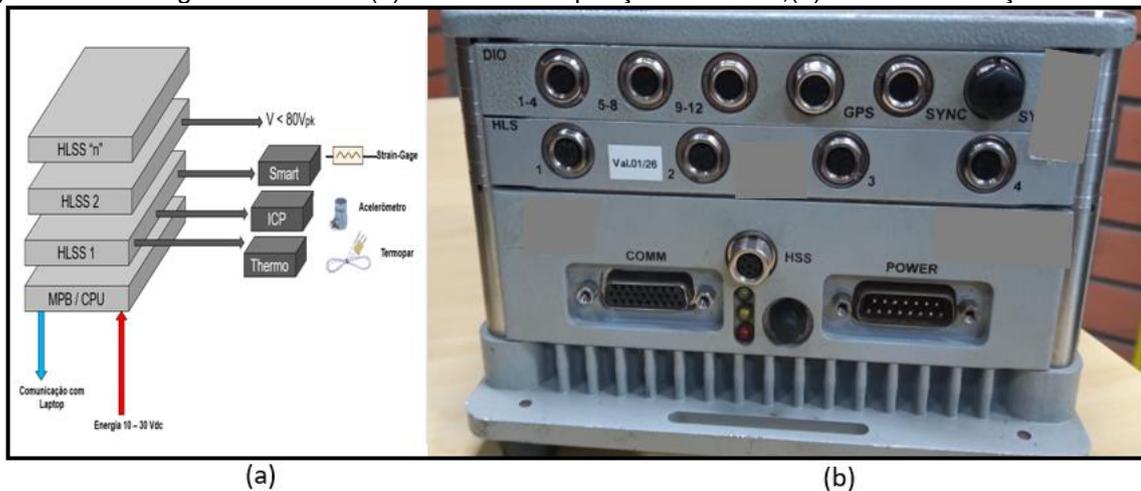
Figura 18 – Vista geral do sistema montado para o ensaio de flexão simples



Fonte: Autor, 2024

Essa comunicação de rede Ethernet, serial e eDAQ para eDAQ se conecta por meio de conector D-sub de alta densidade 26 pinos no painel traseiro com alta velocidade HSS. Para evitar a saturação do sinal durante a realização dos ensaios e minimizar o ruído da rede elétrica foi utilizado uma bateria, e neste foram conectados o sistema de aquisição.

Figura 19 – Vista geral do eDAQ: (a) Sistema de aquisição de dados; (b) selo de calibração



Fonte: Autor, 2024

Para a leitura da célula de carga foi utilizado o *SmartStrain* módulo que possui amplificador de sinais, permite a ligação em ponte para  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e ponte completa de *strain-gages* e fornece até 10V de alimentação para sensores na ponte que permitiu a leitura de tensão completa da carga. A célula de carga utilizada era uma U10M – Métrica de 10 T, ponte completa 350  $\Omega$ , saída 2 mV/V portando 10000 kgf e uma variação de 0,02 v com a leitura de forças fundamentada por extensômetros com data de validade até 04/2025 conforme a Figura 20.

Figura 20 – Selo de validade da célula de carga



**Fonte:** Autor, 2024

O sistema hidráulico utilizado é composto de um reservatório para armazenagem do óleo com capacidade para 20 l. Durante a realização dos experimentos a vazão do óleo foi controlada por uma válvula reguladora de vazão. Para movimentar a célula de carga e pressioná-la contra a estrutura a ser ensaiada, foi utilizado um cilindro hidráulico com pressão máxima de 18 MPa. O acionamento da bomba de engrenagens foi realizado por um motor elétrico com potência 15 CV e rotação 1175 rpm. O motor elétrico foi ligado em um inversor de frequência, justamente para reduzir a frequência do motor elétrico (de 60 Hz para 15 Hz) e assim diminuir a velocidade de avanço do pistão.

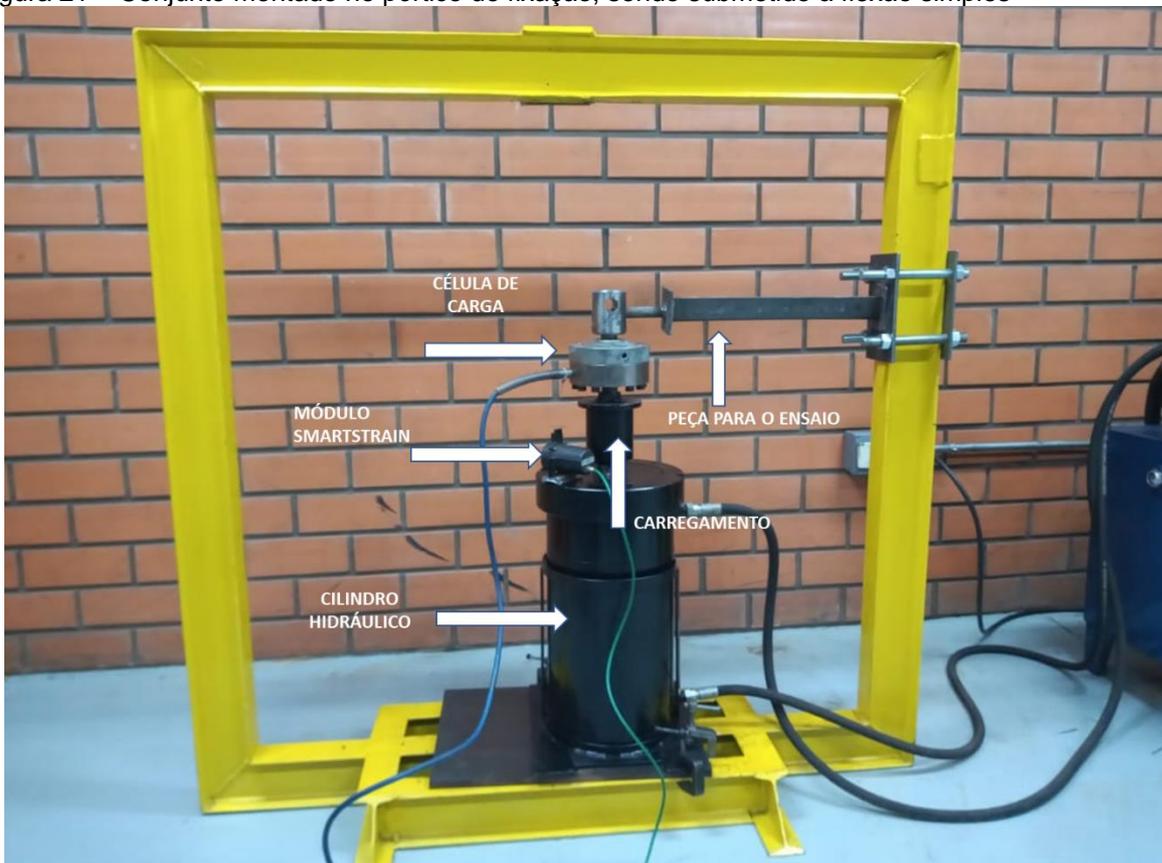
A bomba de engrenagem responsável pelo bombeamento do óleo através do sistema hidráulico possui vazão de 1,2 cm<sup>3</sup>/rot, pressão de trabalho de 180 bar. Para movimentar o cilindro hidráulico, controlar a direção e vazão do óleo hidráulico no sistema é utilizado uma válvula direcional com pressão máxima 250 bar e vazão

máxima 60 l/min. Quando a válvula direcional é acionada, ela direciona o fluxo de óleo para uma das duas entradas do cilindro, definindo se o cilindro irá subir ou descer. Para determinar o movimento desejado do cilindro hidráulico foi criado um comando manual para o acionamento.

As medições do deslocamento vertical do pistão do cilindro hidráulico foram realizadas com o módulo *SmartStrain*, utilizando a configuração de ponte completa de *Wheatstone*. No sistema montado, as deformações específicas da estrutura foram medidas pelo módulo *SmartStrain* que foram ligados com um cabo de aço e fixado na célula de carga. O ponto de aplicação da força na viga fica a 470 mm da coluna onde o mesmo está soldado (viga, coluna).

Em relação ao ensaio de flexão, a velocidade de deformação da estrutura, ou seja, a velocidade de carregamento foi mantida em 5 mm/s e as medições do ensaio foram encerradas após a ruptura da estrutura. A Figura 21 mostra o conjunto soldado sendo submetido à flexão simples, assim como os demais equipamentos utilizados no ponto de carregamento.

Figura 21 – Conjunto montado no pórtico de fixação, sendo submetido à flexão simples



Fonte: Autor, 2024

### 3.6 ANÁLISES FEITAS APÓS OS ENSAIOS DE FLEXÃO

Após a realização dos ensaios e a coleta dos dados, as peças foram levadas para o laboratório onde em um ambiente iluminado as mesmas foram limpadas com álcool para poder analisar os detalhes das rupturas em ambos os tipos de perfis. As fraturas foram fotografadas em ambos os lados, (transversal e longitudinal) com uma câmera fotográfica de alta qualidade para garantir que todos os detalhes fossem observados. Após esta análise visual das amostras foi analisado os dados que foram coletados pela célula de carga, *eDAQ* e pelo *SmartStrain*, onde os mesmos estavam disponibilizados em uma planilha de *Excel* e em formato de gráficos.

## 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

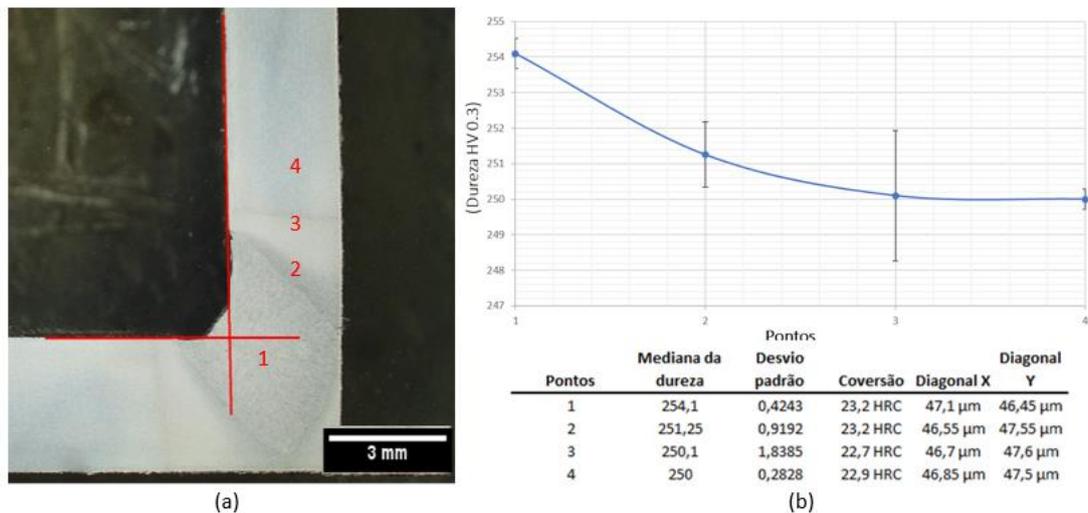
No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de flexão nos perfis tubulares, a análise metalográfica da solda, microdureza da zona termicamente afetada e a análise das fraturas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 4.1.1 Análise das macrofotografias e dureza das juntas soldadas

Em ambas as macrofotografias, longitudinal e transversal observou-se micro mordeduras que são aceitáveis conforme a norma AWS D1.1 (2002), é estas são originadas pela soldagem a laser sem metal de adição conforme Figura 22(a).

Figura 22 – Macrografia e gráfico de dureza: (a) Junta soldada por laser; (b) Análise de dureza



Fonte: Autor, 2024

Os perfis de microdureza dos cordões de solda foram realizados em dois pontos na junta soldada transversal e longitudinal com a mesmas energias de soldagem sem a adição de materiais. A Figura 22(b) apresenta a mediana e o desvio padrão da microdureza das amostras, a ZTA e do MS, em função da distância da linha central do cordão de solda. Realizou-se um perfil de dureza a fim de verificar alterações microestruturais na (ZTA). Nas amostras foi identificado pequenas alteração de dureza na região próxima a solda, limites entre solda e material base conforme pontos marcados na Figura 22(a), aspecto positivo relacionado com a resistência do componente. No ponto 1 obtivemos a maior dureza pois devido à natureza concentrada pelo feixe de laser se comparado com outros processos de

soldagens o laser aquece a região muito rapidamente e, após o término da aplicação a região resfria rapidamente. Esse resfriamento extremamente rápido pode resultar na formação de estruturas mais duras, como a martensita, especialmente em ligas que têm uma tendência maior a transformações de fase rápidas (Shravan *et al.*, 2023).

## 4.2 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS JUNTAS “T” SOLDADAS NOS PERFIS TUBULARES

### 4.2.1 Força e deformação obtidas durante os ensaios de flexão

As forças máximas suportadas pelas estruturas e as deformações medidas pelo *SmartStrain*, bem como a tensão de cisalhamento dos diferentes tipos de perfis tubulares em seu plano superior estão apresentados nas Figuras 23-27(a, b). Os valores de deformação, onde a tensão é convertida em força que serão apresentados, referem-se ao momento exato da ruptura, ou seja, no instante em que ocorreu a força máxima suportada pelas juntas soldadas. Este fato é facilmente constatado através dos registros da força durante o ensaio, pois ocorre súbita redução da força exercida sobre a célula de carga. Os perfis que ensaiados foram fabricados com o mesmo tipo de material, mesma espessura e o mesmo comprimento do cordão de solda, variando apenas a forma da seção geométrica da seção transversal.

Figura 23 – Força e deformação do perfil “C”, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2

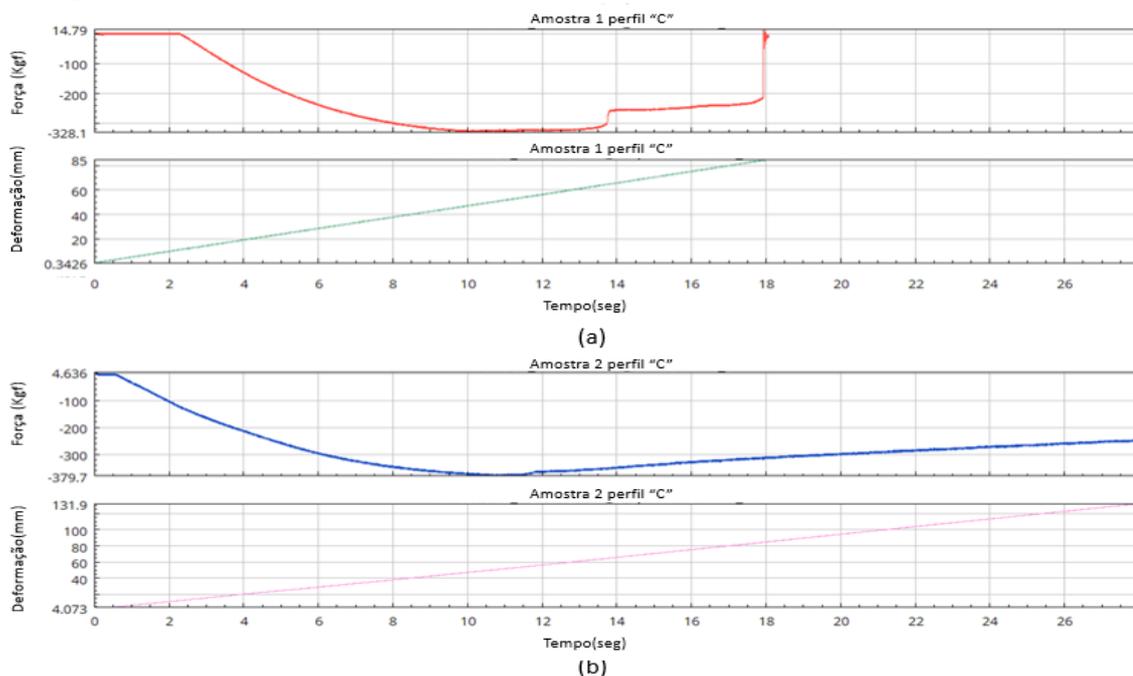
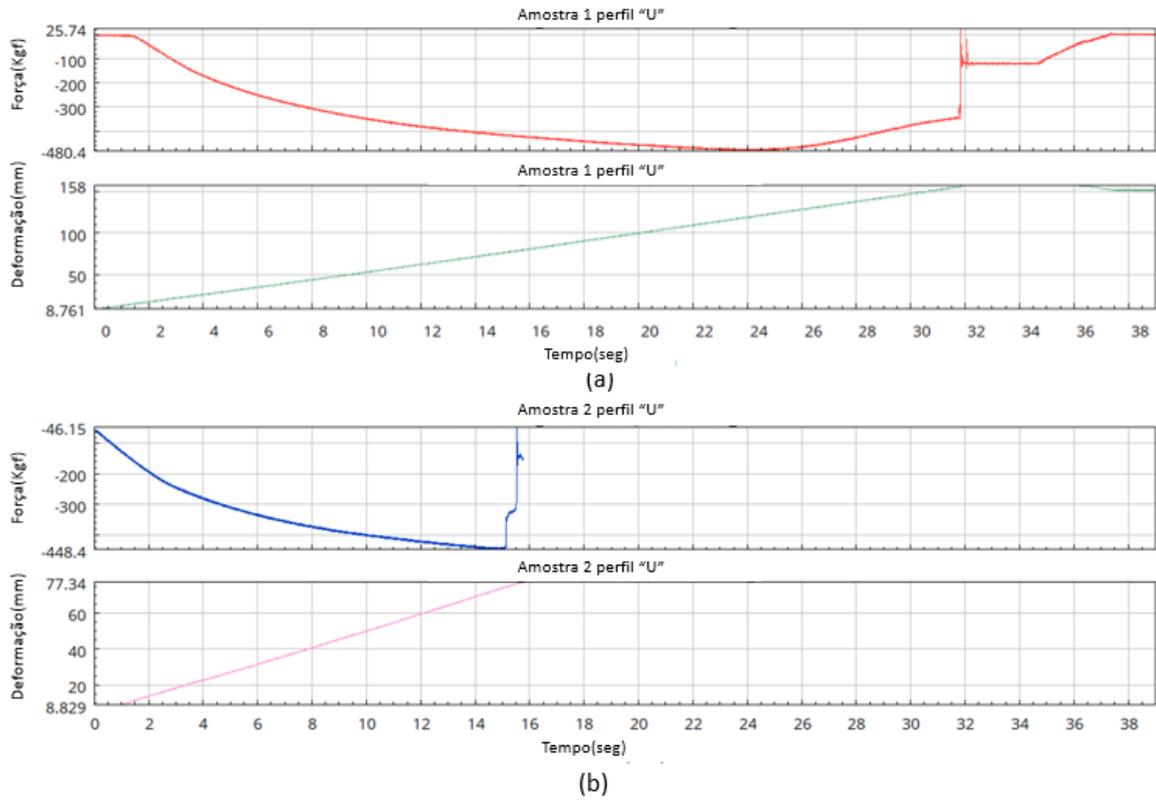
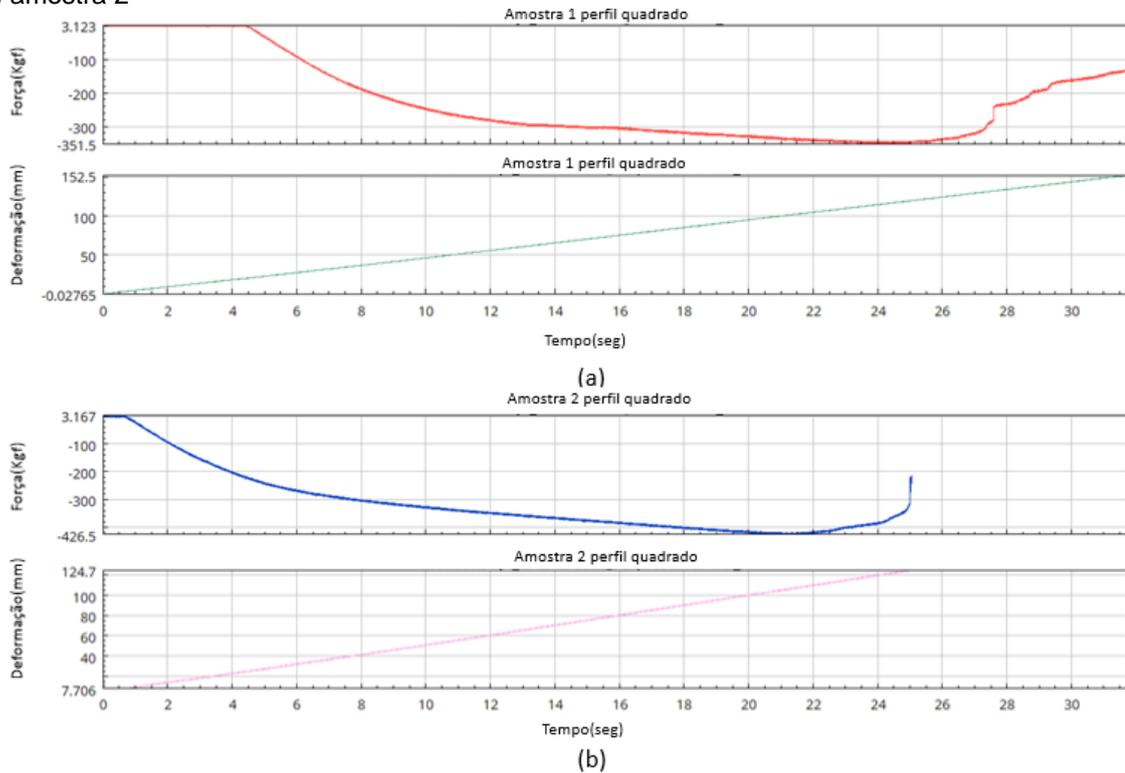


Figura 24 – Força e deformação do perfil “U”, obtido durante o ensaio de flexão: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2



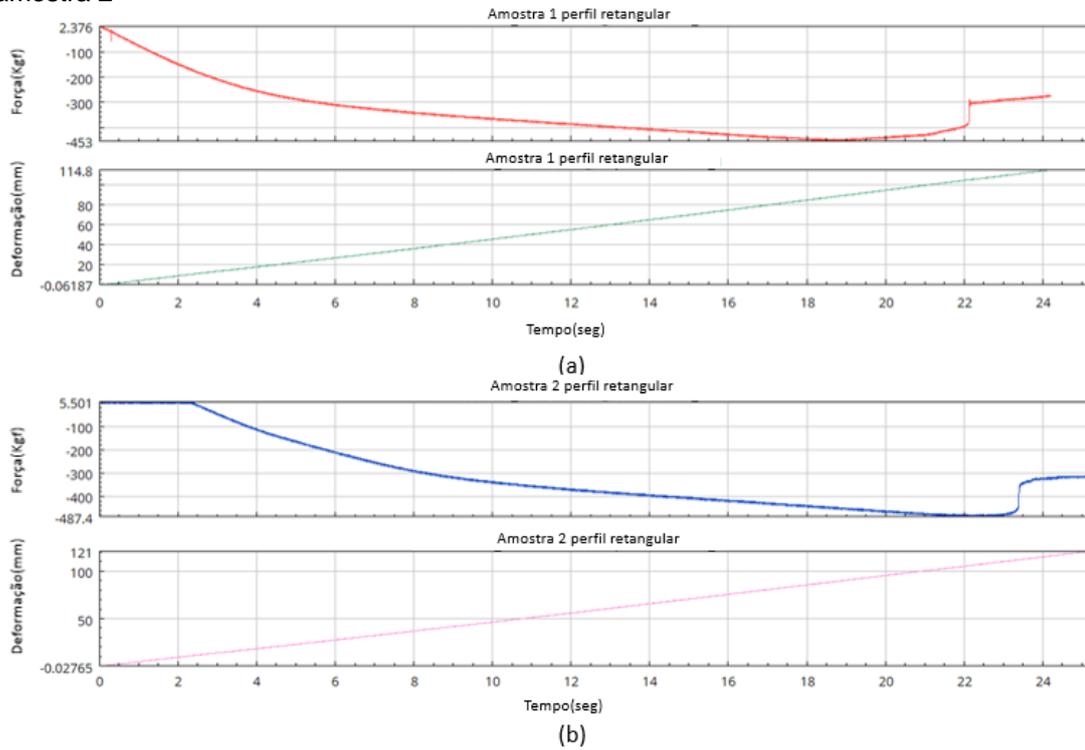
Fonte: Autor, 2024

Figura 25 – Força e deformação do perfil quadrado, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2



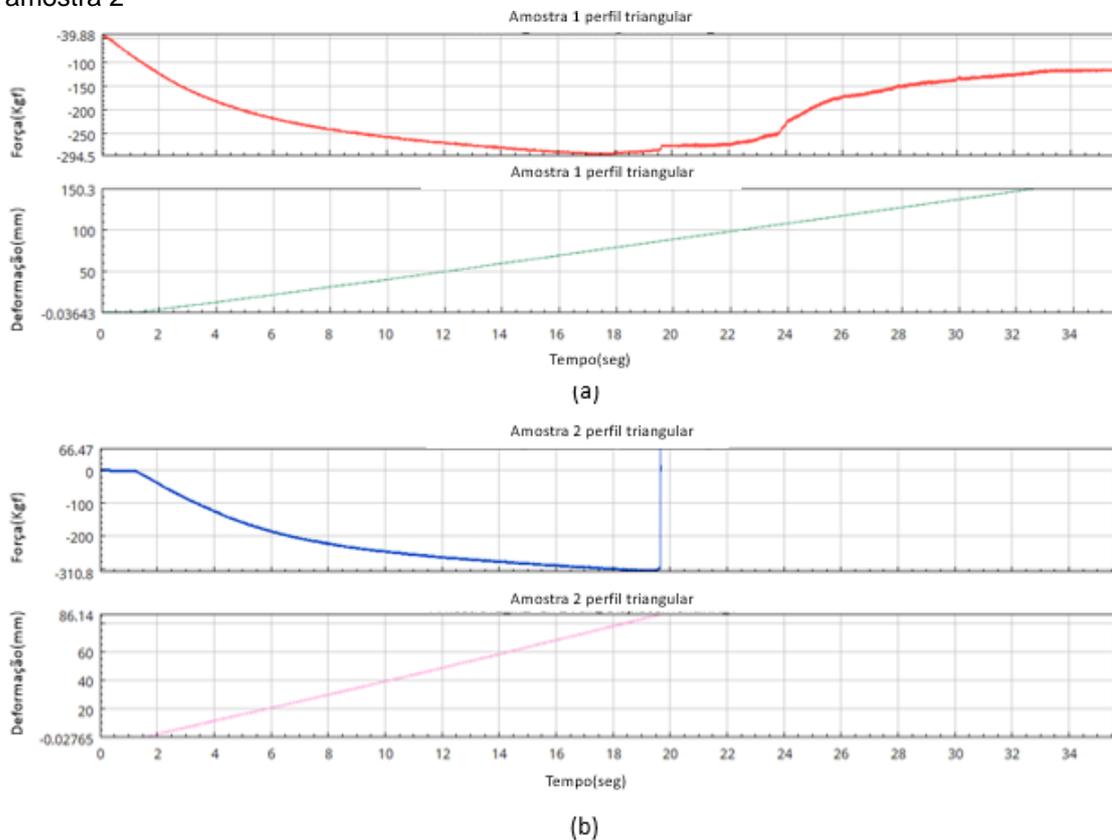
Fonte: Autor, 2024

Figura 26 – Força e deformação do perfil retangular, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2



Fonte: Autor, 2024

Figura 27 – Força e deformação do perfil triangular, obtido durante o ensaio de flexão: (a) amostra 1; (b) amostra 2

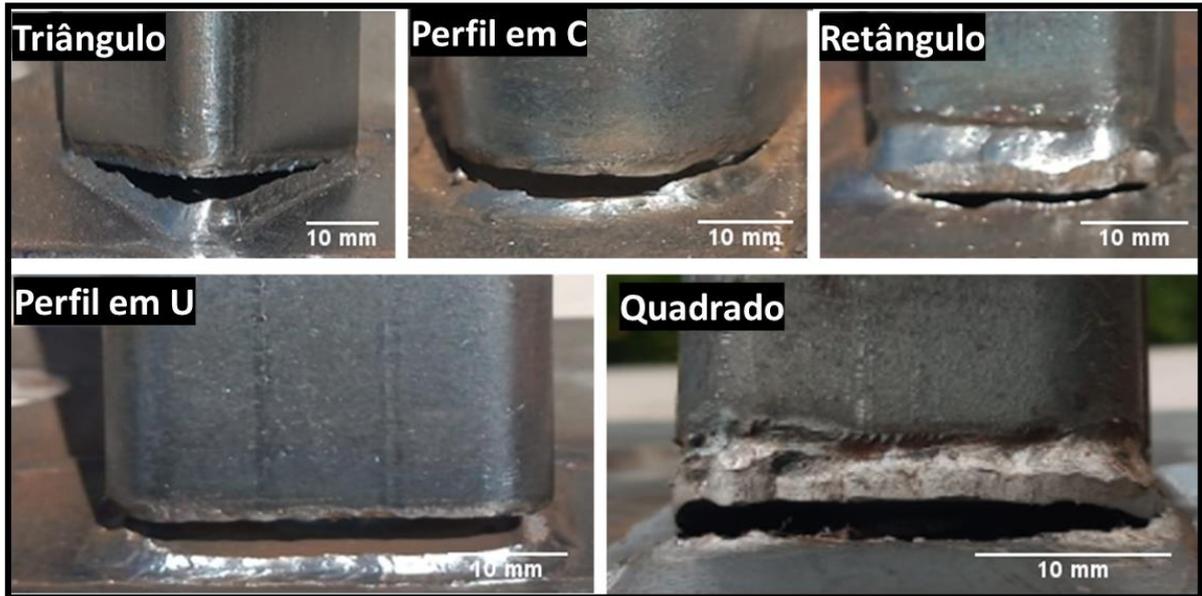


Fonte: Autor, 2024

#### 4.2.2 Região de ruptura dos corpos de prova

A Figura 28 apresenta as fotografias da região central do cordão de solda das juntas soldadas transversalmente dos diferentes perfis. Na Figura 29 apresenta-se as fotografias dos cordões longitudinais dos perfis e a Figura 30 apresenta a deformação plástica em uma das amostras ensaiadas dos perfis “U” e “C”.

Figura 28 – Juntas transversal soldadas nos perfis: Triangular, "C", Retangular, "U" e Quadrado

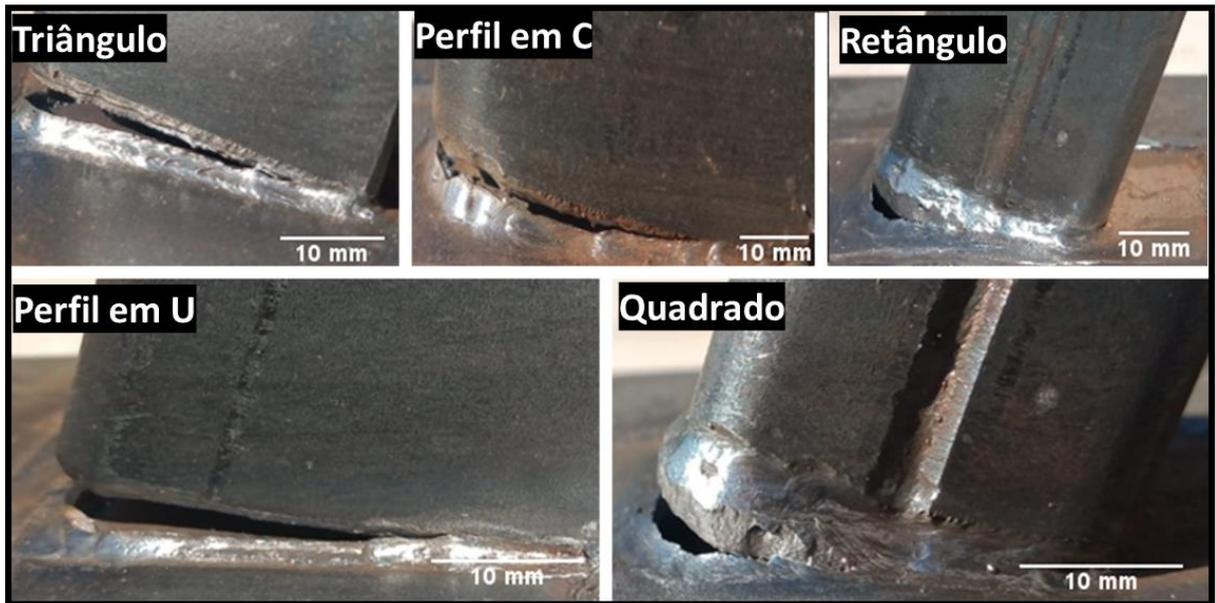


Fonte: Autor, 2024

As fraturas das juntas transversais, Figura 28, normalmente localizaram-se na ZTA, justamente na região de menor dureza. Isso se justifica provavelmente em função de alguma descontinuidade existente na junta soldada, devido a soldagem ser realizada de forma manual e sem metal de adição. As fraturas das juntas transversais soldadas nos perfis quadrado e retangular, ocorreram ao longo da raiz e da margem da solda, provavelmente devido a concentração de tensão ser mais elevada nestas regiões. Da mesma forma que as juntas longitudinais, as juntas transversais soldadas nestes perfis, exibiram modos de fraturas descontínuas e ocorreram na mesma região, pelos mesmos motivos citados anteriormente.

Conforme mostrado na Figura 29, as juntas soldadas longitudinais apresentaram fraturas com características distintas das juntas transversais, em função do modo de carregamento, porém, para o mesmo tipo de junta às fraturas apresentam certa tendência de ocorrer numa mesma região, independentemente do perfil utilizado.

Figura 29 – Juntas longitudinal soldadas nos perfis: Triangular, "C", Retangular, "U" e Quadrado



Fonte: Autor, 2024

Todos os corpos de prova das juntas soldadas fraturaram de forma dúctil, pois houve significativa redução da seção transversal, exceto uma amostra do perfil "U" e uma do perfil "C" que não rompeu a solda, mas teve deformação plástica no perfil conforme a Figura 30.

Figura 30 – Deformação plástica



Fonte: Autor, 2024

### 4.2.3 Discussão geral dos resultados

Na análise de dureza dos cordões de solda obtivemos uma baixa variabilidade de dureza na ZTA como sendo um ponto positivo e característico da soldagem a laser e dos aços TMCP que possuem elementos de ligas que tem por objetivo suprir o crescimento de grãos austenísticos durante a soldagem (Gladman, 1997), contudo, o uso do nitrogênio como gás de proteção e a soldagem a laser sem adição de material está relacionada a alta taxa de resfriamento do cordão de solda, ocasionada diretamente pela ação da temperatura atingida durante o processo de soldagem, impedindo a plena difusão desse gás na poça de fusão (Benuti, 2018).

Nas macrografias da junta soldada em “T” a penetração da solda no perfil tubular foi total, já na base foi parcial, e esta diferença de fusão está diretamente ligado ao posicionamento da tocha de solda, que como a mesma foi soldada manualmente não se tem precisão no ângulo correto da tocha, que em soldas de 90° e chapas com a mesma espessura a posição da tocha deve ser de 45° (Marques, 2017). Também foi possível visualizar uma mordedura no cordão de solda, que conforme norma AWS D1.1 (2002), está aceitável, e não compromete os resultados dos ensaios.

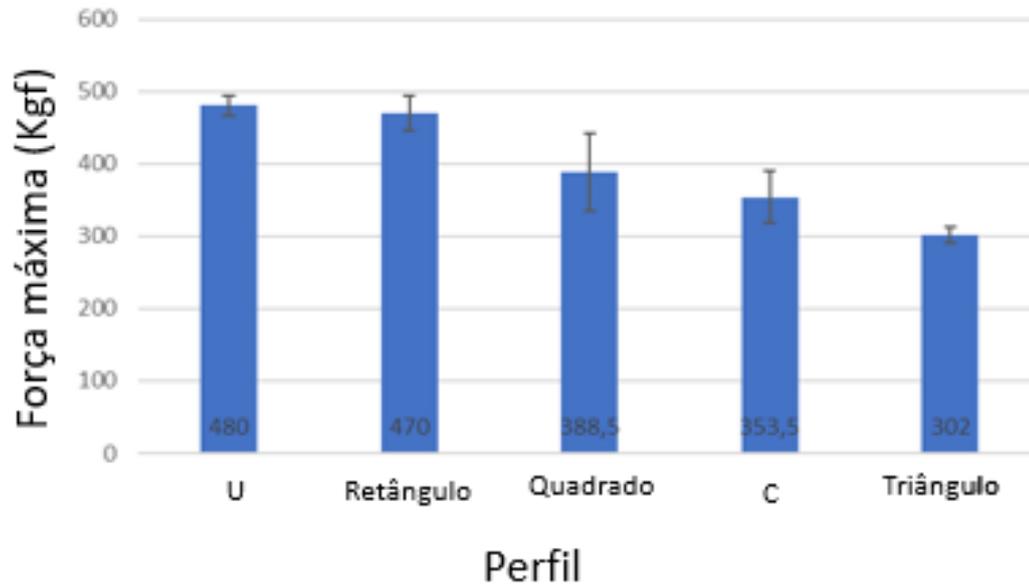
Na análise química das chapas utilizadas para a fabricação dos perfis identificou-se que o material possui as características do aço STREX 700MC PLUS, com o carbono equivalente de 0,33%, e 0,0667% de carbono, que conforme o diagrama de Graville mostrado na Figura 2 o mesmo está na zona I dos aços TMCP, e por isso possuem uma boa soldabilidade, não sendo necessário pré-aquecimento antes da aplicação da solda (Tamura *et al.*, 1988).

Nos testes de flexão foi possível observar que o perfil “U” obteve o maior esforço até o ponto de ruptura conforme o gráfico da Figura 31 com resultado semelhante ao do retângulo. Quanto as fraturas dos perfis os mesmos ocorreram de forma dúctil, na região próxima da solda, ZTA, região que possui a menor resistência devido a reestruturação cristalina após a aplicação da soldagem (Weman, 2012). Em uma das amostras ensaiadas dos perfis “U” e uma do perfil “C” foi obtido uma deformação plástica no perfil não ocorrendo a ruptura do cordão de solda, devido a seção transversal ser mais frágil ao carregamento de peso do que a resistência da solda (Marconi, 2018).

Para o processo de soldagem a laser não foi encontrado na bibliografia fórmulas matemáticas para realizar um comparativo com os ensaios realizados. Já

nos demais tipos de soldagens que geram algum tipo de cateto de solda é possível calcular quanto de esforço será necessário para romper o mesmo (Collins; Busby; Staab, 2019). As áreas que utilizam a soldagem a laser atualmente realizam testes experimentais nas soldas até encontrar o melhor parâmetro para a aplicação (Felix, 2007).

Figura 31 – Força máxima suportada pelos perfis nos ensaios de flexão



Fonte: Autor, 2024

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados e discussões apresentados neste trabalho, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

A soldagem Laser autógena realizada manualmente nos perfis tubulares do aço STRENX 700MC PLUS com espessura de 3mm obteve uma penetração total e não modificou significativamente a estrutura do material na ZTA, mas houve um incremento de 1,63% na dureza da zona fundida.

Com os resultados do ensaio de flexão foi possível verificar que o perfil “U” apresentou a maior resistência, seguindo pelo perfil retangular, quadrado, “C” e o de menor resistência foi o triângulo devido a posição que o mesmo foi exposto ao esforço. O perfil “U” apresentou uma resistência de 2% a mais que o perfil retangular e em comparação com os demais, 19% a mais que o quadrado, 26% a mais que o perfil em “C” e 37% a mais que o triângulo.

A variação dos perfis tem grande influência no carregamento de peso, sendo que os perfis analisados todos possuem o mesmo tipo de aço, perímetro, espessura, comprimento e parâmetros de soldagem e o que diferenciava uns dos outros é apenas a seção transversal e mesmo assim obteve-se uma grande variação de resistência nas juntas soldadas. Com o estudo realizado entende-se que é possível fazer projetos mais eficientes, mais seguros, com custos menores e mais leves apenas usando um perfil adequado.

## SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a linha de pesquisa adotada, sugere-se algumas alternativas de pesquisas:

- Realizar a soldagem dos perfis com o processo a Laser autógena ou com adição de material (Arame) mas automatizados para garantir a precisão e continuidade da solda.
- Fazer a geometria da seção transversal dos perfis maiores para se ter uma acuracidade melhor nos resultados.
- Fazer um comparativo com diferentes processos de soldagens nos perfis.
- Realizar análise de elementos finitos – FEA (Computacional) e comparação com cálculos analíticos.
- Realizar os ensaios de flexão em diferentes posições em um mesmo perfil.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. ASM HANDBOOK. ***Metalworking: bulk forming***. v.14A. Novelty: ASM International, 2005. 888 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ***ASTM STANDARD E384-11. Standard test method for knoop and vickers hardness of materials***. West Conshohocken: ASTM, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3-95. ***Standard practice for preparation of metallographic specimens***. West Conshohocken: ASTM, 1995.
- AN AMERICAN NATIONAL STANDARD. AWS D1.1. ***Structural welding code-steel***. Lejeune Road, Miami, Florida, 2002.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. D. ***Extensometria básica***. Material de apoio - Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2004.
- ASHBY, M. F.; ***Seleção de materiais no projeto mecânico***. 5. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- BHADESHIA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R.W.K. Steel: ***Microstructure and properties***. 3. ed. Cambridge: Elsevier LTD, 2006. 344 p.
- BENUTI, R.S ***Efeito da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de aço superduplex UNS S32750 soldadas com Laser Pulsado Nd:YAG***. Ilha Solteira 2018.
- CARER, M.; CARRARO, E. ***Célula de carga***. 2010. Disponível em: <http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/cel61.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- CHO, D. W.; CHO, W. I.; NA, S. J. ***Modeling and simulation of arc: laser and hybrid welding process***. ***Journal of Manufacturing Processes***, v. 16, p. 26–55, 2014
- CIMM. ***Material didático /aços para construção civil/soldabilidade***. 2021. Disponível em:[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6351-soldabilidade](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6351-soldabilidade) Acesso em: 23 out.2021.
- COLLINS, J. A; BUSBY, H. R; STAAB, G. H. ***Projeto mecânico de elementos de máquinas***. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- COSTA, V. M.; HAAG, J.; SANTOS, B. P.; COGO, G.; LESSA, C. R. L.; STROHAECKER, T. T. ***Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de metais alta resistência e baixa liga***. In: 67° Congresso ABM – Internacional. Rio de Janeiro, 2012. p. 1432-1441.
- DALCIN, Rafael Luciano. ***Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares***. Orientador: Ivan Guerra Machado. 2016. 81 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. 2. ed. United States of America: McGraw-Hill, 1978. 571 p.

DAVIS, J. R. **Corrosion of weldments**. ASM International: American Technical Publishers Ltd, 2006. 225 p.

DEMERI, M. Y. **Advanced High-Strength Steels: science, technology and applications**. USA: Copyright, 2013.

DEMO, P. **Introdução ao ensino da metodologia da ciência**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985.

EINSTEIN, A. *On the quantum theory of radiation*. **Physical Journal**, v. 18, p. 121–128, 1917.

EUROCODE 3. **Design of steel structures – Part 1-8: General Rules**. European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 10149-2. **Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – part 2: delivery conditions for thermomechanically rolled steels**. Brussels: ECS, 1995.

FELIX, A. **Estudo comparativo de juntas soldadas a TIG e laser empregando-se TI com pureza comercial utilizado em prótese sobre implantes**. Araraquara: UNESP, 2007.

FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007. 278 p.

FREITAS A. M. S., MENDES F. C., FREITAS M.S.R. **Finite Elements Analyses of welded T joints**. [s.l.]: Eurosteel, 2008.

GARCIA, Amauri; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GHO, W.M.; GAO, F.; YANG, Y. *Load Combination Effects on Stress and Strain Concentration on Completely Overlapped Tubular K(N)- Joints*. **Thin-Walled Structures**, v. 43, p. 1234-1263, 2005.

GLADMAN, T. **The physical metallurgy of microalloyed steels**. 1.ed. London: Institute of Materials, 1997. 363 p.

GOLDAK, J. A., & MAZUMDER, J. *Modeling of Laser and Hybrid Laser-Arc Welding*. **Springer Science & Business Media**, 2002.

GORDON, J. P.; ZEIGER, H. J.; TOWNES, C. H. *The maser-new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer*. **Physical Review**, v. 99, p. 1264–1274, 1955.

HBM. **Curso de extensometria**. Material de apoio. São Paulo, 2006.

- HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt: Hattinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
- ION, J. C. **Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application**. Oxford: Elsevier, 2005.
- KONG, F. et al. *Modeling of temperature field and grain growth of a dual phase steel DP980 in direct diode laser heat treatment*. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5996–6003, 2009.
- KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- KRASNOPEROV, M. Y.; PIETERS, R. R. G. M.; RICHARDSON, I. M. *Weld pool geometry during keyhole laser welding of thin steel sheets*. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, p. 501–506, 2004.
- LAIBLE, M. **Electrical measurement of mechanical quantities**. Darmstadt: Hattinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2000.
- LIANG, D; ALMEIDA, J: **Laser ND: YAG de modo TEM00 com bomba solar**. 2013.
- LIMA, L. R. O.; NEVES, L. F. C.; SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. S. **Análise Paramétrica de Ligações “T” com Perfis Tubulares em Aço através de um Modelo de Elementos Finitos**. Guarapari: CILAMCE, 2005.
- MACHADO, I. G. **Condução do calor na soldagem: fundamentos & aplicações**. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora LTDA, 2000. 119 p
- MACHADO, I. G. Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n.2, p. 189-201, abr/jun 2011.
- MACHADO, I. G. Falhas de estruturas de aço soldadas devido a reduzida ductilidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 4, p. 391-403, out/dez 2013.
- MAIMANN, T. H. *Stimulated optical radiation in ruby*. **Nature**, v. 187, p. 493–494, 1960.
- MAJUMDAR, J. D.; MANNA, I. *Laser material processing*. **International Materials Reviews**, v. 56, p. 341–388, 2011.
- MAJUMDAR, J. D.; MANNA, I. *Laser processing of materials*. **Sadhana**, v. 28, p. 495–562, 2003.
- MARCONI, S. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. São Paulo: Câmara Brasileira do livro, 2018.
- MARQUES, P. B. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- MENDES, Cláudia Luisa; SILVEIRA, Aline Morais da. **Ensaio mecânicos**. Porto Alegre: Sagah Educação, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025028/>. Acesso em: 08 nov. 2022.

MESSLER JR, R. W. *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG–Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2011. <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf> Acesso em: 6 nov. 2021.

NORRISH, J. *Advanced welding processes: technologies and process control*. Cambridge: Woodhead, 2006.

OLIVEIRA JÚNIOR, C. A. **Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2013.

SALES, A. M.; WESTIN, A. M.; COLEGROVE, P. *Effect of nitrogen in backing gas on duplex root weld properties of heavy-walled pipe*. **Journal of Materials Processing Technology**, Alemanha, v. 60, n. 5, p. 877-882, 2016.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SHIMODA, K.; WANG, T. C.; TOWNES, C. H. *Further aspects of the theory of the maser*. **Physical Review**, v. 102, p. 1308–1321, 1956.

SHRAVAN, C. N.; RADHIKA, N. H.; KUMAR, D.; SIVASAILAM, B. **A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications**, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2023.

SOEIRO JUNIOR, J. C.; ROCHA, D.B.; BRANDI, S. D. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n.2, p. 176-195, 2013.

SOKOLOV, M. *et al. Laser welding of structural steels: influence of the edge roughness level*. **Optics & Laser Technology**, v. 44, p. 2064–2071, 2012.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânico de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. Ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1982. 286 p.

SSAB TUNNPLAT. **Sheet steel joining handbook: joining of high strength steels**. Sweden: SSAB Tunnplat AB, 2004.

SSAB. **Descrição geral do produto, Strenx 700MC**, 2017. Disponível em: <https://www.ssab.com.br/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=18074E31EF1849578E2979B2EE96F1C1&language=pt-BR>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SSAB. **Strenx® 700MC**. 2021. Disponível em: <https://www.ssab.com.br/products/brands/strenx/products/strenx-700-mc>. Acesso em: 13 maio 2023.

- STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**. 4. ed. London: SpringerVerlag, 2010.
- SVENUNGSSON, J.; CHOQUET, I.; KAPLAN, A. F. H. *Laser welding Process - a review of keyhole welding modelling*. **Physics Procedia**, v. 78, p. 182–191, 2015.
- TAMURA, I.; SEKINE, H.; TANAKA, T.; OUCHI, C. **Thermomechanical processing of high-strength low-alloy steels**. 1. ed. Butterworth-Heinemann, 1988. 248 p.
- VILLANI, P. M.; MODANESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.
- WEMAN, K. **Welding processes handbook**. 2 ed. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.
- WINDOW, A. L.; HOLISTER, G. S. **Strain gauge technology**. 1. ed. London and New York: Elsevier Applied Science, 1982. 356 p.