



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO  
IFPE – CAMPUS CARUARU

**THIAGO DUARTE MOURA ARAÚJO DOS SANTOS**

**Análise de viabilidade do aumento da velocidade de soldagem para a obtenção  
de aumento quantitativo na produção de racks metálicos**

**Caruaru - PE  
2023**

**THIAGO DUARTE MOURA ARAÚJO DOS SANTOS**

**Análise de viabilidade do aumento da velocidade de soldagem para a obtenção de aumento quantitativo na produção de racks metálicos**

Trabalho apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – Campus Caruaru como pré-requisito para obtenção do título de engenheiro mecânico, sob orientação de Fábio José Carvalho França.

**Orientador: Fábio José Carvalho França**

**Caruaru – PE**

**2023**

S237a

Santos, Thiago Duarte Moura Araújo dos

Análise de viabilidade do aumento da velocidade de soldagem para a obtenção de aumento quantitativo na produção de racks metálicos/ Thiago Duarte Moura Araújo dos Santos; orientação de Fábio José Carvalho França. – Caruaru, 2023.

58 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2023.

1. Soldagem. 2. Rack metálico – Produção Industrial. 3. Soldagem – Junta. 4. Soldagem – velocidade. 5. Soldagem – Ensaio. 6. Soldagem – Metalurgia. 7. Soldagem – Processo. 8. Engenharia Mecânica - IFPE. I. França, Fábio José Carvalho. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. III. Trabalho de Conclusão de Curso. IV. Título.

CDD: 671.52

CDU: 621.79

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente ao Senhor Jesus, por ter me dado força, paciência, força de vontade para finalizar esta graduação.

Aos meus avós Vera e Bui, por terem me dado todo suporte financeiro e serem um dos maiores incentivadores para as minhas melhorias de vida e profissional.

À minha mãe Thaís, por nunca me deixar desistir nos momentos mais críticos da minha vida. Amo de forma profunda, muito obrigado por tudo.

À minha irmã Lilianne, por me incentivar a ser melhor sempre, muito obrigado por ser quem é para mim. Sempre nós por nós mesmo.

Aos meus pastores Dom Fred Bastos, Felipe Silva, Saul Silva e Paulo André, por me darem toda cobertura espiritual e me incentivarem a finalizar os meus ciclos para que novas oportunidades surgissem. Muito obrigado por serem referência e suporte, os amo como se fossem meus pais.

Ao meu pai Sérvulo, por todo amor e conselhos visando o meu melhor.

Aos queridos irmãos Ialysson Medeiros, Luann Glauber e Laerty Keverson por dividir, durante 5 anos, não só o lar, mas as suas vidas comigo. Vocês foram muito importantes para que tudo isso acontecesse.

Aos amigos que são como irmãos: Thiago Paz, Rivaldo, Thiago Bezerra, Manoel, Thomás, Carol, Franciely, Mikaely, Yasmin, Túlio e Aryanne por sempre me incentivarem a concluir este trabalho e me proporcionarem momentos ímpares na minha vida.

Ao meu amigo Tiago Santino por todas as caronas entre Vitória e Caruaru.

Aos queridos amigos de graduação Maycon, Lucas, Victor, Acarcio, Cácio, Vinícius, Gernan e Eduardo pelos momentos de confraternização e estudo, sempre visando o melhor uns para os outros. Sempre os levarei comigo.

À Amanda Xavier e família, por me ajudar com toda paciência a finalizar a minha graduação.

À Eurocontainers Brasil, nas pessoas de Adolpho Mafra e Romero Mafra, pelo fornecimento do material para o estudo e por me fazer ser um homem e um profissional melhor.

Aos amigos Erick Willams e Alexandre Urquiza por sempre me incentivarem a concluir este presente trabalho e por sempre exigirem de mim o melhor que eu possa ser.

Aos companheiros de trabalho Everson, Tamyres, Heitor, Luciano, Pedro, Ramos, Reginaldo, Erivan, Marcelo e Thiago que me ajudam e contribuem para o meu melhor desempenho profissional.

À Alexsandro Moura e Abinaelson Pereira, por ter soldado o material do presente estudo.

À Usiman, na pessoa de Senhor Luiz por ter confeccionado os corpos de prova.

Ao professor Fábio França, por ter aceitado ser meu orientador e fazer com que eu entregasse o melhor trabalho possível.

Ao IFPE, por ter dado toda a estrutura de ensino para a minha educação e dos meus amigos.

## RESUMO

Os racks metálicos industriais são utilizados com a finalidade de armazenar, movimentar, transportar produtos e suportar grandes cargas, como também, na organização da linha de produção, pois oferece um armazenamento de forma prática com uma compactação espacial, pelo fato de haver a possibilidade de um armazenamento vertical, permitindo que haja uma área disponível maior no campo de trabalho. As juntas soldadas têm uma função crucial neste ramo industrial, pelo fato de que as confecções desses racks metálicos dependem, em larga escala, do processo de soldagem, muito porque é um processo rápido, econômico e seguro, em comparação com outros processos de fabricação. O presente trabalho visa estudar a viabilidade do aumento da velocidade de soldagem para obter ganhos produtivos em relação a quantidade de racks produzidos, sem que haja perdas substanciais de acordo com a aplicação da metodologia da Eurocontainers Brasil, no que tange as análises de tensão e deformação do material estudado para as necessidades apresentadas. O presente trabalho propõe uma análise comparativa em relação ao aporte térmico contido em um processo de soldagem de uma junta soldada, através de análises de caracterizações das propriedades mecânicas, via ensaios de tração e dobramento das uniões estudadas. Concluiu-se que a soldagem com velocidade normal está adequada pelos parâmetros das normas e devem continuar a ser utilizados, porém, a melhoria sugerida através deste aumento de velocidade, por mais que apresente um resultado satisfatório em relação às metodologias de projeto e fabricação, ainda necessita de padronização de procedimentos de soldagem para assim atender em sua totalidade aos requisitos da norma ASTM A36.

**Palavras – chave:** Racks metálicos industriais; Juntas soldadas; Soldagem.

## ABSTRACT

Industrial metal racks are used for the purpose of storing, moving, transporting products and supporting large loads, as well as in organizing the production line, as they offer practical storage with spatial compaction, due to the fact that there is the possibility of vertical storage, allowing for a larger area available in the work field. Welded joints have a crucial function in this industrial sector, due to the fact that the manufacture of these metal racks depends, on a large scale, on the welding process, largely because it is a fast, economical and safe process, compared to other manufacturing processes. The present work aims to study the feasibility of increasing welding speed to obtain productive gains in relation to the quantity of racks produced, without substantial losses in accordance with the application of the Eurocontainers Brasil methodology, regarding stress and deformation analyses. of the material studied for the needs presented. The present work proposes a comparative analysis in relation to the thermal input contained in a welding process of a welded joint, through analyzes of characterizations of the mechanical properties, via tensile and bending tests of the joints studied. It was concluded that welding at normal speed is adequate according to the standard parameters and should continue to be used, however, the improvement suggested through this increase in speed, even though it presents a satisfactory result in relation to design and manufacturing methodologies, still requires standardization of welding procedures to fully meet the requirements of the ASTM A36 standard.

**Keywords:** Industrial metal racks; Welded joints; Welding.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Tipos de juntas soldadas .....	15
<b>Figura 2</b> - Principais tipos de chanfros utilizados .....	16
<b>Figura 3</b> - Regiões de uma junta soldada .....	16
<b>Figura 4</b> - Esquema de distribuição das sub-regiões da ZTA de acordo com a temperatura.....	18
<b>Figura 5</b> - Esquema das regiões de um arco elétrico.....	20
<b>Figura 6</b> - Processo de soldagem GMAW.....	21
<b>Figura 7</b> - Esquema dos modos de transferência metálica. ....	23
<b>Figura 8</b> - Esquema do ciclo térmico com o passar do tempo no processo de soldagem.....	28
<b>Figura 9</b> - Diagrama tensão x deformação.....	29
<b>Figura 10</b> - Área reduzida da seção de aplicação da força em um ensaio de tração. ....	30
<b>Figura 11</b> - Desenho técnico do corpo de prova do ensaio de tração. ....	31
<b>Figura 12</b> - Esquema de retirada dos corpos de prova soldados para o ensaio de tração na posição (a) transversal e na posição (b) longitudinal.....	32
<b>Figura 13</b> - Esquema do ensaio de dobramento. ....	32
<b>Figura 14</b> – Passo a passo .....	34
<b>Figura 15</b> - Esquema do passo a passo do ensaio de líquido penetrante. (a) limpeza da superfície; (b) aplicação do líquido penetrante; (c) remoção do excesso do penetrante; (d) aplicação do revelador; (e) revelação das discontinuidades e inspeção.....	36
<b>Figura 16</b> - Materiais utilizados para o ensaio de líquido penetrante. (a) Líquido penetrante Metal Chek VP-30; (b) Revelador Metal Chek D-70. ....	39
<b>Figura 17</b> - Máquina de solda GMAW.....	39
<b>Figura 18</b> - Extração dos corpos de prova do metalon. ....	40
<b>Figura 19</b> - Dimensional do corpo de prova para o ensaio de tração.....	41
<b>Figura 20</b> - Corpos de provas confeccionados para o ensaio de tração. ....	41
<b>Figura 21</b> - Máquina de tração utilizada para os ensaios de tração e dobramento. ....	42
<b>Figura 22</b> - Ferramentas utilizadas para o ensaio de dobramento.....	43
<b>Figura 23</b> - Aplicação do líquido penetrante.....	43

<b>Figura 24</b> - Aplicação do revelador. (a) corpo de prova ensaiado para solda normal; (b) corpo de prova extraído da soldagem rápida; (c) corpo de prova ensaiado para a soldagem rápida.....	44
<b>Figura 25</b> - Curva Tensão x Deformação para a soldagem normal. ....	47
<b>Figura 26</b> - Curva Tensão x Deformação para a soldagem rápida. ....	48
<b>Figura 27</b> - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.....	49
<b>Figura 28</b> - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.....	49
<b>Figura 29</b> - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.....	50
<b>Figura 30</b> - Corpos de prova CP 20 e CP 50. ....	50
<b>Figura 31</b> - Ensaio de tração realizado nos corpos de prova para a soldagem normal. ....	51
<b>Figura 32</b> - Ensaio de tração realizado nos corpos de prova para a soldagem rápida. ....	51
<b>Figura 33</b> - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas normais.....	53
<b>Figura 34</b> - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas normais.....	54
<b>Figura 35</b> - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas rápidas. ....	54
<b>Figura 36</b> - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas rápidas. ....	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição química (% de peso) do aço ASTM A-36. ....	14
<b>Tabela 2</b> - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36.....	14
<b>Tabela 3</b> - Composição química dos arames de solda de aço carbono. ....	24
<b>Tabela 4</b> - Tipos de arames de solda de aço carbono de acordo com os gases de proteção. ....	25
<b>Tabela 5</b> - Faixa ótima de corrente de soldagem em relação ao diâmetro do arame de solda para a transferência metálica de curto-circuito. ....	26
<b>Tabela 6</b> - Propriedades mecânicas do arame de solda AWS ER70S-6.....	37
<b>Tabela 7</b> - Resultados de velocidade e energia de soldagem para velocidade normal. ....	45
<b>Tabela 8</b> - Resultados de velocidade e energia de soldagem para velocidade rápida. ....	45
<b>Tabela 9</b> - Valores e médias obtidos no ensaio de tração para a soldagem normal. ....	46
<b>Tabela 10</b> - Valores e médias obtidos no ensaio de tração para a soldagem rápida. ....	47
<b>Tabela 11</b> - Tensões máximas para o ensaio de dobramento das soldagens normais.....	52
<b>Tabela 12</b> - Tensões máximas para o ensaio de dobramento das soldagens rápidas. ....	52

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Objetivos Gerais</b> .....	12
<b>1.2 Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
<b>2.1 Aço estrutural ASTM-A36</b> .....	13
<b>2.2 Soldagem</b> .....	14
2.2.1 Juntas soldadas .....	15
2.2.1.1 Chanfros para a realização das juntas soldadas .....	15
2.2.2 Partes que compõem uma junta soldada.....	16
2.2.2.1 Zona Fundida.....	17
2.2.2.2 Zona de ligação .....	17
2.2.2.3 Zona termicamente afetada .....	17
2.2.3 Classificação dos processos de soldagem .....	19
<b>2.3 Processos de soldagem ao arco elétrico</b> .....	19
2.2.3    Processo de soldagem GMAW.....	20
2.2.3.1 Gases de proteção do processo GMAW.....	22
2.2.3.3 Tipos de arame de solda no processo GMAW.....	24
2.2.3.4 Principais variáveis de soldagem.....	25
<b>2.4 Metalurgia da soldagem</b> .....	26
2.4.1    Energia de soldagem.....	26
2.4.2    Ciclos térmicos da soldagem .....	27
<b>2.5 Ensaio de tração</b> .....	28
2.5.1    Corpos de prova para o ensaio de tração .....	30
<b>2.6 Ensaio de dobramento</b> .....	32
2.6.1    Corpo de prova do ensaio de dobramento.....	33
<b>2.7 Ensaio de líquido penetrante</b> .....	33
2.7.1    Limpeza da superfície.....	34
2.7.2    Aplicação e características do penetrante .....	34
2.7.3    Remoção de excesso de penetrante .....	35
2.7.4    Aplicação do revelador .....	35
2.7.5    Inspeção .....	35
2.7.6    Outras características.....	36
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	37
<b>3.1 Materiais utilizados para a realização do estudo</b> .....	37
3.1.1    Metal de base .....	37

3.1.2 Arame de solda .....	37
3.1.3 Gás de proteção .....	38
3.1.4 Líquido penetrante .....	38
<b>3.2 Métodos utilizados para a realização do estudo .....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Procedimento de soldagem .....	39
3.2.2 Extração dos corpos de prova .....	40
3.2.3 Ensaio de tração .....	41
3.2.4 Ensaio de dobramento .....	42
3.2.5 Ensaio de líquido penetrante .....	43
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
4.1 Energia de soldagem .....	44
4.2 Ensaio de tração .....	46
4.3 Ensaio de dobramento.....	52
4.4 Ensaio de líquido penetrante .....	55
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>

## **INTRODUÇÃO**

Os racks metálicos industriais são utilizados com a finalidade de armazenar, movimentar, transportar produtos e suportar grandes cargas, como também, na organização da linha de produção, pois oferece um armazenamento de forma prática com uma compactação espacial, pelo fato de haver a possibilidade de um armazenamento vertical, permitindo que haja uma área disponível maior no campo de trabalho.

Os fabricantes de racks conseguem projetar uma gama de modelos, para diversos tipos de aplicações. Esses armazenadores industriais podem ser de vários tipos: desmontáveis, de encaixe, fixos, para grandes cargas, pequenas cargas, para materiais longos, para materiais curtos, entre outros. Estas fabricações também podem ser feitas de forma específica, ou seja, para uma determinada aplicação há a fabricação de um rack específico.

Para a fabricação destes racks metálicos, um dos aços mais utilizados, pelo fato de, também, ser muito empregado nas construções estruturais em geral, é o aço ASTM A-36. Ele apresenta boa usinabilidade, boa soldabilidade, no que tange os processos mais tradicionais e usuais nas indústrias.

As juntas soldadas têm uma função crucial neste ramo industrial, pelo fato de que as confecções desses racks metálicos dependem, em larga escala, do processo de soldagem, muito porque é uma ferramenta rápida, econômica e segura, podendo entregar uma produção relativamente rápida em relação a outros procedimentos.

O presente trabalho visa estudar a viabilidade do aumento da velocidade de soldagem para obter ganhos produtivos em relação a quantidade de racks produzidos, sem que haja perdas substanciais de acordo com a aplicação da metodologia da Eurocontainers Brasil, no que tange as análises de tensão e deformação do material estudado para as necessidades apresentadas.

### **1.1 Objetivos Gerais**

O presente trabalho propõe uma análise comparativa em relação ao aporte térmico contido em um processo de soldagem de uma junta soldada, fazendo

análises de caracterizações das propriedades mecânicas das uniões estudadas, visando o ganho produtivo.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Obter diferentes juntas soldadas por processo de soldagem GMAW tendo como fator variável a velocidade de soldagem em um processo semiautomático;
- Realizar ensaios mecânicos destrutivos de tração e dobramento nas juntas soldadas;
- Análise comparativa entre os dados obtidos sobre a viabilidade das melhorias sugeridas;

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Aço estrutural ASTM-A36**

Segundo Colpaert (2008), o ASTM A-36 é uma representação clássica de um aço estrutural de grãos finos. Este material é ferrítico, com baixa liga e baixo carbono ligado ao manganês, com teores de fósforo e enxofre controlados, alta resistência e baixa liga (ARBL).

Suas propriedades para a indústria são bastante proveitosas, pois, ele apresenta boa soldabilidade e boa usinabilidade e boa tenacidade.

O aço ASTM A-36 é muito utilizado na indústria, com uma vasta variedade de formas e tipos. São, muitas vezes, encontrados como chapas, tubos, perfis, barras, afim de atender os diversos ramos de demanda.

São aplicados em navios de médio e grande porte, plataformas marítimas, galpões metálicos etc.

As tabelas abaixo mostram, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas do aço ASTM A-36 estabelecida por norma.

**Tabela 1** - Composição química (% de peso) do aço ASTM A-36.

<b>Composição Química [%]</b>					
C máx	Mn	P máx	S máx	Si máx	Cu mín
0,28	0,60 - 0,90	0,04	0,05	0,4	0,2

Fonte: ASTM A-36 (2008).

**Tabela 2** - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
Limite de escoamento (LE)	250 MPa
Limite de Ruptura (LR)	400 - 550 Mpa
Alongamento	23%

Fonte: ASTM A-36 (2008).

## 2.2 Soldagem

A soldagem faz parte de um dos grupos que compõe o quesito de união de materiais. Segundo Marques, Mondenesi e Bracarense (2011), existem dois grupos principais que são responsáveis pelas uniões de materiais: os que são baseados em forças macroscópicas (parafusagem e rebitagem, por exemplo) e em forças microscópicas (soldagem, brasagem e colagem).

Este processo de soldagem é um dos mais utilizados no meio industrial quando o assunto é junção de materiais pelo fato de ser seguro, rápido e econômico.

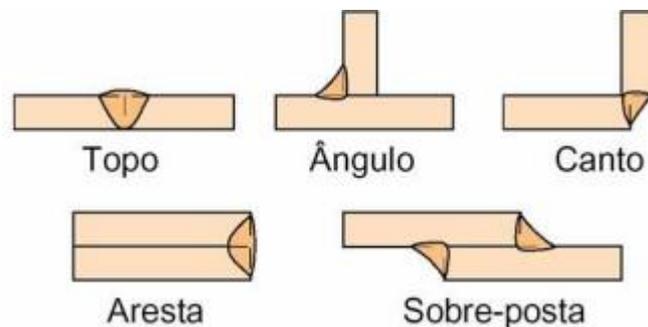
De acordo com Brandi (2004), a definição de soldagem é: “o processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão”.

Este processo é muito utilizado na edificação de navios, aeronaves, como também de portões, grades, componentes eletrônicos, petrolíferos, etc.

### 2.2.1 Juntas soldadas

As juntas soldadas são as regiões em que será realizada a união dos materiais pelo processo de soldagem. Há vários tipos de juntas. São elas: juntas de topo, de canto, de aresta, em ângulo, ou sobreposta. A figura 1 mostra exemplos destas juntas citadas acima.

**Figura 1-** Tipos de juntas soldadas

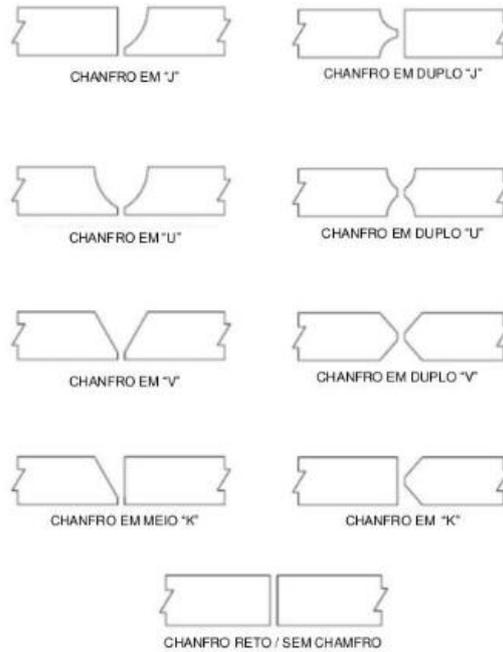


Fonte: Mondenesi (2001).

#### 2.2.1.1 Chanfros para a realização das juntas soldadas

De acordo com a peças a serem soldadas, em relação às dimensões, deverá ser levado em consideração a utilização de chanfros, que é uma preparação na superfície da peça a ser unida e que determina o espaço para conter o material depositado (MARQUES *et al.*, 2011). Os principais tipos de chanfro estão apresentados na figura 2.

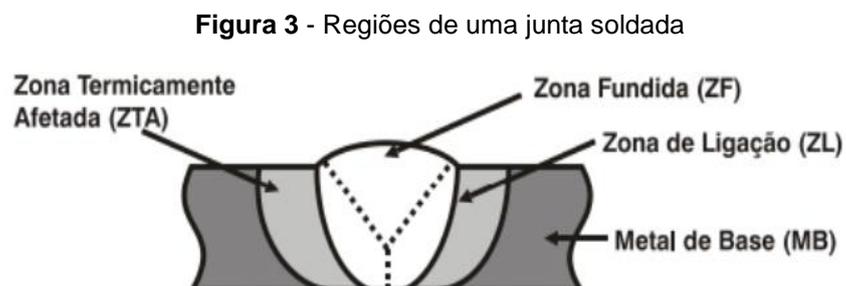
**Figura 2 - Principais tipos de chanfros utilizados**



Fonte: CIG SOLDAS.

### 2.2.2 Partes que compõem uma junta soldada

Uma junta soldada é composta por quatro regiões: zona fundida, zona de ligação, zona termicamente afetada e metal de base. A figura 3 mostra um esquema de uma junta soldada cortada de forma transversal, apontando a divisão destas regiões citadas acima



Fonte: FURTADO (2019).

### 2.2.2.1 Zona Fundida

A zona fundida é constituída pela junção entre o metal de base e o metal de adição, onde a temperatura de pico ultrapassa a temperatura de fusão. Essa região pode ser composta com um ou vários cordões de solda, de acordo com Marques (2011). Segundo Rodrigues (2010), nessa região ocorre um fenômeno chamado “crescimento competitivo dos grãos”, porque, durante a solidificação, os grãos tendem a crescer na direção do gradiente máximo de temperatura.

Segundo Lima Júnior (2013), podemos encontrar na zona fundida dos aços C-Mn e de baixas ligas as seguintes microestruturas: ferrita primária (PF), ferrita com segunda fase (FS), ferrita acicular (AF), martensita (M), como também, a micro fase austenita-martensita (A-M).

### 2.2.2.2 Zona de ligação

É a região que limita a poça de fusão, que está na fase líquida, e o metal de base, que é sólido. É nesta zona em que se dá o início do crescimento dos grãos que foram parcialmente fundidos, formando o metal de solda (LIMA JÚNIOR, 2013).

### 2.2.2.3 Zona termicamente afetada

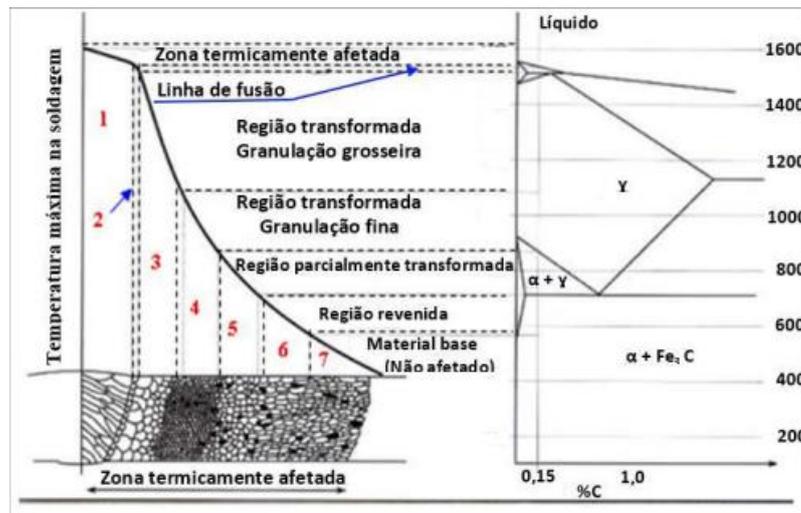
A Zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal de base que, pela sua proximidade com a zona fundida, sofreu mudanças microestruturais por conta dos ciclos térmicos decorridos do processo de soldagem (DINIZ, 2017).

Fundamentalmente, para haver a caracterização da ZTA, é necessário ser definido qual o tipo do material a ser soldado, como também o processo de soldagem ao qual este material será submetido, por conta dos efeitos do ciclo térmico (MARQUES *et al.*, 2011).

Nos aços transformáveis, que tem a capacidade de sofrer transformações no estado sólido, os ciclos térmicos podem afetar diretamente algumas propriedades mecânicas, podendo ocasionar no surgimento de trincas nesta junta soldada (DINIZ, 2017).

Na ZTA, existem algumas sub-regiões às quais serão apresentadas na figura 4:

**Figura 4** - Esquema de distribuição das sub-regiões da ZTA de acordo com a temperatura.



Fonte: Rodrigues (2010).

Na região transformada granulação grosseira, ou região de granulação grosseira, é a sub-região do metal de base mais próxima do metal que foi adicionado e está entre uma temperatura em cerca de 1200°C e a temperatura de fusão, que é 1500°C. Esta sub-região é caracterizada pelo crescimento do grão. (MARQUES *et al.*, 2011)

Na região transformada granulação fina, ou região de normalização, é uma das sub-regiões que está mais afastada em relação à anterior e tem uma faixa de temperatura entre 900°C e 1200°C. Tem características similares aos aços que sofreram o processo de normalização e apresentam uma granulação mais fina (LIMA JÚNIOR, 2013)

Na região parcialmente transformada, ou região intercrítica e na região revenida, ou subcrítica, segundo Rodrigues (2010), ocorre em uma faixa de temperatura de 700°C a 950°C e, dependendo da velocidade de resfriamento, a austenita poderá se transformar em perlita, bainita ou martensita maclada, podendo

apresentar propriedades mecânicas inferiores ao metal de base (LIMA JÚNIOR, 2013).

### 2.2.3 Classificação dos processos de soldagem

Segundo Lima Júnior (2013), os processos de soldagem podem ser classificados em:

- Manual: Toda operação de soldagem é realizada e controlada manualmente pelo soldador;
- Semiautomática: Processo possui controle automático da alimentação do metal de adição, mas com controle manual do posicionamento da tocha e deslocamento;
- Mecanizada: Processo possui controle automático da alimentação do metal de adição e do deslocamento do cabeçote de soldagem pelo equipamento, mas com o posicionamento, acionamento e supervisão da operação realizada por um operador;
- Automática: Processo de soldagem com controle automático através da utilização de sensores e possibilidades de programações. Podem ser divididos em duas classes: execução de operações específicas de soldagem e sistemas com robôs que permitem flexibilidade para alterações em termos de operações através de programações.

## 2.3 Processos de soldagem ao arco elétrico

Para Brandi (2004), define-se o arco elétrico como: “a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido”.

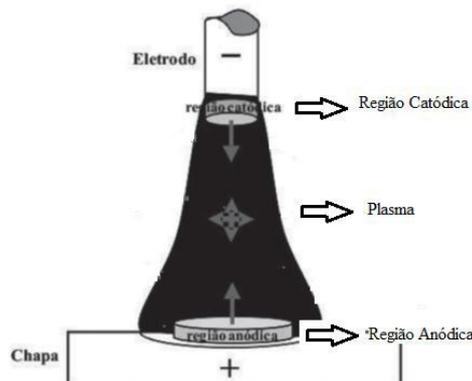
O arco elétrico é uma das fontes de calor mais utilizadas nas operações de soldagem por fusão de materiais metálicos, porque apresenta uma ótima combinação de características, como concentração adequada de energia de fusão

localizada no metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo e tem uma baixa nocividade à saúde do operador.

Para que haja a abertura do arco elétrico para a soldagem, são necessários o aquecimento e o bombardeamento de elétrons do gás que circunda o eletrodo, tendo a fonte de energia a posse de uma diferença de potencial característica, o que favorece a abertura do arco (BRANDI, 2004).

De acordo com Marques *et al.* (2011), o arco elétrico é formado por três regiões distintas: região catódica, região anódica e plasma. A diferença de potencial entre cátodo e ânodo, que, também, são caracterizadas por um elevado gradiente de temperatura e de eletricidade, geram a região do plasma. A imagem a seguir mostra o esquema das três regiões citadas.

**Figura 5** - Esquema das regiões de um arco elétrico.



Fonte: Lima Júnior (2013).

### 2.2.3 Processo de soldagem GMAW

Segundo Fortes (2005), na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), que é, também, conhecida como MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*) é estabelecido um arco elétrico entre o metal de base e um arame de solda, que é um consumível, fazendo com que este elemento de desgaste imediato seja fundido, se tornando o metal que constitui a solda, alimentando a poça de fusão, sendo, este metal de solda, protegido da

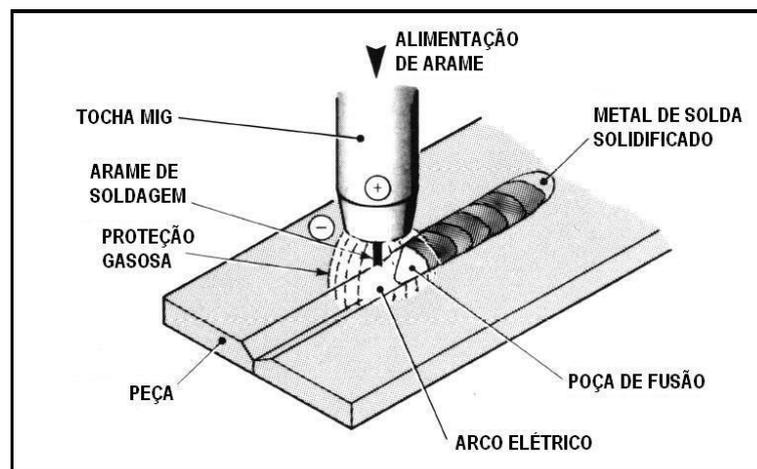
atmosfera por um fluxo de gás inerte ou ativo. A figura 6 mostra o esquema de soldagem GMAW:

O processo de soldagem MIG/MAG proporciona diversas vantagens para a aplicação tanto de baixa como de alta produção.

Comparada com outros tipos de soldagem, elas apresentam os seguintes benefícios, segundo Fortes (2005):

- A soldagem pode ser executada em qualquer posição;
- Não há necessidade de remover as escórias;
- Alta taxa de deposição do metal de solda;
- Tempo de soldagem é menor;
- Maior aproveitamento dos consumíveis utilizados;

**Figura 6** - Processo de soldagem GMAW.



Fonte: ESAB (2005).

O processo GMAW pode ser utilizado nos modos automático, semi-automático e mecanizado.

De acordo com Almeida (2004), por conta da ação do gás de proteção, o processo MIG é mais adequado à soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e suas devidas ligas, magnésio e suas ligas, cobre e suas ligas. Já o processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo

carbono e aços de baixa liga, podendo ser usado nos três modos de soldagem citados acima.

Os parâmetros que são levados em consideração para que a soldagem MIG/MAG seja realizada são: corrente de soldagem, tensão do arco, polaridade de soldagem, extensão do eletrodo, posição do eletrodo, tipo de junta a ser soldada, diâmetro do eletrodo, características do gás de proteção e velocidade de soldagem (HERMANS, 1999).

### *2.2.3.1 Gases de proteção do processo GMAW*

Os gases de proteção são de suma importância para o processo de soldagem, porque eles impedem que a atmosfera como um todo contamine a poça de solda. Esta contaminação vem através do nitrogênio, que reduz a ductilidade e tenacidade, deixando, também, o metal de solda com porosidade. O oxigênio da atmosfera também causa porosidade, assim, como os outros elementos (FORTES, 2005).

Para evitar contaminação da poça de fusão, os três gases que são mais utilizados são: Argônio, Hélio, dióxido de carbono. Eles podem ser aplicados puros ou combinados com outros elementos, como oxigênio.

As propriedades dos gases de proteção que afetam o processo de soldagem são: propriedades térmicas a temperaturas elevadas, reação química do gás com os vários elementos no metal de base e no arame de solda e o efeito de cada gás no modo de transferência de metal.

Segundo Fortes (2005), para que o arco seja mantido estável para a soldagem utilizando o gás hélio ou o dióxido de carbono, é preciso elevar a tensão de solda, por conta da condutividade térmica destes gases serem maior do que a do argônio.

### 2.2.3.2 Transferências metálicas no processo GMAW

O processo MIG/MAG são compostos por três técnicas de modo de transferência de metal: curto-circuito, globular, aerossol e corrente pulsada.

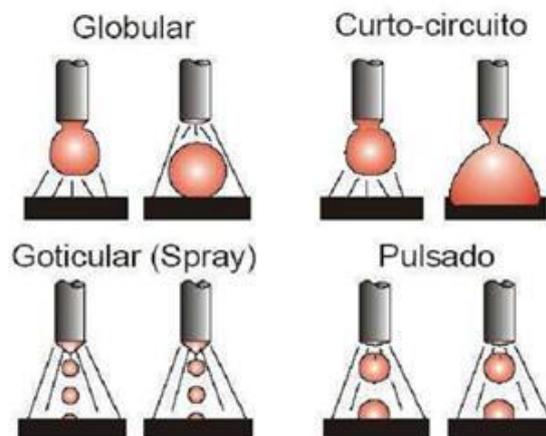
A transferência de metal por curto-circuito se dá quando há, como o próprio nome já diz, um curto-circuito e isso acontece quando o arame de solda toca o metal de base, causando uma diferença de potencial (FORTES, 2005).

A transferência globular se dá em níveis de tensão mais elevados em relação ao curto-circuito. As gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão, principalmente pela ação da força gravitacional (QUITES, 2002).

A transferência por aerossol ou spray é de forma similar a transferência globular, o que muda é que a corrente elétrica utilizada no processo aumenta, fazendo com que os glóbulos se transformem em aerossol (MODONESI *et al.*, 1994).

A transferência por corrente pulsada é o modo de transferência que é controlada através da forma da onda da corrente de soldagem, sendo ela, pulsada. A figura 7 mostra o esquema dos modos de transferência metálica.

**Figura 7** - Esquema dos modos de transferência metálica.



Fonte: Barra (2003).

### 2.2.3.3 Tipos de arame de solda no processo GMAW

Segundo Fortes (2005), algo a ser considerado ao realizar o processo de soldagem é a seleção correta do arame de solda. Existem cinco fatores que influenciam na escolha correta do metal de adição no processo MIG/MAG:

- A composição química do metal de base;
- As propriedades mecânicas do metal de base;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço que será realizado;
- O tipo de junta que será soldada.

Para realizar um processo de soldagem, cujo metal de adição é de aço carbono, há uma adição de elementos de liga para controle da desoxidação da poça de fusão e ajudar na determinação das propriedades mecânicas da solda.

A soldagem com arames de solda sólidos ou maciços não apresentam escórias e a produção da poça de fusão é totalmente dependente do gás de proteção (Barbedo, 2011).

De acordo com as tabelas 3 e 4, estão dispostos os tipos de arames de solda de aço carbono, juntamente com os seus respectivos gases de proteção.

**Tabela 3** - Composição química dos arames de solda de aço carbono.

AWS	ESAB	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-5	---	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-7	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	---	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor							

Fonte: Fortes (2005).

**Tabela 4** - Tipos de arames de solda de aço carbono de acordo com os gases de proteção.

AWS	ESAB	Gás de Proteção	Corrente e polaridade	L.R. (mín.) (MPa)	L.E. (mín.) (MPa)	Al. (mín.) (%)	Impacto ChV (J)		
ER70S-2	65	Al 1,5% O <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>1</sup>	CC+	480	400	22	27J @ -29 °C		
ER70S-3	82						27J @ 0 °C		
ER70S-4	85	não requerido							
ER70S-5	---	CO <sub>2</sub> <sup>1</sup>				480	400	17	27J @ -29 °C
ER70S-6	OK 12.51								22
ER70S-7	87HP								
ER80S-D2	83 ou Hi84	não especificado				não especificado	---	---	17
ER70S-G	---		22	não requerido					

Fonte: Fortes (2005).

No presente trabalho, será utilizado o arame de solda AWS ER70S-6, com o dióxido de carbono como gás de proteção.

#### 2.2.3.4 Principais variáveis de soldagem

As variáveis que estão envolvidas no processo de soldagem determinam quais vão ser as características finais do cordão de solda, ou seja, impactam diretamente nas dimensões, acabamento e propriedades mecânicas. Acabam, também, definindo a possibilidade da ocorrência de alguns tipos de defeitos, como trincas, poros, mordeduras, entre outros (BARBEDO, 2011).

Estas variáveis consistem em: corrente de soldagem, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, extensão livre do eletrodo, a proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame.

A corrente de soldagem tem uma influência direta na taxa de deposição, no modo de transferência metálica, e nas características geométricas do cordão. Logo, a escolha da corrente de soldagem correta dependerá da espessura da chapa que será soldada. Há, também, a influência na velocidade de alimentação do arame de solda, pois, quanto maior a corrente, maior será a velocidade de alimentação do arame de solda.

De acordo com Fortes (2005), para o tipo de transferência metálica de curto-circuito, a faixa ótima de corrente de soldagem, de acordo com o diâmetro do arame é representado na tabela 5.

**Tabela 5** - Faixa ótima de corrente de soldagem em relação ao diâmetro do arame de solda para a transferência metálica de curto-circuito.

Diâmetro do arame		Corrente de soldagem (A)	
pol (")	mm	Mínima	Máxima
0,030	0,76	50	150
0,035	0,89	75	175
0,045	1,10	100	225

Fonte: Fortes (2005).

A tensão de soldagem afeta, de forma direta, duas coisas: o modo de transferência metálica e a geometria do cordão. Influencia, também, no perfil do cordão, na profundidade da penetração e na quantidade de respingos (GOMES, 2006).

A velocidade de soldagem, segundo Miranda (1999), representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta. A deposição de material é menor quando há uma alta velocidade e a penetração da solda, inicialmente, aumenta, mas com o aumento da velocidade, diminui. Se a velocidade de soldagem for menor, haverá uma maior deposição de material por unidade de comprimento, porém, a dimensão do cordão de solda aumenta, fazendo com que o calor do arco atue no poço de solda e não no metal de base, diminuindo a penetração.

A extensão livre do eletrodo é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato e a peça de trabalho. Caso haja uma distância grande, o gás de proteção não atuará da maneira correta, causando uma deficiência no processo de soldagem. Se houver uma taxa de alimentação fixa no arame de solda, qualquer aumento desta distância, haverá uma diminuição de corrente fornecida pela máquina de solda (BARBEDO, 2011).

## 2.4 Metalurgia da soldagem

### 2.4.1 Energia de soldagem

A energia de soldagem, no sistema metalúrgico, é de grande importância, porque, alinhada com as características geométricas da junta, é determinante para

os ciclos térmicos impostos ao material, podendo gerar transformações na microestrutura e no comportamento da solda aplicada (ZEEMANN, 2003).

Segundo Lima Júnior (2013), quanto mais alta for a energia de soldagem aplicada na junta, maior será a quantidade de calor transferido, como também, será maior a poça de fusão e a zona termicamente afetada será mais alargada.

Caso haja, por outro lado, uma baixa energia de soldagem, ocorrerá falta de penetração e elevadas velocidades de resfriamento, o que pode ser prejudicial, a depender da aplicação.

A energia de soldagem ou aporte térmico é dada pela equação (1):

$$E = \eta \frac{V.I}{v} \quad (1)$$

Sendo:

$E$ : Energia de soldagem [J/mm]

$\eta$ : Rendimento do arco

$V$ : Tensão de soldagem [V]

$I$ : Corrente de soldagem [A]

$u$ : Velocidade de soldagem [mm/s]

De acordo com Quites (2002), o rendimento da soldagem depende do processo empregado, sendo o valor utilizado  $\eta=0,78$  para o GMAW.

#### 2.4.2 Ciclos térmicos da soldagem

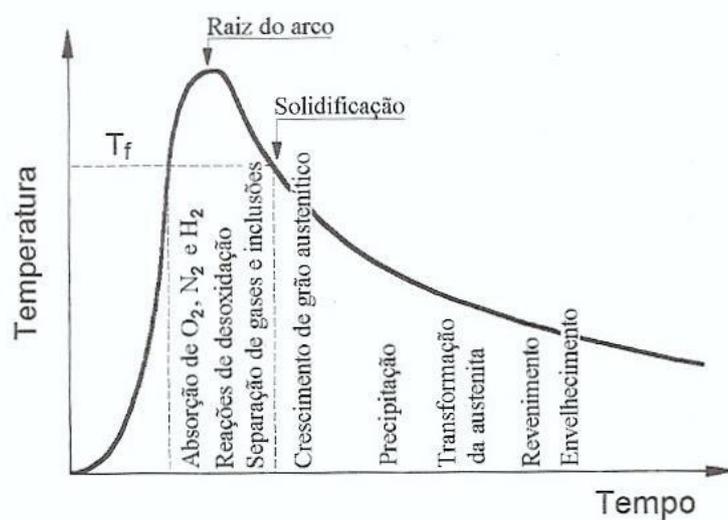
Segundo Bracarense (2009), o ciclo térmico gera uma alta influência sobre as reações e alterações estruturais ocorridas em determinadas regiões do material.

O ciclo térmico é definido como a curva que relaciona a variação da temperatura durante a soldagem com o passar do tempo, ou seja, é a representação das temperaturas obtidas pelo processo de soldagem em cada instante do processo. Há alguns fatores que são capazes de estabelecer diferenças na forma de um ciclo térmico. São elas: tipos de processo, se o material será pré-aquecido ou pós-aquecido ou não, aporte térmico e soldagem multipasses (RODRIGUES, 2011).

Este conjunto de temperaturas são influenciadas pelas seguintes grandezas: intensidade da fonte de calor, propriedades físicas do material, temperatura inicial do material, velocidade de deslocamento da fonte de energia e as coordenadas do ponto onde se deseja conhecer o valor da temperatura (RODRIGUES, 2011).

A figura 8 mostra o esquema de como funciona a variação da temperatura e o que ocorre neste ciclo.

**Figura 8** - Esquema do ciclo térmico com o passar do tempo no processo de soldagem.



Fonte: Bracarense (2009).

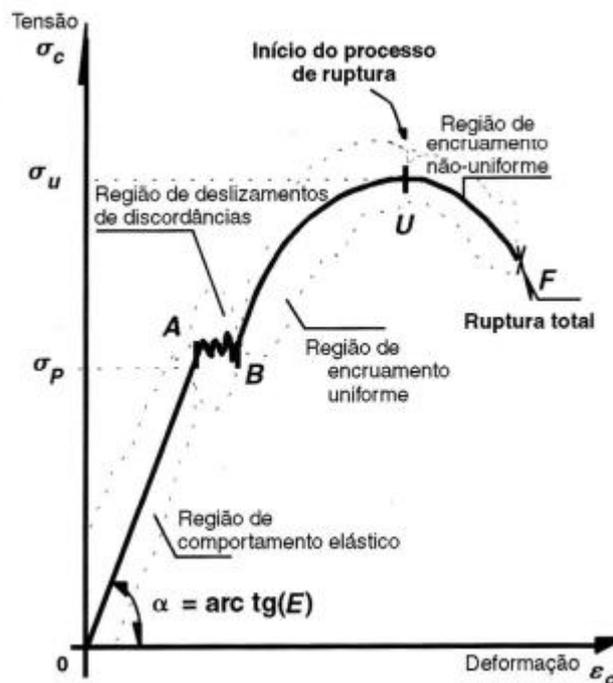
## 2.5 Ensaio de tração

Segundo a norma ASTM E8/E8M (ASTM – *American Society for Testing and Materials*), que é utilizada como padrão, o ensaio de tração tem por objetivo o conhecimento da capacidade de um material suportar solicitações de esforços de alongamento em uma direção uniaxial de uma maneira constante ao longo do tempo até a sua ruptura, sendo extraído deste ensaio o comportamento quantitativo das propriedades mecânicas, como: resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, ductilidade, etc.

O comportamento gráfico deste ensaio é conhecido como diagrama tensão x deformação, que será apresentado na figura 9.

De acordo com Lima Júnior (2013), nos ensaios de corpo de prova soldados, apenas o limite de resistência a tração é válido, porque está sendo tensionado simultaneamente dois materiais de propriedades diferentes, que são o metal de base e o metal de solda.

**Figura 9** - Diagrama tensão x deformação.



Fonte: Garcia (2000).

Onde o eixo das ordenadas ( $\sigma$ ) representa as tensões e o eixo das abscissas ( $\epsilon$ ) representa os alongamentos.

- $\sigma_p$  representa a tensão aplicada sobre o material na região elástica;
- A região AB representa a transição da região elástica para a região plástica, onde ocorre as discordâncias no material;
- A região BU representa o desenvolvimento da região plástica, que, com o aumento da tensão, o material vai apresentando um encruamento uniforme;
- O ponto U é representado pelo ponto de tensão máxima  $\sigma_u$ , onde se inicia a ruptura do material;

- A região UF representa o desenvolvimento da ruptura do material, onde a seção do corpo de prova que será rompido sofre uma diminuição de área, conforme a figura 10;
- O ponto F representa o momento em que o material sofre a ruptura total;
- O ângulo  $\alpha$  representa o módulo de Elasticidade do material, que é calculado pela variação da tensão na região plástica dividido pela variação da deformação na mesma região.

**Figura 10** - Área reduzida da seção de aplicação da força em um ensaio de tração.

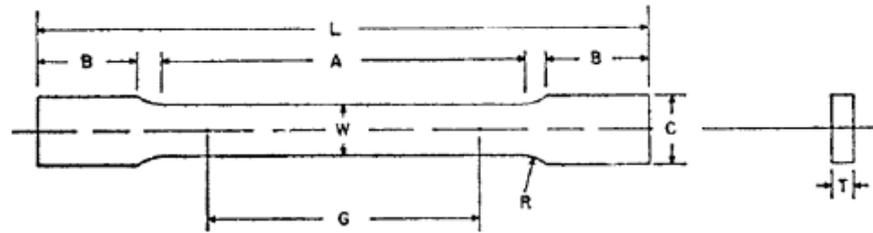


Fonte: Autor.

### 2.5.1 Corpos de prova para o ensaio de tração

Para a confecção dos corpos de prova, deverá ser respeitada a norma ASTM E8/E8M. A figura 11 mostra o desenho que deverá ser confeccionado o corpo de prova para ser ensaiado.

**Figura 11** - Desenho técnico do corpo de prova do ensaio de tração.



Fonte: ASTM E8/E8M.

Onde:

L: Largura total

B: Comprimento da seção de aderência

A: Comprimento da seção reduzida

C: Largura da seção de aderência

R: Raio do filete

T: Espessura do corpo de prova

G: Comprimento de Gage

Segundo a norma técnica da SABESP-NTS 034 (1999), a resistência à tração da solda, compreendendo a zona de fusão de cada seção deve ser igual ou maior que a mínima resistência à tração especificada pelo metal de base.

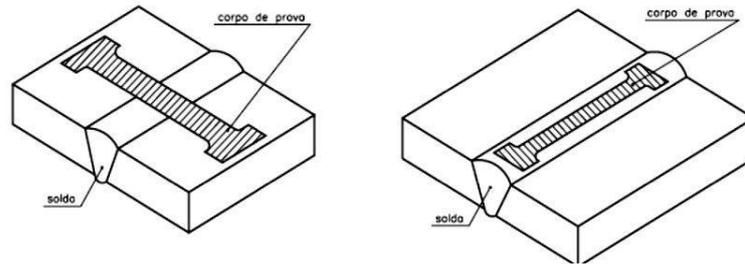
Se a seção romper fora da zona de fusão, tendo a resistência à tração igual ou superior ao metal de base, o teste da seção será aprovado.

Caso a seção romper dentro da zona de fusão ou na solda e a resistência à tração for maior ou igual a do metal de base, o ensaio será aprovado.

Se a seção se romper na solda ou na zona de fusão, com resistência abaixo da especificada para o metal de base, a seção será reprovada.

Os corpos de prova, ainda, podem ser retirados tanto no sentido transversal como no sentido longitudinal, assim como mostra a figura 12.

**Figura 12-** Esquema de retirada dos corpos de prova soldados para o ensaio de tração na posição (a) transversal e na posição (b) longitudinal.



Fonte: AWS (2003).

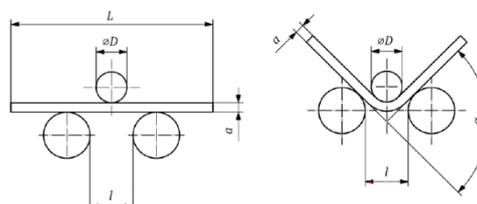
## 2.6 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento consiste no dobramento de uma seção do componente de uma junta soldada. Este ensaio indica, de forma qualitativa, a ductilidade do material após a soldagem e se houve, de fato, a união conforme norma. É utilizado como um controle de qualidade da junta soldada, sendo possível verificar problemas na solda, como trincas, mordeduras, falta de fusão, etc.

De acordo com a norma ISO 7438, um corpo de prova retangular e transversal à solda é extraído da chapa soldada. O ensaio de dobramento consiste em submeter um corpo de prova de seção transversal redonda, retangular ou poligonal à deformação plástica, sem alterar a direção do carregamento, até um determinado ângulo de curvatura.

Os eixos de duas pernas do corpo de prova permanecem em um plano perpendicular ao eixo de dobramento. No caso de uma curva de 180°, as duas superfícies laterais podem, dependendo dos requisitos do padrão do produto, ficar planas, uma contra a outra ou podem ser paralelas a uma distância especificada. A figura 13 mostra o esquema do ensaio de dobramento.

**Figura 13 -** Esquema do ensaio de dobramento.



Fonte: ISO 7438 (2016).

Sendo:

L: comprimento do corpo de prova (mm)

D: diâmetro do molde (mm)

a: espessura do corpo de prova (mm)

l: distância entre os suportes (mm)

$\alpha$ : ângulo de dobramento (graus)

A distância entre os suportes é calculada através da equação 2:

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2} \quad (2)$$

### 2.6.1 Corpo de prova do ensaio de dobramento

Os corpos de prova podem ser retirados de seções retangulares, diametrais ou poligonais. Serão utilizados neste presente trabalho os corpos de prova com as seguintes dimensões: 200 x 20 x 2,65 mm, de seção retangular.

## 2.7 Ensaio de líquido penetrante

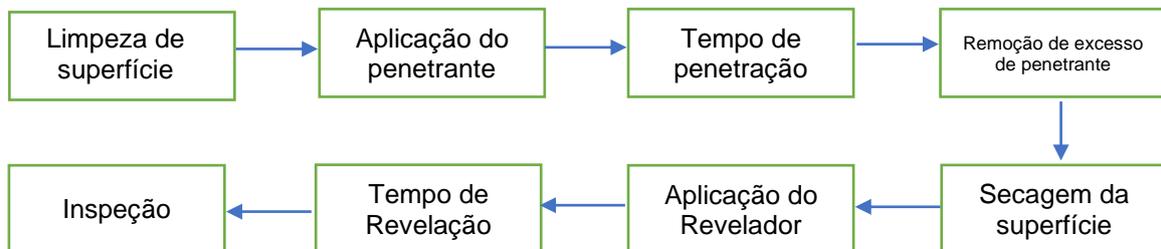
O Ensaio de Líquido Penetrante está na categoria de ensaios não destrutivos, segundo a ABENDI (2018) – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos, que são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos para detectar defeitos, falhas e descontinuidades, visando livrar de acidentes os meios industrial e social.

Garcia (2017) descreve que o ensaio por líquidos penetrantes baseia-se na penetração de líquidos em trincas e rachaduras superficiais de peças por ação do

fenômeno da capilaridade, e é aplicado, portanto, na verificação da existência de trincas superficiais difíceis de serem observadas a olho nu.

Antes do teste com penetrante, a superfície a ser inspecionada deve estar limpa e seca. O penetrante adequado é então aplicado à área de teste e entra em descontinuidades abertas na superfície. Após a penetração adequada passado o tempo, o excesso de penetrante é removido da superfície e o revelador é aplicado. O revelador absorve o penetrante que entrou e permanece nas descontinuidades e pode dar uma indicação melhorada claramente visível da descontinuidade (ISO 3452-1, 2013). O passo a passo deste processo está descrito abaixo, que está, também, demonstrada na figura14:

**Figura 14 – Passo a passo**



Fonte: Adaptado de ISO 3452-1 (2013).

### 2.7.1 Limpeza da superfície

A superfície deve estar limpa de todas as impurezas possíveis, para que não haja impeditivos na penetração do líquido e, posteriormente, na identificação das inconformidades.

### 2.7.2 Aplicação e características do penetrante

O penetrante, líquido utilizado para fazer a penetração nas possíveis descontinuidades da peça, têm algumas características importantes: deve ter alta

molhabilidade e viscosidade considerável, para que ele consiga se aderir à peça (ANDREUCCI, 2010).

Existem dois tipos de líquido penetrante utilizados: o de contraste de cor, geralmente na cor vermelha, que reage na luz natural ou o fluorescente, que reage na luz negra.

### 2.7.3 Remoção de excesso de penetrante

O excesso do penetrante é removido com alguns produtos adequados, de acordo com o tipo do líquido utilizado. De acordo com a norma ISO 3452-1(2021), são eles: água, emulsificante lipofílico, solvente, emulsificante hidrofílico, água e solvente em solução.

### 2.7.4 Aplicação do revelador

É aplicado um filme uniforme de revelador sobre a superfície, usualmente é na cor branca. Ele age absorvendo o penetrante das discontinuidades, revelando-as (ANDREUCCI, 2010).

### 2.7.5 Inspeção

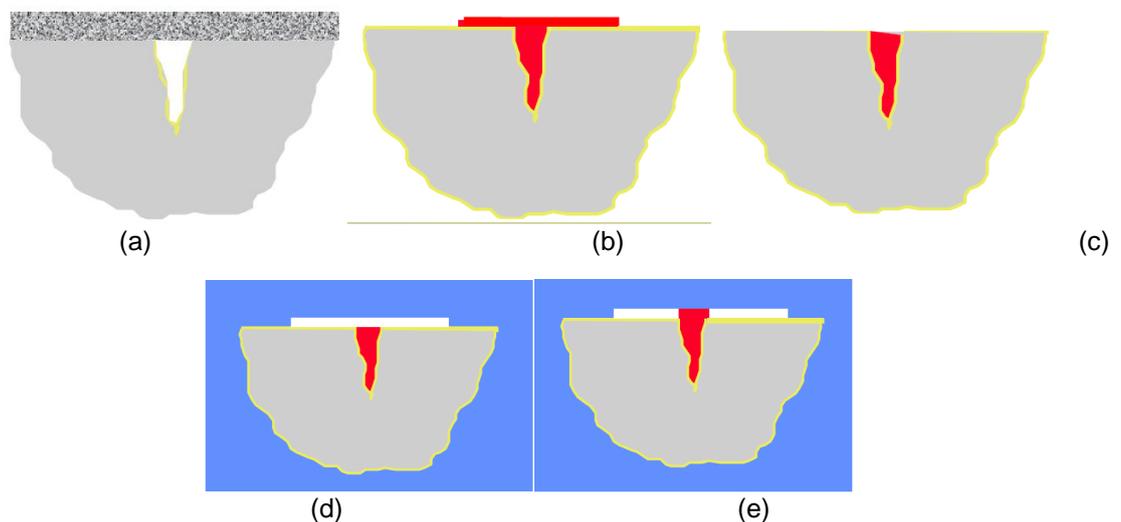
Fase final, onde são observadas e avaliadas as revelações através do ensaio realizado.

### 2.7.6 Outras características

O ensaio de líquido penetrante é capaz de ensaiar peças de diversos tamanhos e de variadas formas, podendo, também, detectar discontinuidades muito pequenas. É um ensaio relativamente barato e rápido, que não requer equipamentos sofisticados para a sua execução. Este ensaio pode ser realizado em qualquer etapa de manutenção, tanto no início, como no fim, para detectar se o serviço realizado está conforme (ANDREUCCI, 2013).

Segundo Andreucci (2013), esta técnica apresenta algumas desvantagens: a superfície ensaiada não pode ser porosa ou absorvente, para que não haja remoção completa do penetrante, mascarando o resultado; as técnicas convencionais devem ser aplicadas numa faixa de temperatura entre 10°C e 52°C (ISO 3452-1, 2013); não é possível medir, através deste ensaio, a profundidade das discontinuidades.

**Figura 15** - Esquema do passo a passo do ensaio de líquido penetrante. (a) limpeza da superfície; (b) aplicação do líquido penetrante; (c) remoção do excesso do penetrante; (d) aplicação do revelador; (e) revelação das discontinuidades e inspeção



Fonte: Andreucci (2010).

### 3 METODOLOGIA

Para poder realizar este estudo, será utilizado dois conjuntos de tubo metalon 50 x 50 x 2,65 mm, sendo separados em 3 juntas soldadas em cada conjunto, soldados pelo processo GMAW, mais especificamente o processo MAG, com arame de solda AWS ER70S-6.

#### 3.1 Materiais utilizados para a realização do estudo

##### 3.1.1 Metal de base

O metal de base utilizado foi o aço ASTM A36, que é amplamente utilizado na fabricação de estruturas metálicas, por sua boa soldabilidade e usinabilidade.

Este aço apresenta Limite mínimo de escoamento de 250 MPa, Limite de escoamento entre 400 e 550 MPa e alongamento de 23%.

##### 3.1.2 Arame de solda

O arame de solda utilizado, assim como foi falado na seção 2.2.1.3, será o AWS ER70S-6, que é um arame sólido cobreado e tem como elementos de liga manganês e silício. A tabela 6 aponta as suas propriedades mecânicas.

**Tabela 6** - Propriedades mecânicas do arame de solda AWS ER70S-6.

Propriedades Mecânicas	Sem tratamento
Limite de Escoamento (MPa)	430
Resistência à Tração (MPa)	530
Alongamento (%)	30
Impacto Charpy 20°C (J)	110

Impacto Charpy -20°C (J)	70
Bitola do arame (mm)	1.0
Tensão de soldagem (V)	18 – 32
Corrente de soldagem (A)	80 – 300

Fonte: Catálogo ESAB.

As informações contidas na tabela 6 são referentes ao processo de soldagem utilizando dióxido de carbono 100% como gás de proteção no processo de soldagem.

### 3.1.3 Gás de proteção

O gás de proteção utilizado será o dióxido de carbono 100%.

### 3.1.4 Líquido penetrante

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o kit da Metal Chek para líquido penetrante, de acordo com a figura 16.

O líquido penetrante Metal Chek VP-30 é um dos mais usuais, de contraste de cor, tendo uma coloração vermelha e a forma de remoção de excesso deste líquido é a base de água.

O revelador Metal Chek D-70 é formado por finas partículas brancas, tendo sua utilização através da pulverização sobre a peça estudada.

**Figura 16** - Materiais utilizados para o ensaio de líquido penetrante. (a) Líquido penetrante Metal Chek VP-30; (b) Revelador Metal Chek D-70.



Fonte: Site Metal Chek.

## 3.2 Métodos utilizados para a realização do estudo

### 3.2.1 Procedimento de soldagem

A soldagem dos dois conjuntos de amostras foi de topo sem chanfro, na posição plana em uma única direção.

A máquina de solda utilizada foi ESAB Smashweld 408 topflex, como mostra a figura 17, com tensão 18,0 V e corrente 116 A, para ambas as juntas.

A velocidade do arame de solda utilizada no processo foi de 5 m/min, a vazão e a pressão do gás de proteção são 14 L/min e 64 PSI, respectivamente.

**Figura 17** - Máquina de solda GMAW.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 Extração dos corpos de prova

Os corpos de prova, para a realização dos ensaios de tração e dobramento, foram extraídos de forma transversal, como mostra o esquema mostrado na figura 11, utilizando esmerilhadeira e disco de corte, desprezando as extremidades do material original, em um primeiro momento, de acordo com a figura 18.

**Figura 18** - Extração dos corpos de prova do metalon.



Fonte: Autor

Logo após serem extraídos dos metalons, os corpos de prova passaram, ainda, por um corte de guilhotina, para que chegassem nas medidas solicitadas na norma. Após este processo, os corpos a serem ensaiados no teste de dobramento ficaram prontos. Os designados para o ensaio de tração ainda passaram por um processo de usinagem para serem obtidas as dimensões requeridas em norma.

### 3.2.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova, para a realização deste ensaio, foram definidos segundo a norma ASTM E8/E8M. Do material original, foram extraídos dez corpos de prova de cada conjunto de junta soldada.

Dos dez corpos de prova, foram utilizados três de cada conjunto para testes preliminares na máquina de tração, restando, então, sete de cada agrupamento.

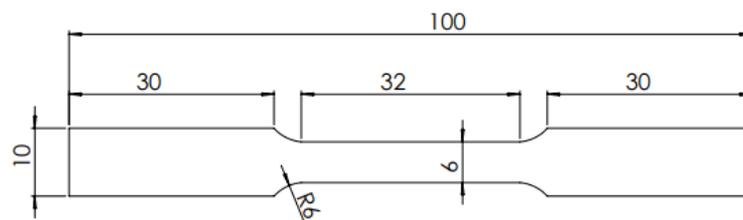
As figuras 19 e 20 mostram as dimensões que foram utilizadas e os corpos de prova que foram confeccionados, segundo o desenho e norma. O comprimento de Gage (G)= 25mm.

**Figura 19** - Dimensional do corpo de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Autor.

**Figura 20** - Corpos de provas confeccionados para o ensaio de tração.



Fonte: Autor.

A máquina de tração utilizada foi a Arotec Time, de modelo WDW-50E, como mostra a figura 21

**Figura 21** - Máquina de tração utilizada para os ensaios de tração e dobramento.



Fonte: Autor.

### 3.2.4 Ensaio de dobramento

Para realizar esse ensaio, foram extraídos 10 corpos de prova com as dimensões 200 X 20 X 2,65 mm.

A fim de calcular a distância entre os suportes, conforme pede a ISO 7438, colheu-se as informações acerca do diâmetro do molde utilizado para o ensaio, conforme a figura 22. Seguem, abaixo, as cotas necessárias para a utilização da equação (2):

$D = 10 \text{ mm};$

$a = 2,65 \text{ mm};$

Logo,  $l = 19,30 \text{ mm}$

Após obter a distância entre os suportes, foram realizados os testes até serem atingidas as maiores tensões de dobra que os corpos de prova suportariam.

**Figura 22** - Ferramentas utilizadas para o ensaio de dobramento.



Fonte: Autor.

### 3.2.5 Ensaio de líquido penetrante

As peças utilizadas para o ensaio foram: 02 amostras aleatórias do ensaio de dobramento para a soldagem rápida, 02 amostras aleatórias do ensaio de dobramento para a soldagem normal e 03 corpos de prova confeccionados para este ensaio.

Assim como descrito na seção 2.7, a primeira etapa realizada foi a limpeza da peça. Utilizou-se uma esmerilhadeira com escova de aço rotativa para esta ação.

Após isso, foi aplicado o líquido penetrante nas peças que estavam sendo ensaiadas, assim como mostra a figura 23.

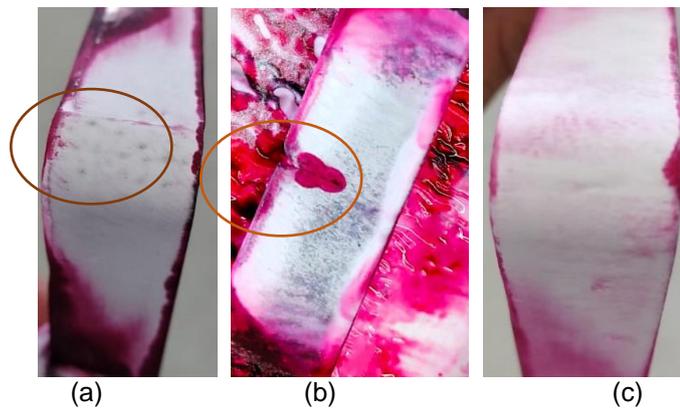
**Figura 23** - Aplicação do líquido penetrante



Fonte: Autor.

O tempo de penetração utilizado foi de 60 minutos, seguindo as recomendações da Metal Chek. Após esse tempo, houve a remoção do excesso com água e, ao final da secagem dele foi aplicado o revelador. Ao esperar 15 minutos, os resultados do ensaio começaram a aparecer, como mostra a figura 24.

**Figura 24** - Aplicação do revelador. (a) corpo de prova ensaiado para solda normal; (b) corpo de prova extraído da soldagem rápida; (c) corpo de prova ensaiado para a soldagem rápida



Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Energia de soldagem

Para calcular as energias de soldagens que foram aplicadas nos processos, precisa-se calcular, primeiramente, as velocidades que foram utilizadas pelo operador, que está disposta na equação (3), por meio do tempo que foi cronometrado no ato da soldagem e, logo após, utilizar a equação (1).

As velocidades de soldagem são calculadas através da equação a seguir:

$$V = \frac{D}{t} \quad (3),$$

Onde:

- D é o comprimento da solda;
- t é o tempo de soldagem;

Nas tabelas 7 e 8, temos os resultados obtidos através das equações (3) e (1), para a soldagem normal e rápida, respectivamente, onde, de t1 a t12 representam as amostras retiradas dos conjuntos das juntas soldadas.

E, ao compararmos as duas médias de energia de soldagem, vemos que o aporte térmico para as amostras normais são 42,41% maiores do que as amostras mais rápidas.

**Tabela 7** - Resultados de velocidade e energia de soldagem para velocidade normal.

	Tempo (s)	Velocidade (mm/s)	Energia (J/mm)
t1	9,64	5,19	314,00
t2	8,76	5,71	285,34
t3	8,84	5,66	287,94
t4	8,44	5,92	274,91
t5	9,21	5,43	300,00
t6	9,71	5,15	316,28
t7	9,16	5,46	298,37
t8	9,24	5,41	300,97
t9	9,33	5,36	303,90
t10	10,17	4,92	331,27
t11	9,49	5,27	309,12
t12	8,84	5,66	287,94
Média	8,53	5,86	277,85

Fonte: Autor.

**Tabela 8** - Resultados de velocidade e energia de soldagem para velocidade rápida.

	Tempo (s)	Velocidade (mm/s)	Energia (J/mm)
t1	5,08	9,84	165,47
t2	7,23	6,92	235,50
t3	6,1	8,20	198,69
t4	5,97	8,38	194,46
t5	5,35	9,35	174,26
t6	6,03	8,29	196,41
t7	5,38	9,29	175,24

t8	5,73	8,73	186,64
t9	6,4	7,81	208,47
t10	6,15	8,13	200,32
t11	6,53	7,66	212,70
t12	6,04	8,28	196,74
Média	5,99	8,35	195,11

Fonte: Autor.

## 4.2 Ensaio de tração

Segundo consta na seção 2.1, na tabela 2, os valores para este ensaio em relação ao metal de base são, de acordo com a norma ASTM A-36: Limite de Escoamento mínimo de 250 MPa, Limite de resistência à tração entre 400 MPa e 550 MPa e alongamento base de 23%, para corpos de prova com comprimento útil de 50mm.

Nas tabelas 9 e 10, estão dispostos os valores para os limites de ruptura, limites de escoamento, deformações e alongamento para as soldagens normal e rápida, respectivamente:

**Tabela 9** - Valores e médias obtidos no ensaio de tração para a soldagem normal.

Amostra	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Deformação (mm/mm)	Alongamento (mm)
CP1	422,14	341,38	0,2420	6,05
CP2	413,33	315,22	0,3563	8,91
CP3	417,11	298,62	0,3842	9,61
CP4	385,66	275,97	0,3531	8,83
CP5	398,24	306,92	0,3117	7,79
CP6	403,52	266,16	0,4123	10,31
CP7	397,74	240,50	0,4168	10,42
Média	405,39	292,11	0,3538	8,84

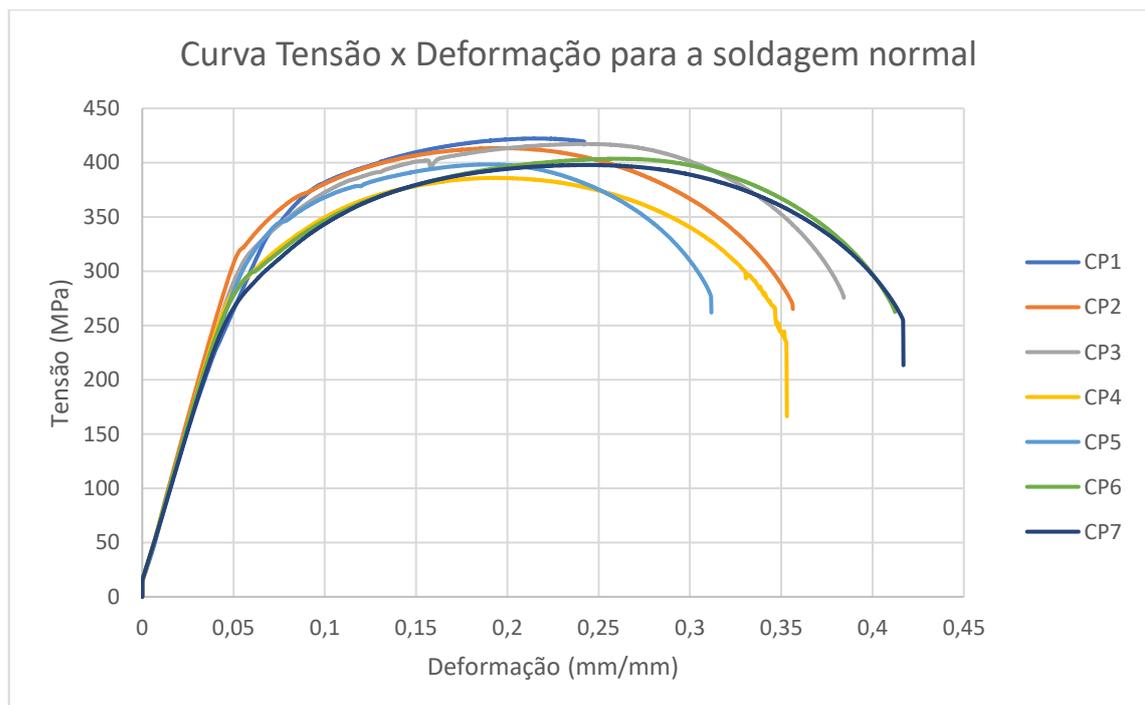
Fonte: Autor.

**Tabela 10** - Valores e médias obtidos no ensaio de tração para a soldagem rápida.

Amostra	Limite de Ruptura (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Deformação (mm/mm)	Alongamento (mm)
CP10	384,40	295,97	0,2286	5,72
CP20	411,82	321,51	0,1778	4,45
CP30	386,42	255,09	0,1171	2,93
CP40	349,43	288,55	0,2619	6,55
CP50	411,57	225,91	0,3493	8,73
CP60	407,55	238,49	0,1096	2,74
CP70	334,34	239,50	0,1625	4,06
Média	383,65	266,43	0,2010	5,02

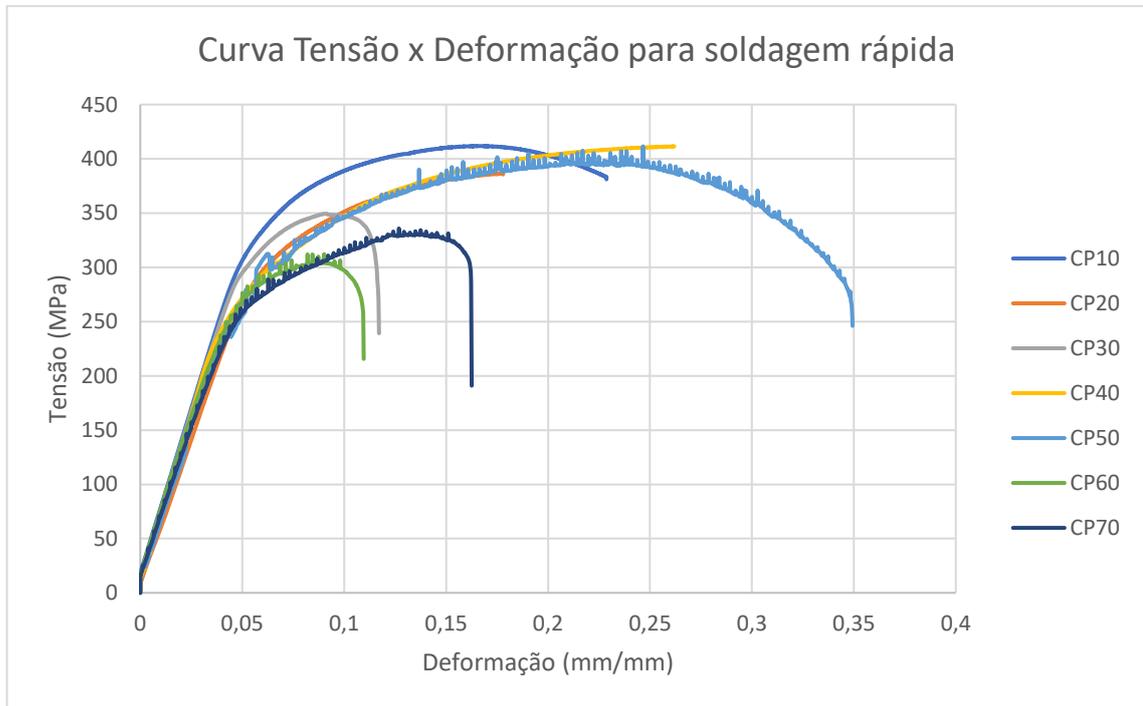
Fonte: Autor.

A partir dos dados obtidos, plotamos os gráficos para cada uma das soldagens realizadas. As figuras 25 e 26 mostram os comportamentos das curvas referentes às soldas normal e rápida, respectivamente:

**Figura 25** - Curva Tensão x Deformação para a soldagem normal.

Fonte: Autor.

**Figura 26** - Curva Tensão x Deformação para a soldagem rápida.



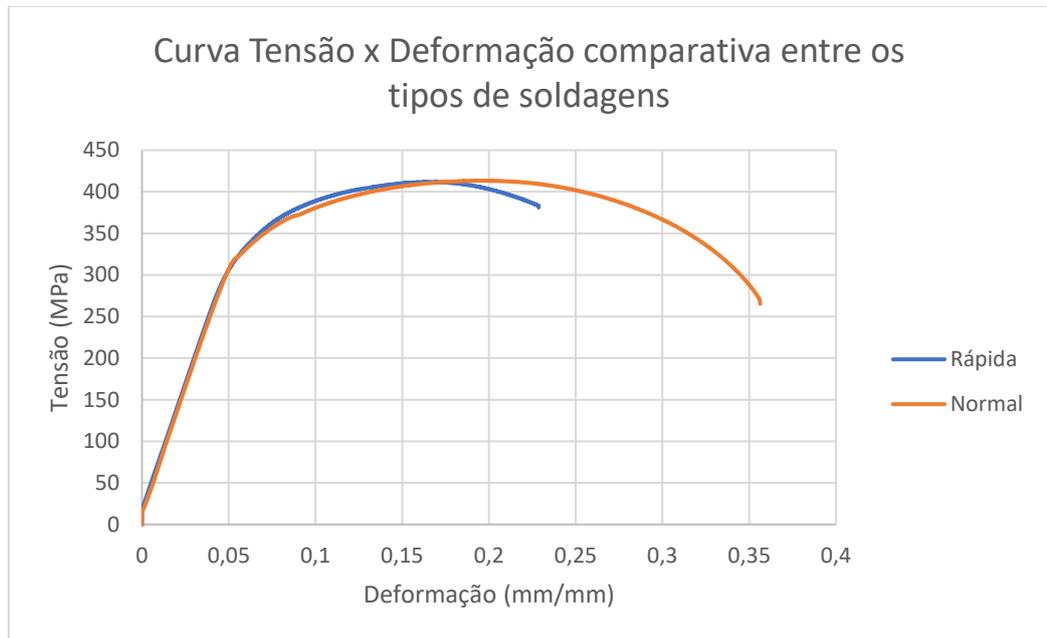
Fonte: Autor.

Diante dos resultados obtidos, foram feitas as seguintes análises:

- A média do Limite de Ruptura da soldagem normal é 5,67% maior do que a rápida;
- A média do Limite de Escoamento da soldagem normal é 9,64% maior do que a rápida;
- O alongamento dos corpos de prova da soldagem normal é 76,1% maior.

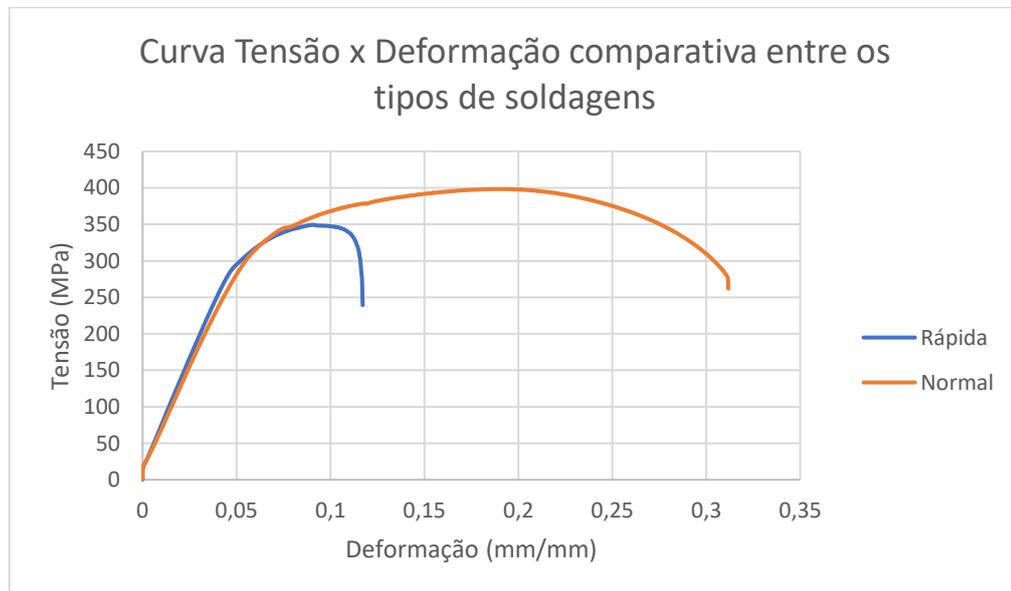
Para realizar a comparação entre as soldagens de velocidade rápidas e normais, com o intuito de mostrar as diferenças de comportamentos em relação aos limites de ruptura entre eles e alongamento máximo obtido no ensaio, foram plotados os gráficos apresentados nas figuras 27, 28 e 29, comparando os corpos de prova CP10 e CP2, CP30 e CP5 e CP50 e CP7, respectivamente.

**Figura 27** - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.



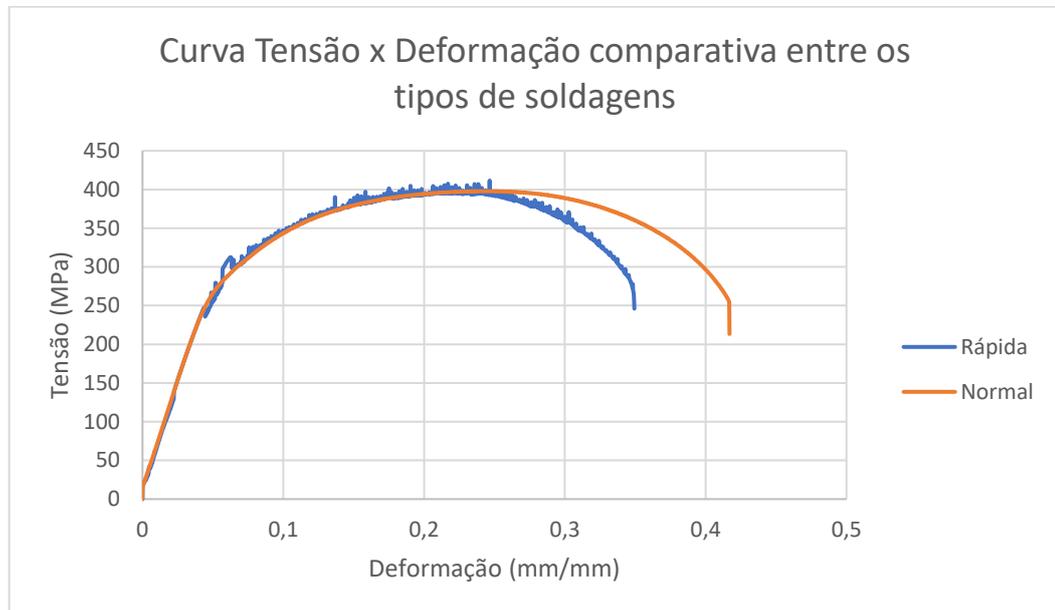
Fonte: Autor.

**Figura 28** - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.



Fonte: Autor.

**Figura 29** - Curva Tensão x deformação comparativa entre os tipos de soldagem.



Fonte: Autor.

Ao comparar os resultados obtidos com os valores fornecidos pela norma ASTM A36, os corpos de prova da soldagem normal foram aprovados, visto que eles romperam no metal de base.

Já para a soldagem rápida, os corpos de prova CP20 e CP50 romperam fora da solda, como mostra a figura 30. As demais romperam na região soldada e, apenas o CP60, apresentou Tensão de ruptura acima da norma.

**Figura 30** - Corpos de prova CP 20 e CP 50.



Fonte: Autor.

As discontinuidades apresentadas nos gráficos para a soldagem rápida devem ser, provavelmente, por conta das irregularidades microestruturais na solda,

por conta da velocidade empregada com parâmetros de soldagem abaixo do que é utilizado usualmente pelos operadores que realizaram as soldas para este estudo.

Assim como foi falado na seção 2.5.1, para que os corpos de prova sejam aprovados, é necessário que eles rompam fora da região soldada. Caso haja o rompimento na solda, os limites de ruptura deverão ser iguais ou maiores que os do metal de base. Com isso, os resultados obtidos acima demonstram que as amostras para velocidade de soldagem normal estão aprovadas. Já os para soldagem rápida estão reprovadas. As figuras 31 e 32 mostram alguns corpos de provas rompidos.

**Figura 31** - Ensaio de tração realizado nos corpos de prova para a soldagem normal.



Fonte: Autor.

**Figura 32** - Ensaio de tração realizado nos corpos de prova para a soldagem rápida.



Fonte: Autor.

Em relação às tensões requeridas no âmbito de aplicação deste material, que tem como tensão máxima admissível para validação de projeto e fabricação de 100

MPa, ou seja, é trabalhado com um coeficiente de segurança em relação ao limite de escoamento, 250 MPa, de 2,5. Logo, para as condições metodológicas do solicitante do estudo, todos os corpos de prova que foram ensaiados atendem às demandas.

### 4.3 Ensaio de dobramento

A fim de descobrir possíveis defeitos de soldagem, como fissuras, inclusões e porosidades nas juntas soldadas e as tensões máximas para os produtos que sofrem ação de uma força aplicada em balanço, obtiveram-se os resultados mostrados nas tabelas 11 e 12 e as figuras 33, 34, 35 e 36 relativas aos corpos de provas ensaiados.

**Tabela 11** - Tensões máximas para o ensaio de dobramento das soldagens normais.

Amostra	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	3,012	189,43
2	4,644	292,08
3	3,824	240,50
4	3,572	224,65
5	3,556	223,65
6	3,684	231,70
7	4,788	301,13
8	4,14	260,38
9	5,096	320,50
10	2,984	187,67
Média	3,93	247,17

Fonte: Autor.

**Tabela 12** - Tensões máximas para o ensaio de dobramento das soldagens rápidas.

Amostra	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	3,168	199,25
2	3,152	198,24
3	3,528	221,89

4	3,844	241,76
5	4,02	252,83
6	3,296	207,30
7	1,936	121,76
8	3,556	223,65
9	4,024	253,08
10	3,508	220,63
Média	3,4032	214,04

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos, as tensões máximas atingidas pelos corpos de prova ensaiados com soldagem normais são, em média, 15,48% maiores do que os conjuntos soldados mais rápido.

Assim como foi falado na seção anterior, o limite de tensão admissível é de 100 MPa, tornando os corpos de prova com um resultado satisfatório, para as aplicações em campo, de acordo com as metodologias de projeto.

Após os testes, os corpos de prova para as soldagens mais rápidas apresentaram rompimentos em sua estrutura, assim como mostra as figuras 28 e 29. Já os corpos de prova para as soldagens normais apresentaram uma resistência maior, sem que houvesse os aparecimentos das macros trincas.

**Figura 33** - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas normais.



Fonte: Autor.

**Figura 34** - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas normais.



Fonte: Autor.

**Figura 35** - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas rápidas.



Fonte: Autor.

**Figura 36** - Ensaio de dobramento para os corpos de prova das soldas rápidas.



Fonte: Autor.

#### 4.4 Ensaio de líquido penetrante

De acordo com a figura 24 (a) na seção 3.2.5, analisou-se que, os corpos de prova com a soldagem normal que passara pelo ensaio de dobramento e foi submetido ao ensaio de Líquido Penetrante, apresentou descontinuidades aparentes na sua superfície. A amostra da soldagem rápida que foi ensaiada apenas com o presente experimento, figura 24 (b), apresenta, também, descontinuidades, constando que há falta de fusão exposta. O corpo de prova de soldagem rápida, figura 24 (c), não apresenta descontinuidades aparentes na superfície do material.

### 5. CONCLUSÃO

Para o processo de soldagem utilizado, GMAW, tendo as soldas realizadas variando apenas a velocidade e todos os outros parâmetros sendo mantidos constantes, a fim de se ter uma diminuição de aporte térmico e ganho na quantidade de produtos soldados, obtivemos as seguintes respostas com este presente estudo:

- A energia de soldagem para a velocidade de solda normal é 42,41% maior do que a mais rápida;

Porém:

- As tensões de ruptura por tração diminuíram quase 6% de média;
- O alongamento das juntas soldadas diminuiu cerca de 76% em média;
- As tensões máximas de flexão diminuíram cerca de 15% em média;

As juntas soldadas em velocidade rápida se rompem com mais facilidade, expondo o produto, como um todo, a manutenções corretivas mais frequentes ao longo do tempo, caso este esteja exposto a tensões muito próximas aos seus limites por muito tempo.

Concluiu-se que a soldagem com velocidade normal está adequada pelos parâmetros das normas e devem continuar a ser utilizados, porém, a melhoria sugerida através deste aumento de velocidade, por mais que apresente um

resultado satisfatório em relação às metodologias de projeto e fabricação, ainda estão aquém da norma ASTM A36.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, H. A. L. Otimização e comparação de modelos matemáticos para as características geométricas de soldas GMAW e FCAW. Monografia. Centro Federal de Educação tecnológica do Pará, Coordenação de Mecânica.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. Test Methods for Evaluation Welded Joints. USA: [s.n.]. 2003. 53p.

ANDREUCCI, R. Líquidos penetrantes. **Abendi**, São Paulo/SP, 2010.

ANDREUCCI, R. Líquidos penetrantes. **Abendi**, São Paulo/SP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO-ABENDI. **Guia ABENDI 2018: Ensaio Não Destrutivo e Inspeção**, 2018.

Disponível em: [http://abendici.org.br/download/GUIA\\_ABENDI\\_2018.pdf](http://abendici.org.br/download/GUIA_ABENDI_2018.pdf). Acessado em ago. de 2023.

**ASTM A36 / 36M**. Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2008. 4p.

**ASTM E8 / 8M**. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2011.

BARRA, S. R. *Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida*. 2003. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BRACARENSE, A. Q., MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. *Soldagem - Fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

BRANDI, W. **Soldagem: processos e metalurgia**. 2004.

Catálogo ESAB. Disponível em: [https://esab.com/br/sam\\_pt/products-solutions/filler-metals-pdf/?filename=mdm-productfamily13282&siteid=sam\\_pt&countryname=BRA&countrylocale=pt-br](https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/filler-metals-pdf/?filename=mdm-productfamily13282&siteid=sam_pt&countryname=BRA&countrylocale=pt-br). Acesso em: 04 de novembro de 2022.

CIG SOLDAS. Backing de Cerâmica. Disponível em: <http://cigsoldas.com.br/backing-de-ceramica/>. Acesso em: 03 de novembro de 2022.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos**. 5ª Edição. Editora

LTC, Rio de Janeiro, 2008.

DINIZ, N. K. S. et al. Estudo da zona fundida de uma junta soldada do aço ASTM A-36 com inonel 625. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12922>. Acesso em 02 de nov. de 2022.

FORTES, C. Apostila MIG/MAG, ESAB BR, 2005.

FURTADO. Regiões presentes numa junta soldada. 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Regioes-presentes-numa-unta-soldada-Fonte-8\\_fig1\\_335635340](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Regioes-presentes-numa-unta-soldada-Fonte-8_fig1_335635340). Acesso em: 03 de novembro de 2022.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaios dos materiais. Ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2000.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A. dos. Ensaios dos materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2017.

GOMES, E. B. *Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi*. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GOVERNO ESTDUAL DO CEARÁ. **Curso Técnico em Mecânica/Processos de Soldagem**. Escola Estadual de Educação Profissional - EEEP Ensino Médio Integrado à Educação Profissional. Disponível em: [https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mecanica\\_processos\\_de\\_soldagem.pdf](https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mecanica_processos_de_soldagem.pdf). Acesso em: 30 de out. de 2022.

HERMANS, M. J. M.; DEN OUDEN, G. Process behavior and stability in short circuiting gas metal arc welding. *Welding Journal*. p.137-141, abr. 1999.

ISO, E. N. 3452-1: 2013 Non-Destructive Testing—Penetrant Testing—Part 1: General Principles. **ISO: Geneva, Switzerland**, 2013.

ISO 7438. Metallic materials – bend test, 2016.

LANCASTER, J. F. *Metallurgy of welding* Abington. William Andrew, 1999.

LIMA JÚNIOR, D. R. de. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW**. Recife, 2013. 81 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/13258>. Acesso em 02 de nov. de 2022.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. **Editora UFMG**, 2011.

METAL CHEK. Líquido penetrante Metal Chek VP-30/ Revelador Metal Chek D-70. Disponível em: <https://metalchek.com.br/loja/liquidopenetrante/metal-check/penetrante/vp-30/>. Acesso em ago. de 2023.

MODENESI, P. J. Soldabilidade dos aços transformados. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012. Disponível em: <https://www.embratecno.com.br/SOLDABILIDADE%20DOS%20A%C3%87OS%20-%20UFMG-1.pdf>. Acesso em 02 de nov. de 2022.

MODENESI, P. J. Apostila – Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico, UFMG, 2001.

MODONESI, P. J., NIXON, J. H. Arc instability phenomena in GMAW. Welding Journal. v. 73, p. 219-224, 1994.

MOYER, N. The evolution of shielding gas. Welding Journal, p. 51-52, 2002.

RODRIGUES, E. R. **Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36. 2010.** 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/181>. Acesso em 02 de nov. de 2022.

**SABESP-NTS 034.** Norma Técnica Interna SABESP NTS 034. 1999. Disponível em: <http://www2.sabesp.com.br/normas/nts/nts034.pdf>. Acesso em: 02/11/2022