

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

**CHARLES PEREIRA ARAUJO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DOS METAIS DE ADIÇÃO AWS A5.18: ER70S-6  
E AWS A5.28: ER110S-G NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS APLICADO EM  
ESTRUTURAS SOLDADAS DE PRENSAS HIDRÁULICAS**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

**CHARLES PEREIRA ARAUJO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DOS METAIS DE ADIÇÃO AWS A5.18: ER70S-6  
E AWS A5.28: ER110S-G NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS APLICADO EM  
ESTRUTURAS SOLDADAS DE Prensas Hidráulicas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de concentração: Processos de  
Fabricação.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez  
Acosta.

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**CHARLES PEREIRA ARAUJO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DOS METAIS DE ADIÇÃO AWS A5.18: ER70S-6  
E AWS A5.28: ER110S-G NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS APLICADO EM  
ESTRUTURAS SOLDADAS DE Prensas Hidráulicas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de concentração: Processos de  
Fabricação.

**Aprovado em: 26/06/2019**

**Banca Examinadora**

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Gilmar Tonietto  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## RESUMO

Frequentemente as estruturas das máquinas industriais, neste caso, prensas hidráulicas, são fabricadas com chapas de aço com baixo teor de carbono e são unidas através de processos de soldagem. Tais processos geram calor elevado, ocasionando a dilatação dos materiais, que geralmente possuem seus movimentos restritos dentro do equipamento por outros componentes, a soma desses fatores resulta em altos valores de tensões residuais e empenamentos. Este trabalho tem como objetivo, avaliar a influência da resistência do metal de adição nas propriedades mecânicas de estruturas de prensas, analisando as juntas soldadas através do processo GMAW. Corpos de provas soldados com dois diferentes metais de adição, aliados a parâmetros controlados durante o processo de soldagem, foram ensaiados afim de se obter dados específicos das propriedades mecânicas, como: Limite de ruptura e dureza. Mediante estes resultados, e os resultados da verificação dimensional, foi feita uma avaliação e constatado que é possível diminuir o tempo de produção e melhorar o comportamento dessas estruturas após a fabricação, resultando assim, na diminuição dos processos posteriores de correção e adequação, como a usinagem.

**Palavras-chave:** juntas soldadas. resistência do metal de adição. processo GMAW.

## ABSTRACT

Frequently the structures of industrial machines, in this case, hydraulic presses, are manufactured with steel sheets with low carbon content and are joined through welding processes. These processes generate high heat, causing the dilatation of materials, which usually have their restricted movements inside the equipment by other components, the sum of these factors results in high values of residual stresses and warps. The objective of this work was to evaluate the influence of the addition metal strength on the mechanical properties of press structures by analyzing weld joints through the GMAW process. Welded test bodies with two different addition metals, together with parameters controlled during the welding process, were tested in order to obtain specific data on the mechanical properties, such as: Breakage limit and hardness. By means of these results, and the results of the dimensional verification, an evaluation was made and it was verified that it is possible to reduce the time of production and to improve the behavior of these structures after the manufacture, resulting, in the reduction of the subsequent processes of correction and adequacy, as the machining.

**Keywords:** welded joints. resistance of the addition metal. GMAW process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regiões básicas da soldagem.....	18
Figura 2 – Características dimensionais de chanfros usados em soldagem.....	19
Figura 3 – Chanfros usados com diferentes tipos de junta.....	20
Figura 4 – Esquemática das juntas de penetração completa e parcial.....	20
Figura 5 – Execução de uma solda de vários passes.....	21
Figura 6 – Seção transversal de uma solda de topo por fusão.....	22
Figura 7 – Posições de soldagem para as soldas de topo.....	22
Figura 8 – Processos de soldagem e afins, segundo a AWS.....	23
Figura 9 – Processo de soldagem GMAW.....	24
Figura 10 – Equipamento básico para a soldagem GMAW.....	25
Figura 11 – Modos de transferência do metal de solda.....	27
Figura 12 – Classificação dos arames para soldagem de aços pela especificação AWS.....	28
Figura 13 – Diagrama S – N (tensão – número de ciclos).....	34
Figura 14 – Configurações de solda com base na resistência a fadiga do material base.....	35
Figura 15 – Regiões de análise da estrutura soldada e simplificação das cargas envolvidas...36	
Figura 16 – Fluxograma das etapas do estudo proposto.....	37
Figura 17 – Soldagem dos corpos de prova na posição plana com junta de topo.....	39
Figura 18 – Soldagem dos corpos de prova na posição plana com junta em ângulo.....	39
Figura 19 – Máquina utilizada no processo de soldagem.....	39
Figura 20 – Layout esquemático para retirada dos corpos de prova.....	40
Figura 21 – Máquina utilizada no processo de corte dos corpos de prova.....	40
Figura 22 – Corpo de prova com indicação dos pontos a serem analisados.....	41
Figura 23 – Procedimento adotado para verificação dimensional.....	41
Figura 24 – Equipamento utilizado para verificação dimensional.....	42
Figura 25 – Equipamento utilizado nos ensaios de tração.....	42
Figura 26 – Equipamento utilizado nos ensaios metalográficos.....	43
Figura 27 – Equipamento utilizado nos ensaios de microdureza.....	44
Figura 28 – Configuração da junta soldada dos corpos de prova.....	44
Figura 29 – Diagrama de corpo livre simplificado da estrutura soldada.....	46
Figura 30 – Configuração da junta soldada da estrutura da prensa e distribuição de forças.....	46
Figura 31 – Resultado da verificação dimensional com o AWS A5.18: ER70S-6.....	47
Figura 32 – Resultado da verificação dimensional com o AWS A5.28: ER110S-G.....	47

Figura 33 – Comparativo dos resultados da verificação dimensional após a soldagem.....	48
Figura 34 – Pontos de verificação dimensional e fixação dos corpos de prova para soldagem...	48
Figura 35 – Resultado do ensaio de tração.....	49
Figura 36 – Corpos de prova após a ruptura.....	49
Figura 37 – Micrografia dos metais de adição AWS A5.18: ER70S e AWS A5.28: ER110S.....	50
Figura 38 – Micrografia da zona de transição das juntas soldadas.....	51
Figura 39 – Micrografia da zona afetada termicamente das juntas soldadas.....	51
Figura 40 – Micrografia do metal de base.....	52
Figura 41 – Esquemático das dimensões da junta soldada com o AWS A5.18: ER70S-6.....	53
Figura 42 – Esquemático das dimensões da junta soldada com o AWS A5.28: E110S-G.....	54
Figura 43 – Comparativo entre o limite de resistência a tração dos corpos de prova e os metais de solda.....	55
Figura 44 – Pontos de medição da microdureza.....	56
Figura 45 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio de microdureza.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações AWS de materiais de adição para soldagem GMAW.....	28
Tabela 2 – Resistência mecânica do metal de solda.....	29
Tabela 3 – Requisitos de composição química para o metal de solda (% peso).....	29
Tabela 4 – Gases e misturas utilizados na soldagem GMAW para os aços.....	30
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A36.....	31
Tabela 6 – Composição química do aço ASTM A-36.....	32
Tabela 7 – Tamanho mínimo para cordões de solda.....	33
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo atual e aporte térmico.....	38
Tabela 9 – Parâmetros de soldagem usados na confecção dos corpos e prova e aporte térmico.....	38
Tabela 10 – Valores de entrada e resultados dos cálculos teóricos das juntas soldadas.....	45
Tabela 11 – Valores de entrada e resultados dos cálculos teóricos da tensão de cisalhamento.....	46
Tabela 12 – Resultados da macrografia.....	54
Tabela 13 – Valores de entrada e resultados dos cálculos práticos das juntas soldadas.....	55
Tabela 14 – Valores de entrada e resultados dos cálculos práticos da tensão de cisalhamento.....	55



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

At	Área total da garganta de solda
A <sub>term</sub>	Aporte térmico
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CB	Chapa da base
C <sub>conf</sub>	Fator de confiabilidade
C <sub>f</sub>	Coeficiente de equação
CT	Chapa de topo
F <sub>p</sub>	Força principal
F <sub>t</sub>	Força teórica suportada na garganta da solda
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
LR	Limite de resistência do metal de adição
L <sub>t</sub>	Comprimento total de garganta da solda
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal de Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
N	Número de ciclos
NR	Norma Regulamentadora
P	Carga aplicada
R <sub>js</sub>	Reação nas juntas soldadas
S <sub>er</sub>	Limite de fadiga em tração
S <sub>ers</sub>	Limite de fadiga em cisalhamento.
S <sub>fr</sub>	Resistência à fadiga em tração
S <sub>frs</sub>	Resistência à fadiga em cisalhamento
t	Garganta da solda
UCS	Universidade de Caxias do Sul
V <sub>s</sub>	Velocidade de soldagem
ZF	Zona fundida

ZTA Zona Termicamente Afetada  
w Perna da solda

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo de Chanfro
$\beta$	Ângulo de Abertura da Junta
$\sigma_x$	Tensão normal de tração ou compressão
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	15
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	16
1.3	OBJETIVOS .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM .....	18
2.1.1	Geometria de uma junta soldada.....	19
2.1.2	Zonas de uma junta soldada.....	21
2.1.3	Posições de soldagem.....	22
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	23
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO GMAW .....	24
2.3.1	Características gerais.....	24
2.3.2	Equipamentos utilizados no processo.....	25
2.3.3	Qualificação do processo .....	26
2.3.4	Transferência do metal de solda .....	26
2.3.5	Variáveis do processo.....	27
2.3.6	Consumíveis do processo .....	27
2.3.7	Aporte térmico.....	30
2.3	AÇOS.....	31
2.3.1	Aços baixo teor de carbono .....	31
2.4	PROJETO DE ESTRUTURAS SOLDADAS .....	32
2.4.1	Carregamento estático de soldas .....	32
2.4.2	Carregamento dinâmico de soldas.....	33
2.4.3	Efeito da configuração da solda na resistência a fadiga .....	34
2.4.4	Regiões de análise e simplificação das cargas envolvidas na estrutura soldada ....	36

<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>37</b>
3.1	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES.....	37
3.2	MAT ERIAIS E MÉTODOS .....	37
<b>3.2.1</b>	<b>Mapeamento do processo de soldagem atual.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Definição dos parâmetros de soldagem.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Procedimento de soldagem.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Retirada dos corpos de prova .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Verificação dimensional .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Ensaio de tração .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Ensaio metalográfico.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Ensaio de Microdureza .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.9</b>	<b>Cálculos de resistência mecânica teórica e diagrama de corpo livre simplificado .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1	RESULTADO DA VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL .....	47
4.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	49
4.3	RESULTADO DOS ENSAIOS METALGRÁFICOS .....	50
<b>4.3.1</b>	<b>Resultados da micrografia.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Resultados da macrografia.....</b>	<b>53</b>
4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A - RESULTADOS DO ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL...61</b>	
	<b>APÊNDICE B - RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....62</b>	

<b>APÊNDICE C - RESULTADOS DOS LIMITES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO TEÓRICO E A TENSÃO MÁXIMA APLICADA NOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE D - RESULTADOS DA MICRODUREZA DA JUNTA SOLDADA COM O AWS A5.18: ER70S-6.....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE E - RESULTADOS DA MICRODUREZA DA JUNTA SOLDADA COM O AWS A5.28: E110S-G.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para acompanhar o constante crescimento do mercado e as inúmeras tecnologias que acompanham esse desenvolvimento, as indústrias buscam cada vez mais aperfeiçoar e otimizar seus processos de fabricação, procurando estratégias para a redução de custos e por consequência, o aumento da sua lucratividade. Essas questões passam a ser imprescindíveis para as empresas crescerem e permanecerem de forma competitiva em seus segmentos de atuação.

Revisar os seus processos de fabricação, é um requisito obrigatório das organizações, devido à crescente evolução tecnológica do mercado. A todo momento aparecem novas possibilidades, provenientes de pesquisas realizadas para encontrar a resolução de problemas específicos em cada caso estudado.

Nos últimos anos houve uma evolução da soldagem surgindo uma grande variedade de métodos e processos neste segmento, os quais podem ser divididos em dois grandes grupos: Soldagem por fusão e Soldagem por pressão. Conhecer estas novas tecnologias é fundamental para os engenheiros atualmente, visto que, o processo de soldagem se aplica em larga escala na produção e fabricação das estruturas. Com o aquecimento e resfriamento das juntas soldadas, oriundos do processo, as características mecânicas e metalúrgicas destas estruturas são afetadas, tornando assim o controle desses processos fundamental para garantir a qualidade dos seus produtos.

### 1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A Menegotto Prensas Hidráulicas é uma empresa criada no ano de 1995 na cidade de Caxias do Sul/RS. Atuando no segmento da produção de prensas hidráulicas, oferece soluções a diversos segmentos do mercado como por exemplo o metalmecânico, automotivo, rodoviário, ferroviário, cutelaria, eletrodomésticos, indústria da borracha, indústria do plástico, entre outros. Também presta serviços de retrofitting e adequações de acordo com as normas NR 10 e NR 12.

O desenvolvimento do estudo se dará nos setores da Engenharia e Produção da empresa simultaneamente, juntamente com a Universidade de Caxias do Sul, permitindo assim um melhor entendimento do processo atual e possibilitando a comparação com o objetivo proposto, aproximando a teoria e a prática.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Assim como todos os segmentos da indústria metal mecânica, o mercado de fabricantes de prensas é bastante amplo e concorrido, isto faz com que as empresas prezem pela qualidade elevada de seus produtos para conquistar a preferência do consumidor.

Um dos principais fatores de sucesso para essas empresas, é a confiabilidade de seus produtos, que está diretamente ligada com o projeto e os processos que são realizados para a construção dos equipamentos.

Visando melhorar seus produtos, os fabricantes buscam o desenvolvimento de novas tecnologias. Entretanto, qualquer alteração de projeto ou processo precisa ser amplamente testada. Este trabalho surge da necessidade de um estudo comparativo das uniões soldadas com a variação do metal de adição. Os ensaios têm como objetivo, monitorar aspectos importantes como as tensões aplicadas sobre as juntas soldadas nas estruturas, a alteração do tempo empregado para realização do processo e a resistência mecânica do produto, podendo assim existir ou não a validação da substituição do metal de adição utilizado.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos metais de adição AWS A5.18: ER70S-6 e AWS A5.28: ER110S-G nas propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas soldadas aplicadas em estruturas de prensas hidráulicas, e assim propor possíveis modificações no processo de fabricação atual.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar a bibliografia sobre os processos de soldagem utilizados em estruturas de prensas;
- b) mapeamento do processo de soldagem atual utilizado pela empresa na fabricação dos equipamentos;
- c) estudar as propriedades mecânicas e metalúrgicas da região soldada através de ensaios mecânicos;



- d) sugerir alterações para tentar minimizar o tempo utilizado no processo de soldagem das estruturas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica envolvida no estudo proposto, que procura verificar a influência da resistência do metal de adição nas propriedades mecânicas aplicado em estruturas de prensas hidráulicas. Abordando os aços baixo carbono e suas propriedades mecânicas, alguns dos metais de adição utilizados atualmente nos processos de soldagem, a resistência das juntas soldadas, as solicitações mecânicas que as estruturas sofrem e os efeitos dos processos de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) nos aços.

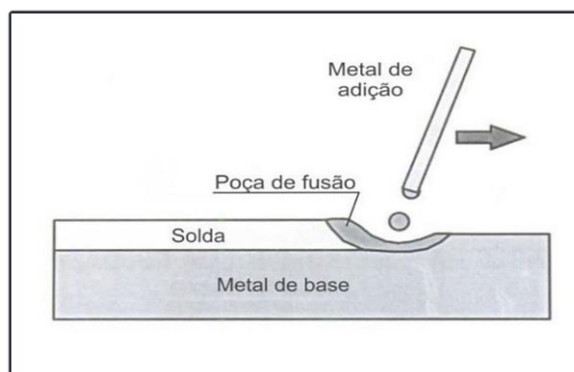
### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é um processo dedicado a união de materiais amplamente utilizado nas indústrias pela sua versatilidade de aplicação, seja na fabricação de novos componentes ou na recuperação de peças, equipamentos e estruturas.

De modo geral, denomina-se soldagem o processo de união entre dois metais utilizando-se uma fonte de energia, com ou sem aplicação de pressão (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Também é possível dizer que o processo consiste da união de dois materiais, ou através da fusão de ambos, com ou sem a adição de um material adicional, ou pelo contato direto dos dois em fase sólida ou semi-sólida (MACHADO, 1996).

Por tanto, a soldagem é uma operação que visa obter a união de peças, e a solda é o resultado desta operação. O material da peça que está sendo soldada é denominado de metal base. Nos métodos de soldagem por fusão, um material adicional é fornecido para a formação da solda, chamado de metal de adição. Durante a soldagem, estes elementos serão fundidos, formando a poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Na figura 1 estão ilustradas estas regiões acima citadas, que formam as juntas soldadas.

Figura 1 – Regiões básicas da soldagem



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

### 2.1.1 Geometria de uma junta soldada

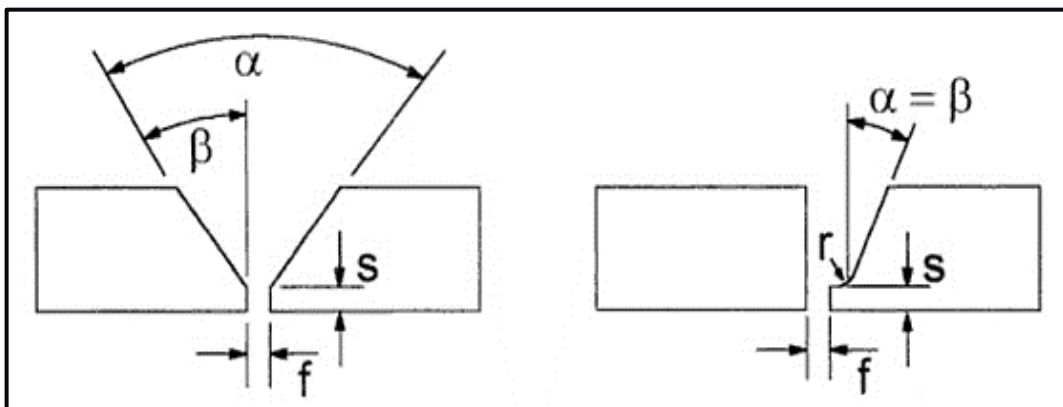
Muitas vezes é necessário a preparação da geometria das juntas a serem soldadas, normalmente esse procedimento acontece na forma de cortes ou de uma conformação especial da junta, estas aberturas ou sulcos na superfície das peças a serem unidas determinam o espaço para conter a solda e recebem o nome de chanfro (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Por sua vez, o procedimento de chanfrar leva em consideração a espessura dos componentes, o volume de material a ser depositado, as condições de execução da soldagem e o material que está sendo utilizado (MACHADO, 1996).

Em alguns casos é preciso colocar uma peça na parte inferior da solda, chamada de cobre-junta ou mata-junta, que tem por finalidade conter o material fundido durante a execução da soldagem.

Segundo Marques, Modenesi, Bracarense (2005), um chanfro é definido por seus elementos ou características dimensionais. Os principais elementos de um chanfro, ilustrados na figura 2, são:

- face da raiz ou nariz ( $s$ ): Parte não chanfrada de um componente da junta;
- abertura da raiz, folga ou fresta ( $f$ ): Menor distância entre as peças a soldar;
- ângulo de abertura da junta ( $\beta$ ): Ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta;
- ângulo de chanfro ( $\alpha$ ): Soma dos ângulos de abertura dos componentes da junta.

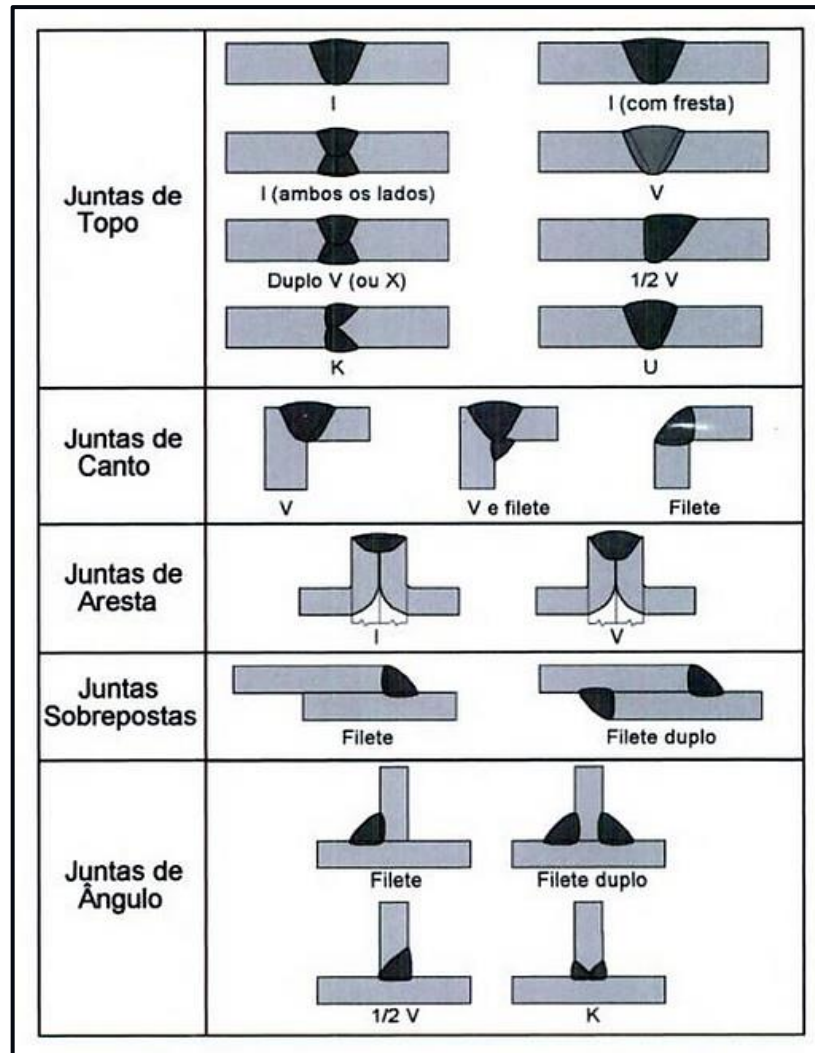
Figura 2 – Características dimensionais de chanfros usados em soldagem



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Na figura 3 estão ilustrados os chanfros geralmente usados com diferentes tipos de juntas.

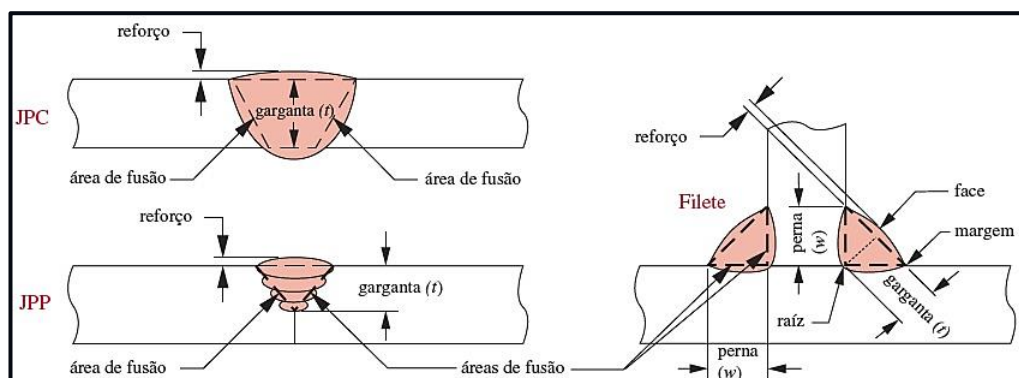
Figura 3 – Chanfros usados com diferentes tipos de junta



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

As soldas de chanfros podem ter juntas de penetração completa (JPC) ou juntas de penetração parcial (JPP), conforme ilustra a figura 4.

Figura 4 – Esquemática das juntas de penetração completa e parcial



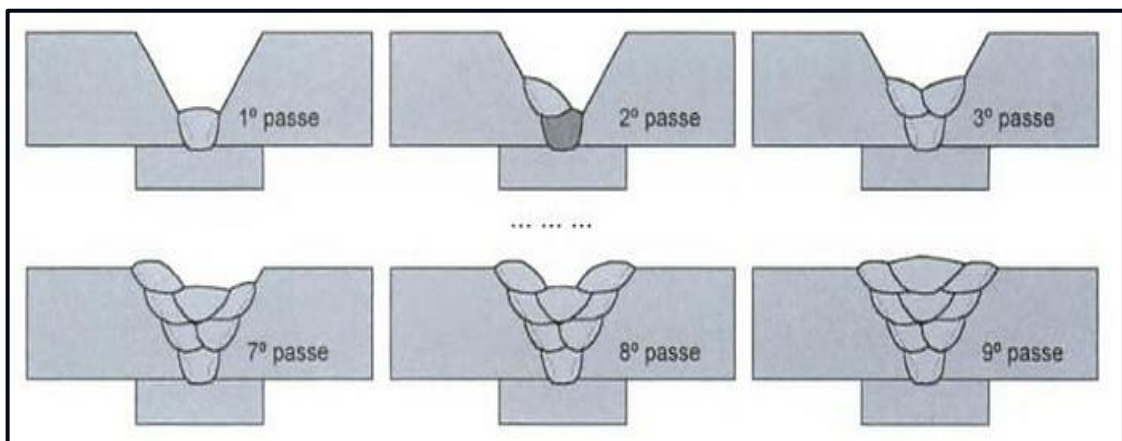
Fonte: adaptado de Norton (2005).

### 2.1.2 Zonas de uma junta soldada

Na maioria dos processos de soldagem e especialmente naqueles por fusão, as juntas soldadas apresentam várias zonas distintas, e cada uma delas possui suas próprias particularidades (MACHADO, 1996).

A zona fundida (ZF) de uma solda é constituída pelo metal de solda, que é a soma da parte fundida do metal de base e do metal de adição. Esta zona pode ser constituída por um ou mais passes depositados seguindo uma sequência de deposição e organizados em camadas, que são um conjunto de passes localizados em uma mesma altura de chanfro. Cada passe de solda é formado por um deslocamento da poça de fusão na região da junta (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005), conforme ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Execução de uma solda de vários passes

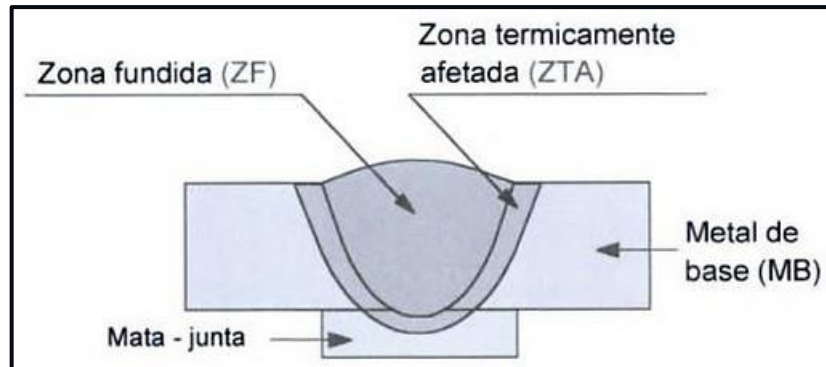


Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal de base adjacente a poça de fusão, que sofre um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem, e por consequência tem sua estrutura e suas propriedades alteradas, mesmo sem ocorrer fusão nesta região.

A zona do metal de base (MB) é constituída pelo restante da peça que não sofreu nenhuma transformação metalúrgica. Entretanto, essa área pode estar num estado de alta tensão residual, o que poderá trazer importantes consequências para a utilização da peça (MACHADO, 1996), conforme será abordado posteriormente. As zonas mencionadas estão ilustradas na figura 6.

Figura 6 – Seção transversal de uma solda de topo por fusão

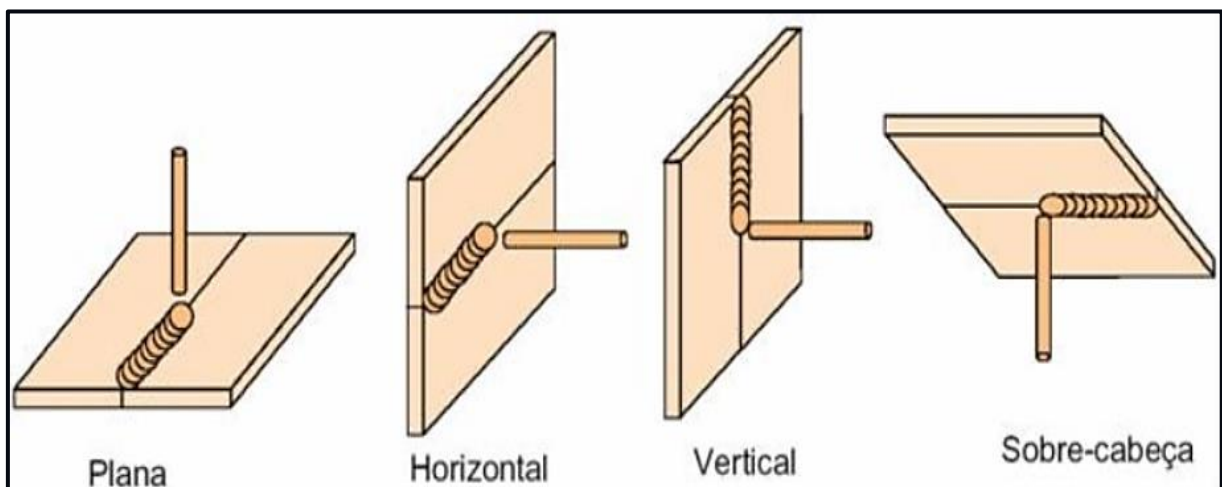


Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2014).

### 2.1.3 Posições de soldagem

As posições de soldagem são determinadas através da posição da peça e do eixo em que a solda será realizada. Diante desses fatores, as posições de soldagem são caracterizadas como plana, horizontal, vertical e sobrecabeça. Tais posições, possuem uma forte influência sobre o grau de dificuldade da sua execução, impactando na produtividade do processo, sendo a soldagem na posição plana, em geral, a mais fácil de ser executada e a que possibilita uma maior produtividade. A soldagem na posição vertical pode ser executada na direção ascendente ou descendente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014). A figura 7 ilustra as posições de soldagem citadas.

Figura 7 – Posições de soldagem para as soldas de topo



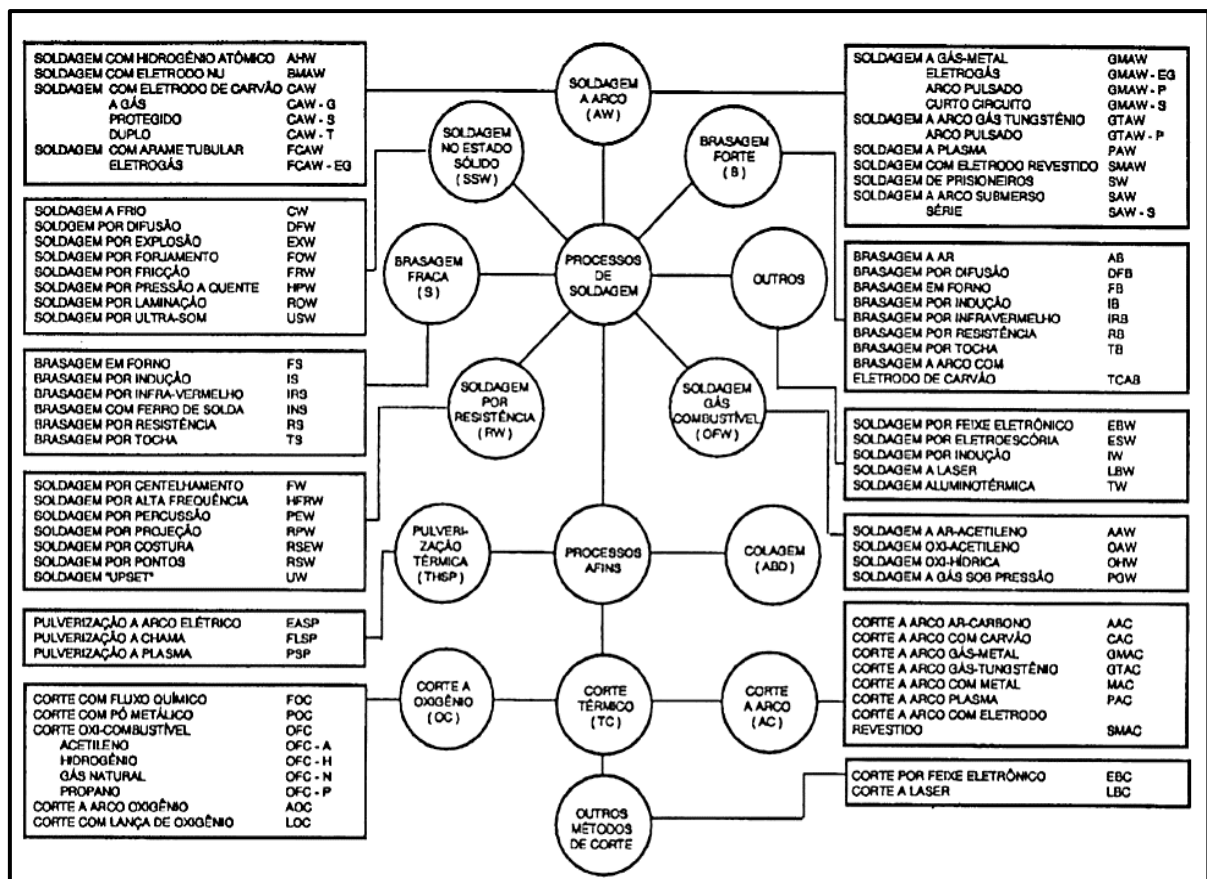
Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2014).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Uma maneira de classificar os processos de soldagem consiste em agrupá-los em dois grandes grupos baseando-se no método dominante para produzir a solda: processo de soldagem por pressão (ou por deformação) e processo de soldagem por fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

A figura 8 mostra uma classificação segundo a AWS (*American Welding Society*), juntamente com as abreviações adotadas por esta associação para designar cada processo.

Figura 8 – Processos de soldagem segundo a AWS



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2014).

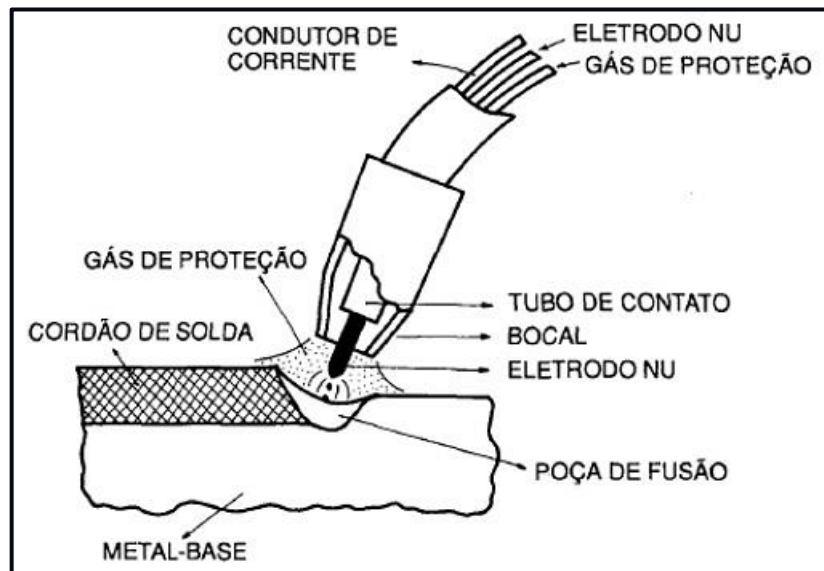
Neste estudo, será abordado somente o processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, pois é o processo pelo qual a empresa fabrica suas estruturas soldadas, e também será o processo utilizado no presente trabalho para a união dos materiais que posteriormente darão origem aos corpos de prova.

### 2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO GMAW

O processo de soldagem GMAW está baseado na união de peças metálicas que é produzido pelo aquecimento destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra a contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos.

Os termos MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) são decorrentes dos gases utilizados no processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A figura 9 ilustra esquematicamente este processo.

Figura 9 – Processo de soldagem GMAW



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992).

#### 2.3.1 Características gerais

Segundo Wainer, Brandi, Mello (1992), as principais vantagens e limitações do processo GMAW são:

Vantagens:

- a) processo semi-automático bastante versátil, podendo ser adequado a soldagem automática;
- b) eletrodo nu é alimentado continuamente;
- c) todas as posições de soldagem podem ser executadas;



- d) alta velocidade de soldagem;
- e) taxa de deposição elevada devido à densidade de corrente alta na ponta do arame;
- f) não há formação de escória;
- g) distorção e tensões residuais diminuídos;
- h) fácil execução.

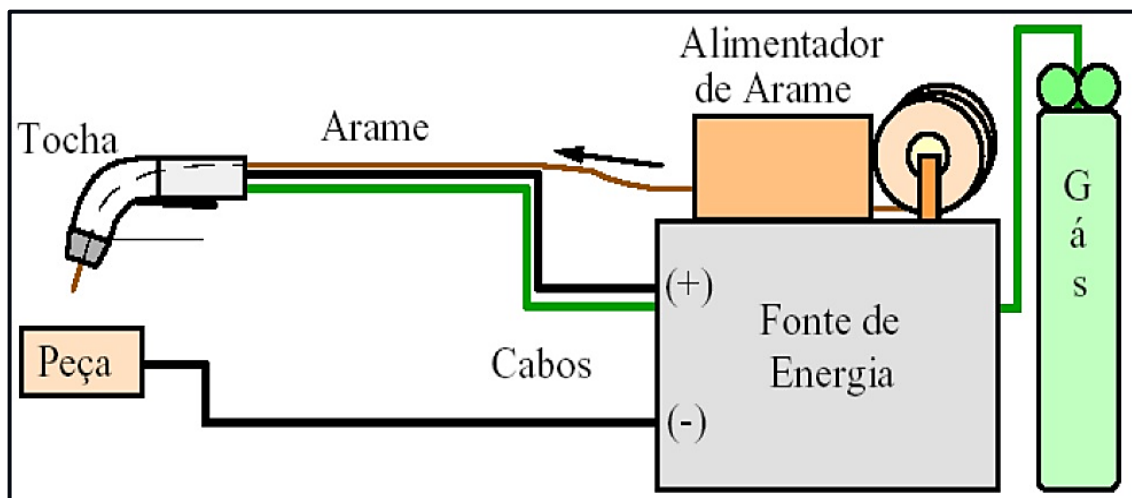
Limitações:

- a) alta velocidade de resfriamento, causando a ocorrência de trincas;
- b) grande emissão de raios ultravioleta;
- c) equipamento mais caro e complexo em relação ao eletrodo revestido;
- d) geração de respingos;
- e) a soldagem deve ser protegida de correntes de ar;
- f) operação dificultada em locais de difícil acesso, devido à necessidade do bocal da pistola estar próximo ao metal base.

### 2.3.2 Equipamentos utilizados no processo

O equipamento é composto de uma fonte de energia que serve para manter a tensão constante, um alimentador de arame que é responsável pela alimentação do consumível, uma tocha de soldagem, uma fonte de gás protetor, cabos e mangueiras (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014), conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Equipamento básico para soldagem GMAW



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

### 2.3.3 Qualificação do processo

Conforme a norma ASME (2012), as variáveis para a qualificação deste processo são:

- a) qualificação do procedimento: metal base; metal de adição; tratamento térmico após a soldagem; preaquecimento; tipo de gás de proteção; tipo de junta; posição de soldagem; características elétricas e técnicas de soldagem;
- b) qualificação do soldador: tipo de junta; metal base; metal de adição; posição de soldagem; tipo de gás de proteção e características elétricas.

Nas qualificações do procedimento, as três primeiras são consideradas essenciais, já nas qualificações do soldador, todas as variáveis são consideradas essenciais.

### 2.3.4 Transferência do metal de solda

No processo GMAW, a forma na qual o material do eletrodo consumível é transferido para a poça de fusão afeta as características resultantes da operação, como a estabilidade do arco, o nível de respingos gerados e a absorção de gases pelo material fundido. A polaridade e tipo de corrente, a tensão, a natureza do gás de proteção, as características do eletrodo, dentre outros fatores, são determinantes para a transferência do metal e podem ser classificados de uma forma simplificada em 4 modos básicos a saber: transferência por curto-circuito, globular, por aerosol e transferência controlada (MACHADO, 1996; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A figura 11 ilustra alguns modos de transferência do metal de solda.

A transferência por curto-circuito tem como princípio básico a atração pela tensão superficial pela poça de fusão. Ocorre quando são usados baixos valores de tensão e corrente, gerando uma poça de fusão de pequenas dimensões e de rápida solidificação, e indicada para posições diferentes da posição plana e na união de peças de pequenas espessuras.

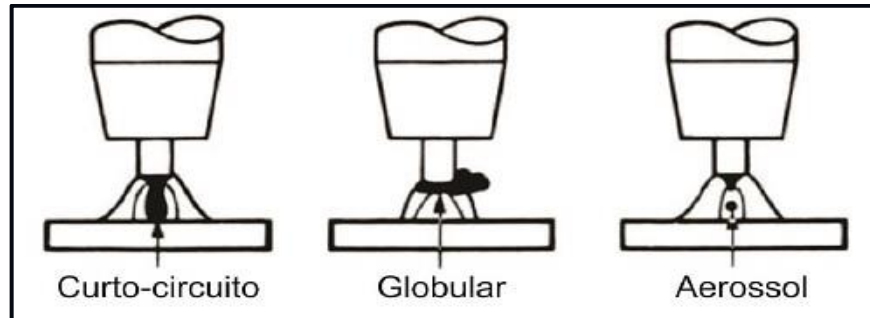
A transferência globular apresenta valores intermediários de tensão e corrente, gerando como no processo anterior, uma gota na ponta do eletrodo, porém a transferência nesse caso acontece principalmente pela ação da gravidade.

Na transferência por aerosol, as gotas metálicas sofrem a ação principalmente de forças eletromagnéticas. Este processo só é possível com níveis de corrente relativamente elevados, fazendo com as gotas do metal sejam pequenas e em número bastante elevado, adquirindo assim uma forma semelhante a uma névoa.

A transferência controlada mais habitual é a pulsada, é semelhante ao aerosol, porém mais estável e uniforme, apresentando a ação de duas correntes distintas, sendo uma baixa que

serve para manter o arco elétrico, e outra em picos, responsável pela transferência de apenas uma gota, que se forma durante a corrente de menor valor.

Figura 11 – Modos de transferência do metal de solda



Fonte: adaptado de ESAB (2005).

### 2.3.5 Variáveis do processo

Para se atingir níveis interessantes de qualidade na soldagem GMAW, algumas variáveis que tem relação direta com o processo precisam ser observadas. A tensão do arco, a velocidade de avanço e a corrente de soldagem são denominadas variáveis ajustáveis primárias, também conhecidas como parâmetros de soldagem, porém antes de iniciada a análise desses parâmetros, as variáveis fixas devem ser estabelecidas, como os consumíveis. Após essas definições, aparecem as variáveis ajustáveis secundárias, como as técnicas a serem aplicadas na execução do processo, comprimento do cordão de solda e o ângulo de posicionamento do bocal. De modo geral, grande parte dessas variáveis estão interligadas e não agem de forma independente. (MACHADO, 1996).

### 2.3.6 Consumíveis do processo

Os principais consumíveis utilizados no processo GMAW são o arame eletrodo e o gás de proteção. Os arames de aço usados nesse processo são tradicionalmente cobreados, uma vez que a camada de cobre protege o arame contra a corrosão e melhora o contato elétrico com o bico de contato, localizado na tocha de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

A seleção do arame a ser usado em cada operação é feita em termos da composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE,

2005). A tabela 1 relaciona as especificações da AWS de arames para soldagem GMAW para aços baixo carbono.

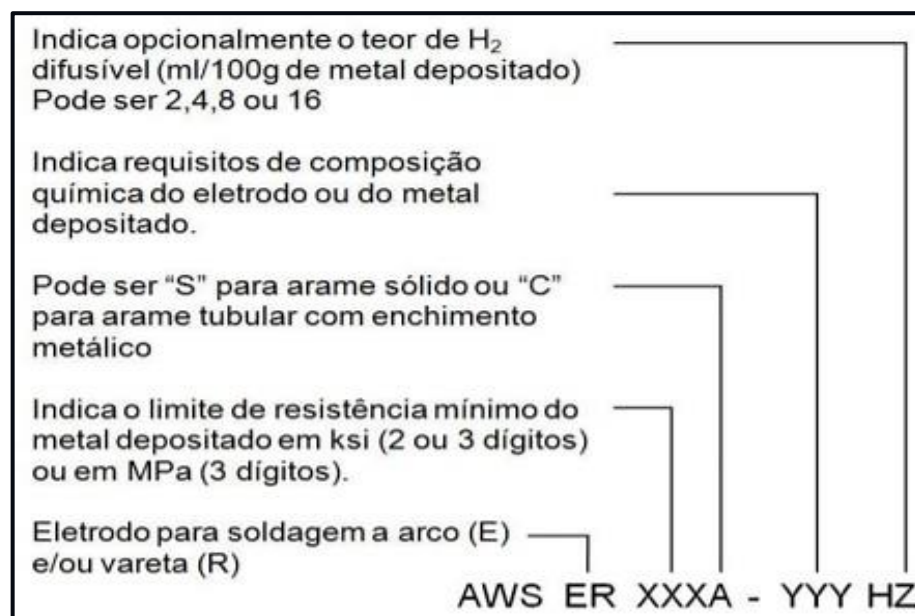
Tabela 1 – Especificações AWS de materiais de adição para soldagem GMAW

<b>Especificação</b>	<b>Consumível</b>
AWS A 5.18	Arames e arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.28	Arames de cobre e suas ligas

Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Os arames para soldagem de aços, em geral, podem ter seção inteiramente metálica, chamados de arames sólidos, ou ser do tipo tubular, formado por uma camada metálica fechada, e ter um enchimento interno (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2015). A classificação dos arames para soldagem de aços pela especificação AWS A 5.18 e A 5.28, que engloba os arames sólidos e os arames com enchimento metálico, estão representados na figura 12.

Figura 12 – Classificação dos arames para soldagem de aços pela especificação AWS



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Quando a resistência do metal de solda é comparada com a resistência do metal de base, podem existir 3 relações distintas (AWS D1.1/D1.1M, 2015):

- a) *Overmatching* – É quando o metal de solda tem maior limite de resistência a ruptura que o metal de base;
- b) *Matching* – Acontece quando ambos os materiais têm o mesmo limite de resistência a ruptura;
- c) *Undermatching* – É quando o metal de solda tem menor limite de resistência a ruptura que o metal de base.

A tabela 2 mostra a classificação da resistência mecânica do metal de solda. A tabela 3 mostra os requisitos de composição química para o metal de solda (% peso), ambas de acordo com as especificações da AWS.

Tabela 2 – Resistência mecânica do metal de solda

Classificação	Gás de proteção	Limite de resistência		Limite de escoamento		Alongamento % mínimo
		psi	MPa	psi	MPa	
ER 70S- 2 a 7	CO2	70.000	480	58.000	400	22
ER 70S-B2L ER 70C-B2L	Ar/1-5% O2	75.000	515	58.000	400	19
ER 80S e 80C		80.000	550	68.000	470	19
ER 90S E 90C		90.000	620	78.000	540	17
ER 100S		100.000	690	88.000	610	16
ER 110S ou 110C		110.000	760	95.000	660	15
ER 120S ou 120C		120.000	830	105.000	730	14

Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Tabela 3 – Requisitos de composição química para o metal de solda (% peso)

Classificação	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER 70S-2	0,07	0,9-1,4	0,40-,70	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
ER 70S-3	0,06-0,15	0,9-1,4	0,45-0,75							
ER 70S-4	0,06-0,15	1,0-1,5	0,65-0,85							
ER 70S-6	0,06-0,15	1,4-1,8	0,80-1,15							
ER 70S-7	0,06-0,15	1,5-2,0	0,50-0,80							
ER 110S-G	0,09	1,4-1,8	0,20-0,55	0,01	0,01	1,4-2,0	0,5	0,25-0,55	0,4	0,25

Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Em relação ao gás de proteção, como citado anteriormente, ele tem a função de proteger a poça de fusão da atmosfera, sua escolha interfere diretamente no processo de soldagem, seja no modo de transferência do metal, no formato do cordão de solda, na penetração e até em algumas discontinuidades que são encontradas ao final da operação.

Na soldagem de aços-carbono e aços de baixa liga é comum se utilizar a mistura de um gás ativo, geralmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com um gás inerte, normalmente o

argônio. O CO<sub>2</sub> possui algumas características como o baixo custo, alta penetração, porém gera um alto nível de respingos que pode ser controlada com a adição de argônio (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Após a escolha do gás a ser utilizado, é preciso controlar de forma adequada sua vazão, esta deve ser suficiente para garantir uma proteção eficaz contra possíveis contaminantes da atmosfera. Em geral, quanto maior a corrente, maior a poça de fusão e a área a proteger, se fazendo necessária uma maior vazão. Vazões reduzidas podem levar ao aparecimento de porosidades, perda de elementos de liga e deterioração de propriedades, por outro lado, vazões muito elevadas podem tornar o cordão de solda irregular, além de aumentar o custo da operação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014). A tabela 4 ilustra os principais gases e misturas utilizados na soldagem GMAW.

Tabela 4 – Gases e misturas utilizados na soldagem GMAW para os aços

<b>Gás ou mistura</b>	<b>Comportamento químico</b>	<b>Aplicações</b>
Ar + 3-5% O <sub>2</sub>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aços (transferência por curto circuito)
Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Oxidante	Aços

Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2014).

### 2.3.7 Aporte térmico

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material (ESAB, 2005).

Na soldagem a arco elétrico o aporte térmico é definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento e é calculado através da equação 1.

$$A_{\text{term}} = 0,06 * \frac{T * C}{V_s} \quad (1)$$

Nesta equação,  $A_{\text{term}}$  é o aporte térmico [KJ/mm]; T é a tensão [V]; C é a corrente [A]; e  $V_s$  se refere a velocidade de soldagem [mm/min].

Após a soldagem a dissipação de calor ocorre principalmente por condução na peça, das regiões de maior temperatura para o restante do metal.

## 2.3 AÇOS

Denomina-se aço, a liga-ferro carbono que apresenta a composição geralmente entre 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, contendo também uma estrutura com pequenas quantidades de elementos residuais decorrentes dos processos de fabricação. Quando a quantidade desses elementos residuais ou elementos de ligas passam os níveis normais, classifica-se então como aço-liga (CHIAVERINI, 1996).

Segundo Chiaverini (2005), através da composição de carbono C, pode-se subdividir os aços em:

- a) baixo teor de carbono: inferior a 0,2%;
- b) médio carbono: de 0,2 a 0,5%;
- c) alto teor de carbono: Superior a 0,5%.

### 2.3.1 Aços baixo teor de carbono

Os aços com baixo carbono apresentam custos de produção relativamente baixos e são comercializados em larga escala em diversas aplicações, como perfis estruturais, tubos, na construção civil, entre outros. O aço a ser estudado neste trabalho é o ASTM-A36. A tabela 1 ilustra as propriedades deste aço. Já a tabela 2 apresenta sua composição química.

As microestruturas presentes são ferrita e perlita, o que faz com que estes materiais tenham dureza e limite de resistência relativamente menores do que os demais aços que possuem maiores níveis de carbono, porém são mais dúcteis e tenazes, além apresentarem boa usinabilidade e soldabilidade. Tipicamente possuem um limite de escoamento máximo de 275 MPa, resistência a tração entre 400 e 550 MPa com ductilidade de 25% (CALLISTER, 2008).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço ASTM-A36

<b>Propriedade Mecânica</b>	<b>Valor</b>
Resistência à Tração	400 - 550 MPa
Limite de Escoamento	250 MPa
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Alongamento na Ruptura (em 50mm)	23%

Fonte: adaptado de Matweb (2018).

Tabela 6 – Composição química do aço ASTM A-36

<b>Elemento Químico</b>	<b>%</b>
Carbono	0,25 - 0,29
Cobre	0,2
Ferro	98
Manganês	1,03
Fósforo	<=0,04
Silício	0,28
Enxofre	<=0,05

Fonte: adaptado de Matweb (2018).

## 2.4 PROJETO DE ESTRUTURAS SOLDADAS

Carregamentos cíclicos são capazes de causar a falha de um elemento estrutural em níveis de tensões inferiores ao limite de resistência do material, estando presentes em 90% dos casos de falha (PANG; WANG; ZHANG, 2013).

A vida à fadiga de uma estrutura soldada, é limitada pelo comportamento a fadiga de suas juntas soldadas, as quais tem seu cálculo baseado na comparação da geometria e direções de carregamento do caso estudado com uma série de classes de juntas amplamente ensaiadas e padronizadas, selecionando-se então a curva de fadiga correspondente. Esta comparação pode ser feita de forma global, através da tensão nominal, ou sob um aspecto local, onde efeitos localizados do carregamento são mensurados de uma forma mais precisa junto ao parâmetro de tensão do diagrama S – N (tensão – número de ciclos), diminuindo-se dessa forma, o número de classes normatizadas, as quais serão citadas na sequência.

### 2.4.1 Carregamento estático de soldas

Segundo Norton (2005), sempre que possível o carregamento em flexão nas soldas deve ser evitado, assim, o carregamento será normalmente de tração/compressão ou cisalhamento direto. A tensão normal de tração ou compressão é definida pela equação 2. Já a tensão de cisalhamento direto é definida através da equação 3.

$$\sigma_x = \frac{P}{A} \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{A_{cis}} \quad (3)$$



Em ambas as equações,  $P$  é a carga aplicada [N];  $A$  ou  $A_{cis}$  é a área do cordão de solda [mm<sup>2</sup>];  $\sigma_x$  é a tensão normal de tração ou compressão [MPa]; e  $\tau_{xy}$  se refere a tensão de cisalhamento [MPa].

Para carregamentos estáticos, a AWS recomenda que as tensões cisalhantes nos cordões de solda sejam limitadas a 30% da resistência à tração do eletrodo, conforme equação.

$$\tau_{adm} = 0,30 * E_{xx} \quad (4)$$

Nesta equação  $\tau_{adm}$  é a tensão de cisalhamento admissível [MPa]; e  $E_{xx}$  representa a resistência mínima à tração do eletrodo.

Esse valor, tem um fator de segurança mínimo embutido de 2,21 a 4,06 para a maioria dos carregamentos de solda, e estão baseados em ensaios feitos em conjuntos soldados realizados pela AISC (*American Institute of Steel Construction*) (NORTON, 2005).

Em relação aos tamanhos das soldas, a norma AWS D1.1 (2015) define o tamanho mínimo para as soldas baseada na espessura do material soldado, esse tamanho deve assegurar que o calor aplicado seja suficiente para se atingir uma boa fusão. A tabela 7 apresenta a relação de algumas dimensões de soldas baseadas na espessura do material soldado.

Tabela 7 – Tamanho mínimo para cordões de solda

Espessura do metal base - T (mm)	Tamanho mínimo da solda (mm)
$T \leq 6$	3
$6 < T \leq 12$	5
$12 < T \leq 20$	6
$20 < T$	8

Fonte: adaptado da AWS D1.1 (2015).

## 2.4.2 Carregamento dinâmico de soldas

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Estas falhas ocorrem geralmente, em níveis de tensão bastante inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais.

As soldas carregadas dinamicamente têm comportamento surpreendentemente diferente de peças não soldadas, tornando a tensão média irrelevante para a sua potencial falha por fadiga (NORTON, 2005).

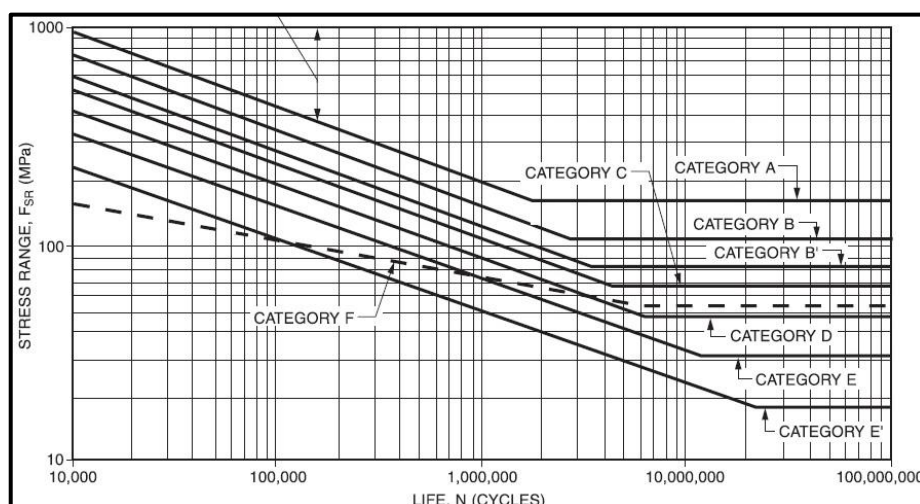
### 2.4.3 Efeito da configuração da solda na resistência a fadiga

A resistência de uma soldagem à fadiga, varia de acordo com a presença ou a ausência de interrupções na geometria do conjunto e dos cordões de solda, os quais criam concentrações de tensões (NORTON, 2005).

Segundo a AISC, as diferentes configurações de solda, com base na resistência a fadiga do material base, podem ser agrupadas em oito categorias distintas identificadas como A, B, B', C, D, E, E' e F, em ordem decrescente de resistência ao carregamento dinâmico, sendo a categoria A a mais resistente e a E' a menos resistente à fadiga. A categoria F é a resistência ao cisalhamento do cordão de solda e as outras são para a resistência à tração da área de fusão entre a solda e o material-base. Todas as categorias, com a exceção da F, possuem a inclinação de 1/3 no diagrama tensão – número de ciclos, e as suas intercepções decrescem com o aumento do nível da categoria. Já a categoria F, que é aplicada ao metal de solda e não ao metal de base, possui uma inclinação 1/6 mais suave (NORTON, 2005).

Extensos ensaios de soldagem em cada uma das categorias foram realizados pelo *Highway Research Board* nos anos de 1960. Ensaios de 374 vigas de 10 pés de extensão por 5 polegadas de largura e vários detalhes soldados foram realizados por dois laboratórios de universidades distintas. Os dados de ambos apresentaram uma correlação estatística bem próxima. Os conjuntos de dados foram obtidos para diferentes valores de tensão mínima, mas com a mesma variação de tensão. Os dados foram ajustados por regressão para o gráfico log-log (NORTON, 2005). A figura 13 ilustra o diagrama tensão - número de ciclos com as categorias e suas respectivas inclinações.

Figura 13 – Diagrama S – N (tensão – número de ciclos)



Fonte: adaptado da AWS D1.1 (2015).

A equação 5, mostra a faixa de tensão de fadiga permissível  $S_{fr}$ , para todas as categorias exceto a F, que por sua vez é mostrada na equação 6.

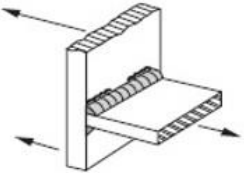
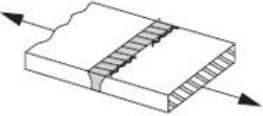
$$S_{fr} = C_{conf} * \frac{C_f^{\frac{1}{3}}}{N} \geq S_{er} \quad (5)$$

$$S_{frs} = C_{conf} * \frac{C_f^{\frac{1}{6}}}{N} \geq S_{ers} \quad (6)$$

Nestas equações  $S_{fr}$  é a resistência à fadiga em tração;  $S_{frs}$  é a resistência à fadiga em cisalhamento;  $C_{conf}$  é o fator de confiabilidade;  $C_f$  é o coeficiente da equação;  $N$  é o número de ciclos; e  $S_{er}$  é o limite de fadiga em tração; e  $S_{ers}$  é o limite de fadiga em cisalhamento.

A figura 14 ilustra as configurações de solda pertinentes ao estudo proposto, com base na resistência a fadiga do material base, de acordo com a AISC.

Figura 14 – Configurações de solda com base na resistência a fadiga do material base

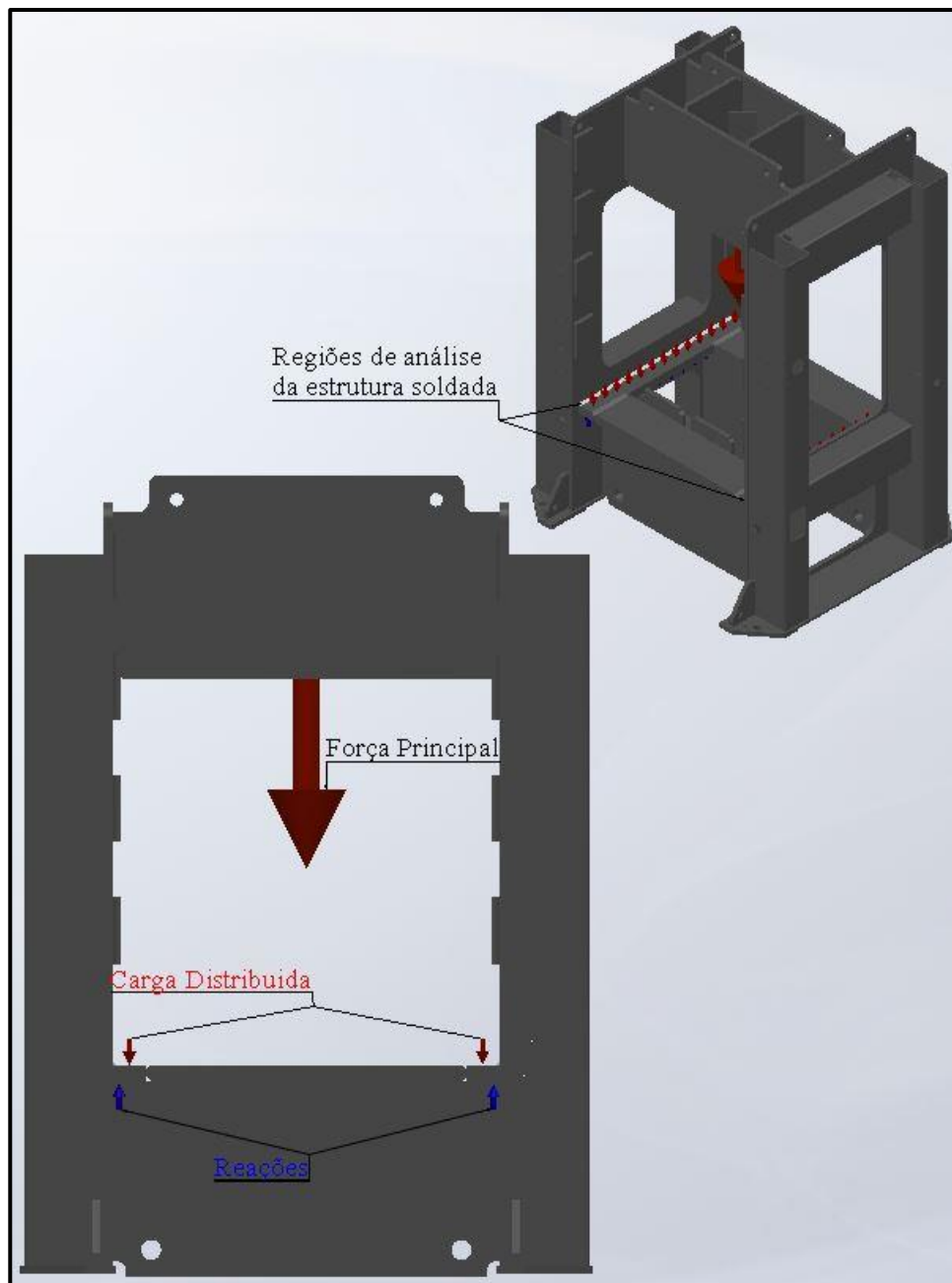
Descrição	Categoria de stress	Constante $C_f$	Limite de stress a fadiga [MPa]	Ilustração
Metal base e solda nas conexões da extremidade transversal dos elementos da placa carregada por tensão usando o par de soldas de filete em lados opostos da placa.	C	$44 \times 10^8$	69	
Metal de base e solda adjacentes as emendas de solda do canal das chapas, formas laminadas ou seções transversais construídas, sem alteração na seção transversal	B	$120 \times 10^8$	110	

Fonte: adaptado da AWS D1.1 (2015).

#### 2.4.4 Regiões de análise e simplificação das cargas envolvidas na estrutura soldada

Mediante a avaliação da estrutura soldada, optou-se por fazer a análise das juntas soldadas que se encontram nas regiões do equipamento que são responsáveis por suportar a maior carga do produto quando o mesmo está em regime de trabalho, a figura 15 ilustra a região descrita, juntamente com as forças de ação e reação dessas regiões.

Figura 15 – Regiões de análise da estrutura soldada e simplificação das cargas envolvidas



Fonte: o autor (2019).

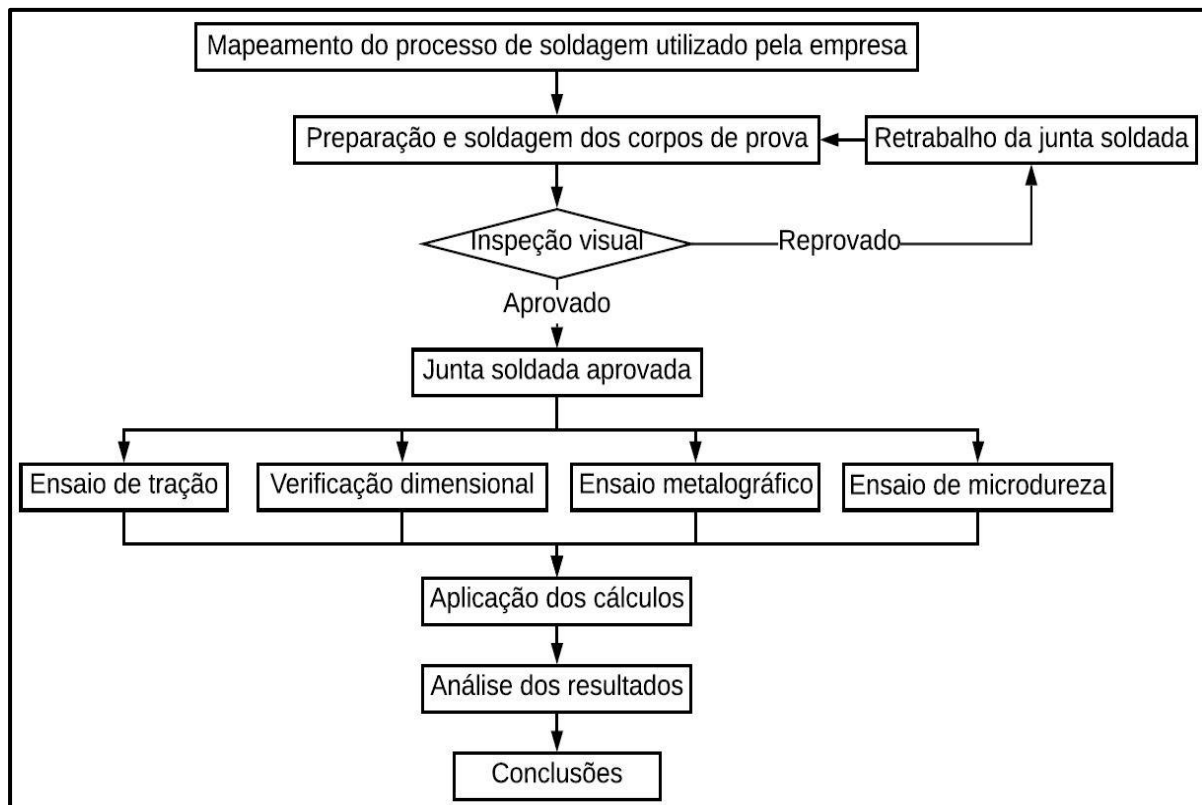
### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do estudo proposto, e envolve os materiais e métodos utilizados para obter os dados necessários para realizá-lo.

#### 3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

Com o intuito de apresentar as etapas para o desenvolvimento do trabalho experimental, foi desenvolvido o fluxograma ilustrado na figura 16.

Figura 16 – Fluxograma das etapas do estudo proposto



Fonte: o autor (2019).

#### 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no procedimento experimental são o aço estrutural baixo carbono fabricado conforme a norma ASTM A-36, com chapas de 12,7mm e 25,4mm de espessura que servirão como metal de base, os arames AWS A5.18: ER70S-6 e AWS A5.28:

ER110S-G, com diâmetros de 1.2 e 1 respectivamente, que servirão como metal de adição e o gás de proteção utilizado para a efetuar o procedimento de soldagem GMAW será o CO<sub>2</sub>.

### 3.2.1 Mapeamento do processo de soldagem atual

Através do mapeamento do processo de soldagem atual utilizado pela empresa, foi possível constatar que existem diversas variações no processo, que resultam principalmente da espessura de chapa utilizada em cada estrutura. A soldagem é executada normalmente em oito passes, com junta de penetração parcial e chanfro em V, conforme ilustrado pelas figuras 3, 4 e 5. A tabela 8 mostra os parâmetros de soldagem utilizados pela empresa atualmente.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo atual e aporte térmico

<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Tensão	22 a 26 V
Corrente	200 a 240 A
Velocidade de alimentação do arame	5 m/min
Velocidade de soldagem	0,4 m/min
Vazão do gás de proteção	12 - 15 L/min
Aporte térmico	0,792 KJ/mm

Fonte: o autor (2019).

### 3.2.2 Definição dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados para efetuar a união dos materiais que serviram como matéria-prima para a retirada dos corpos de prova, foram baseados nos padrões que a empresa utiliza, contudo para melhorar a eficácia do procedimento e atingir os resultados de maneira satisfatória, foram necessários alguns ajustes conforme reposta da máquina. Os dados citados acima são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de soldagem usados na confecção dos corpos e prova e aporte térmico

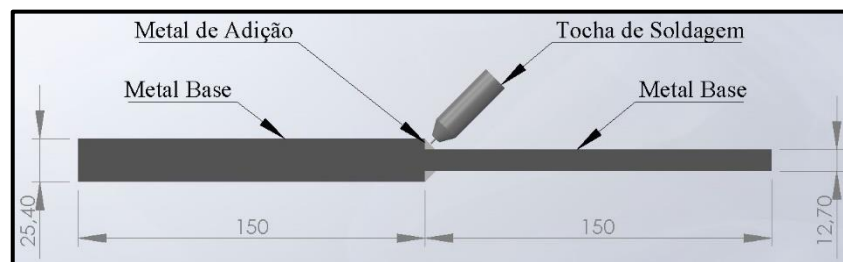
<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Tensão	24 a 28 V
Corrente	210 a 250 A
Velocidade de alimentação do arame	5,5 m/min
Velocidade de soldagem	0,6 m/min
Vazão do gás de proteção	12 - 15 L/min
Aporte térmico	0,598 KJ/mm

Fonte: o autor (2019).

### 3.2.3 Procedimento de soldagem

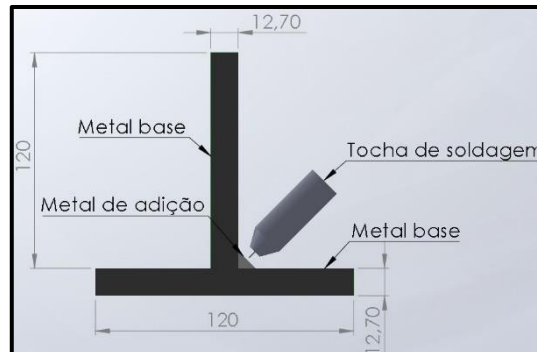
As chapas foram soldadas de forma manual com duas configurações distintas: a primeira situação na posição plana com junta de topo, ilustrada na figura 17. Já na segunda situação a posição também foi a plana, porém com junta em ângulo, ilustrada na figura 18. O processo de soldagem GMAW foi realizado utilizando uma máquina ESAB modelo LAB 475, mostrada na figura 19.

Figura 17 – Soldagem dos corpos de prova na posição plana com junta de topo



Fonte: o autor (2019).

Figura 18 – Soldagem dos corpos de prova na posição plana com junta em ângulo



Fonte: o autor (2019).

Figura 19 – Máquina utilizada no processo de soldagem

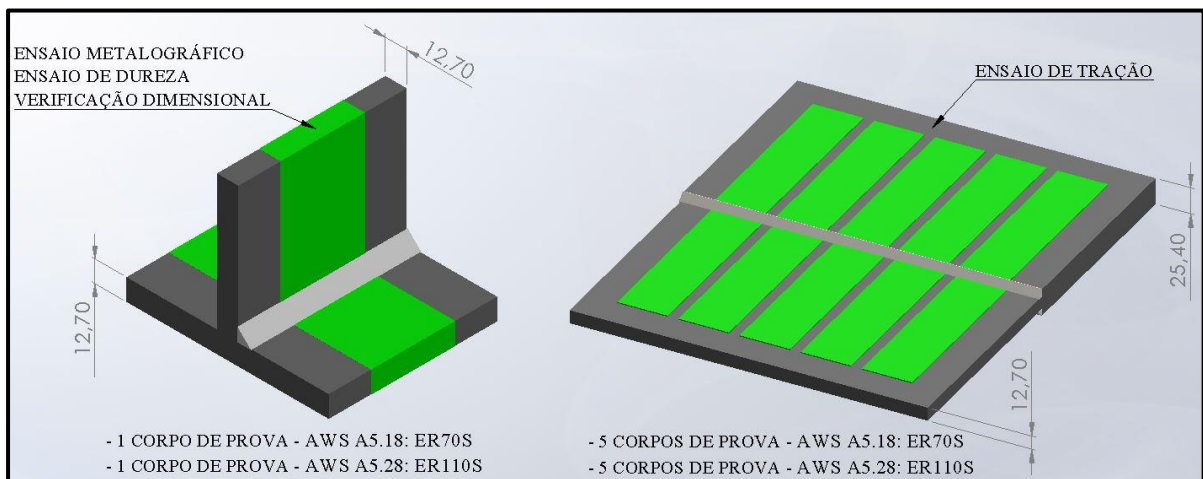


Fonte: o autor (2019).

### 3.2.4 Retirada dos corpos de prova

Conforme citado anteriormente, foram soldadas chapas de 12,7mm e 25,4mm de espessura do aço ASTM A-36 de acordo com os padrões geométricos citados nas figuras 16 e 17 do item 3.1.2, para retirada dos corpos de prova para verificação dimensional, ensaios de tração, metalografia e microdureza das juntas soldadas. A figura 20 mostra o layout esquemático para retirada dos corpos de prova. Os materiais foram seccionados com largura de 45mm através de uma serra fita com lubrificação localizada modelo Schrack, que pode ser visualizada na figura 21.

Figura 20 – Layout esquemático para retirada dos corpos de prova



Fonte: o autor (2019).

Figura 21 – Máquina utilizada no processo de corte dos corpos de prova



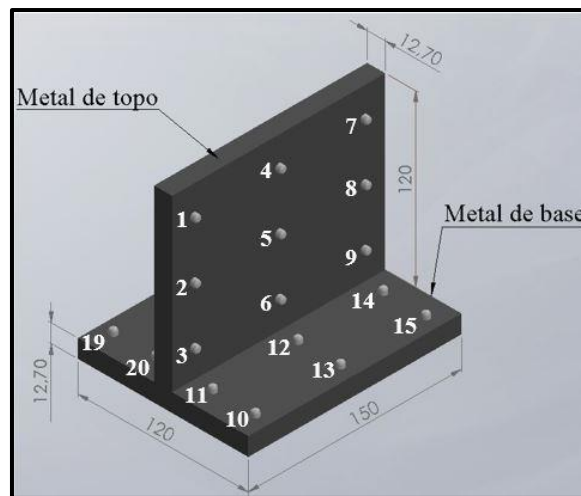
Fonte: o autor (2019).



### 3.2.5 Verificação dimensional

O dimensionamento para os corpos de provas soldados para o ensaio de verificação dimensional, foram feitos de forma a permitir a avaliação da variação de posicionamento de vinte pontos distintos, sendo nove situados no metal de topo e onze no metal de base, conforme demonstrado na figura 22.

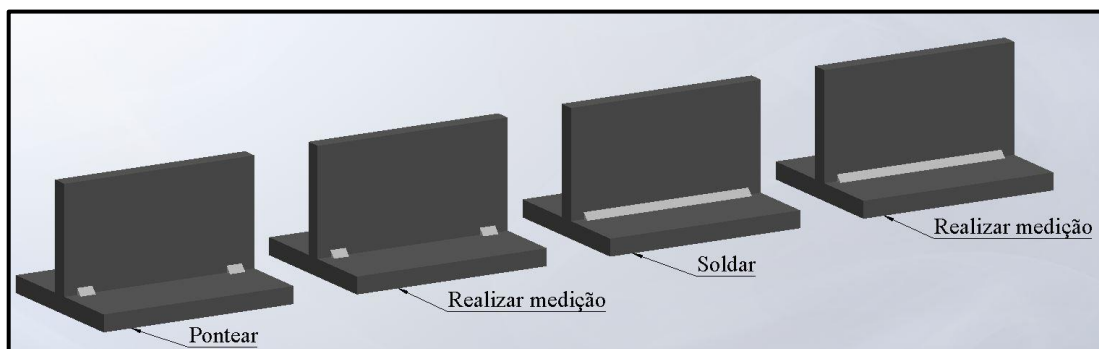
Figura 22 – Corpo de prova com indicação dos pontos a serem analisados



Fonte: o autor (2019).

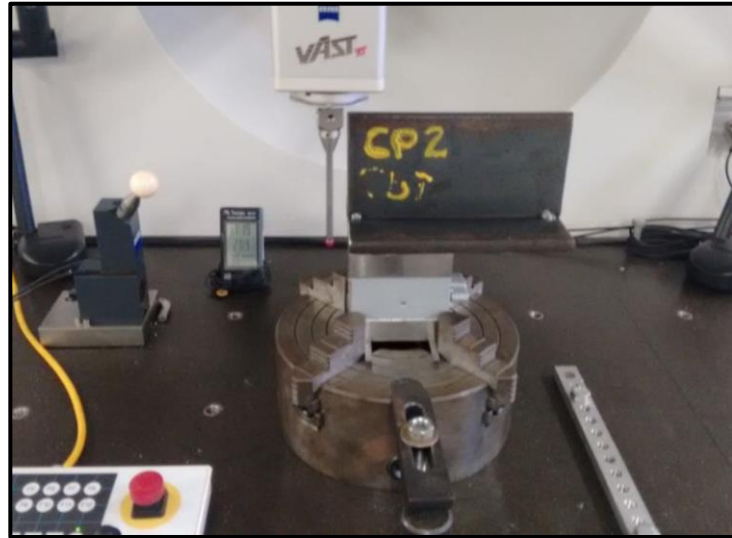
O procedimento adotado para realizar estes ensaios consiste em efetuar a medição dos corpos de prova que foram somente ponteados, executar o procedimento de soldagem com os dois metais de adição distintos, e após realizar uma nova medição, conforme ilustrado na figura 23. As medições foram feitas na máquina de dimensão por coordenadas Zeiss modelo GageMax demonstrado na figura 24, localizado no laboratório de novas tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, responsável pelos ensaios. Foram realizados três ensaios para cada condição.

Figura 23 – Procedimento adotado para verificação dimensional



Fonte: o autor (2019).

Figura 24 – Equipamento utilizado para verificação dimensional



Fonte: o autor (2019).

### 3.2.6 Ensaio de tração

O dimensionamento para os corpos de provas soldados para o ensaio de tração, foram feitos de acordo com a norma ASME IX-150, utilizada pelo laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Caxias do Sul. O equipamento VEB onde os ensaios foram feitos está ilustrado na figura 25. Foram realizados 5 ensaios para cada condição, afim de avaliar e comparar os limites de resistência a tração das juntas soldadas.

Figura 25 – Equipamento utilizado nos ensaios de tração



Fonte: o autor (2019).

### 3.2.7 Ensaio metalográfico

O ensaio de micrografia foi realizado por meio de microscopia ótica, com a finalidade de analisar a microestrutura da junta soldada e as transformações ocorridas no metal base, na zona de transição e no metal de adição devido a variação do mesmo.

O ensaio de macrografia foi realizado por meio de microscopia ótica de acordo com as normas NBR 13284:95 e NBR 8108:1983 com sete vezes de aumento, com a finalidade de analisar a macroestrutura da junta soldada, avaliando a dimensão da perna, da garganta e a penetração do metal de solda no metal base. O equipamento utilizado para realizar os ensaios metalográficos foi o microscópio digital Nikon modelo Epiphot 200, representado na figura 26.

Figura 26 – Equipamento utilizado nos ensaios metalográficos



Fonte: o autor (2019).

### 3.2.8 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado a partir dos mesmos corpos de provas utilizados para a análise metalográfica. A escala de dureza utilizada foi a Vickers, conforme a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1. O equipamento utilizado foi o microdurômetro Shimadzu HMV-2, com carga de 0,3 Kg, ilustrado na figura 27. As medições foram realizadas na espessura dos corpos de prova, após prévia preparação, partindo do metal de adição, passando pela zona termicamente afetada pelo calor e terminado no metal base, formando um perfil de dureza de dezoito pontos.

Figura 27 – Equipamento utilizado nos ensaios de microdureza

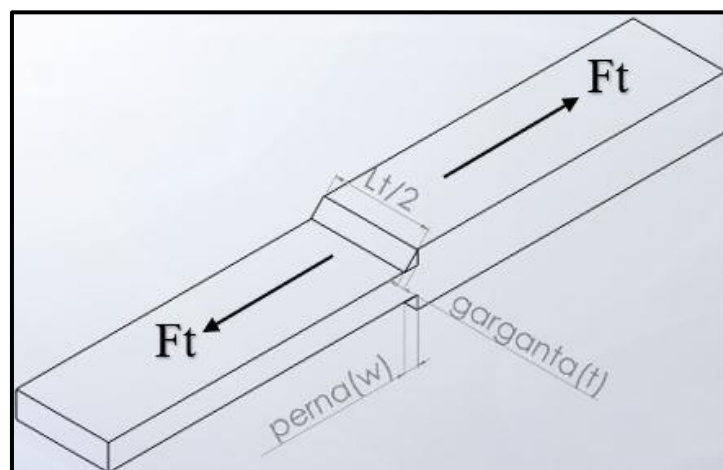


Fonte: o autor (2019).

### 3.2.9 Cálculos de resistência mecânica teórica e diagrama de corpo livre simplificado

Os cálculos das propriedades mecânicas das juntas soldadas foram desenvolvidos tratando a solda como uma linha, com base no tipo de esforços aplicados sobre as juntas, na variação do metal de adição e nas configurações das soldas executadas durante os testes, conforme ilustrado na figura 28.

Figura 28 – Configuração da junta soldada dos corpos de prova



Fonte: o autor (2019).

Utilizando as equações a seguir, foi possível determinar o tamanho das juntas soldadas utilizadas nos corpos de prova:

$$t^2=w^2+w^2 \quad (7)$$

$$L_t=l+b \quad (8)$$

$$A_t=t*L_t \quad (9)$$

$$F_t=LR*A_t \quad (10)$$

Nestas equações  $t$  é a garganta da solda [mm];  $w$  representa a perna da solda [mm];  $L_t$  é o comprimento total da garganta de solda [mm];  $l$  é o comprimento [mm] e  $b$  é a largura da solda [mm];  $A_t$  é a área total da garganta de solda [mm<sup>2</sup>];  $F_t$  é a força teórica suportada pelo cordão da solda [N]; e  $LR$  é o limite de resistência do metal de adição [MPa].

Os valores de entrada e os resultados obtidos através da resolução das equações acima, para as duas variações do metal de adição do estudo, são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Valores de entrada e resultados dos cálculos teóricos das juntas soldadas

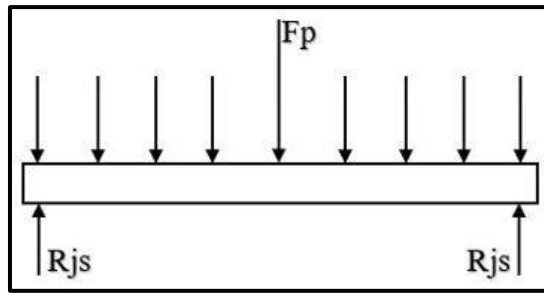
<b>Metal de adição</b>	<b>w (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>L<sub>t</sub> (mm)</b>	<b>A<sub>t</sub> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LR (MPa)</b>	<b>F<sub>t</sub> (N)</b>
AWS A5.18: ER70S	6,35	9	90	810	480	388.800,00
AWS A5.28: ER110S	4	5,7	90	513	760	389.880,00

Fonte: o autor (2019).

Para verificar as tensões admissíveis de cisalhamento teóricas aplicadas sobre as juntas soldadas no processo atual, foi escolhido um equipamento específico da empresa, com capacidade de carga de duzentas toneladas e comprimento total de garganta de solda igual a dois mil seiscentos e vinte milímetros. O equipamento citado, é mostrado na figura 15 do item 2.4.4.

Através da aplicação da equação 3, apresentada no item 2.4.1, as equações 7, 8, 9 e 10 informadas no item 3.2.9, o diagrama de corpo livre simplificado apresentado na figura 29 juntamente com a configuração da junta soldada e as cargas envolvidas mostradas na figura 30 e a equação 11, se obteve os resultados ilustrados na tabela 11.

Figura 29 – Diagrama de corpo livre simplificado da estrutura soldada

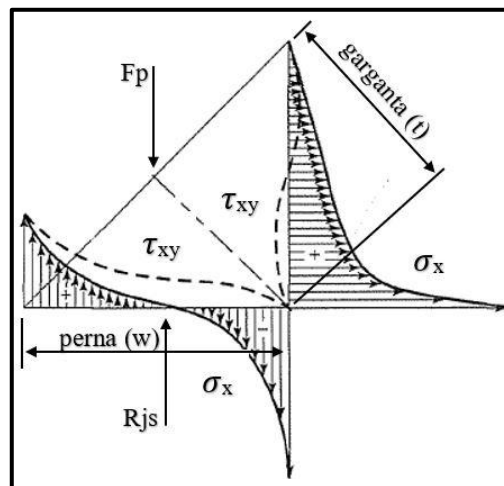


Fonte: o autor (2019).

$$\uparrow + \Sigma Fy = 0; \Sigma Fy = - Fp + Rjs; Fp/2 = Rjs \tag{11}$$

Onde  $\Sigma Fy$  é o somatório das forças na direção vertical;  $Fp$  é a força principal [kN]; e  $Rjs$  é a reação nas juntas soldadas [kN].

Figura 30 – Configuração da junta soldada da estrutura da prensa e distribuição de forças



Fonte: o autor (2019).

Tabela 11 – Valores de entrada e resultados dos cálculos teóricos da tensão de cisalhamento

Metal de adição	w (mm)	t (mm)	Lt (mm)	Acis (mm <sup>2</sup> )	Fp (kN)	$\tau_{xy}$ (MPa)	LR (MPa)
AWS A5.18: ER70S	6,35	9	2620	23.580	1.962,33	84,00	480
AWS A5.28: ER110S	4	5,7	2620	14.934	1.962,33	132,00	760

Fonte: o autor (2019).

Com base no resultado de tensão de cisalhamento admissível apresentado na tabela acima e aplicando a equação 3 ilustrada no item 2.1.4, constata-se que a tensão aplicada nas juntas soldadas está dentro do que a norma AWS recomenda para carregamentos estáticos, que especifica que cordões de solda sejam limitadas a 30% da resistência à tração do eletrodo.

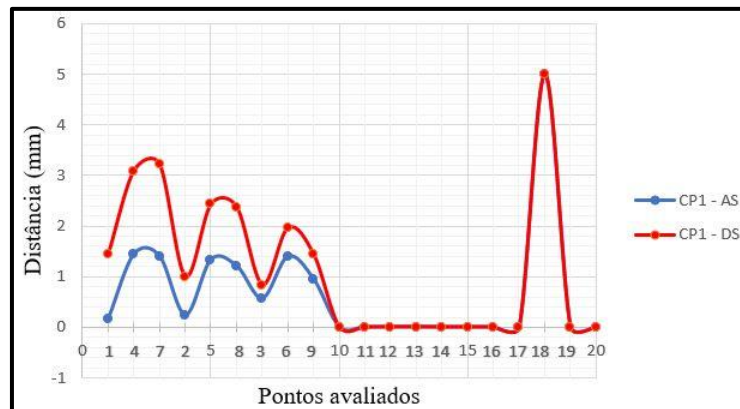
## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados, com base no estudo desenvolvido.

### 4.1 RESULTADO DA VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL

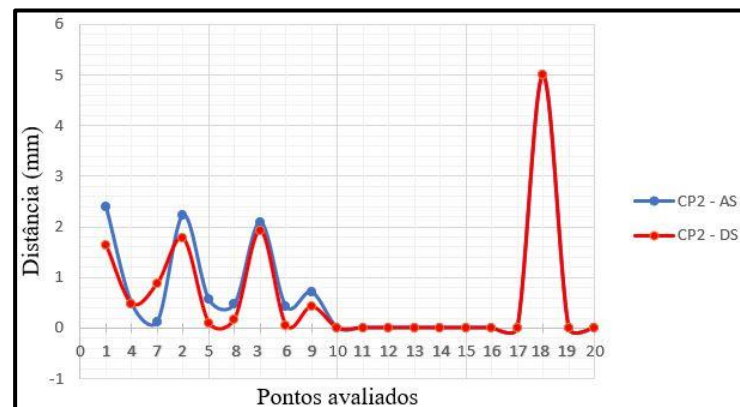
Foram realizadas três medições em cada um dos dois corpos de prova, afim de se obter maior confiabilidade no comportamento dimensional dos mesmos antes e depois da soldagem. O Apêndice A apresenta os resultados das duas variações do metal de adição, AWS A5.18: ER70S-6 e AWS A5.28: ER110S-G. Os gráficos 31 e 32 apresentam os resultados das configurações acima citadas, porém, para melhorar o entendimento e diminuir a incerteza dos resultados da medição, foi feito a média das três medições em cada ponto.

Figura 31 – Resultado da verificação dimensional com o AWS A5.18: ER70S-6



Fonte: o autor (2019).

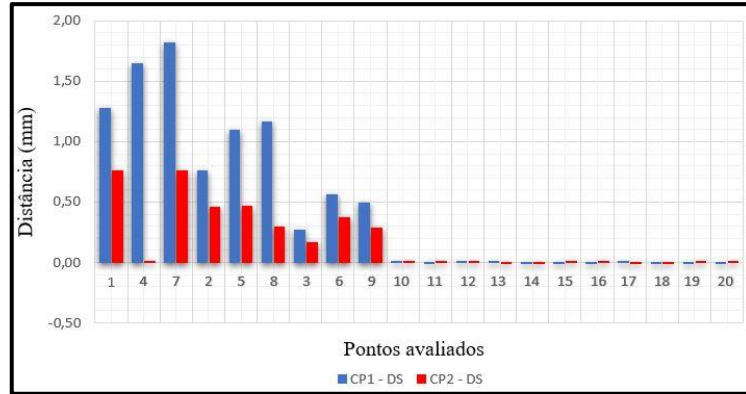
Figura 32 – Resultado da verificação dimensional com o AWS A5.28: ER110S-G



Fonte: o autor (2019).

O gráfico da figura 33 mostra os resultados de forma comparativa, das duas configurações depois da solda.

Figura 33 – Comparativo dos resultados da verificação dimensional após a soldagem



Fonte: o autor (2019).

Através dos resultados da verificação dimensional é possível afirmar que em ambos os corpos de prova há variações dimensionais entre o antes e o depois da soldagem, principalmente até o ponto 9, que são aqueles situados na chapa de topo. Observa-se no ponto 18, uma variação de aproximadamente 5mm nas duas configurações, o que pode ser explicado através da forma de fixação utilizada para efetuar a soldagem. Contudo, os corpos de prova soldados com o metal de adição AWS A5.28: ER110S-G, apresentam amplitude entre os resultados menores do que os corpos de prova soldados com o AWS A5.18: ER70S-6, o que pode ser explicado pela menor aporte térmico gerado na configuração 2, que é permitido através do aumento das propriedades mecânicas do metal de solda desta configuração, possibilitando o tamanho da garganta da junta soldada inferior ao da condição 1. Os pontos de 1 a 9 e o ponto 18, citados no parágrafo acima, são mostrados na figura 34.

Figura 34 – Pontos de verificação dimensional e fixação dos corpos de prova para soldagem



Fonte: o autor (2019).

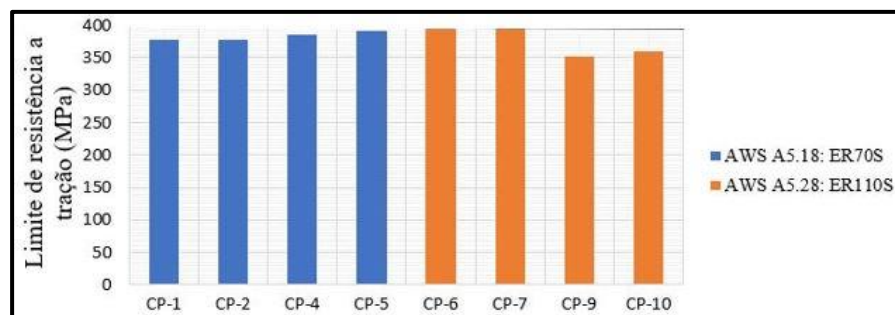


## 4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram realizados dez ensaios de tração, sendo cinco para cada metal de adição. Contudo, após realizar os cinco ensaios de tração no AWS A5.28: ER110S-G, foi constatado que devido à falta de fusão localizada entre o metal de solda e o metal base, os corpos de prova estavam apresentando ruptura nessa região, para garantir que os resultados fossem satisfatórios, os corpos de prova desta configuração foram confeccionados novamente.

O Apêndice B apresenta os valores de limite de resistência a tração dos corpos de prova ensaiados. O gráfico da figura 35 mostra os resultados deste ensaio de forma comparativa.

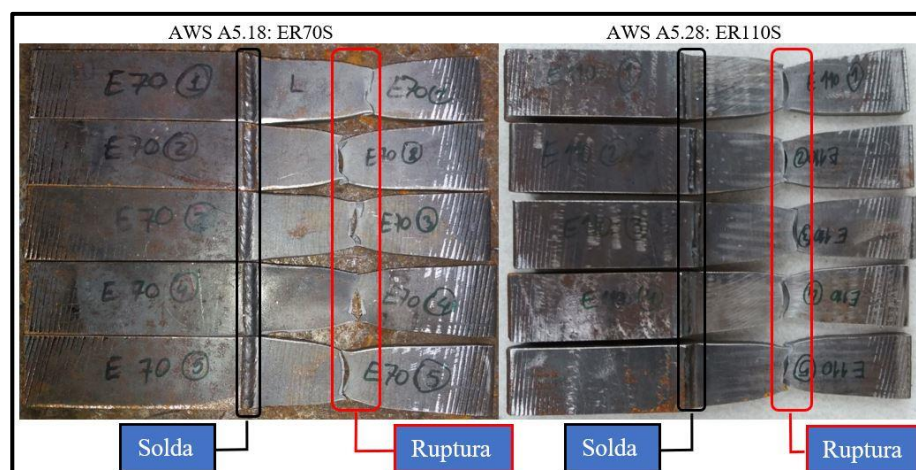
Figura 35 – Limite de resistência a tração dos corpos de prova



Fonte: o autor (2019).

É possível observar no Apêndice B uma variação no corpo de prova oito, soldado com o metal de adição AWS A5.28: ER110S-G, podendo ser decorrente de uma possível falha interna no metal base, ou falha no sistema de medição. A figura 36 mostra os corpos de prova após o ensaio de tração.

Figura 36 – Corpos de prova após a ruptura



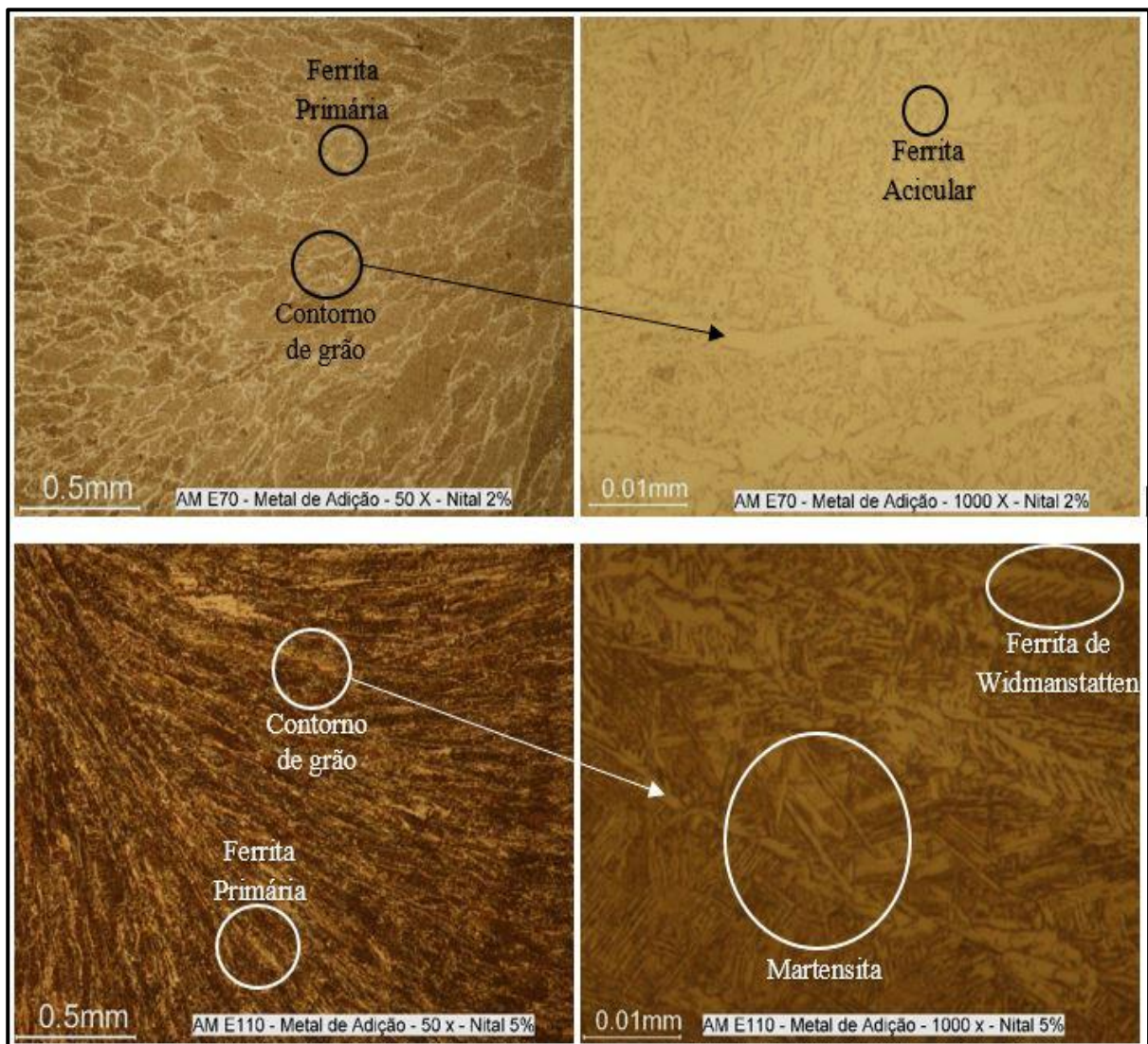
Fonte: o autor (2019).

### 4.3 RESULTADO DOS ENSAIOS METALOGRÁFICOS

#### 4.3.1 Resultados da micrografia

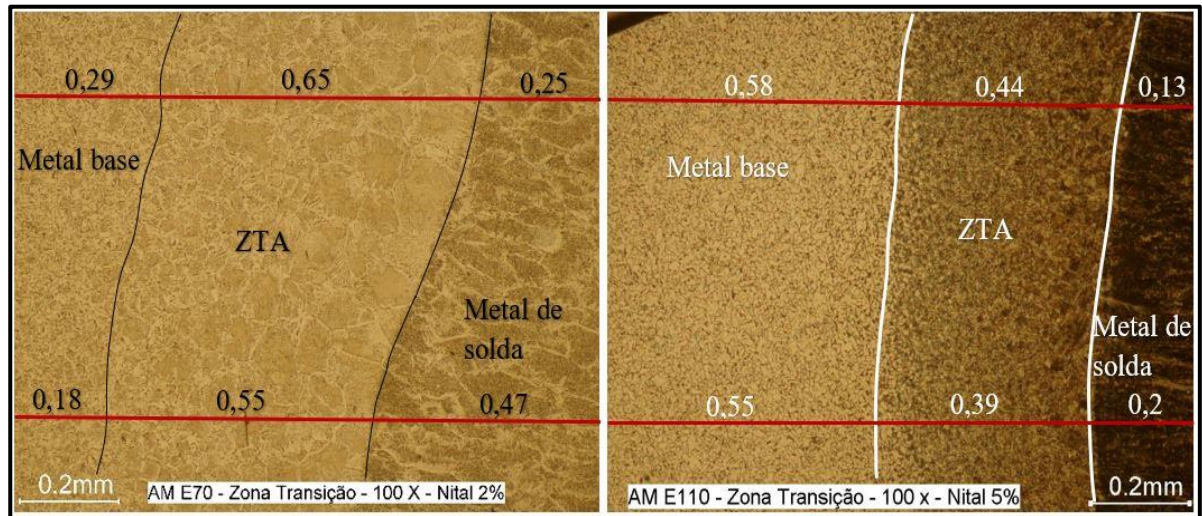
As amostras para a análise do metal de adição AWS A5.18: ER70S-6 e AWS A5.28: ER110S-G foram atacadas com Nital 2% e 5% respectivamente, e as imagens obtidas em 50x, 100x, 500x e 1000x de aumento sobre o metal base, metal de adição, zona de transição e zona termicamente afetada. Foram analisadas duas amostras, sendo uma delas para cada variação do estudo. As figuras 37, 38 e 39 a seguir, mostram de maneira comparativa as micrografias do metal de adição, zona de transição e zona afetada termicamente, respectivamente, para as duas variações do estudo. Já na figura 40 é apresentado a micrografia do metal base.

Figura 37 – Micrografia dos metais de adição AWS A5.18: ER70S e AWS A5.28: ER110S



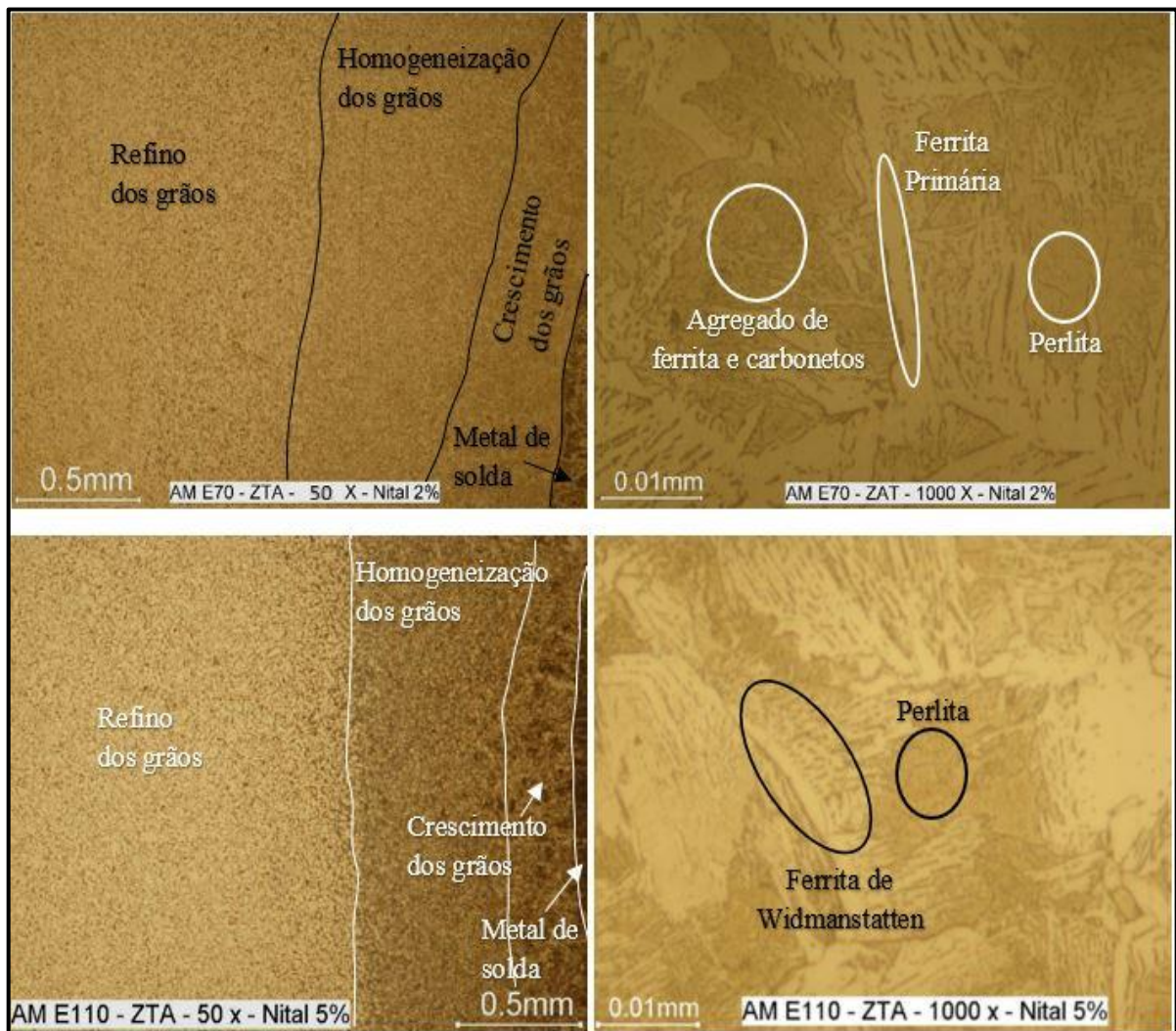
Fonte: o autor (2019).

Figura 38 – Micrografia da zona de transição das juntas soldadas



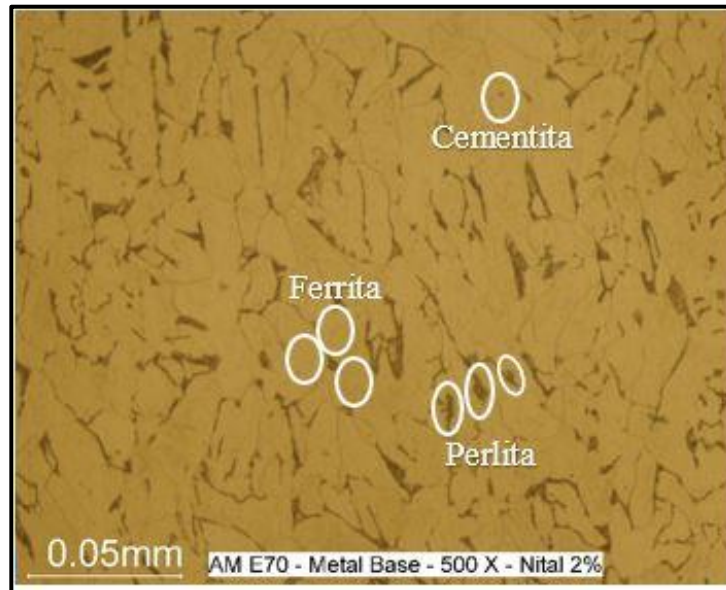
Fonte: o autor (2019).

Figura 39 – Micrografia da zona afetada termicamente das juntas soldadas



Fonte: o autor (2019).

Figura 40 – Micrografia do metal de base



Fonte: o autor (2019).

Através da figura 37 na parte superior, é possível observar a presença de ferrita primária e ferrita acicular na amostra com o metal de adição AWS A5.18: ER70S-6, este resultado pode ser atribuído ao percentual de manganês encontrado no metal de adição, que promove um refinamento na microestrutura, levando a formação dos microconstituintes citados. Já na parte inferior, na amostra com metal de adição AWS A5.28: ER110S-G, aparecem a ferrita primária e ferrita de Widmanstatten, iniciando seu crescimento diretamente do contorno de grão da austenita. A martensita também está presente aparecendo na forma laminar, sendo decorrente da composição química do metal de solda, que apresenta teores consideráveis de manganês, níquel, cromo e molibdênio e da alta velocidade de resfriamento da junta soldada.

Na figura 38, são mostradas as zonas de transições das duas variações do metal de adição, no lado esquerdo encontra-se a junta soldada com o metal de adição AWS A5.18: ER70S-6, já no lado direito, o metal de adição AWS A5.28: ER110S-G, nota-se entre as amostras uma variação no tamanho das três regiões avaliadas, metal de solda, ZTA e metal base, que pode ser explicado pela variação da composição química entre os metais de adição e pela variação dos parâmetros de soldagem.

A figura 39 apresenta a ZTA do metal de solda AWS A5.18: ER70S-6 na parte superior e na parte inferior o metal de solda AWS A5.28: ER110S-G, nota-se a transição do metal de solda a direita para a ZTA, onde se encontra a região de crescimento e homogeneização dos grãos, ao centro da imagem, progredindo para o refino de grãos à esquerda.

Em relação ao tamanho dessas regiões, não houve variações significativas entre as duas configurações, porém é possível notar na primeira condição, agregado de ferrita e carbonetos, além da ferrita primária e perlita. Já segunda condição, observa-se perlita e ferrita de Widmanstätten.

Na figura 40 é apresentado a microestrutura do metal de base, composta de ferrita com grãos de perlita e cementita nos contornos de grão.

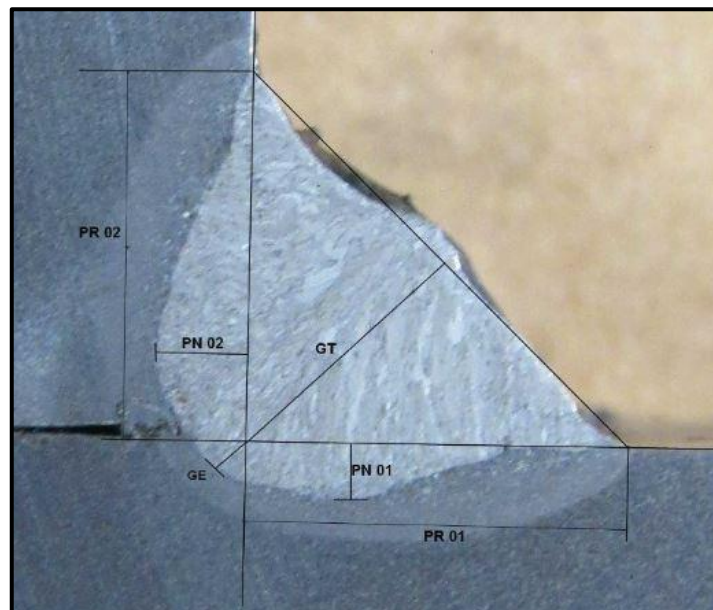
#### 4.3.2 Resultados da macrografia

Foram realizados 2 ensaios, sendo um para cada variação do estudo. Através do resultado da macrografia é possível observar as seguintes dimensões da junta soldada:

- a) perna horizontal (PR 01);
- b) perna vertical (PR 02);
- c) garganta de solda teórica (GT);
- d) garganta de solda efetiva (GT+GE);
- e) penetração chapa da base (PN 01);
- f) penetração chapa de topo (PN 02).

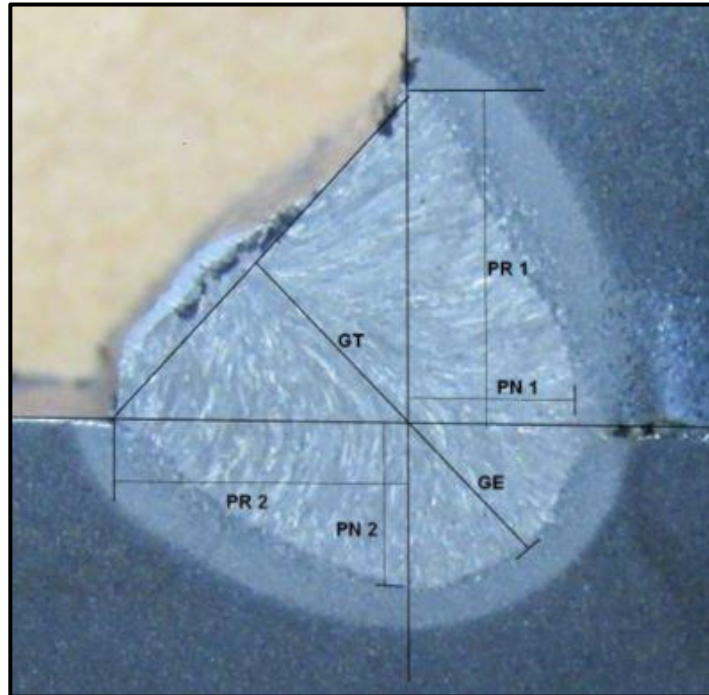
A figura 41 ilustra de forma esquemática as dimensões citadas da primeira configuração, já na figura 42 é possível observar as dimensões da segunda condição. Os resultados da macrografia são apresentados na tabela 12.

Figura 41 – Esquemático das dimensões da junta soldada com o AWS A5.18: ER70S-6



Fonte: o autor (2019).

Figura 42 – Esquemático das dimensões da junta soldada com o AWS A5.28: E110S-G



Fonte: o autor (2019).

Tabela 12 – Resultados da macrografia

Metal de adição	PR 01 (mm)	PR 02 (mm)	GT (mm)	GT+GE (mm)	PN 01 (mm)	PN 02 (mm)
AWS A5.18: ER70S	7,1	7,2	5,1	6,1	1,1	2
AWS A5.28: ER110S	5	4,8	3,2	6,1	2,8	2,9

Fonte: o autor (2019).

Através dos resultados da macrografia é possível afirmar que na junta soldada com o metal de adição AWS A5.28: ER110S-G houve maior penetração em todas as direções analisadas, PN 01, PN 02 e GE, porém como o processo de soldagem foi feito de forma manual, ambas as juntas soldadas apresentaram variações nas dimensões da garganta da solda, se comparadas com as calculadas conforme o item 3.2.9.

Para confrontar os resultados dos cálculos teóricos feitos no item 3.2.9, os mesmos foram refeitos com os valores encontrados através da macrografia e o ensaio de tração, e assim foi possível obter a tensão máxima e a tensão de cisalhamento admissível aplicadas sobre as juntas soldadas, em ambas as condições, esses resultados são mostrados nas tabelas 13 e 14. Os resultados dos limites de resistência a tração teórico e o limite de tensão máxima são mostrados no Apêndice C. Já o gráfico da figura 43 mostra os resultados do limite de resistência a tração dos corpos de prova e metais de solda, de forma comparativa.

Tabela 13 – Valores de entrada e resultados dos cálculos práticos das juntas soldadas

Metal de adição	w (mm)	t (mm)	Lt (mm)	At (mm <sup>2</sup> )	LR (MPa)	Ft (N)
AWS A5.18: ER70S	7,15	5,1	90	459	480	220.320,00
AWS A5.28: ER110S	4,9	3,2	90	288	760	218.880,00

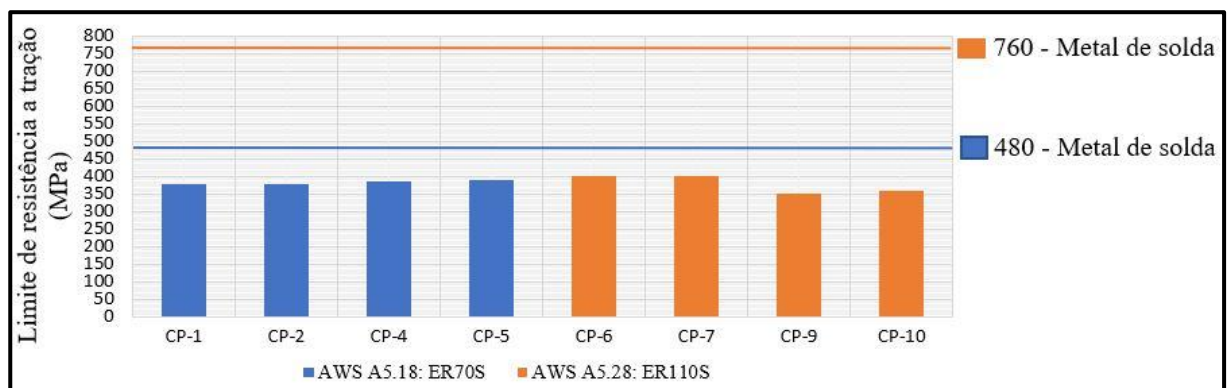
Fonte: o autor (2019).

Tabela 14 – Valores de entrada e resultados dos cálculos práticos da tensão de cisalhamento

Metal de adição	w (mm)	t (mm)	Lt (mm)	Acis (mm <sup>2</sup> )	Fp (kN)	$\tau_{xy}$ (MPa)	LR (MPa)
AWS A5.18: ER70S	7,15	5,1	2620	13.362	1.962,33	146,00	480
AWS A5.28: ER110S	4,9	3,2	2620	8.384	1.962,33	234,00	760

Fonte: o autor (2019).

Figura 43 – Comparativo entre o limite de resistência a tração dos corpos de prova e os metais de adição



Fonte: o autor (2019).

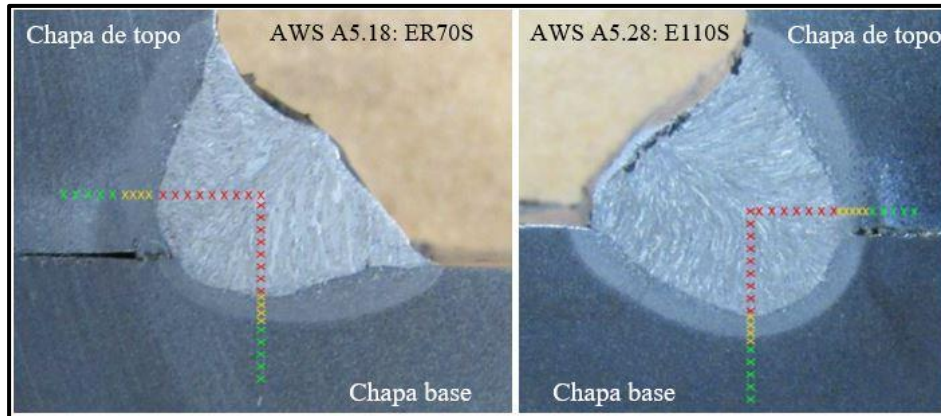
Com base nos dados do gráfico acima, nota-se que a tensão aplicada sobre as juntas soldadas dos corpos de prova, não atingiu os valores mínimos de limite de resistência a tração dos metais de solda, uma vez que a ruptura ocorreu no metal de base de menor espessura.

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICRODUREZA

Foram obtidos valores de microdureza em três regiões distintas para cada amostra, partindo do metal de adição, com medições equidistantes de 0,5mm, passando pela zona termicamente afetada e terminado no metal base, ambas com medidas a cada 0,2mm, formando um perfil de dureza de dezoito pontos, conforme ilustrado na figura 44. Os resultados da

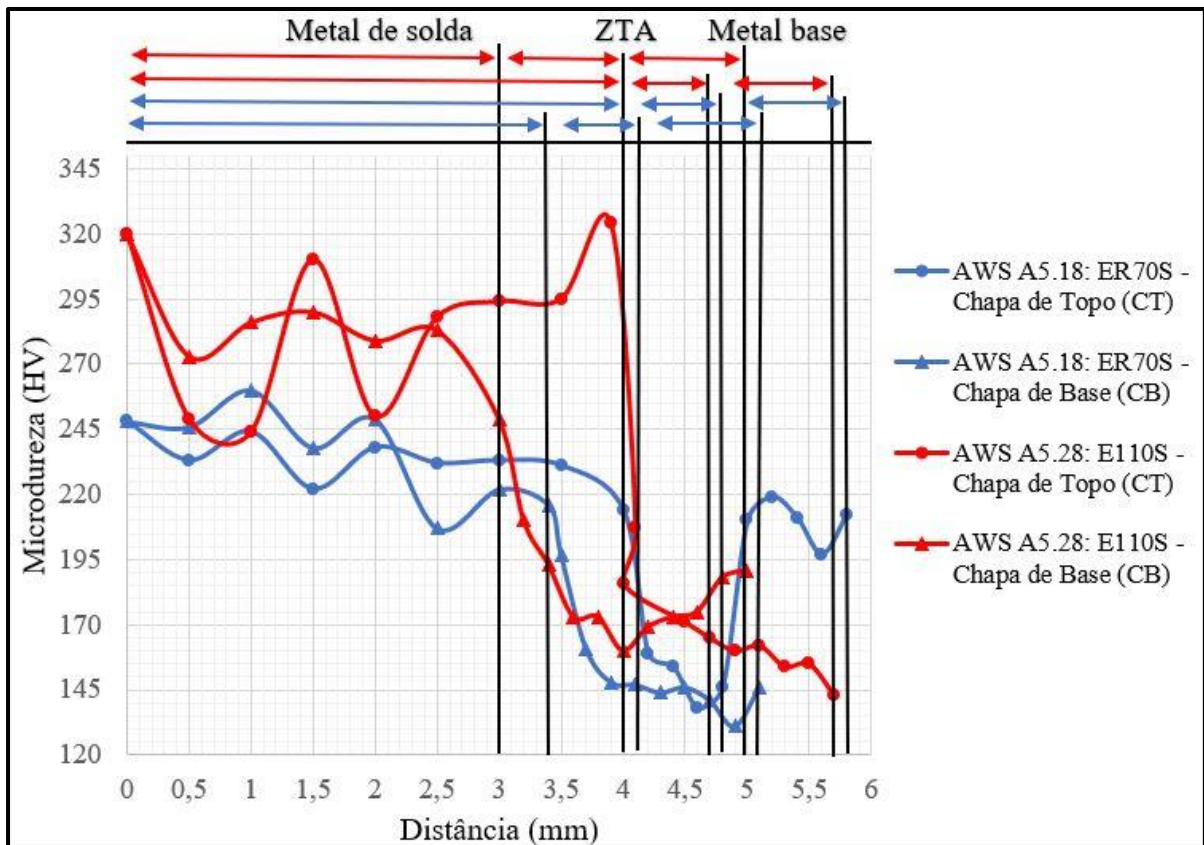
microdureza são mostrados no Apêndice D e E, e apresentados de forma comparativa no gráfico da figura 45.

Figura 44 – Pontos de medição da microdureza



Fonte: o autor (2019).

Figura 45 – Comparativo dos resultados obtidos no ensaio de microdureza



Fonte: o autor (2019).

Com base nos dados do gráfico acima, é possível verificar nos corpos de prova soldados com o metal de adição AWS A5.18: ER70S-6 que a zona do metal de solda possui em



torno de 4mm na direção da CT, e 3,4mm na direção da CB. Nas duas direções o perfil de dureza é semelhante, variando entre 214 a 260 HV. Já na zona termicamente afetada, o tamanho varia entre 4,2 e 4,8 para à CT, e entre 3,5 e 4,1 para à CB. E em relação a dureza, ambas as direções também são semelhantes variando entre 146 a 161 HV, existindo apenas um pico de dureza na direção da CB de 197 HV.

Na segunda condição onde os corpos de prova foram soldados com o metal de adição AWS A5.28: ER110S-G, observa-se que a zona do metal de solda possui 3,9mm na direção da CT, e 3mm na direção da CB. Em ambas as direções o perfil de dureza é similar, variando entre 244 a 320 HV. Em relação a zona termicamente afetada, o tamanho varia entre 4,1 e 4,7 para à CT, e entre 3,2 e 4mm par à CB. E o perfil de dureza também se mantém constante, possuindo entre 160 e 210 HV. Após estas distâncias os valores de dureza variam de acordo com as propriedades do metal de base, até uma distância medida de 5,8mm nas duas condições.

Na comparação entre as duas condições, a zona do metal de solda mostra-se com maior dureza na segunda configuração, apresentando na média 47 HV a mais na direção da CB e 53 HV na direção da CT. Esse resultado pode ser explicado através da composição química do metal de adição, e dos microconstituintes como a martensita, observados nos resultados dos ensaios de micrografia, que eleva a dureza nessa condição. Já na zona termicamente afetada, houve um decréscimo de dureza proporcional nas duas condições analisadas em relação ao metal de solda conforme o esperado, contudo a segunda configuração apresentou média de 33 HV a mais na direção da CT e 18 HV na direção da CB. Tendo em vista que nessa região não há mudança de composição química, as variações de dureza estão associadas ao teor de carbono e aos elementos de liga, presentes nos aços que formam as juntas soldadas.

Após avaliar os resultados dos ensaios mecânicos, fica claro a importância do controle dos processos de soldagem que compõem a fabricação das estruturas das prensas, podendo-se fazer as seguintes afirmações:

- a) as juntas soldadas provenientes do processo de soldagem atual utilizado pela empresa, suportam as solicitações mecânicas que lhe são impostas, o que pode ser afirmado através do ensaio de tração dos corpos de prova, soldados com o metal de adição atual, o AWS A5.18: ER70S-6;
- b) evidencia-se através dos resultados da macrografia dos corpos de prova soldados com o metal de adição proposto, o AWS A5.28: ER110S-G que a profundidade de fusão da perna e garganta da junta soldada, são maiores que a condição atual, o que é permitido através da maior corrente (amperagem) aplicada durante o processo de soldagem com o novo metal de adição;

- c) é possível verificar através dos resultados do ensaio de microdureza, que a composição química do metal de solda proposto tem influência direta no aumento da dureza da junta soldada, contudo não foi constatado a presença de martensita na zona termicamente afetada, o que poderia tornar as juntas soldadas frágeis.
- d) apesar dos dois metais de adição do presente estudo terem a característica *Overmatching*, o maior limite de resistência mecânica do AWS A5.28: ER110S-G permite que a junta soldada possua menor tamanho de garganta, sem decréscimo em suas propriedades mecânicas, resultando assim em um menor aporte térmico. Sendo esse o principal motivo pelo qual o resultado do ensaio de verificação dimensional, aponta os menores valores de empenamento dos corpos de prova dessa configuração.

Por fim, supondo-se que o metal de AWS A5.28: ER110S-G fosse implementado no lugar do AWS A5.18: ER70S-6 para efetuar o processo de soldagem das estruturas das prensas da empresa, haveria uma redução em torno de 38,2% no tempo de fabricação, uma vez que o novo metal de adição permite uma velocidade de soldagem mais rápida, de 0,4 para 0,6 m/min, e suas maiores propriedades mecânicas, permitem uma redução no tamanho da garganta da junta soldada de 9 para 5,7mm. Além disso o menor aporte térmico evidenciado na segunda condição, de 0,792 para 0,598 KJ/mm, em torno de 25% menor, mostrou-se eficaz na redução do empenamento dos corpos de prova, fazendo com que processos posteriores como a usinagem, sejam menos solicitados, uma vez que a relação de empenamento média entre as condições foi 41,3% menor na segunda condição.

## 5 CONCLUSÃO

Após avaliar os resultados obtidos, é possível concluir que:

- a) O ensaio de verificação dimensional mostrou um empenamento médio de 41,3% menor na configuração proposta em relação a atual. Este resultado deve-se ao menor aporte térmico evidenciado na nova condição.
- b) Verificou-se com o ensaio metalográfico de micrografia que, a região do metal de solda da nova condição apresenta microconstituintes que promovem o aumento da dureza, o que se deve a composição química do metal de adição. Já a zona termicamente afetada, mostrou-se menor na nova configuração devido aos parâmetros de soldagem e a composição do metal de adição, não apresentando martensita, o que tornaria a junta soldada mais frágil;
- c) O ensaio de tração juntamente com o ensaio da macrografia, mostrou que apesar do processo de soldagem atual suportar os carregamentos solicitados, com a nova condição é possível diminuir o tamanho da garganta da junta soldada em 36,7%, devido ao aumento nas propriedades mecânicas, proporcionado através da composição química do metal de adição proposto.
- d) Através do ensaio de microdureza, evidenciou-se o aumento da dureza das juntas soldadas na configuração proposta. Na região do metal de solda houve aumento médio de 50 HV, já na zona termicamente afetada o aumento médio ficou em 25,5 HV. Tendo em vista que nessa região não há mudança de composição química, esse aumento de dureza é devido a maior taxa de resfriamento decorrente do menor aporte térmico na nova condição.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir do trabalho realizado, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliar o presente estudo em um protótipo de estrutura soldada;
- b) Desenvolver os testes em relação a fadiga das propriedades mecânicas, considerando carregamentos dinâmicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONOV, AA. **Investigation of fields of residual stresses in welded structures**. Welding International, Moscow, v. 1, n 12, p. 966-969, feb. 2014.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1M** – Structural welding code steel. Miami, 2015.
- ASM, **Metals Handbook Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering**, ASM International, 1993.
- ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook**. 10.ed. Materials Park: ASM International, 1990. 7v.
- ASME IX QW-150, **Welding, Brazing and Fusing Qualifications - Tension Tests**, 2017
- ASTM A36 Steel, plate. Disponível em <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>>. Acesso em 13 outubro 2018.
- BLODGETT, Omer W. **Design of welded structures**. Cleveland: The James F. Lincoln arc Welding Foundation, 1966. ca 590 p.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2008. xx, 705 p.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed., ampl. e rev. São Paulo: 1996. ABM, 599 p.
- CUNHA, Lelis José G. da. **Solda: como, quando e por quê**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2013. 366 p.
- ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag\\_low.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf)>. Acesso em: 12 outubro 2018.
- MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996. x, 477 p.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. atual. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 362 p.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.
- NORTON, Robert Lawrence. **Machine design: an integrated approach**. 4.ed. Boston, US: Prentice Hall, c2011. xxvii, 1027 p.

SILVEIRA, J. A., Mezzomo, G. P., & Goedel, F. **Avaliação dos métodos da tensão estrutural e curva mestre para determinação da vida em fadiga de junta soldada**. Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería, v. 1, p. 318–328, set. 2016.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992. 494 p.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL

AWS A5.18: ER70S						Ponto avaliado	AWS A5.28: ER110S					
Antes da solda			Depois da solda				Antes da solda			Depois da solda		
CP -1A	CP -1B	CP -1C	CP -1A	CP -1B	CP -1C		CP -2A	CP -2B	CP -2C	CP -2A	CP -2B	CP -2C
-0,151	-0,176	-0,171	-1,45	-1,437	-1,438	<b>1</b>	2,4111	2,3872	2,3839	1,6191	1,6461	1,6482
-0,229	-0,247	-0,243	-1,008	-0,995	-0,996	<b>2</b>	2,2423	2,2245	2,2224	1,7591	1,7782	1,7799
-0,565	-0,575	-0,573	-0,845	-0,832	-0,833	<b>3</b>	2,1008	2,0834	2,0836	1,9175	1,93	1,9309
-1,427	-1,455	-1,447	-3,102	-3,086	-3,087	<b>4</b>	0,4878	0,4908	0,4506	-0,487	-0,475	-0,473
-1,326	-1,347	-1,34	-2,441	-2,425	-2,426	<b>5</b>	0,5665	0,5762	0,537	-0,102	-0,095	-0,093
-1,393	-1,407	-1,402	-1,974	-1,959	-1,959	<b>6</b>	0,4287	0,4383	0,3986	0,0542	0,0533	0,054
-1,383	-1,416	-1,406	-3,232	-3,214	-3,214	<b>7</b>	0,1324	0,1602	0,0837	-0,884	-0,884	-0,883
-1,197	-1,221	-1,211	-2,389	-2,37	-2,37	<b>8</b>	0,4746	0,5072	0,4311	-0,172	-0,18	-0,179
-0,938	-0,957	-0,947	-1,448	-1,43	-1,429	<b>9</b>	0,7082	0,7443	0,6672	0,4283	0,414	0,4146
0,0009	0,0011	0,0007	0,0026	7E-05	-2E-04	<b>10</b>	0,0013	0,0002	-0,001	0,0002	0,0002	-3E-04
0,005	0,0047	0,003	0,0011	-0,001	-4E-05	<b>11</b>	0,0025	0,0031	0,0014	-1E-03	0,0007	8E-05
0,0055	0,005	0,0032	-0,012	-0,003	-2E-04	<b>12</b>	0,0034	0,0034	0,0022	-5E-04	0,0005	-0,001
-0,003	-0,003	4E-05	-0,012	-0,008	-0,005	<b>13</b>	-7E-04	9E-05	-0,003	-0,002	-0,002	-0,003
-0,003	-0,002	0,0026	-0,003	-0,002	-0,003	<b>14</b>	-7E-04	0,0001	-0,002	-0,002	-7E-04	-0,002
0,0053	0,0053	0,0033	-0,003	-0,001	-0,001	<b>15</b>	0,0044	0,0033	0,0024	-2E-04	-5E-04	-3E-04
0,0057	0,0061	0,003	0,0002	0,0018	-6E-04	<b>16</b>	0,002	0,0032	0,0008	-5E-04	0,0009	-5E-04
-0,002	-0,002	0,0011	0,0049	-0,002	3E-05	<b>17</b>	0,0011	0,0025	-0,001	-0,002	-0,003	-0,002
-5,002	-5,002	-4,999	-4,995	-5,002	-5	<b>18</b>	-4,999	-4,997	-5,001	-5,002	-5,003	-5,002
0,0058	0,0055	0,0034	0,0076	0,0016	0,0021	<b>19</b>	0,004	0,0044	0,0032	-6E-04	0,0008	0,0001
0,0043	0,0056	0,0032	0,0036	0,0032	0,0005	<b>20</b>	0,0036	0,0033	0,0019	0,0003	-5E-04	-5E-04

Fonte: o autor (2019).

**APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO**

<b>Identificação da amostra</b>	<b>Metal de adição</b>	<b>Limite de resistência à tração (Mpa)</b>
CP-1	AWS A5.18: ER70S	378
CP-2	AWS A5.18: ER70S	378
CP-3	AWS A5.18: ER70S	386
CP-4	AWS A5.18: ER70S	386
CP-5	AWS A5.18: ER70S	391
CP-6	AWS A5.28: ER110S	399
CP-7	AWS A5.28: ER110S	399
CP-8	AWS A5.28: ER110S	221
CP-9	AWS A5.28: ER110S	352
CP-10	AWS A5.28: ER110S	359

Fonte: o autor (2019).



**APÊNDICE C – RESULTADOS DOS LIMITES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO  
TEÓRICO E TENSÃO MÁXIMA APLICADA NOS CORPOS DE PROVA**

<b>Identificação da amostra</b>	<b>Metal de adição</b>	<b>Limite de resistência à tração teórico (Mpa)</b>	<b>Limite de tensão máximo (Mpa)</b>
CP-1	AWS A5.18: ER70S	480	393
CP-2	AWS A5.18: ER70S	480	393
CP-3	AWS A5.18: ER70S	480	402
CP-4	AWS A5.18: ER70S	480	402
CP-5	AWS A5.18: ER70S	480	407
CP-6	AWS A5.28: ER110S	760	416
CP-7	AWS A5.28: ER110S	760	416
CP-8	AWS A5.28: ER110S	760	230
CP-9	AWS A5.28: ER110S	760	366
CP-10	AWS A5.28: ER110S	760	373

Fonte: o autor (2019).

**APÊNDICE D – RESULTADOS DA MICRODUREZA DA JUNTA SOLDADA COM  
O AWS A5.18: ER70S-6**

<b>Região Chapa de topo</b>	<b>Distância (mm)</b>	<b>Microdureza Chapa de topo (HV<sub>0,3</sub>)</b>	<b>Microdureza Chapa base (HV<sub>0,3</sub>)</b>	<b>Distância (mm)</b>	<b>Região Chapa base</b>
<b>Metal de solda</b>	0	248	248	0	<b>Metal de solda</b>
	0,5	233	246	0,5	
	1	244	260	1	
	1,5	222	238	1,5	
	2	238	249	2	
	2,5	232	207	2,5	
	3	233	222	3	
	3,5	231	216	3,4	
4	214				
<b>ZTA</b>	4,2	159	197	3,5	<b>ZTA</b>
	4,4	154	161	3,7	
	4,6	138	148	3,9	
	4,8	146	147	4,1	
<b>Chapa de topo</b>	5	210	144	4,3	<b>Chapa base</b>
	5,2	219	146	4,5	
	5,4	211	141	4,7	
	5,6	197	131	4,9	
	5,8	212	146	5,1	

Fonte: o autor (2019).

**APÊNDICE E – RESULTADOS DA MICRODUREZA DA JUNTA SOLDADA COM O  
AWS A5.28: E110S-G**

<b>Região Chapa de topo</b>	<b>Distância (mm)</b>	<b>Microdureza Chapa de topo (HV<sub>0,3</sub>)</b>	<b>Microdureza Chapa base (HV<sub>0,3</sub>)</b>	<b>Distância (mm)</b>	<b>Região Chapa base</b>
<b>Metal de solda</b>	0	320	320	0	<b>Metal de solda</b>
	0,5	249	273	0,5	
	1	244	286	1	
	1,5	310	290	1,5	
	2	250	279	2	
	2,5	288	283	2,5	
	3	294	249	3	
	3,5	295			
	3,9	324			
<b>ZTA</b>	4,1	207	210	3,2	<b>ZTA</b>
	4,3	186	193	3,4	
	4,5	171	173	3,6	
	4,7	165	173	3,8	
			160	4	
<b>Chapa de topo</b>	4,9	160	169	4,2	<b>Chapa base</b>
	5,1	162	173	4,4	
	5,3	154	175	4,6	
	5,5	155	188	4,8	
	5,7	143	191	5	

Fonte: o autor (2019).