

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**DANIEL FERNANDO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM DE CHAPAS DE AÇO  
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L SOLDADAS PELO PROCESSO GTAW**

Ilha Solteira  
2017

**DANIEL FERNANDO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM DE CHAPAS DE AÇO  
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L SOLDADAS PELO PROCESSO GTAW**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação.

**Orientador:** Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Ilha Solteira  
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586 Silva, Daniel Fernando da.  
Influência do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316I soldadas pelo processo GTAW / Daniel Fernando da Silva. - Ilha Solteira: [s.n.], 2017  
81 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2017

Orientador: Vicente Afonso Ventrella  
Inclui bibliografia

1. Soldagem GTAW. 2. Soldagem GTAW. 3. Aporte térmico. 4. Propriedades mecânicas.

  
**Raiane da Silva Santos**  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação  
Seção Técnica de Fichas, Atendimento ao Usuário e Documentação  
Supervisor Técnico do Bloco  
CRB 008-0000



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L SOLDADAS PELO PROCESSO GTAW

**AUTOR: DANIEL FERNANDO DA SILVA**

**ORIENTADOR: VICENTE AFONSO VENTRELLA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA  
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Ilha Solteira, 07 de julho de 2017

**DEDICO**, a minha mãe **Maria Honória da Silva**  
(in memoriam), que me ensinou que o estudo é o  
melhor caminho para um homem e por sempre me  
dar condições para realizar grandes conquistas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao nosso Deus criador, por estar sempre presente em minha vida nos momentos fáceis e difíceis, sendo o nosso guia espiritual sobre esta terra.

A minha mãe, Maria Honória da Silva (*in memoriam*), mulher simples, mas de grande coração, aos meus irmãos Danilo Aparecido da Silva e José Antônio da Silva Neto (*in memoriam*), aos meus tios José Antônio Honório da Silva e Aparecido Honório da Silva, as minhas tias Gilda Honória da Silva e Maria das Dores Honória da Silva (*in memoriam*), pessoas importantes neste meu desenvolvimento pessoal e profissional e a minha avó Ricardina de Souza Filho (*in memoriam*), sempre sorridente e feliz na vida simples que levava, mas bola para frente, pois a vida continua e somos passageiros neste mundo.

A minha esposa e companheira nas atuais conquistas da minha vida, Cristiane Marques de Freitas Loiola e também a toda sua família.

A todos meus amigos de escola, faculdade e também os de profissão, em especial aos meus amigos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde. Aos diretores das Faculdades de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde, Prof. Dr. Warley Augusto Pereira, Prof. Me. João Pires, pela confiança no meu trabalho e no desenvolvimento de projetos importantes, como o Mini Baja, na Universidade de Rio Verde.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, principalmente aos funcionários de laboratório que me ensinaram a operar instrumentos e equipamentos que não tinha habilidades e a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella, pela oportunidade de me orientar e desenvolver este trabalho, pelos ensinamentos, confiança no meu trabalho, grande paciência e pela amizade construída durante todos esses anos.

“A melhor preparação para o amanhã é fazer seu melhor hoje”.

H. Jackson Brown Junior

## RESUMO

O presente trabalho estudou a influência do aporte térmico do processo de soldagem GTAW automatizado nas propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Esse aço é amplamente utilizado na indústria alimentícia e de petróleo e gás, por ser muito resistente a corrosão. Utilizou-se chapas de 1,0 mm de espessura, soldadas por junta de topo sem chanfro. Os parâmetros de soldagem foram selecionados e ajustados através de pré-testes, pois existem poucas fontes de pesquisa sobre a soldagem de chapas finas de aço inoxidável. Para analisar a influência da variação do aporte térmico, variou-se a velocidade de soldagem na faixa de 375 a 500 mm/min, com incremento de 25 mm/min. O processo de soldagem foi autógeno. Foram realizadas análises macrográficas para avaliar a largura e profundidade do cordão de solda. Foram realizados também ensaios mecânicos de microdureza Vickers e ensaios de tração para avaliar as propriedades mecânicas do cordão de solda formado. Os valores encontrados nestes ensaios foram comparados com o aporte térmico de soldagem, para avaliar a influência do mesmo nas propriedades mecânicas da junta de solda. Os resultados obtidos com os ensaios descritos, mostraram que o controle da energia de soldagem, ou seja, do aporte térmico é essencial na soldagem de chapas finas de aço inoxidável austenítico AISI 316L, gerando juntas de solda livres de descontinuidades e com propriedades mecânicas próximas ao do metal puro.

**Palavras-chave:** Soldagem GTAW. Parâmetros de soldagem. Aporte térmico. Propriedades mecânicas.



## ABSTRACT

The present research studied the influence of the thermal input of the automated GTAW welding process on the mechanical properties of AISI 316L austenitic stainless steel. This steel is widely used in the food and oil and gas industry because it is very resistant to corrosion. Panels of 1.0 mm thickness were used, welded by a non-chamfered top joint. The welding parameters were selected and adjusted through pre-tests, as there are few sources of research on the welding of stainless steel thin sheets. In order to analyze the influence of the variation of the thermal input, the welding speed was varied in the range of 375 to 500 mm / min, with an increase of 25 mm / min. The welding process was autogenous. Macrographic analyzes were performed to evaluate the width and depth of the weld bead. Mechanical tests of Vickers microhardness and tensile tests were also performed to evaluate the mechanical properties of the weld bead formed. The values found in these tests were compared with the thermal input of welding, to evaluate the influence of the same on the mechanical properties of the weld joint. The results obtained with the described tests showed that the control of the welding energy, that is, of the thermal input is essential in the welding of thin sheets of AISI 316L austenitic stainless steel, generating solder joints free of discontinuities and with mechanical properties close to the of the pure metal.

**Keywords:** Welding GTAW. Welding parameters. Thermal input. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Microestrutura de um aço inoxidável ferrítico .....  | 21 |
| Figura 2 – Microestrutura de um aço inoxidável Martensítico .....   | 22 |
| Figura 3 – Microestrutura de um aço inoxidável austenítico .....  | 24 |
| Figura 4 – Composição típica dos aços inoxidáveis austeníticos .....  | 25 |
| Figura 5 – Morfologias da ferrita na Zona Fundida (ZF) para aços inoxidáveis austeníticos..   | 28 |
| Figura 6 – Diagrama de Schaeffler .....   | 29 |
| Figura 7 – Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis.....   | 29 |
| Figura 8 – Processos de soldagem e natureza de união .....  | 31 |
| Figura 9 – Soldagem GTAW: (a) Detalhe da região do arco, (b) montagem usual .....   | 33 |
| Figura 10 – Painel de comando de uma fonte de soldagem GTAW .....   | 35 |
| Figura 11 – Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem GTAW .....  | 36 |
| Figura 12 – Aspecto do cordão gerado por fonte pulsada .....  | 37 |
| Figura 13 – Influência do ângulo de inclinação na profundidade do cordão de solda .....   | 38 |
| Figura 14 – Tocha TIG comum .....   | 39 |
| Figura 15 – Exemplos de bocais utilizados no processo TIG.....  | 40 |
| Figura 16 – Seção transversal de uma junta de solda e suas diversas regiões.....  | 43 |
| Figura 17 – Exemplos de falta de penetração.....  | 44 |
| Figura 18 – Falta de fusão em junta de filete .....   | 45 |
| Figura 19 – Exemplos de mordedura.....  | 45 |
| Figura 20 – Poros internos: (a) dispersos; (b) agrupados; (c) alinhados .....   | 46 |
| Figura 21 – Exemplos de trincas longitudinais .....   | 46 |
| Figura 22 – Conceito de energia de soldagem.....  | 48 |
| Figura 23 – Ciclo térmico na soldagem em um só passe .....  | 49 |
| Figura 24 – Amostras para os testes de soldagem .....   | 50 |
| Figura 25 – Fonte retificadora multiprocesso Invertec V300I .....   | 51 |
| Figura 26 – Sistema de soldagem TIG automatizado.....   | 52 |
| Figura 27 – defeitos de soldagem gerados por valores de baixa e alta corrente.....  | 53 |
| Figura 28 – Cordão de solda com parâmetros de soldagem da Tabela 9 e velocidade de<br>soldagem de 375 mm/min .....  | 54 |
| Figura 29 – Corpos de prova para os ensaios mecânicos. (a) corpo de prova para ensaio<br>de dureza e (b) amostra para a confecção dos corpos de prova para ensaio<br>de tração..... | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30 – Amostras embutidas para os ensaios de macro e microscopia.....  | 56 |
| Figura 31 – Estereomicroscópio ZEISS, modelo DISCOVERY V.8.....   | 57 |
| Figura 32 – Microscópio óptico, marca: ZEISS, modelo Neophot 21 .....   | 57 |
| Figura 33 – Ultramicrodurômetro digital Shimadzu, modelo DUH 211S .....   | 58 |
| Figura 34 – Amostras soldadas para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração .....                  | 59 |
| Figura 35 – Formato de corpo de prova para ensaio de tração.....  | 59 |
| Figura 36 – Corpo de prova sendo confeccionado pelo processo de corte com jato de água ..                         | 60 |
| Figura 37 – Corpos de prova para ensaio de tração.....  | 61 |
| Figura 38 – Máquina universal de ensaios, Oswaldo Filizola BME-20KN .....   | 62 |
| Figura 39 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 191,40 e 179,44 J/mm. ....                   | 63 |
| Figura 40 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 168,88 e 159,50 J/mm. ....                   | 64 |
| Figura 41 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 151,11 e 143,55 J/mm. ....                   | 64 |
| Figura 42 – Microscopia ótica das regiões do MB, ZTA e ZF do CP04(159,50 J/mm) .....                              | 66 |
| Figura 43 – Esquema utilizado para a medição da microdureza Vickers.....  | 67 |
| Figura 44 – Gráficos de Microdureza das Juntas para cada condição de variação de aporte térmico .....             | 68 |
| Figura 45 – Média das medidas de dureza Vickers (HV) para todas as amostras.....                                  | 69 |
| Figura 46 – Região de ruptura dos cordões de solda analisados no Estereomicroscópio ZEISS com aumento de 3x ..... | 71 |
| Figura 47 – Ensaio de Tração CP01 e CP02, com 191,40 J/mm.....  | 71 |
| Figura 48 – Ensaio de Tração CP03 e CP04, com 179,44 J/mm.....  | 72 |
| Figura 49 – Ensaio de Tração CP05 e CP06, com 168,88 J/mm.....  | 72 |
| Figura 50 – Ensaio de Tração CP07 e CP08, com 159,5 J/mm.....   | 72 |
| Figura 51 – Ensaio de Tração CP09 e CP10, com 151,11 J/mm.....  | 73 |
| Figura 52 – Ensaio de Tração CP11 e CP12, com 143,55 J/mm.....  | 73 |
| Figura 53 – Ensaio de Tração CP13 e CP14, Metal de Base .....   | 73 |
| Figura 54 – Relação do limite de resistência a tração com o aporte térmico .....                                  | 76 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Características dos processos de fusão. ....   | 32 |
| Tabela 2 – Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GTAW.....  | 34 |
| Tabela 3 – Orientação para escolha de eletrodo do processo TIG. ....  | 40 |
| Tabela 4 – Diâmetro do eletrodo e bocal x Corrente de soldagem para a soldagem TIG.....   | 41 |
| Tabela 5 – Parâmetros TIG para a soldagem do aço inoxidável austenítico da série 300.....                                       | 42 |
| Tabela 6 – rendimento térmico de acordo com o processo de soldagem. ....  | 47 |
| Tabela 7 – Composição química do aço AISI 316 L (% em peso). ....   | 50 |
| Tabela 8 – Parâmetros dos pré-testes de soldagem GTAW. ....   | 52 |
| Tabela 9 – Parâmetros de soldagem GTAW para avaliar a influência do aporte térmico nas<br>propriedades do cordão de solda. .... | 54 |
| Tabela 10 – Valores de aporte térmicos obtidos.....   | 56 |
| Tabela 11 – Dimensões dos corpos de prova. ....   | 60 |
| Tabela 12 – Dimensões do cordão de solda para cada variação de aporte térmico.....  | 65 |
| Tabela 13 - Média das medidas de dureza Vickers (HV) para cada aporte térmico de<br>respetivas zonas do cordão de solda. ....   | 69 |
| Tabela 14 – Relação alongamento (mm e %) em relação a tensão de ruptura. ....   | 74 |
| Tabela 15 – Média dos limites de resistência para cada variação de aporte térmico. ....   | 75 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|      |   |
|------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| AISI | <i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)                 |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de testes e Materiais) |
| AT   | Aporte Térmico  |
| AWS  | American Welding Society  |
| CCC  | Cúbica de Corpo Centrado  |
| CFC  | Cúbica de Face Centrada   |
| Cr   | Cromo   |
| CP   | Corpo de prova  |
| Cu   | Cobre   |
| DP   | Desvio Padrão   |
| Fe   | Ferro   |
| GTAW | Gas Tungsten Arc Welding  |
| HRB  | Dureza Rockwell B   |
| Mn   | Manganês  |
| Ni   | Níquel  |
| Pb   | Chumbo  |
| TIG  | Tungsten Inert Gas  |
| Zn   | Zinco   |
| ZF   | Zona Fundida  |
| ZTA  | Zona Termicamente Afetada   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                    |
|----------|--------------------|
| $\eta$   | Eficiência         |
| B        | Fase Beta          |
| $\Delta$ | Ferrita Delta      |
| A        | Ferrita Alfa       |
| $\Gamma$ | Austenita          |
| %p       | Percentual em Peso |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>15</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS .....  | 17        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1          | LIGAS METÁLICAS .....  | 19        |
| 2.2          | AÇOS.....  | 20        |
| 2.3          | AÇOS INOXIDÁVEIS .....   | 20        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Aços Inoxidáveis ferríticos .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Aços inoxidáveis martensíticos .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Aços inoxidáveis austeníticos .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Aços Inoxidáveis endurecidos por precipitação .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.3.5</b> | <b>Aços Inoxidáveis dúplex .....</b>   | <b>26</b> |
| 2.4          | SOLDABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO.....   | 26        |
| 2.5          | PROCESSOS DE SOLDAGEM .....  | 30        |
| 2.6          | SOLDAGEM TIG (GTAW).....   | 33        |
| <b>2.6.1</b> | <b>Parâmetros de soldagem TIG (GTAW) para aços inoxidáveis austeníticos série<br/>300.....</b>       | <b>41</b> |
| 2.7          | TERMINOLOGIA DAS IMPERFEIÇÕES DA SOLDAGEM DOS AÇOS<br>AUSTENÍSTICOS SOLDADOS PELO PROCESSO TIG ..... | 43        |
| 2.8          | FLUXO DE CALOR NA SOLDAGEM .....   | 47        |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>50</b> |
| 3.1          | MATERIAIS.....   | 50        |
| 3.2          | FONTE DE ENERGIA PARA A SOLDAGEM.....  | 51        |
| 3.3          | PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM E SELEÇÃO DOS PARÂMETROS .....  | 52        |
| 3.4          | PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE METALOGRAFIA E ANÁLISE<br>MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA .....                | 56        |
| 3.5          | PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE MICRODUREZA .....  | 58        |
| 3.6          | PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....   | 58        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>63</b> |
| 4.1          | ANÁLISE MACROGRÁFICA E MICROGRÁFICA .....  | 63        |

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 4.2      | ENSAIO DE DUREZA .....               | 66        |
| 4.3      | ENSAIO DE TRAÇÃO .....               | 70        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>               | <b>77</b> |
| 5.1      | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS ..... | 78        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>              | <b>79</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A evolução do conhecimento humano na descoberta de novos materiais está diretamente ligada às habilidades do homem em transformar a forma bruta de um material, em um bem durável, para satisfazer as exigências do meio em que vive. Dentre esses materiais, o metal foi uma das grandes descobertas, devido a sua grande aplicabilidade na confecção de máquinas e ferramentas utilizadas diariamente pelo homem.

O metal pode ser definido como um elemento que tem facilidade de perder elétrons de forma rápida, formando uma ligação metálica e resultando em grande capacidade de condutibilidade elétrica (CHIAVERINI, 1986).

Como lembra Chiaverini (1986), todos os setores produtivos da indústria moderna estão exigindo equipamentos mecânicos de alto nível de sofisticação, exigindo conhecimento específico dos materiais utilizados na construção do projeto, sobretudo os metálicos.

Para a fabricação destas ferramentas a partir do metal, o homem teve que desenvolver novas técnicas de união dos metais, que podem ser feitas através de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas ou em forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). Para tanto, com o passar dos anos, o homem desenvolveu a soldagem como uma técnica de união dos metais.

De acordo com Modenesi e Marques (2006, p. 2) “[...] embora a soldagem, na sua forma atual, seja um processo recente, com cerca de 100 anos, a brasagem e a soldagem por forjamento têm sido utilizadas desde épocas remotas [...]”.

Segundo Modenesi e Marques (2006, p. 3) “[...] a primeira patente de um processo de soldagem, obtida na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky em 1885, foi baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada [...]”.

Com a evolução dos processos de soldagem, o termo “soldagem” recebeu várias definições ao longo do tempo, mas pode-se destacar a definição adotada pela Associação Americana de Soldagem (American Welding Society - AWS): "Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição" (MODENESI; MARQUES, 2006).

O desenvolvimento de novos materiais e suas ligas, também fez com que os processos de soldagem se desenvolvessem para atender as necessidades de soldagem de materiais específicos utilizados nas indústrias, principalmente nas indústrias que exigem do material propriedades específicas para determinadas aplicações, propriedades essas que podem ser

mecânicas, resistência a corrosão, resistência ao calor, características elétricas e magnéticas etc.

Como lembra Ventrella, Berreta e Rossi (2010) para materiais expostos em ambientes corrosivos, a seleção de um material resistente é imprescindível. Com isso, componentes industriais são cobertos com folhas finas de aço inoxidável.

Dentro deste contexto, pode-se destacar a grande aplicabilidade do aço inox na indústria, que atualmente ganhou um grande impulso na indústria petrolífera, principalmente no cenário nacional, pois vale observar que a extração do petróleo Brasileiro é feita totalmente através de plataformas em alto-mar, onde temos um ambiente altamente corrosivo, devido a ação da água salgada. No Brasil, tornou-se muito importante o estudo dos aços inoxidáveis, devido ao desenvolvimento recente de atividades na área de petróleo e gás natural.

O aço inox, também pode ser encontrado em nossas casas (talheres, panelas, máquina de lavar roupas, pias, cubas, fornos e fogões). Na indústria o aço inox está presente em tubos, reatores, tanques, condensadores, colunas de destilação, trocadores de calor, nas mais variadas indústrias, como por exemplo: de bebidas, de açúcar e álcool, química e farmacêutica, alimentícia, de cosméticos. A escolha do aço inox para determinada função, está diretamente relacionado a sua composição química e a aplicação, pois os aços inox são classificados por série de acordo com a sua constituição. A Série SAE 300 é a mais comercial e utilizada, por esse motivo, neste trabalho trabalharemos em específico com o Inox 316L.

O aço inoxidável AISI 316L é um aço muito empregado na fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, como exemplo: tubulações industriais, válvulas, indústria de bebidas, indústria química, laticínios, equipamentos marítimos, equipamentos hospitalares, petroquímica e etc., foi desenvolvido logo após o AISI 304, que pertence a um grupo de ligas cromo-níquel austeníticos. Os aços inoxidáveis austeníticos como AISI 316L tem boa resistência geral à corrosão, conformabilidade e soldabilidade, ele é uma variante do AISI 316 com menor teor de carbono, com o limite de escoamento e resistência à tração inferior.

O AISI 316L tem em sua composição química de 2.3% de Molibdênio, o que impede a formação processos específicos de corrosão e geralmente aumenta a sua resistência à corrosão, é popularmente conhecido de aço inoxidável "tipo naval", devido à sua maior resistência à corrosão por cloreto de sódio - NaCl (sal), comparado com outros tipos como por exemplo o AISI 304, portanto tornou-se um material muito adequado para utilização em ambientes de águas salgadas.

O aço inox AISI 316L também pode ser empregado em peças que exigem alta resistência à corrosão e que não podem ser tratadas termicamente após a solda, pois os ciclos

térmicos envolvidos no processo de soldagem, podem gerar mudanças de propriedade no cordão de solda, expansão e contração do material, diminuindo a resistência a corrosão e resistência mecânica da junta soldada, por isso, trabalha-se com um processo de soldagem específico para o material, neste caso o processo GTAW, comercialmente chamado de TIG, é o mais convencional na relação custo e benefício, principalmente quando é feita a seleção correta dos parâmetros de soldagem, deixando o metal de solda com características próximas ou até superiores ao do metal base.

Existe uma grande dificuldade para a seleção dos parâmetros de soldagem envolvendo lâminas (chapas) finas de aços inoxidáveis, devido à falta de literaturas específicas para orientação dos soldadores, a qual, muitos destes soldadores se utilizam de testes práticos feitos na hora da soldagem, até conseguirem ajustar a fonte de soldagem, isso toma tempo e desperdício de material. Muitos dos problemas estão relacionados a seleção de parâmetros como, a velocidade de soldagem e intensidade da corrente da fonte de soldagem, esses fatores contribuem diretamente na variação do aporte térmico ao longo do cordão de solda. O controle do aporte térmico na soldagem de aços inoxidáveis é essencial para a obtenção de uma região de soldagem com características próximas do material puro exigidas para determinado projeto.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa visa estudar o comportamento de chapas de 1 mm de espessura do aço inoxidável AISI 316L soldados pelo processo GTAW automatizado, caracterizando a junta de solda de acordo com a variação do aporte térmico de soldagem e também analisar a influência dos parâmetros e técnicas de soldagem nas propriedades mecânicas da junta soldada.

Os objetivos específicos são:

- Otimizar os parâmetros de soldagem, para que seja realizada a soldagem somente de um lado, evitando a soldagem do lado oposto do cordão de solda, variando somente a velocidade de soldagem;
- Analisar a influência do aporte térmico de soldagem na homogeneidade e variabilidade da geometria (largura e profundidade) do cordão de solda ao longo de seu comprimento através de ensaio macrográfico;
- Analisar a influência do aporte térmico de soldagem na microestrutura do cordão de solda através de análise micrográfica;

- Analisar a influência do aporte térmico de soldagem nos valores de dureza obtidos no metal de solda e zona termicamente afetada;
- Analisar a influência do aporte térmico de soldagem em relação aos valores do limite de resistência (Mpa) gerados pelos ensaios de tração;
- Avaliar a soldabilidade do aço inox 316L austenítico, de acordo com os parâmetros de soldagem selecionados neste estudo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se a revisão da literatura sobre as principais características mecânicas e químicas do aço inoxidável austenítico 316L e suas aplicações na indústria. É feita também uma abordagem sobre os principais processos de soldagem utilizados em aço inox, dando ênfase para o processo de soldagem GTAW e seus parâmetros. Também é abordado um estudo teórico do fluxo de calor na soldagem e a influência do aporte térmico no cordão de solda e dos ensaios mecânicos de macro e micrografia, dureza e tração, utilizados para avaliar as características mecânicas do material e das juntas de solda. Toda revisão bibliográfica a seguir se faz necessária para uma melhor interpretação dos resultados do estudo em questão.

### 2.1 LIGAS METÁLICAS

Os engenheiros frequentemente precisam escolher a melhor composição dos materiais utilizados em projetos mecânicos que utilizam metais e suas ligas, exigindo conhecimento específico das características de cada material, para que seja selecionada a melhor combinação, de modo a alcançar as propriedades exigidas para determinado projeto. (CALLISTER, 2008).

Como já descrito na introdução deste trabalho, o aço inoxidável AISI 316L pertence a um grupo de ligas cromo-níquel e 100% austenítico, por isso, são vários os sistemas de ligas binárias que explicam o comportamento da microestrutura dos metais. Como lembra Zolin (2010), em aplicações industriais a maioria dos aços deixam de ser binárias, pois são sempre adicionados a sua composição química Si, Mn, S e P em baixos teores, não interferindo no diagrama de fases.

Quanto aos tipos de ligas metálicas, elas são agrupadas em duas classes: ferrosas e não-ferrosas. Nas ligas ferrosas o ferro (Fe) é seu principal constituinte, a qual incluem-se os aços e os ferros fundidos, já as ligas não-ferrosas, são todas aquelas que não são à base de ferro.

## 2.2 AÇOS

Chiaverini (2005), afirma que os aços são ligas de ferro-carbono e também de elementos residuais resultantes do processo de fabricação, podem ser classificados de acordo com sua composição, seu processo de acabamento e forma do produto acabado.

Callister (2008), classifica os aços de acordo com a concentração de carbono:

- Aços com baixo teor de carbono: possuem menos de 0,25%p (em peso) C e por não responderem a tratamentos térmicos, possuem baixas dureza e resistência;
- Aços com médio teor de carbono: possuem concentrações de carbono entre 0,25 e 0,60%p de C e podem ter suas propriedades mecânicas melhoradas por tratamentos térmicos por austenitização, têmpera e revenido.
- Aços com alto teor de carbono: possuem teores de carbono entre 0,60 e 1,4%p de C, são os menos dúcteis dos aços-carbono, mas são os mais duros e resistentes.

## 2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com um mínimo de 12% de Cr, que permite a formação de uma camada superficial protetora de óxido de cromo, que age contra a ação corrosiva do oxigênio presente na atmosfera, sendo o cromo o principal elemento para torna o aço inoxidável. (ASKELAND e WRIGHT, 2016).

De acordo com Lo, Shek e Lai (2009), os principais tipos de microestruturas nos aços inoxidáveis, são: ferríticos, austeníticos e martensíticos. Segundo Davis (1994), existem diversos tipos de aços inoxidáveis, de acordo com sua estrutura cristalina e mecanismos de endurecimento, podem ser classificados em cinco grupos:

- Aços Inoxidáveis ferríticos;
- Aços Inoxidáveis martensíticos;
- Aços Inoxidáveis austeníticos;
- Aços Inoxidáveis endurecidos por precipitação.
- Aços Inoxidáveis duplex;

### 2.3.1 Aços Inoxidáveis ferríticos

Em sua composição, os aços inoxidáveis ferríticos contêm até 30% de Cr e menos de 0,12% de C. possuem como características uma boa resistência mecânica devido ao endurecimento por encruamento, são magnéticos, excelente resistência à corrosão, têm conformabilidade moderada e não podem ser tratados termicamente. São aços de baixo custo relativo. Quanto a sua soldabilidade, normalmente sua Zona Termicamente Afetada (ZTA) apresenta crescimento de grão e precipitação nos contornos de grão, estes fenômenos podem comprometer fortemente a sua resistência a corrosão. Comumente empregados em componentes de exaustão automotivos, fabricação de eletrodomésticos, balcões frigoríficos, tanques para pulverizadores agrícolas, válvulas que trabalham em alta temperatura, moldes para vidro, câmaras de combustão.

Pode-se observar na Figura 1, um exemplo de microestrutura do aço inoxidável ferrítico.

Figura 1 – Microestrutura de um aço inoxidável ferrítico



Fonte: Giraldo (2006).

### 2.3.2 Aços inoxidáveis martensíticos

A produção de aços martensíticos envolve procedimentos convencionais de tratamento térmico, emprega-se um resfriamento rápido e contínuo de uma amostra

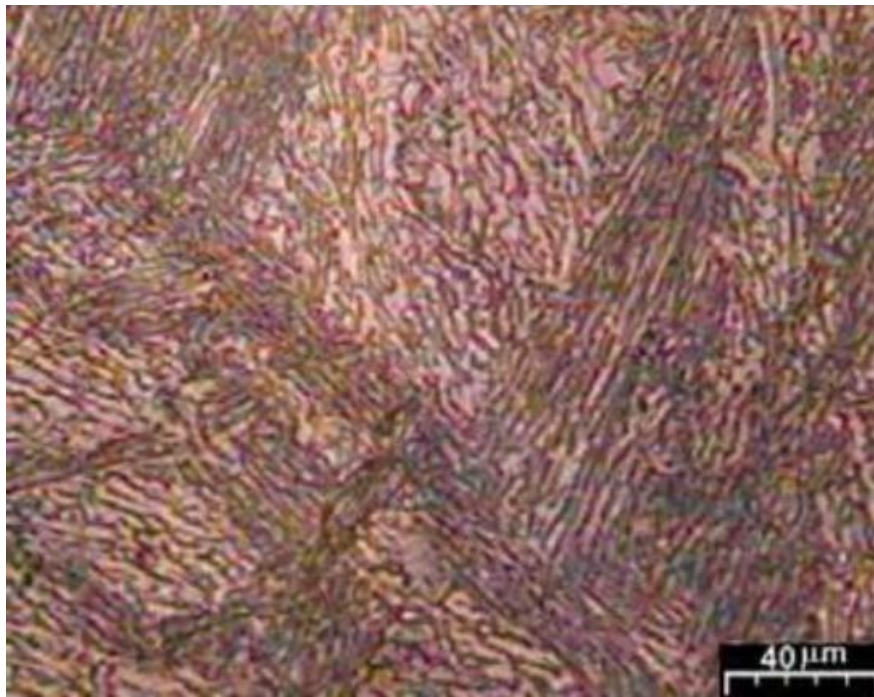
austenitizada, a qual os meios de resfriamento podem ser em água, óleo ou o ar. (CALLISTER, 2008).

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam teor de cromo menor do que 17% Cr, isso se deve a diminuição do campo de austenita, sendo necessário um controle rígido da temperatura de austenitização e do teor de carbono para produzir a austenitização monofásica antes da têmpera. Os teores de carbono variam de 0,1% a 1%, obtendo-se martensita com valores de dureza variáveis. (ASKELAND, 2016).

De acordo com Schumacher (1992), a combinação das várias características dos aços inoxidáveis martensíticos, como dureza, resistência mecânica, boa capacidade de moldagem por forjamento, torna essas ligas indispensáveis para a fabricação de facas de alta qualidade.

Pode-se observar na Figura 2, um exemplo de microestrutura do aço inoxidável martensítico.

Figura 2 – Microestrutura de um aço inoxidável Martensítico



Fonte: Lima (2007).

### 2.3.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Para Souza Prestes (2006), os elementos Fe-Cr-Ni, forma a base dos aços inoxidáveis austeníticos, de forma a obter uma matriz predominantemente austenítica.



Segundo Pereira (2012), o níquel é um elemento estabilizador de austenita e está entre os elementos mais notáveis que promovem a austenita, o mesmo apresenta-se em grandes quantidades, geralmente maiores que 8% em massa da composição dos aços inoxidáveis austeníticos, além do níquel, o carbono, nitrogênio e o cobre são elementos que promovem a austenita.

Os aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar na sua composição até 12% de níquel, como exemplo os austeníticos da série 316L, esses altos teores de níquel e cromo elevam o custo desses aços, mas em contrapartida a relação entre custo e benefício o mesmo se torna favorável, isso se deve a excelente ductilidade, soldabilidade, conformabilidade e resistência a corrosão.

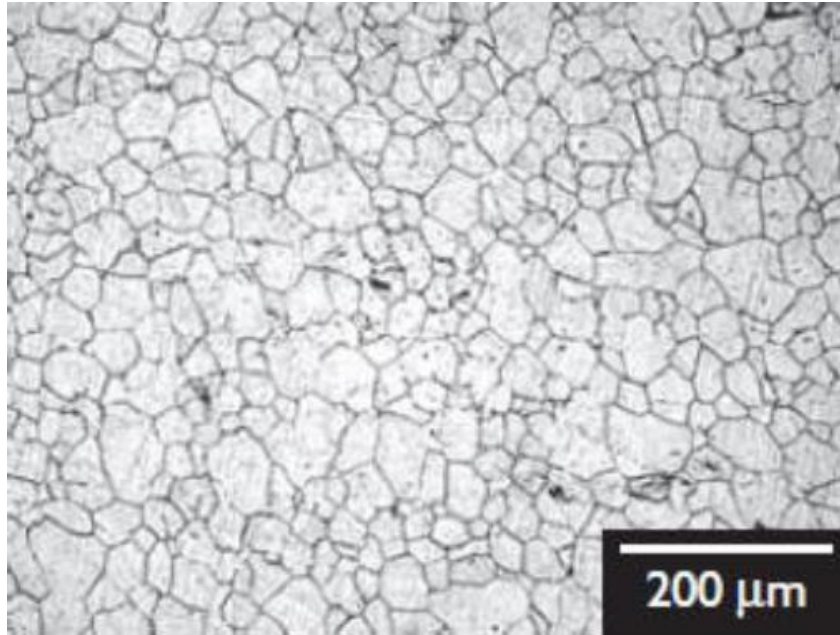
Dentre as vantagens dos aços inoxidáveis austeníticos, pode-se destacar que o mesmo pode ser trabalhado a frio, através do processo de encruamento, sendo este processo mais intenso nos aços austeníticos do que nos ferríticos, tendo como resultado o aumento da resistência mecânica do material.

Apesar de se tratar de um aço inoxidável, esse aço austenítico pode sofrer *sensitização* quando aquecido entre 480°C e 860°C por um processo de tratamento térmico ou de soldagem, a sensitização pode ser denominada como um processo em que os carbonetos de cromo se precipitam nos contornos de grão em vez de se precipitarem no interior dos grãos, causando um empobrecimento de cromo na vizinhança dos contornos de grão e como consequência essas regiões são corroídas com grande intensidade (ZANETIC; FALLEIROS, 2014). Para Serna-Giraldo (2006), a sensitização é o mecanismo mais aceito para justificar a corrosão em aço inox.

Como já descrito neste trabalho, os aços austeníticos não são ferromagnéticos e por isso podem ser empregados em próteses endovasculares, equipamentos para processamentos químicos e de alimentos, construções com solda e na indústria petrolífera, principalmente em atmosferas salinas.

Pode-se observar na Figura 3, um exemplo de microestrutura do aço inoxidável austenítico.

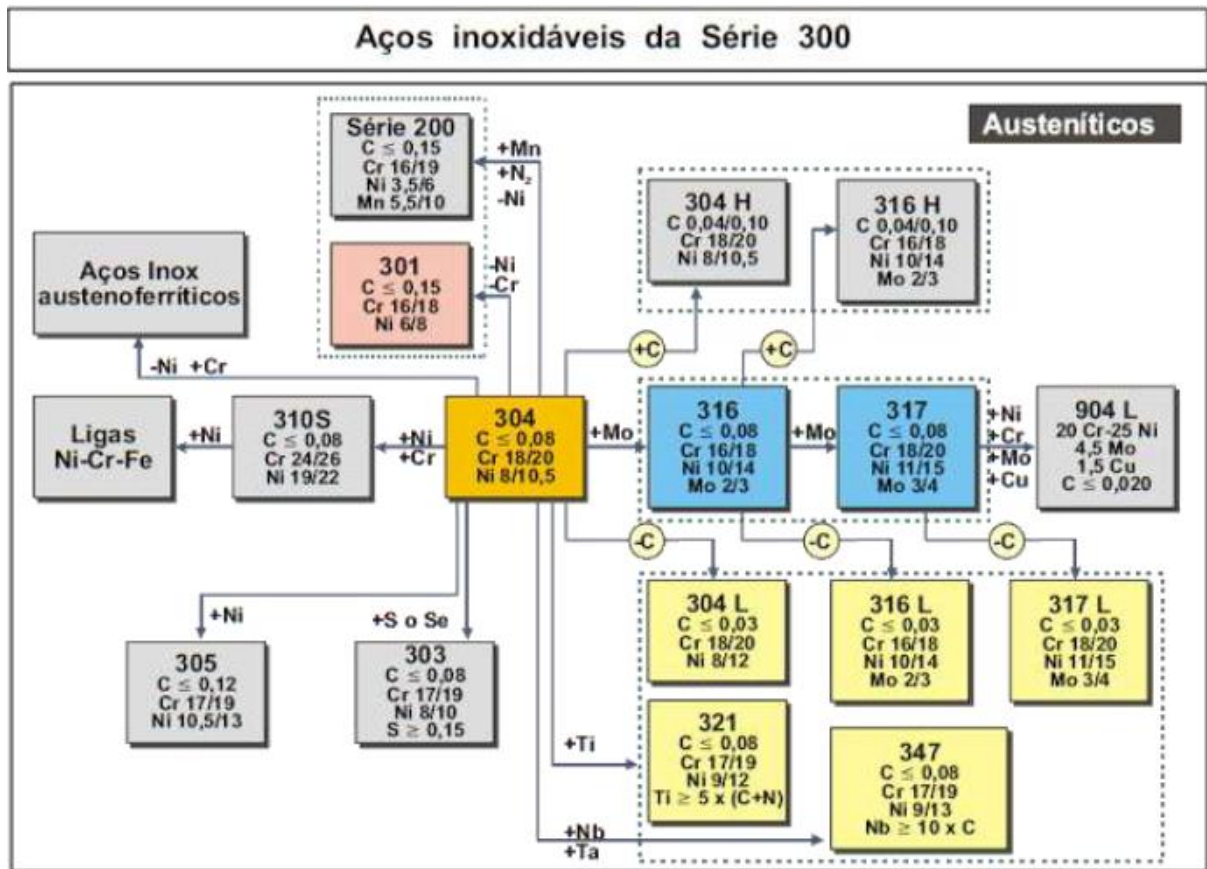
Figura 3 – Microestrutura de um aço inoxidável austenítico



Fonte: Campos et al. (2009)

No Sistema americano para a classificação dos aços (American Iron and Steel Institute - AISI), os aços inoxidáveis austeníticos estão na série 300, sendo o 304 (18%Cr-8%Ni) o mais popular e de maior aplicação. Para uma melhor compreensão da composição dos aços inoxidáveis austeníticos, apresenta-se na Figura 4 todos os aços austeníticos e suas devidas composições.

Figura 4 – Composição típica dos aços inoxidáveis austeníticos



Fonte: Gonçalves (2013).

### 2.3.4 Aços Inoxidáveis endurecidos por precipitação

Estes aços também são identificados pela sigla PH (Precipitation hardening), podem combinar resistência à corrosão com boas características de trabalho e propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas elevadas. Sendo uma alternativa para os aços inoxidáveis austeníticos. (GONÇALVES, 2013).

Os endurecidos por precipitação possuem em sua composição Alumínio (Al), Nióbio (Nb) ou Tântalo (Ta) como elementos de liga e endurecem por solução sólida, por encruamento, por envelhecimento e por transformação martensítica, nesse processo de transformação o aço é inicialmente aquecido e temperado para permitir que a austenita se transforme em martensita, logo após é feito um reaquecimento para a formação de precipitados, a qual se chama esse processo de revenido, formando também o que chamamos de martensita revenida.

Embora sejam mais caros que os aços inoxidáveis normais, por empregarem processos mais elaborados para a sua fabricação, os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação, têm

como característica a resistência máxima e por isso são empregados no campo militar, aeronáutico, molas especiais, facas e vasos de pressão.

### **2.3.5 Aços Inoxidáveis dúplex**

O aço inoxidável dúplex está em uma região bifásica constituída de ferrita e austenita do diagrama Fe-Cr-Ni. Com o desenvolvimento de novas tecnologias de controle da composição e de tratamento térmico, pode-se chegar a proporções de 50% de ferrita e 50% de austenita, produzindo um aço inoxidável dúplex. Para Askeland e Wright (2016), as ótimas propriedades apresentadas pelos aços inoxidáveis duplex se deve a combinação de 50% de ferrita/austenita, proporcionando resistência à corrosão, conformabilidade e soldabilidade não alcançadas por nenhum dos aços inoxidáveis mais comuns.

Por apresentarem combinações superiores aos aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e martensíticos, o faz bastante atraente para as indústrias petrolíferas que utilizam grandes quantidades em oleodutos e linhas de extração de petróleo e gás, principalmente aquelas contaminadas com cloretos. Para Gonçalves (2013), o aço duplex é aplicado em indústrias petroquímica, químicas, equipamentos expostos a íons cloretos, trocadores de calor, bombas e tubos, indústrias de papel e celulose e de alimentos. Nilsson (1992), também nos diz que, os aços inoxidáveis duplex possuem uma combinação atraente de mecânica e propriedades de corrosão, sendo adequadas para muitas aplicações marinhas e petroquímicas.

## **2.4 SOLDABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

Os aços inoxidáveis possuem em sua constituição uma grande variedade de elementos de liga (Carbono, Cromo, Manganês, Níquel, Molibdênio e etc.). Estes elementos modificam a estrutura da liga de acordo com o teor de composição de cada um e influenciam as propriedades mecânicas e de soldabilidade do aço.

De todos os grupos de aços inoxidáveis, os austeníticos representam o maior grupo, cerca de 65% a 70% do total produzido, e também o mais importante dos aços inoxidáveis por apresentarem elevado nível de soldadura, a qual a capacidade de soldabilidade do aço austenítico vai estar diretamente relacionada aos elementos de ligas estabilizadores de austenita, ou seja, aqueles elementos que liga que reduzem a velocidade de transformação da austenita, aumentando a sua temperabilidade e a mantendo estável em altas temperaturas geradas pelo o fluxo de calor na soldagem e também na dissipação desse calor.

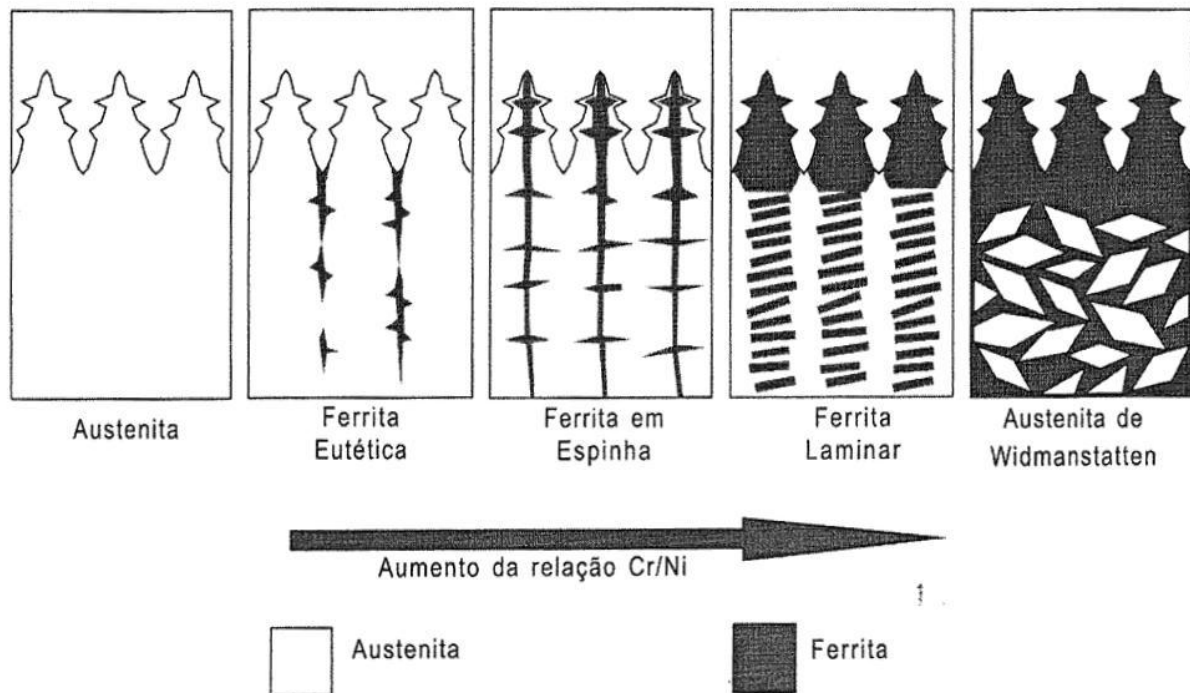
Askeland e Wright (2016), afirma que na soldagem dos aços austeníticos a austenita fica retida nos contornos de grão da ferrita, limitando a recristalização e favorecendo a formação de grãos pequenos, esse efeito contribui para uma região de solda resistente.

Os elementos de liga que se encontram em maior quantidade e que podem determinar a capacidade de soldabilidade de um aço austenítico são o cromo e níquel. Modenesi (2011), nos diz que o Níquel (Ni) é formador de austenita e em proporções que variam entre 6 e 26%, enquanto o Cromo (Cr) é formador de ferrita e em proporções entre 16 e 30% de Cr. Vale observar que a relação de proporção das ligas Cr/Ni pode determinar fases distintas. Modenesi (2001), afirma que quando ocorre a relação  $Cr/Ni < 1,5$  a zona fundida solidifica totalmente com austenita primária, para  $Cr/Ni > 1,95$  forma-se solidificação com ferrita e no intervalo  $1,5 < Cr/Ni < 1,95$  nota-se que ocorre uma solidificação apresentando tanto ferrita quanto austenita.

A constituição final da microestrutura da ZF (Zona Fundida) de um aço inoxidável austenítico dependerá dos valores crescentes da relação Cr/Ni e da forma de solidificação do aço e das transformações subsequentes no estado sólido. Esta microestrutura pode ser classificada de acordo com as configurações da ferrita.

As principais microestruturas encontradas, de acordo com a variação da relação Cr/Ni e morfologias da ferrita na Zona Fundida (ZF) para aços inoxidáveis austeníticos estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Morfologias da ferrita na Zona Fundida (ZF) para aços inoxidáveis austeníticos



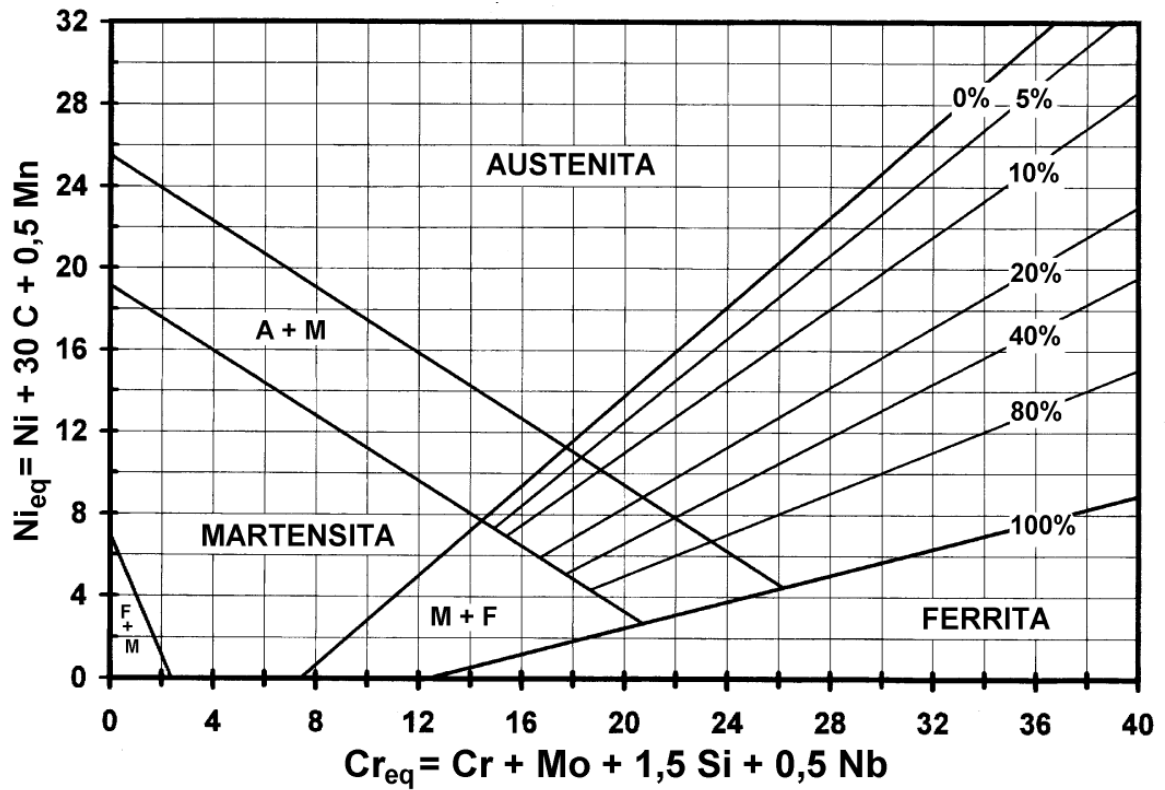
Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

A maneira mais eficaz para se manter a equivalência entre o cromo e o níquel, tendo como objetivo avaliar as características metalúrgicas gerais de qualquer metal soldado de aço inoxidável, veio por meio do diagrama Schaeffler, representado na Figura 6. O diagrama de Schaeffler também permite avaliar o teor de ferrita em componentes soldados com aço inoxidável. Para Modenesi (2011), o diagrama empírico de Schaeffler, é utilizado para determinar a microestrutura da solda e de possíveis problemas típicos na soldagem de aços inoxidáveis.

Na Figura 7 pode-se analisar esses possíveis problemas enumerados de 1 a 4, de forma resumida apresenta-se logo abaixo as características de cada um:

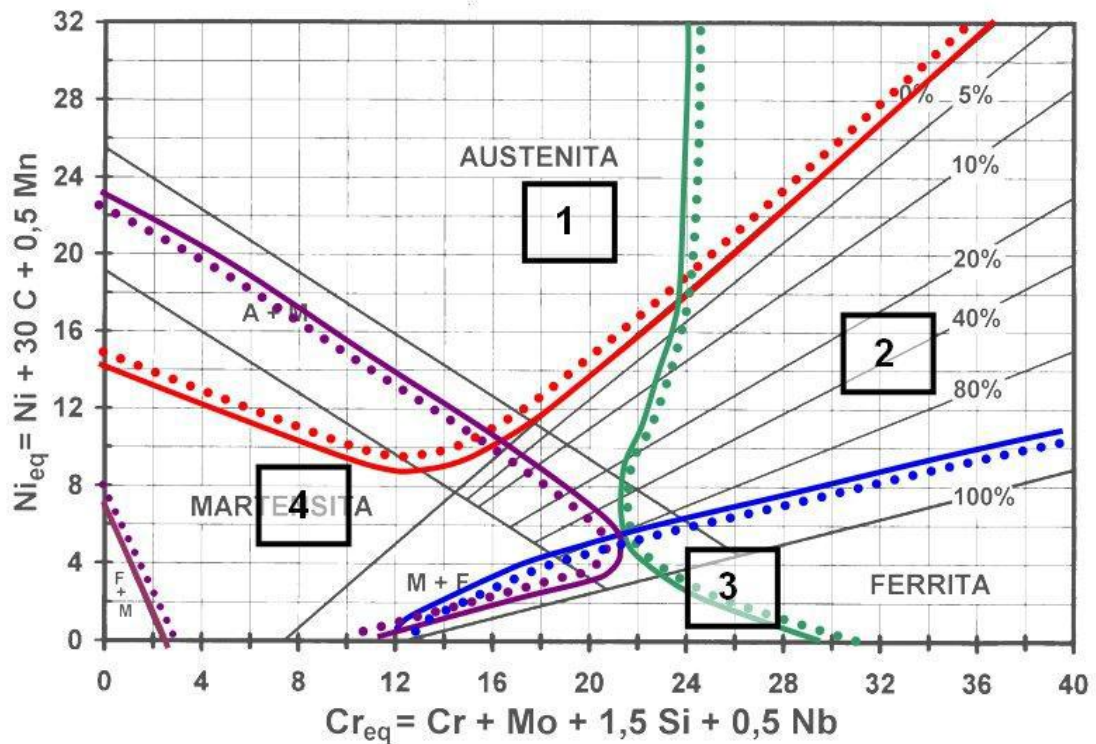
- 1) Região formada totalmente de austenita sólida com formação de trincas de solidificação por perda da ductilidade em temperaturas acima de 1250°C.
- 2) Fase frágil, por apresentar-se em fases intermetálicas após aquecimento entre 450°C e 900°C.
- 3) Ocorre a fragilização pelo crescimento dos grãos na Zona Fundida (ZF) e na Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo calor da soldagem, região de estrutura ferrítica.
- 4) Formação da martensita na ZTA e ZF, causando fragilização e fissuração.

Figura 6 – Diagrama de Schaeffler



Fonte: Modenesi (2011).

Figura 7 – Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis



Fonte: Modenesi (2011).

Portanto, o diagrama de Schaeffler em soldagem é importante para o conhecimento das propriedades de um depósito de solda de aços inoxidáveis e permite conhecer com antecedência a composição química da estrutura de uma solda de liga Cr-Ni. Esse conhecimento influi na escolha correta do eletrodo, previsão e prevenção dos problemas que podem ocorrer, determinando também, em consequência, os tratamentos térmicos necessários, anteriores ou posteriores à soldagem.

Observa-se também na Figura 6, que em um sistema de coordenadas onde os eixos representam o efeito dos elementos alfa-gêneos (cromo; molibdênio; silício e nióbio) ou cromo equivalente formadores de ferrita e também os gama-gêneos (níquel; carbono e manganês) ou níquel equivalente formadores de austenita, colocou os pontos encontrados com as respectivas estruturas à temperatura ambiente.

## 2.5 PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem é o processo industrial mais importante para a fabricação de peças metálicas, recuperação de peças desgastadas, revestimentos para dar características especiais para as superfícies metálicas e para corte. Por outro lado, o sucesso da soldagem está associado aos fatores operacionais e de seleção dos parâmetros adequados, pois a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material pode gerar alterações das propriedades dentro ou próxima da região de solda (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).

A soldagem em metais é definida como o processo de união entre duas partes utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Existem inúmeros processos de soldagem e os mesmos devem atender requisitos e exigências, como: Gerar energia suficiente para a união de materiais similares ou não; fazer limpeza da superfície a ser soldada, para eliminar os elementos contaminantes; evitar o contato com o ar atmosférico; proporcionar condições para o controle das transformações de fase, para o alcance das propriedades físicas, químicas e mecânicas. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Os processos de soldagem são divididos em dois grandes grupos, baseados no método dominante de produção da solda, ao quais Modenesi e Marques (2006) definem:

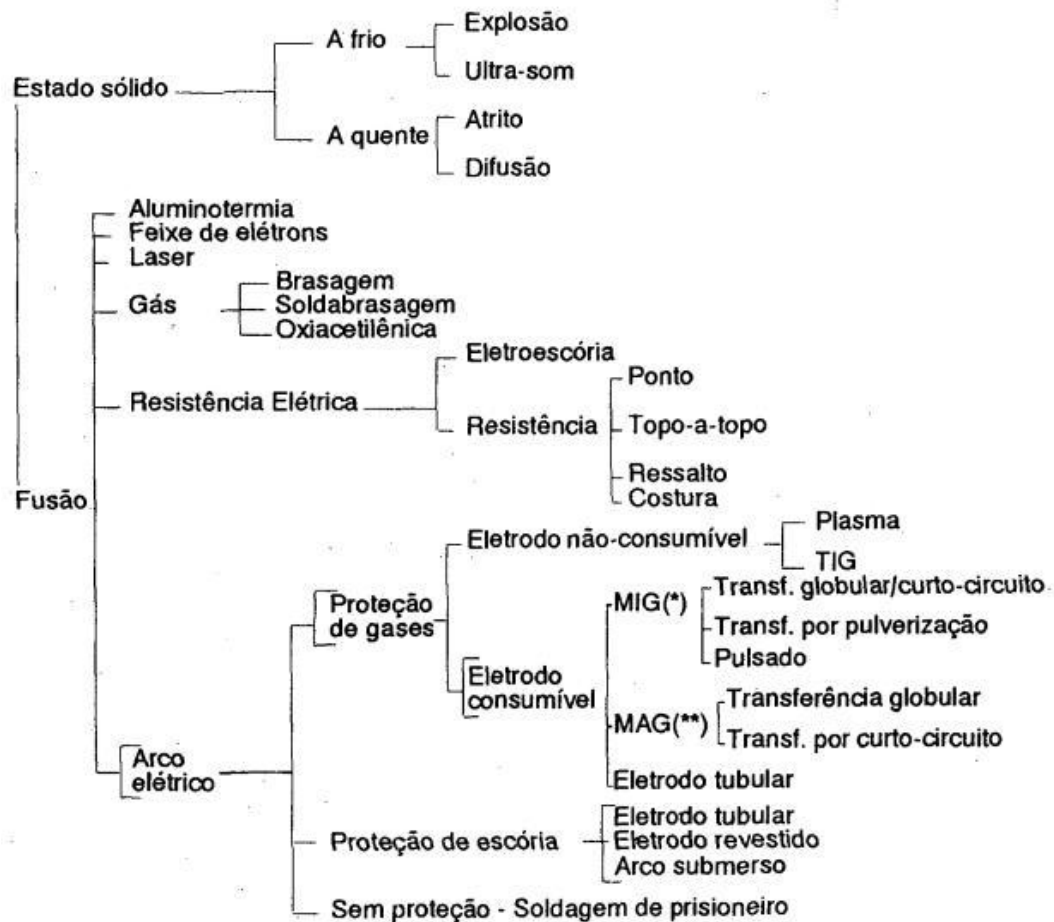
- Pressão ou deformação: neste processo ocorre a deformação das superfícies de contato, fazendo com que os átomos do material tenham uma aproximação ideal e de modo que o calor gerado localmente devido ao atrito, facilite a deformação e a união de ambas partes;



- Por fusão: Aplica-se calor na região de união até que se aconteça a fusão da peça e do material de adição (quando necessita da sua utilização), quando ocorre a fusão das superfícies de contato, ocorre a solidificação do metal, causando a união, ou seja, a soldagem.

Para uma melhor visualização da classificação dos processos de soldagem de acordo com a natureza de união, apresenta-se abaixo a Figura 8.

Figura 8 – Processos de soldagem e natureza de união



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2004).

Dentre esses processos de soldagem descritos anteriormente na Figura 8, os mais utilizados são os processos por fusão, a qual se pode destacar na Tabela 1 as características e aplicações de cada processo.

Tabela 1 – Características dos processos de fusão

| Processo           | Fontes de Calor                                | Tipo de Corrente e polaridade          | Agente Protetor ou de Corte  | Características  | Aplicações   |
|--------------------|--|--|--|--|--|
| Eletro-escória     | Aquecimento por resistência da escória líquida | Continua ou alternada                  | Escória  | Automatizada/Mecanizada. Junta na vertical. Arame de alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco.               | Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 50$ mm. Soldagem de peças de grande espessura.  |
| Arco submerso      | Arco elétrico                                  | Continua ou alternada. Eletrodo +      | Escoria e gases gerados  | Automática/Mecanizada/Semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular  | Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura $\geq 10$ mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão.              |
| Eletrodo revestido | Arco elétrico                                  | Continua ou alternada. Eletrodo + ou - | Escória e gases gerados  | Manual. Vareta metálica e recoberta por camada de fluxo  | Soldagem de quase todos materiais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral                         |
| Arame tubular      | Arco elétrico                                  | Continua. Eletrodo +                   | Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO <sub>2</sub> .    | O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático                              | Soldagem de aços carbono com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas   |
| MIG/MAG            | Arco elétrico                                  | Continua. Eletrodo +                   | Argônio ou Hélio. Argônio + O <sub>2</sub> , Argônio + CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> | Automática/Mecanizada/Semi-automática. O arame é sólido  | Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem em qualquer posição   |
| Plasma             | Arco elétrico                                  | Continua. Eletrodo -                   | Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio   | Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é contido por um bocal | Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas. Com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz   |
| TIG                | Arco elétrico                                  | Continua ou alternada. Eletrodo -      | Argônio, Hélio ou misturas destes  | Automática/Mecanizada/Semi-automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente               | Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações |
| Feixe eletrônico   | Feixe eletrônico                               | Contínua. Alta tensão. Peça +          | Vácuo (10 <sup>-4</sup> mm Hg)   | Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizando em um pequeno ponto                          | Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial  |
| Laser              | Feixe de luz                                   |  | Argônio ou Hélio   | Como acima   | Como acima. Corte de materiais não metálicos   |
| Gás                | Chama oxiacetilênica                           |  | Gás (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)                            | Manual. Arame adicionado separadamente   | Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro  |

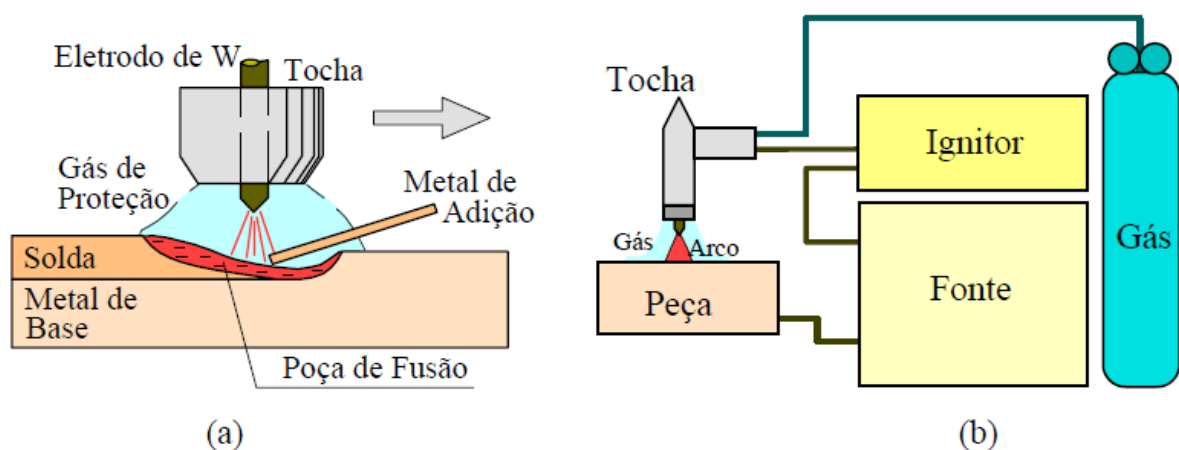
Fonte: Modenesi e Marques (2006).

## 2.6 SOLDAGEM TIG (GTAW)

O processo de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é popularmente conhecido no Brasil como TIG (Tungsten Inert Gas), este processo utiliza como fonte de calor o arco elétrico para fundir e fazer a coalescência entre os metais, através de um eletrodo não consumível de tungstênio. A proteção do cordão de solda é feita por gases inertes ao sistema, utilizando-se em maior frequência o argônio (Ar), ou a mistura de gases inertes de argônio (Ar) mais Hélio (He). Pode-se utilizar o metal de adição ou não. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).

Pode-se analisar na Figura 9 o funcionamento do processo GTAW.

Figura 9 – Soldagem GTAW: (a) Detalhe da região do arco, (b) montagem usual



Fonte: Modenesi e Marques (2006).

Analisando a Figura 9, pode-se observar que o processo de soldagem TIG, constitui-se de uma fonte de energia com corrente contínua (CC) e/ou corrente alternada (CA), tocha com eletrodo de tungstênio, gases de proteção (Ar ou He) e um ignitor de alta frequência, para o envio de um sinal de alta tensão e frequência, utilizado para ionização do meio gasoso entre o eletrodo e a peça, de modo a evitar o contato do eletrodo e a peça para abertura do arco elétrico, diminuindo a contaminação do cordão de solda. Por esses e outros motivos, caracteriza-se o processo TIG como caro e complicado em relação aos outros processos de soldagem.

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a característica mais importante do processo TIG, é o seu excelente controle da energia transferida para peça, controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento quando for preciso, isso

torna o processo adequado para a soldagem de chapas de pequena espessura, eliminação de agentes contaminante e soldagem de difícil soldabilidade.

Como todo processo de soldagem, o processo GTAW possui suas vantagens e limitações, como definidos na Tabela 2 por Modenesi e Marques (2006).

Tabela 2 – Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GTAW

| <b>Vantagens e limitações</b>   | <b>Aplicações</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente controle da poça de fusão.</li> <li>• Permite soldagem sem o uso de metal de adição.</li> <li>• Permite mecanização e automação do processo.</li> <li>• Usado para soldar a maioria dos metais.</li> <li>• Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento.</li> <li>• Gera pouco ou nenhum respingo.</li> <li>• Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem.</li> <li>• Permite a soldagem em qualquer posição.</li> <li>• Produtividade relativamente baixa.</li> <li>• Custo de consumíveis e equipamento é relativamente elevado.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soldagem de precisão ou de elevada qualidade.</li> <li>• Soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro.</li> <li>• Execução do passe de raiz em tubulações.</li> <li>• Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos.</li> </ul> |

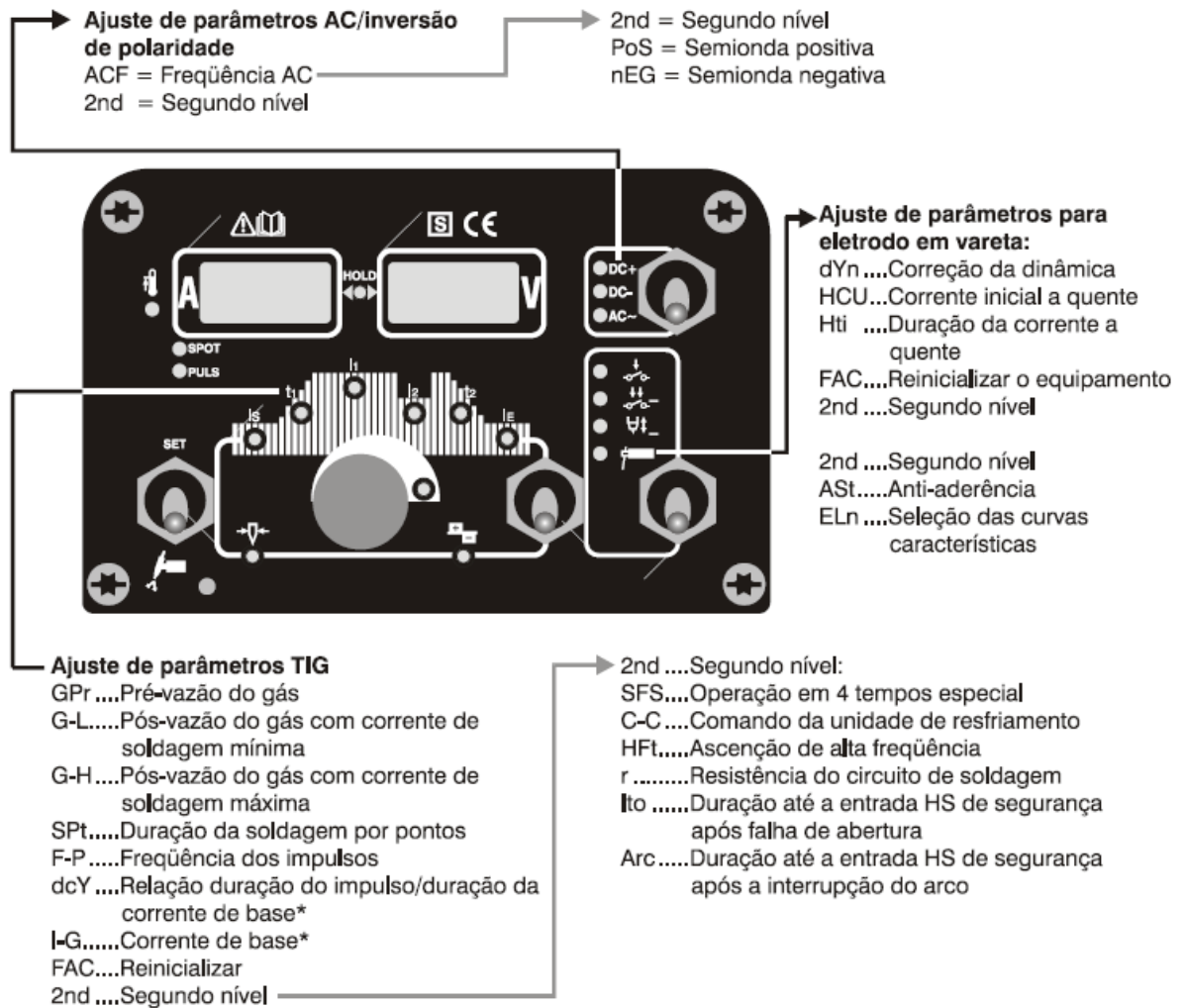
Fonte: Modenesi e Marques (2006).

Entre as principais aplicações industriais do processo de soldagem TIG estão na indústria petrolífera, química e alimentícia, costura e união de topo de tubos de aço inoxidável, soldagem de alumínio, titânio e ligas de níquel, peças leves e de precisão utilizadas na indústria aeroespacial e também na soldagem de 1º passo de raiz nas tubulações de aços liga.

Antes de começar a soldar com uma fonte de soldagem TIG, o operador deve ter conhecimento das configurações da fonte de soldagem, ou seja, seleção dos parâmetros corretos, das técnicas de soldagem e equipamentos auxiliares, entre eles, destacam-se:

- a) Ajustes dos principais parâmetros de soldagem no painel de comando: Fonte de energia, frequência de pulso, intensidade da corrente e o tempo de pré-vazão e pós-vazão do gás de proteção. A Figura 10, mostra com detalhe um exemplo do menu de ajuste do painel de comando de uma fonte de soldagem GTAW, modelo CastoTIG 1702/2202 AC/DC.

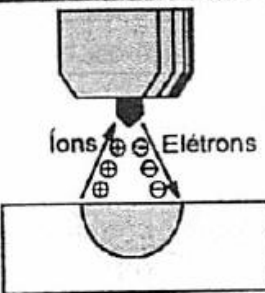
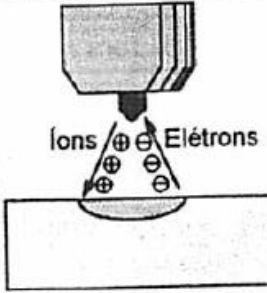
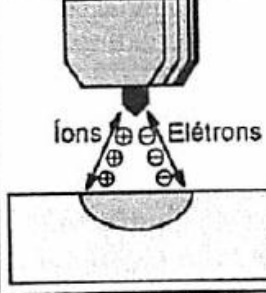



Figura 10 – Painel de comando de uma fonte de soldagem GTAW



Fonte: Eutectic do Brasil LTDA (2002).

As fontes de energia podem empregadas no processo de soldagem TIG podem ser de corrente alternada (CA) ou contínua com polaridade direta (CC-) ou inversa (CC+). A configuração de processo mais utilizada é a de corrente contínua de polaridade direta (CC-) com eletrodo de Tório (W) conectado ao polo negativo, pois esta configuração gera uma fusão mais eficiente do metal base, com menor aquecimento do eletrodo. A Figura 11 apresenta algumas características de soldagem feita com os diferentes tipos de corrente e polaridade.

Figura 11 – Efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem GTAW

| Tipo de Corrente:              | CC-   | CC+  | CA  |
|--------------------------------|---|--|---|
| Polaridade do eletrodo         | Negativa ou direta  | Positiva ou inversa  | Alternada   |
| Fluxo de elétrons e íons       |  |  |  |
| Perfil do cordão               |  |  |  |
| Limpeza de óxido:              | Não   | Sim  | Sim (meio ciclo)  |
| Balanco de calor (aproximado): | 70% na peça<br>30% no eletrodo  | 30% na peça<br>70% no eletrodo   | 50% na peça<br>50% no eletrodo  |
| Penetração                     | Estreita e profunda   | Rasa e superficial   | Intermediária   |
| Aplicações                     | Aço, Cu, Ag, Aços Inoxidáveis e ligas resistentes ao calor                        | Al, Mg (somente para baixas correntes e espessuras)                                | Al, Mg e suas ligas com maiores correntes e espessuras                              |

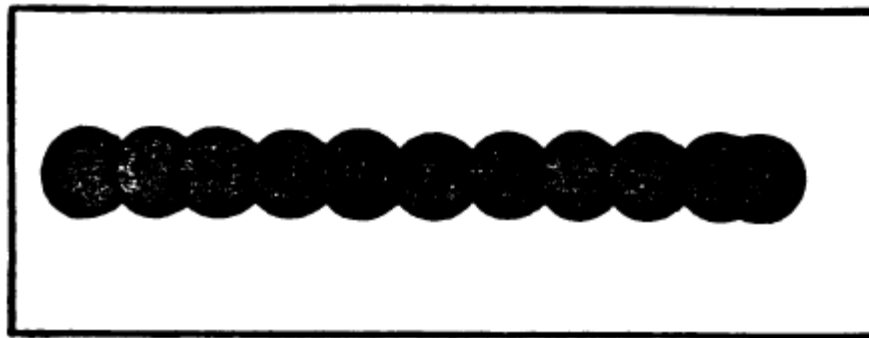
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

Para uma melhor análise da Figura 11, Videira (2016), nos diz que, na polaridade direta forma-se uma poça de fusão mais profunda devido ao bombardeamento direto de elétrons sobre a peça. Na polaridade inversa os elétrons saem da peça para o eletrodo, podendo causar o aquecimento do mesmo, gerando uma poça rasa e promovendo uma limpeza catódica. Já na corrente alternada existe uma combinação das CC- e CC+ gerando uma penetração intermediária.

Nos equipamentos mais modernos de soldagem TIG são apresentadas funções de controle de frequência da energia de pulso, isso permite o uso da corrente contínua pulsada. Segundo Bracarense (2000), a corrente contínua pulsada no processo GTAW (TIG) permite melhor controle da poça de fusão na soldagem, sendo ideal para a soldagem de chapas finas e utilização em sistemas automatizados, minimizando distorções causadas pelo calor gerado pelo arco na soldagem.

A Figura 12 representa um cordão de solda realizado por corrente contínua pulsante, normalmente, para soldagem de lâminas finas, aplica-se sempre os valores máximos de frequência, de aproximadamente de 20 Hz, obtendo-se arcos mais resistentes e uma geometria do cordão de solda mais uniforme.

Figura 12 – Aspecto do cordão gerado por fonte pulsada



**Vista Superior**



**Corte Transversal e Longitudinal**

Fonte: Bracarense (2000).

Para uma melhor qualidade do cordão de solda neste processo, a escolha correta do valor da intensidade de corrente em Ampere (A) pode ser determinante, pois quanto maior o valor da corrente, maior é a penetração e largura do cordão. Valores muito altos ou baixos de corrente, podem mudar as características do material, devido ao calor de soldagem envolvido no processo, onde a velocidade de soldagem entra como outro fator determinante, pois velocidades muito altas, aumentam a produtividade e minimizam os custos, mas acarretam defeitos de descontinuidades, falta de penetração, falta de fusão e mordeduras.

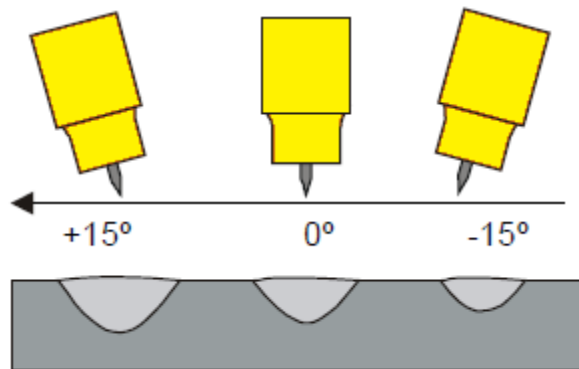
Outro parâmetro importante é o ajuste da vazão (L/min) do gás de proteção em conjunto com o tempo de pré e pós-purga do gás, normalmente o gás flui por 30 segundos no máximo. Vazões baixas geram proteção insuficiente do cordão de solda, gerando oxidação no mesmo.

- b) As técnicas de soldagem: segundo Modenesi e Marques (2006), o processo de soldagem TIG pode ser usada de forma manual, semi-automatizada ou automatizada, sendo um dos processos que permite um maior controle das condições operacionais, favorecendo a formação de cordões de solda de alta qualidade e excelente acabamento,

principalmente em juntas de lâminas de pequena espessura, normalmente inferiores a 3mm.

- Soldagem TIG Manual: o soldador controla todas as funções do processo, como o metal de adição, controle da tocha, cabos e condutores elétricos, pedal de pé para o controle da corrente de soldagem e controles de fluxo de gás. Vale ressaltar a importância do controle da inclinação da tocha, normalmente  $15^\circ$  em relação a peça e da distância do eletrodo de tungstênio em relação a peça, normalmente de 2 a 3 mm. Podemos observar na Figura 13 a influência do ângulo de inclinação da tocha na penetração do cordão.

Figura 13 – Influência do ângulo de inclinação na profundidade do cordão de solda



Fonte: Áquila (2012).

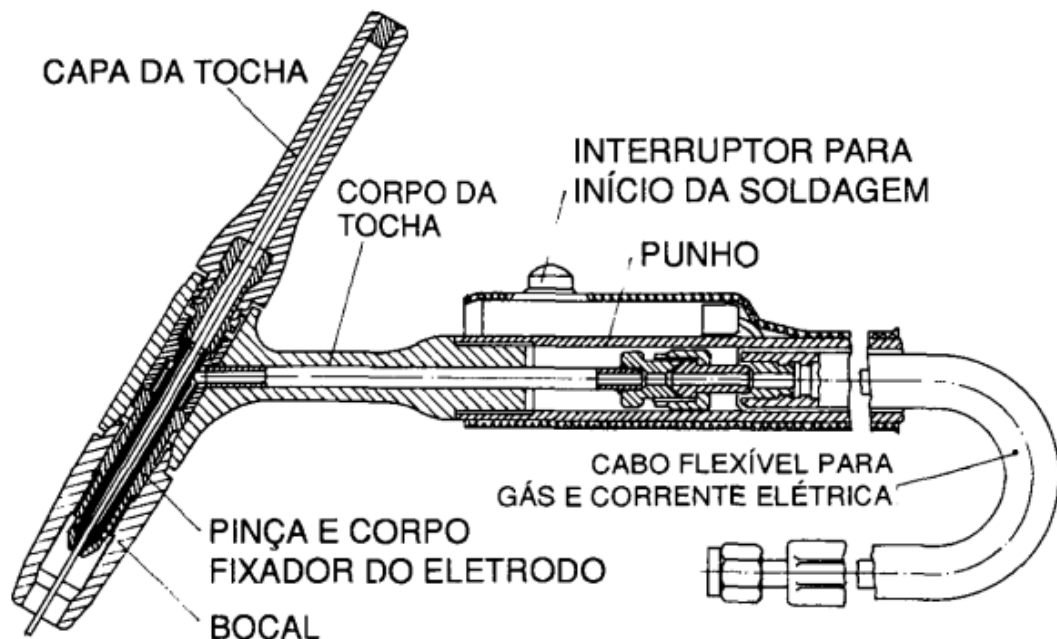
O sentido de soldagem está da direita para esquerda de acordo com a seta indicativa na Figura 13, esse sentido de soldagem indica se a inclinação da tocha é positiva ( $+15^\circ$ ) ou negativa ( $-15^\circ$ ), ou perpendicular ( $0^\circ$ ). A inclinação oferece características diferentes para o cordão de solda. Para Áquila (2012), a inclinação da tocha no sentido positivo indica que o material fundido está sendo puxado, conseguindo maior penetração devido a atuação do arco ser maior. No sentido negativo o material fundido está sendo empurrado, diminuindo a influência e consequentemente menor penetração.

- Soldagem semi-automatizada: alimentação do arame de adição e automatizada enquanto o avanço da tocha é realizado manualmente;
- Soldagem automatizada: processo sem a interferência de um operador, avanço da tocha e alimentação do metal de adição totalmente automáticos. Fontes de soldagem modernas conseguem processar as informações no processo de soldagem e se ajustarem automaticamente.



- c) Seleção dos equipamentos auxiliares: a seleção dos parâmetros descritos até aqui (intensidade de corrente, vazão do gás do gás de proteção, velocidade de soldagem e etc.) possuem influência direta na escolha dos principais equipamentos auxiliares utilizados no processo de soldagem TIG, entre eles podemos destacar o tipo de tocha, bocal da tocha e do eletrodo de tungstênio (W). Para Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a escolha dos parâmetros de soldagem e dos equipamentos auxiliares, dependem também do material a ser soldado, da espessura das peças, da posição de soldagem e da tomada de decisão do uso ou não do material de adição.
- A tocha: a tocha tem a função de conduzir a corrente através do eletrodo de W e o gás inerte para a região de soldagem, sua superfície é feita de material isolante para maior segurança do operador, dentro da mesma vai uma pinça para a fixação do eletrodo. Quanto aos tipos de tochas existentes no mercado temos a tocha automatizada e refrigerada a água e a tocha TIG comum, Figura 14.

Figura 14 – Tocha TIG comum



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

- Bocal da tocha: este tem a finalidade de direcionar o fluxo de gás de proteção em direção ao cordão de solda e que tenha diâmetro suficiente para proteger a poça de fusão, geralmente é feito de material cerâmico. Podemos ver exemplos de bocais na Figura 15.

Figura 15 – Exemplos de bocais utilizados no processo TIG



Fonte: Videira (2016).

- Seleção do eletrodo de tungstênio (W): a seleção do eletrodo é feita de acordo com sua composição química e de seu diâmetro, a qual, essas duas características são encontradas de acordo com a intensidade de corrente utilizada, material a ser soldado, espessura da peça, tipo de junta e número de passes necessários para à realização da soldagem. Para ajudar na seleção correta dos eletrodos utilizados no processo TIG e relacionando a sua composição química com o material que pode ser soldado, apresenta-se a Tabela 3, em que todas especificações atendem as normas ANSI/AWS E DIN 6848.

Tabela 3 – Orientação para escolha de eletrodo do processo TIG

| Cor da Ponta | Classe AWS | Tungstênio com: | Soldagem/Material  |
|--------------|------------|-----------------|--|
| Verde        | EWP        | Puro 99,5%      | Alumínio e magnésio  |
| Vermelho     | EWTh-2     | Tório 2%        | Aço carbono, aço inoxidável, níquel, titânio, cobre e bronze |
| Marrom       | EWZr-0,3   | Zircônio 0,3%   | Alumínio, aço carbono e inoxidáveis                          |
| Branco       | EWZr-0,8   | Zircônio 0,8%   | Alumínio, aço carbono e inoxidáveis                          |
| Cinza        | EWCe-2     | Cério 2 %       | Aço carbono, aço inoxidável e titânio                        |
| Dourada      | EWLa-1,5   | Lantânio 1,5 %  | Em especial aços inoxidáveis e demais aços e ligas           |
| Azul         | EWLa-2     | Lantânio 2%     | Em especial aços inoxidáveis e demais aços e ligas           |

Fonte: American Welding Society (1998).

A faixa de corrente utilizada no processo de soldagem TIG é outro fator determinante para a escolha do tipo e diâmetro do eletrodo, pode-se analisar esse e outros fatores na Tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetro do eletrodo e bocal x Corrente de soldagem para a soldagem TIG

| Diâmetro do Eletrodo (mm)   | Diâmetro do Bocal (mm) | Corrente de Soldagem (A) |           |         |         |
|---|------------------------|--------------------------|-----------|---------|---------|
|   |                        | CC- (a/b)                | CC+ (a/b) | CA (a)  | CA (b)  |
| 0,5   | 6,4                    | 5 - 20                   | --        | 5-20    | 5-15    |
| 1,0   | 6,4                    | 15 - 80                  | --        | 15-80   | 10-60   |
| 1,6   | 9,5                    | 70 - 150                 | 10 - 20   | 70-150  | 50-100  |
| 2,4   | 9,5                    | 150 - 250                | 15 - 30   | 140-235 | 100-160 |
| 3,2   | 12,5                   | 250 - 400                | 25 - 40   | 225-325 | 150-210 |
| 4,0   | 12,5                   | 400 - 500                | 40 - 55   | 300-400 | 200-275 |
| 4,8   | 16,0                   | 500 - 750                | 55 - 80   | 400-500 | 250-350 |
| 6,4   | 19,0                   | 750 - 1000               | 80 - 125  | 500-630 | 325-450 |
| Eletrodos: (a) EWTh-2 (W-2%ThO <sub>2</sub> ) (b) EWP (Tungstênio puro) |                        |                          |           |         |         |

Fonte: Modenesi e Marques (2006).

Depois de selecionado o eletrodo, Áquila (2012), recomenda o afinamento da ponta do eletrodo através de uma esmerilhadeira, formando uma ponta pontiaguda, garantindo a passagem de elétrons entre a o eletrodo e a peça. Esse processo de afinamento da ponta do eletrodo é muito empregado na soldagem de corrente contínua.

### 2.6.1 Parâmetros de soldagem TIG (GTAW) para aços inoxidáveis austeníticos série 300

São muitas as dificuldades encontradas para se padronizar os parâmetros de soldagem TIG para as várias classificações de aços existentes. Segue a Tabela 5 como sugestão de análise para a seleção dos parâmetros de soldagem TIG para os aços austeníticos da série 300.

Tabela 5 – Parâmetros TIG para a soldagem do aço inoxidável austenítico da série 300

| Espessura do metal em mm | Tipo de junta | Diâmetro do eletrodo de tungstênio em mm | Diâmetro do consumível em mm | Corrente tipo ou polaridade | Corrente em amperes (A) | Gás tipo | Vazão em L/min Gás Ag | Pressão em kgf/cm <sup>2</sup> | Velocidade de soldagem cm/min |
|--------------------------|---------------|--|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1,6                      | Topo          | 1,6                                      | 1,6                          |                             | 80-100                  |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Sobreposto    | 1,6                                      | 1,6                          | CC-                         | 100-120                 | Ar       | 5                     | 14                             | 25                            |
|                          | Aresta        | 1,6                                      | 1,6                          |                             | 80-100                  |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Ângulo        | 1,6                                      | 1,6                          |                             | 90-100                  |          | 5                     | 14                             | 25                            |
| 2,4                      | Topo          | 1,6                                      | 1,6 ou 2,4                   | CC-                         | 100-120                 |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Sobreposto    | 1,6                                      | 1,6 ou 2,4                   |                             | 110-130                 | Ar       | 5                     | 14                             | 25                            |
|                          | Aresta        | 1,6                                      | 1,6 ou 2,4                   |                             | 110-120                 |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Ângulo        | 1,6                                      | 1,6 ou 2,4                   |                             | 110-130                 |          | 5                     | 14                             | 25                            |
| 3,2                      | Topo          | 1,6 ou 2,4                               | 2,4                          | CC-                         | 120-140                 |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Sobreposto    | 1,6 ou 2,4                               | 2,4                          |                             | 130-150                 | Ar       | 5                     | 14                             | 25                            |
|                          | Aresta        | 1,6 ou 2,4                               | 2,4                          |                             | 120-140                 |          | 5                     | 14                             | 30                            |
|                          | Ângulo        | 1,6 ou 2,4                               | 2,4                          |                             | 130-150                 |          | 5                     | 14                             | 25                            |
| 4,8                      | Topo          | 2,4                                      | 3,2                          | CC-                         | 200-250                 |          | 6                     | 14                             | 25                            |
|                          | Sobreposto    | 2,4 ou 3,2                               | 3,2                          |                             | 225-275                 | Ar       | 6                     | 14                             | 20                            |
|                          | Aresta        | 2,4                                      | 3,2                          |                             | 200-250                 |          | 6                     | 14                             | 25                            |
|                          | Ângulo        | 2,4 ou 3,2                               | 3,2                          |                             | 225-275                 |          | 6                     | 14                             | 20                            |
| 6,34                     | Topo          | 3,2                                      | 4,8                          | CC-                         | 275-350                 |          | 6                     | 14                             | 13                            |
|                          | Sobreposto    | 3,2                                      | 4,8                          |                             | 300-375                 | Ar       | 6                     | 14                             | 13                            |
|                          | Aresta        | 3,2                                      | 4,8                          |                             | 275-350                 |          | 6                     | 14                             | 13                            |
|                          | Ângulo        | 3,2                                      | 4,8                          |                             | 300-375                 |          | 6                     | 14                             | 13                            |
| 12,7                     | Topo          | 3,2 ou 4,8                               | 6,3                          | CC-                         | 350-450                 |          | 7                     | 14                             | Variável                      |
|                          | Sobreposto    | 3,2 ou 4,8                               | 6,3                          |                             | 375-475                 | Ar       | 7                     | 14                             | Variável                      |
|                          | Aresta        | 3,2 ou 4,8                               | 6,3                          |                             | 375-475                 |          | 7                     | 14                             | Variável                      |
|                          | Ângulo        | 3,2 ou 4,8                               | 6,3                          |                             | 375-475                 |          | 7                     | 14                             | Variável                      |

Fonte: Gimenes Júnior et al (2002).

Os parâmetros descritos na Tabela 5 acima são pontos de partida para iniciar a soldagem, depois cabe o soldador ir ajustando de acordo com suas habilidades pessoais e das condições do seu ambiente físico. De acordo com Gimenes Júnior et al (2002), para a soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300, além de saber selecionar os parâmetros da fonte de soldagem, o soldador antes de começar a soldar deve seguir algumas recomendações:

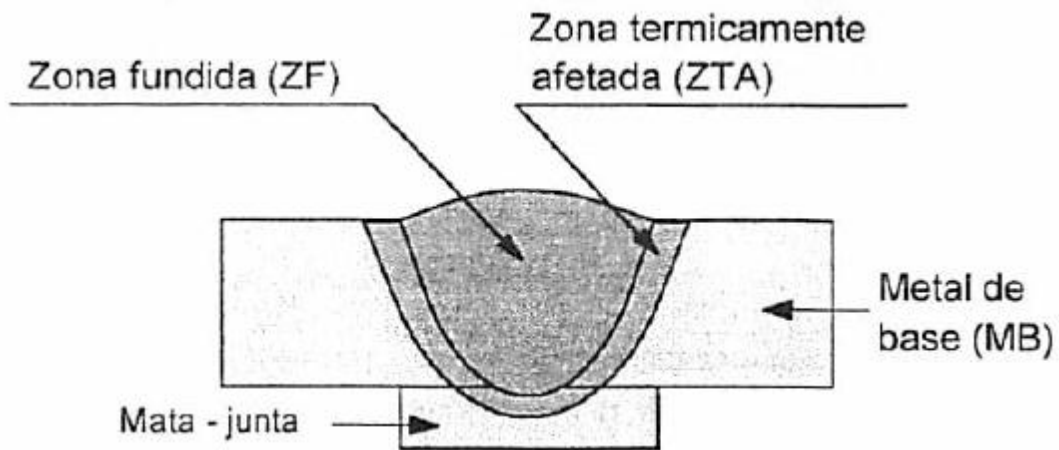
- Fazer a limpeza na região a ser soldada com ferramentas de aço inoxidável e escovas, evitando a contaminação por cloro principalmente, pois o mesmo poderá atacar as camadas de óxido de cromo;
- Deixar os eletrodos livres de áreas úmidas, pois devem estar secos e livres de impurezas;
- Sempre utilizar eletrodo de tungstênio (W) adicionados de Zircônio ou Tório.

- Recomenda-se o processo TIG convencional para espessuras até 4 mm, acima desse valor, usa-se proteção de argônio do lado oposto à solda, para facilitar a penetração.
- O uso de chanfro só é necessário para espessuras acima de 5 mm.
- Evitar longa exposição a temperaturas entre 500 e 900°C, isso evita a deformação do material e a corrosão intergranular.
- Utilizar varetas de aço inoxidável como material de adição.

## 2.7 TERMINOLOGIA DAS IMPERFEIÇÕES DA SOLDAGEM DOS AÇOS AUSTENISTICOS SOLDADOS PELO PROCESSO TIG

Os estudos das imperfeições geradas em um processo de soldagem, requer um breve conhecimento da estrutura e características do cordão de solda, de forma simples, o mesmo é formado por uma zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) que também pode ser chamada de ZAC (Zona afetada pelo calor) e o metal de base (MB), como demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Seção transversal de uma junta de solda e suas diversas regiões



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

Modenesi, Marques e Santos (2006), define as principais regiões da seção transversal de uma junta de solda, como:

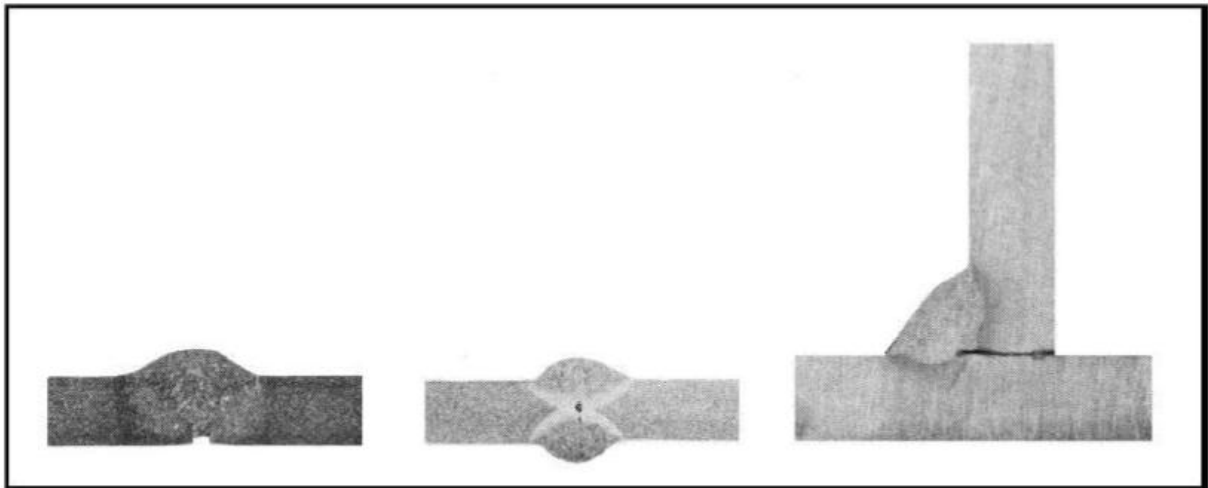
- a) Zona Fundida (ZF): constituída de material base mais o metal de adição fundidos durante o processo de soldagem;
- b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): região cuja a microestrutura e/ou propriedades foram afetadas pelo ciclo térmico de soldagem;

- c) Metal Base (MB): região onde não houve alteração das propriedades do material pela ação do ciclo térmico da soldagem.
- d) Mata-junta ou cobre-junta: peça colocada na parte inferior da solda (raiz), com a função de conter o metal fundido, normalmente é feito de material similar que está sendo soldado, e pode ser retirado ou não no final do processo de soldagem.

Como já descrito nos tópicos anteriores deste trabalho, em que foram analisados a soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos e dos processos empregados para a soldagem desses aços, em específico o processo TIG, que juntamente com a seleção correta dos parâmetros de soldagem, visam obter uma solda de qualidade. Porém, práticas inadequadas de soldagem podem causar defeitos de soldagem. Áquila (2012), define os principais defeitos de soldagem: falta de penetração, falta de fusão, mordedura, porosidade, trincas longitudinais entre outros defeitos.

- a) Falta de penetração: é quando o cordão de solda não atinge a profundidade suficiente para garantir a união do material, as causas estão relacionadas principalmente a corrente baixa, angulação incorreta da tocha e velocidade de soldagem, a Figura 17 exemplifica a falta de penetração.

Figura 17 – Exemplos de falta de penetração

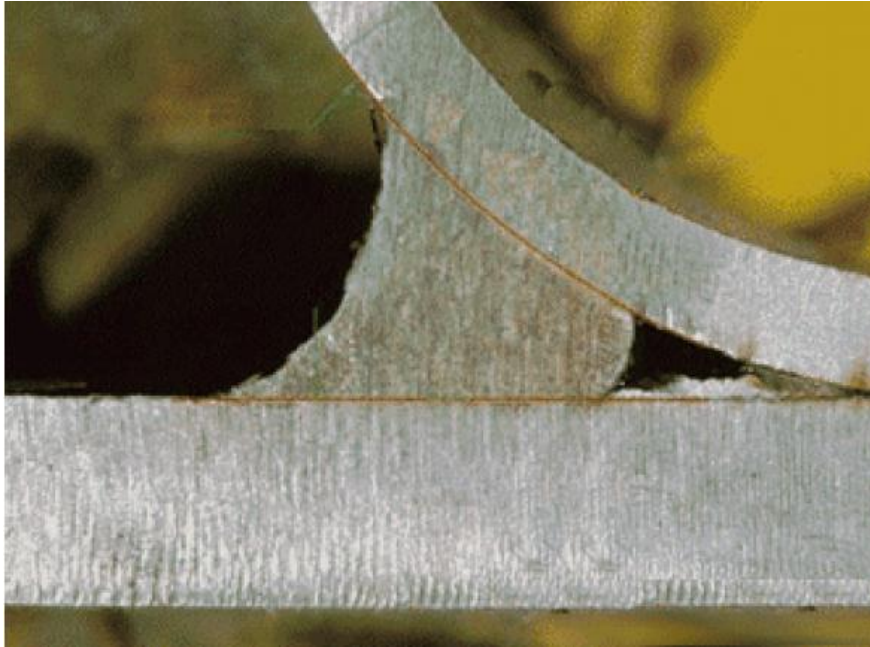


Fonte: Áquila (2012).

- b) Falta de fusão: ocorre devido a maior parte da raiz do cordão de solda não ter sofrido a diluição necessária para a união do material, isso ocorre devido a energia do arco não ter sido suficiente para fundir o metal de base, causando discontinuidades geométricas, como exemplo largura e profundidade insuficiente

do cordão de solda para uma união resistente e confiável. A Figura 18 exemplifica a falta de fusão.

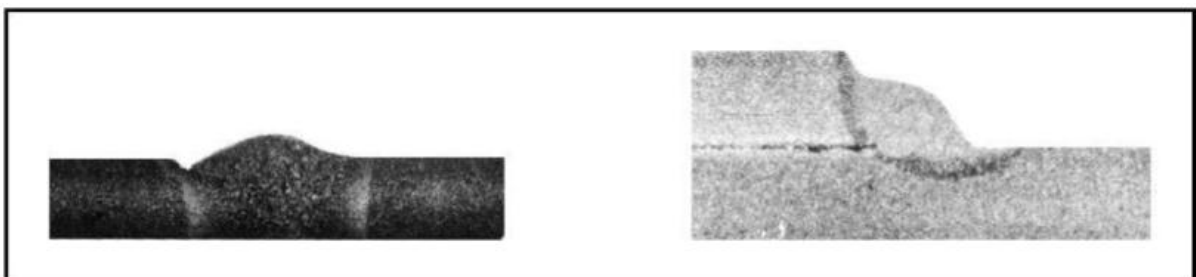
Figura 18 – Falta de fusão em junta de filete



Fonte: Quites (2011).

- c) Mordedura: é a formação de uma depressão ou baixo relevo especificamente entre a ZF e a ZTA na maioria dos casos. A mordedura é comum em juntas sobrepostas, de topo e de ângulo e é causada principalmente por alta velocidade de soldagem, tensão do arco e correntes de soldagem excessivas. A Figura 19, mostra exemplos de mordeduras em juntas de topo e sobrepostas.

Figura 19 – Exemplos de mordedura

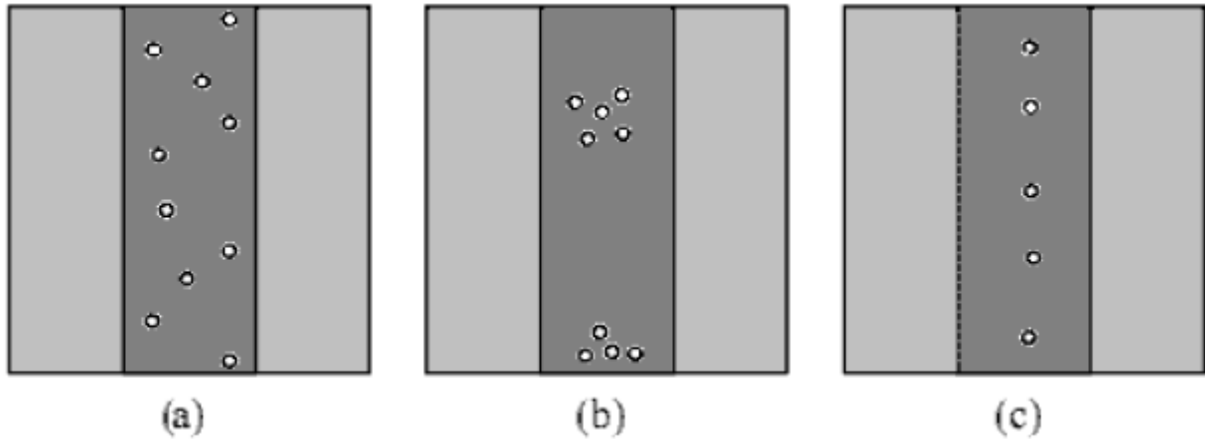


Fonte: Águila (2012).

- d) Porosidade: é formada devido ao aprisionamento de gases dentro do cordão durante a solidificação da solda. As causas estão relacionadas ao excesso ou escassez do gás de proteção, correntes de ar excessivas, valores de corrente de

soldagem muito baixos e presença de sujeira. Os poros podem ser dispersos, alinhados ou agrupados, como demonstrados na Figura 20.

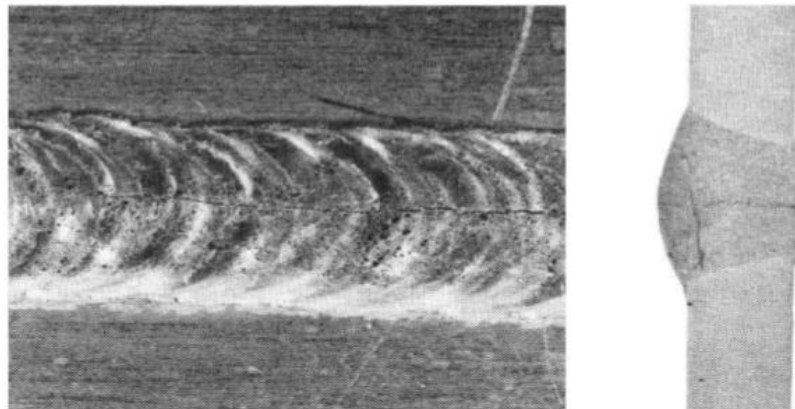
Figura 20 – Poros internos: (a) dispersos; (b) agrupados; (c) alinhados



Fonte: Quites (2011).

- e) Trincas longitudinais: são fissuras, fendas ou rupturas localizadas no sentido do cordão de solda e podem ocorrer a quente ou a frio, pois podem se formar durante a solidificação da solda, durante o resfriamento ou em operações após a solda, quando sujeitas as forças externas. A trinca é um forte concentrador de tensão. Para Zeemann (2003) os aços austeníticos quando soldados com consumível austenítico se tornam susceptíveis ao trincamento a quente, devido à baixa solubilidade das impurezas (S, P, Si) na estrutura austenítica, a qual costuma-se soldar com consumível que não seja totalmente austenítico para minimizar as trincas, como um austeno-ferrítico, pois a estrutura bifásica diminui a concentração de impurezas e diminui o risco de trincamento. A Figura 21, mostra exemplos de trincas longitudinais.

Figura 21 – Exemplos de trincas longitudinais



Fonte: Áquila (2012).



## 2.8 FLUXO DE CALOR NA SOLDAGEM

Para que ocorra a fusão na soldagem, a maioria dos processos trabalham com fontes de calor de elevadas temperaturas, entre 2.000 a 20.000°C, por sua vez a aplicação de elevadas temperaturas e a forma com que o calor é difundido causam a fusão e solidificação do cordão de solda, além disso podem causar variações dimensionais e alterações em pontos localizados da microestrutura. Modenesi, Marques e Santos (2006), nos diz que os principais efeitos indesejáveis gerados pelo o calor de soldagem:

- Tensões residuais e distorção;
- Deterioração das principais propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade, resistência mecânica e etc);
- Formação de trincas;
- Deterioração de propriedades físicas, químicas e etc.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o fluxo de calor de soldagem pode ser dividido em duas etapas básicas: a primeira etapa é o fornecimento de calor à junta e a segunda etapa é a dissipação deste calor pela peça.

- a) Fornecimento de calor à junta: é o processo de energia de soldagem ou do aporte térmico, que é definido como a quantidade de energia fornecido à junta de solda por unidade de comprimento da mesma. O aporte térmico pode ser expresso por:

$$AT = \eta * \frac{V * I}{V_s} \dots\dots\dots(Eq. 1)$$

Onde,  $AT$  é o aporte térmico (J/mm),  $\eta$  é a eficiência térmica do processo,  $V$  é a tensão do arco (V),  $I$  é a corrente de soldagem (A), e  $V_s$  é a velocidade de soldagem (mm/s).

O valor do rendimento térmico depende do processo e das condições de soldagem, a Tabela 6 mostra as faixas de  $\eta$  para diferentes processo de soldagem.

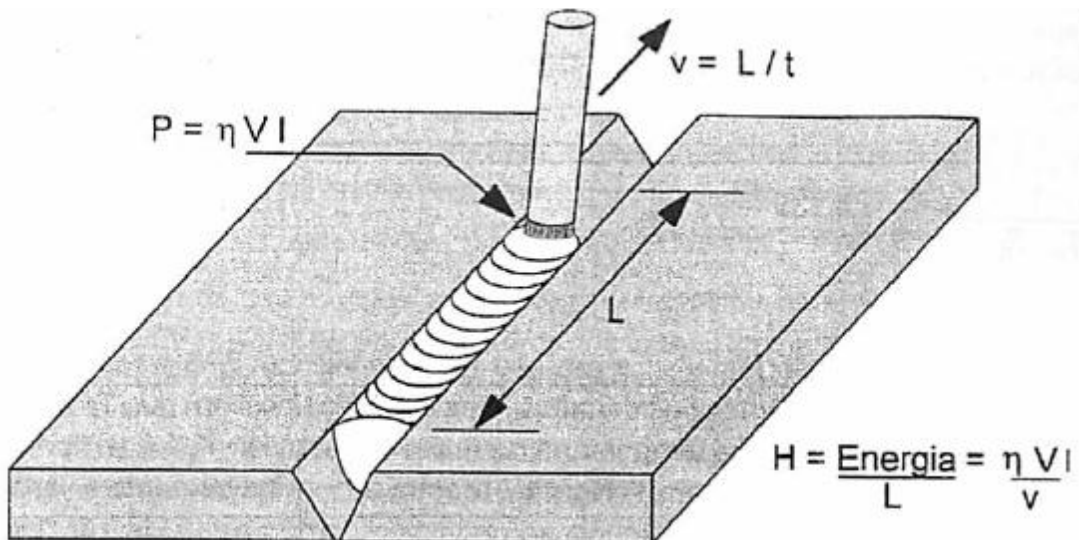
Tabela 6 – rendimento térmico de acordo com o processo de soldagem

| Processo                  | Rendimento Térmico ( $\eta$ ) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Arco Submerso (SAW)       | 0,85 – 0,98                   |
| MIG/MAG (GMAW)            | 0,75 – 0,95                   |
| Eletrodo Revestido (SMAW) | 0,70 – 0,90                   |
| TIG (CC-) (GTAW)          | 0,50 – 0,80                   |
| TIG (CC+)(GTAW)           | 0,20 – 0,50                   |
| Laser (LBW)               | 0,005 – 0,70                  |

Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2006).

Para uma melhor visualização do aporte térmico e da energia dissipada em um processo de soldagem em relação ao comprimento do cordão de solda, apresenta-se abaixo a Figura 22. onde  $P = (\eta \cdot V \cdot I)$  é potência dissipada no arco e cedida à peça,  $t$  é o tempo e  $L$  é o comprimento da solda.

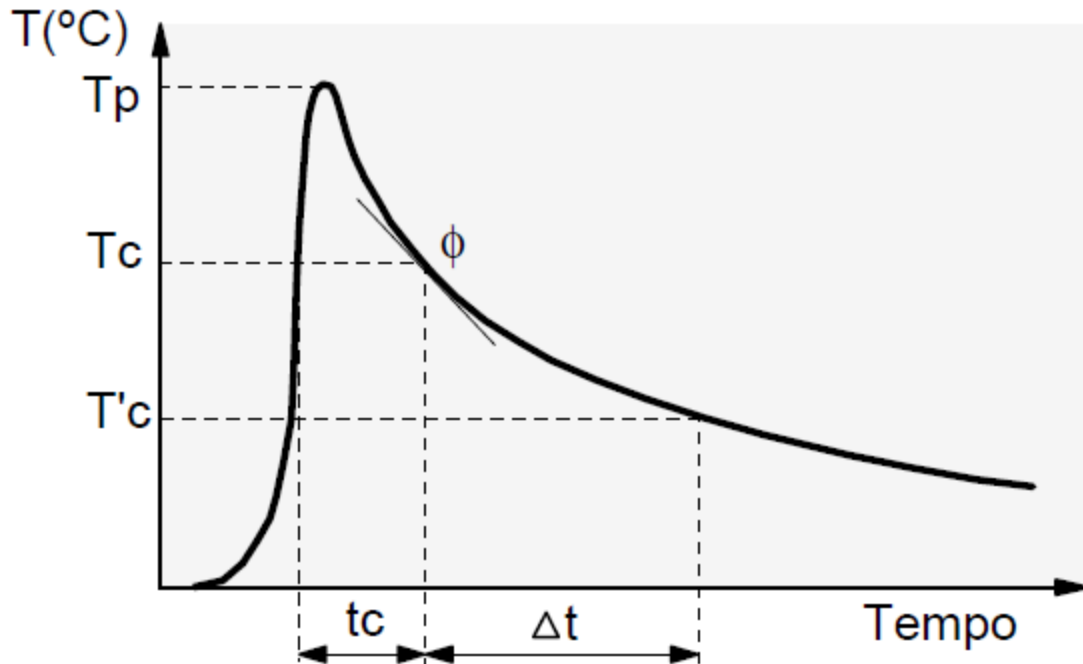
Figura 22 – Conceito de energia de soldagem



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

- b) Dissipação do calor de soldagem: ocorre principalmente por condução da poça de fusão para o restante da peça, sendo que cada parte da peça localizado próximo à junta sofrerá uma diferente variação da temperatura devido a passagem da fonte de calor, esse efeito e denominado de ciclo térmico de soldagem. A Figura 23 demonstra um gráfico esquemático do ciclo térmico de soldagem.

Figura 23 – Ciclo térmico na soldagem em um só passe



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2006).

Modenesi, Marques e Santos (2006), define os principais parâmetros que descrevem o ciclo térmico:

- Temperatura de Pico ( $T_p$ ): Temperatura máxima atingida pelo ciclo térmico em dado ponto, pode indicar a ocorrência de transformações microestruturais;
- Temperatura crítica ( $T_c$ ): tempo de permanência em que determinado ponto da soldagem fica com temperaturas superiores a uma temperatura mínima aceitável para que não ocorra transformações microestruturais no material;
- Velocidade de resfriamento ( $\phi$ ): é o quanto a temperatura de resfriamento está variando em um dado período de tempo, sendo um parâmetro importante para a determinação da microestrutura de aços estruturais.

Vale ressaltar também, que os ciclos térmicos de soldagem dependem de outros fatores para se obter uma solidificação da junta de solda de qualidade, a qual, pode-se citar: tipo de metal base e sua condutividade térmica, a geometria da junta (topo ou ângulo), espessura da junta, energia de soldagem, temperatura de aquecimento e também do número de passes envolvidos na soldagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada em conjunto nos laboratórios da área de Materiais e Processos de Fabricação da UNESP-Campus de Ilha Solteira e também da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNIRV - Universidade de Rio Verde.

#### 3.1 MATERIAIS

O metal de base utilizado neste estudo foi o aço inoxidável austenítico AISI 316L sob a forma de chapa de 1,0 mm de espessura. A escolha do material se deve à sua grande aplicabilidade na indústria alimentícia e petrolífera que exigem aços resistentes a corrosão, onde essa e outras propriedades são encontradas no aço inoxidável AISI 316L. A composição química do aço inoxidável AISI 316L é mostrada na Tabela 7.

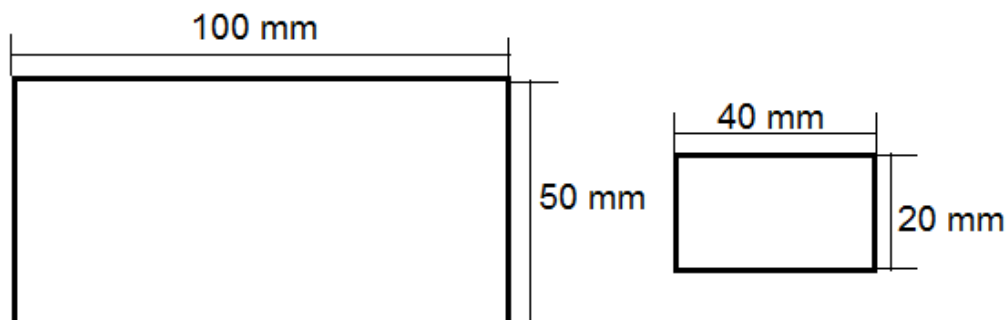
Tabela 7 – Composição química do aço AISI 316 L (% em peso)

| Elementos        | C     | Cr    | Ni    | Mn   | Si   | P     | S     | Mo  |
|------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-----|
| <b>AISI 316L</b> | 0,030 | 17,28 | 13,00 | 0,80 | 0,75 | 0,045 | 0,003 | 2,3 |

Fonte: Ventrella et al. (2010).

Depois de confeccionada a chapa de aço inox 316L com as especificações acima, foram recortados pedaços de chapa para servirem de amostras nos testes de soldagem iniciais e também para retirar os corpos de provas para os ensaios mecânicos e macrográficos. O processo de corte utilizado foi o de corte a jato de água, com o objetivo de não afetar termicamente o material. As dimensões das amostras foram (100x50) mm e (40x20) mm. A Figura 24 exemplifica melhor as dimensões das amostras para serem soldadas.

Figura 24 – Amostras para os testes de soldagem



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.2 FONTE DE ENERGIA PARA A SOLDAGEM

A fonte de energia utilizada para a soldagem GTAW das amostras foi uma fonte retificadora multiprocesso, modelo Invertec V300I, da Lincoln Electric, com tensão de soldagem de 29 V e corrente máxima de 300 A. O modelo pode ser visualizado na Figura 25.

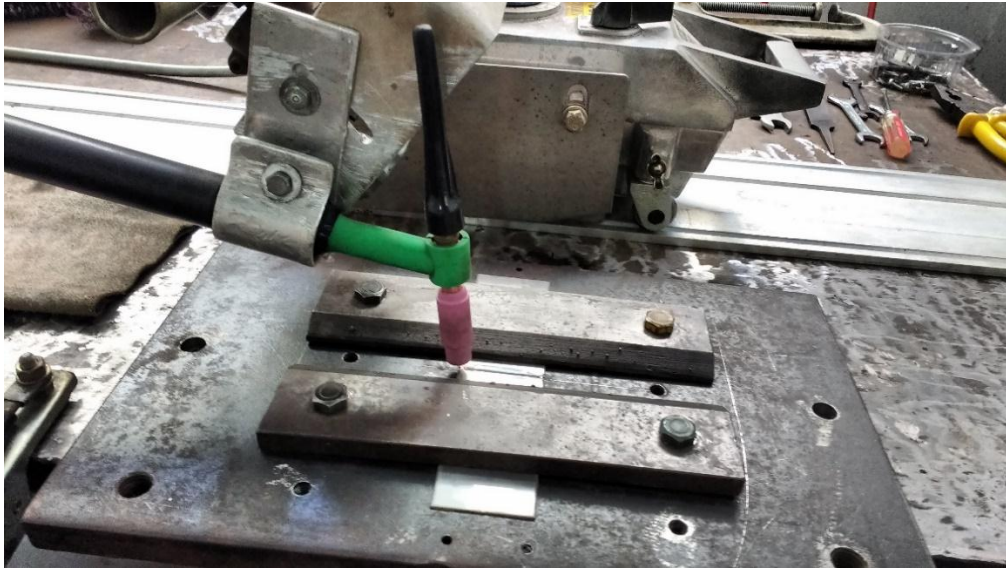
Figura 25 – Fonte retificadora multiprocesso Invertec V300I



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O processo de soldagem automatizado permite utilizar valores de velocidades constantes para um controle mais eficiente do calor de soldagem utilizado para a fusão do metal de base, gerando cordões de solda confiáveis para efeitos comparativos em ensaios para avaliar as propriedades do cordão de solda. Para isso, utilizou-se neste estudo um carrinho “tartaruga” de oxicorte para automatização do processo de soldagem GTAW, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Sistema de soldagem TIG automatizado



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.3 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM E SELEÇÃO DOS PARAMETROS

Para selecionar os parâmetros iniciais de soldagem, foram feitos primeiramente os ajustes na fonte de soldagem. Como já discutido na introdução deste estudo, existe uma grande dificuldade de se encontrar literaturas que ajudam na seleção dos parâmetros de soldagem GTAW de chapas finas de aço inox, pois na maioria dos catálogos e manuais de operação a menor medida de espessura de chapa encontrada é a de  $\frac{1}{16}$  ou 1,6 mm, como exemplo da Tabela 4. Baseado nos parâmetros da Tabela 4 para uma chapa de 1,6 mm, começou-se a fazer os pré-testes de soldagem, fixando alguns parâmetros de soldagem e alterando outros, pois a espessura da chapa soldada em estudo é de 1,0 mm. Os mesmos foram definidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros dos pré-testes de soldagem GTAW

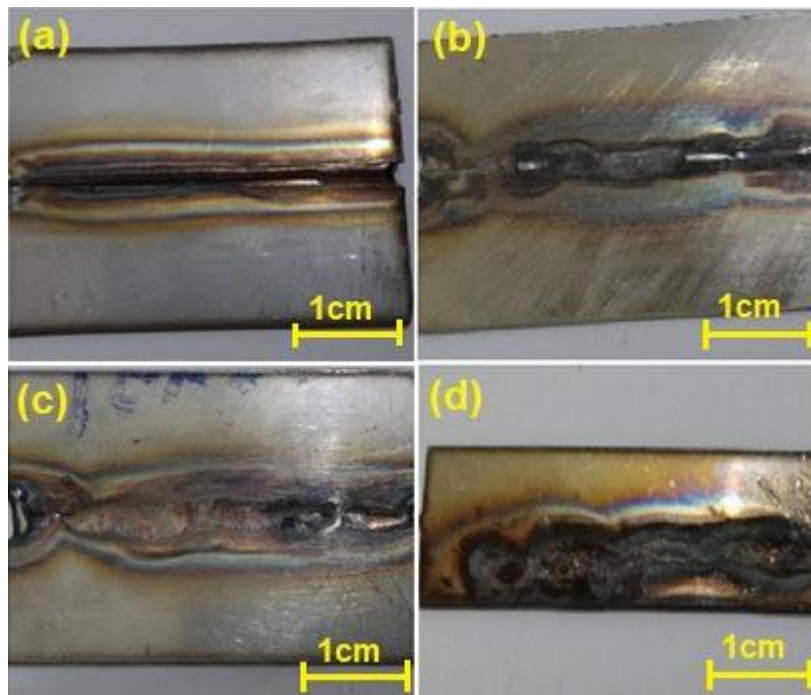
|   |  |
|---|--|
| <b>Material</b>                                 | Aço inox austenítico AISI 316L             |
| <b>Espessura da chapa (mm)</b>                  | 1  |
| <b>Tipo de Junta</b>                            | Topo (sem chanfro)                         |
| <b>Diâmetro (mm) e cor da ponta do eletrodo</b> | 1,6 e vermelha (2% Th)                     |
| <b>Consumível</b>                               | Processo autógeno (sem material de adição) |
| <b>Polaridade</b>                               | CC-  |
| <b>Corrente (A)</b>                             | 40 – 80                                    |
| <b>Tensão de soldagem (V)</b>                   | 29   |
| <b>Vazão Gás de proteção Ar (l/min)</b>         | 5  |
| <b>Velocidade de soldagem (mm/min)</b>          | 250 - 500                                  |
| <b>Ângulo da Tocha</b>                          | 0° (perpendicular ao cordão de solda)      |
| <b>pré e pós-purga do gás (s)</b>               | 15   |
| <b>Frequência de pulso (Hz)</b>                 | 20   |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Tabela 8, pode-se observar que dentre os parâmetros pré-selecionados, considerou-se a variação da corrente entre 40 a 80 A e também da velocidade de soldagem entre 250 e 500 mm/min, com incremento de 25 mm/min, os outros parâmetros foram conservados. Foram realizados vários pré-testes, com variadas combinações de corrente e velocidade de soldagem, até chegar uma corrente de soldagem ideal, de modo que fosse possível variar somente a velocidade de soldagem, e conseqüentemente, o aporte térmico, pois esse procedimento foi especificado nos objetivos específicos deste estudo.

Avaliando os pré-testes, foi observado que os valores de corrente (A) ajustados no menu de ajuste da fonte de soldagem caíam repentinamente quando se abria o arco para a soldagem. Portanto, considerou-se os valores registrados na fonte de soldagem durante a abertura do arco. Também foram avaliadas as discontinuidades existentes no cordão de solda, de acordo com a corrente utilizada dentro do campo pré-estabelecido de 40 a 80 A, a qual se pode definir que em correntes baixas (40 a 50 A), Figura 27 (a e b), o cordão de solda apresentou falta de fusão e penetração do metal de base, necessitando de outro passe de soldagem do lado oposto do cordão de solda. Já em correntes altas (60 a 80 A), Figura 27 (c e d) houve a perfuração da chapa, rebaixamento excessivo do cordão de solda e distorções geradas pelo calor de soldagem em maior parte do corpo de prova.

Figura 27 – defeitos de soldagem gerados por valores de baixa e alta corrente



Fonte: Elaboração do próprio autor.



Depois de vários pré-testes, com variadas combinações de velocidade e intensidade de corrente, chegou-se a um padrão em que a melhor corrente para soldagem apresentada foi de 55 A, com velocidade variando de 375 a 500 mm/min e incremento de 25 mm/min, com isso, ficou decidido os novos parâmetros de soldagem para avaliar a influência do aporte térmico de soldagem nas propriedades do cordão de solda. Esses parâmetros estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de soldagem GTAW para avaliar a influência do aporte térmico nas propriedades do cordão de solda

|   |  |
|---|--|
| <b>Material</b>                                 | Aço inox austenítico AISI 316L             |
| <b>Espessura da chapa (mm)</b>                  | 1  |
| <b>Tipo de Junta</b>                            | Topo (sem chanfro)                         |
| <b>Diâmetro (mm) e cor da ponta do eletrodo</b> | 1,6 e vermelha (2% Th)                     |
| <b>Consumível</b>                               | Processo autógeno (sem material de adição) |
| <b>Polaridade</b>                               | CC-  |
| <b>Corrente (A)</b>                             | 55   |
| <b>Tensão de soldagem (V)</b>                   | 29   |
| <b>Vazão Gás de proteção Ar (l/min)</b>         | 5  |
| <b>Velocidade de soldagem (mm/min)</b>          | 375 - 500                                  |
| <b>Ângulo da Tocha</b>                          | 0° (perpendicular ao cordão de solda)      |
| <b>pré e pós-purga do gás (s)</b>               | 15   |
| <b>Frequência de pulso (Hz)</b>                 | 20   |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Depois de aplicados os parâmetros de soldagem TIG da Tabela 9, com velocidade de 375 mm/min e intensidade de corrente de 55 A, foi notável a diferença de qualidade do cordão de solda, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 – Cordão de solda com parâmetros de soldagem da Tabela 9 e velocidade de soldagem de 375 mm/min

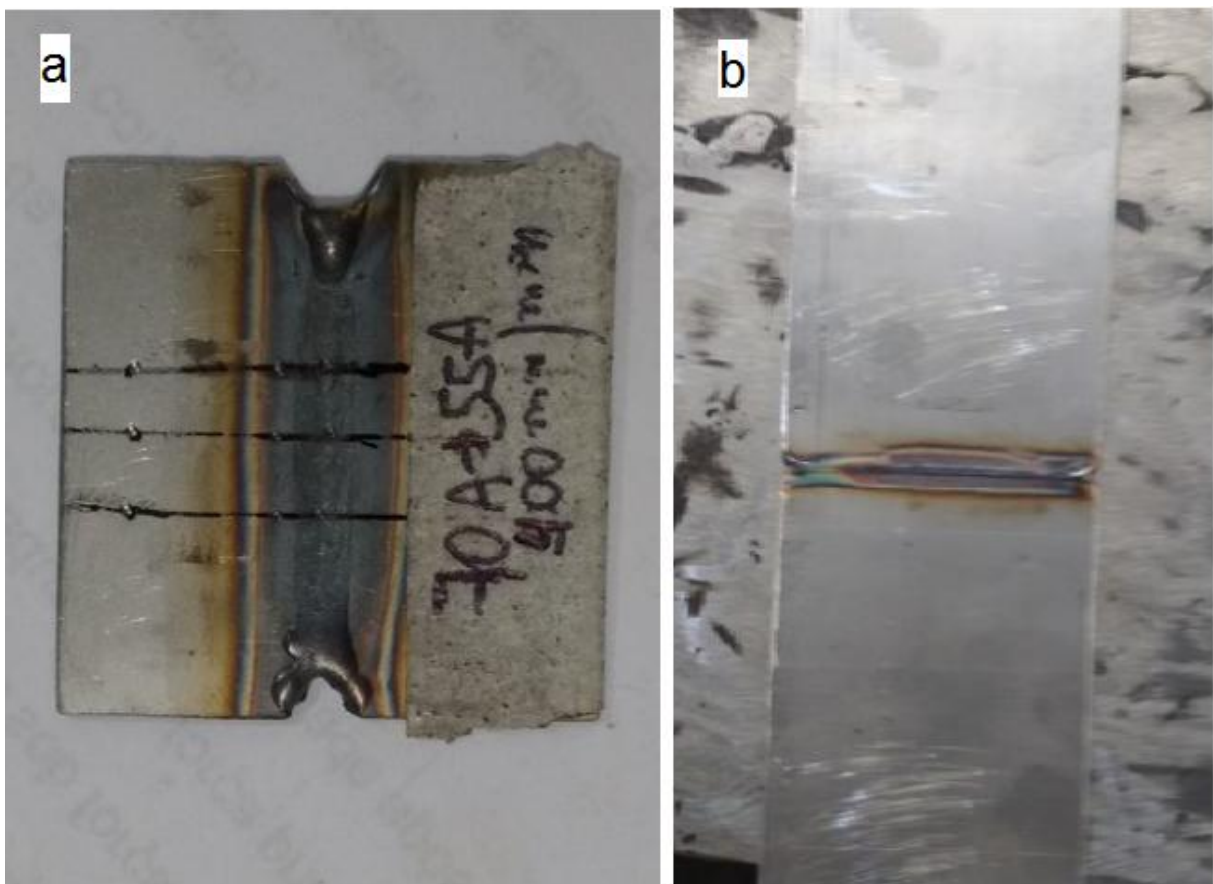


Fonte: Elaboração do próprio autor.



Diante dos parâmetros estabelecidos da Tabela 9, utilizou-se os valores de velocidade de soldagem 375, 400, 425, 450, 475 e 500 mm/min para avaliar a influência da variação do aporte térmico nos corpos de prova para os ensaios de dureza e tração. Foram confeccionados seis corpos de provas para cada variação de velocidade e para cada ensaio mecânico, os mesmos foram feitos com os recortes das amostras especificadas na Figura 24. A Figura 29 exemplifica de que forma foram soldados os corpos de prova para os ensaios mecânicos.

Figura 29 – Corpos de prova para os ensaios mecânicos. (a) corpo de prova para ensaio de dureza e (b) amostra para a confecção dos corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores de aporte térmico (AT) obtidos para cada variação de velocidade, pode ser calculado através da (Eq. 1), dentro das condições operacionais da Tabela 9 e com eficiência térmica ( $\eta = 0,75$ ). Pode-se analisar melhor cada valor de aporte térmico obtido na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 – Valores de aporte térmicos obtidos

| Amostras | Velocidade de Soldagem (mm/min) | Aporte Térmico (J/mm) |
|----------|---------------------------------|-----------------------|
| CP01     | 375                             | 191,40                |
| CP02     | 400                             | 179,44                |
| CP03     | 425                             | 168,88                |
| CP04     | 450                             | 159,50                |
| CP05     | 475                             | 151,11                |
| CP06     | 500                             | 143,55                |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.4 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE METALOGRAFIA E ANÁLISE MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA

Após a soldagem, foram recortadas 6 pequenas amostras (uma para cada aporte térmico) para serem embutidas em material de moldes plásticos de baquelite para os ensaios metalográficos, com intuito de facilitar a observação macro e microscópica. Depois de embutidas as amostras para cada variação de aporte térmico descritos na Tabela 10, iniciou-se o lixamento com lixa grana 220, passando por lixas grana 320, 400, 600, 1200, 1500 e por fim 2000.

Para o polimento, utilizou-se uma politriz marca *Pantec modelo Polipan-2*. Para o polimento foi adicionado o polímero com alumina  $1\mu\text{m}$  e  $0,5\mu\text{m}$ . O ataque eletrolítico foi realizado com ácido oxálico 10%, com a proporção de 10 gramas de ácido oxálico mais 90 ml de água, depois todas as amostras foram limpas em água corrente e secadas para que as mesmas fossem imersas por 15 segundos com tensão de 6 Vcc. A Figura 30 demonstra as amostras prontas depois dos ensaios metalográficos.

Figura 30 – Amostras embutidas para os ensaios de macro e microscopia



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Depois do ataque com ácido, foi realizada a caracterização macroestrutural no estereomicroscópio da marca ZEISS, modelo DISCOVERY V.8, nele está acoplada uma câmera AXIONCAM ERC5S, pertencente ao laboratório de microscopia ótica da

FEIS/UNESP. Ver Figura 31. A geração das imagens macrográficas foram utilizadas para a verificação da geometria do cordão de solda e também da presença de discontinuidades.

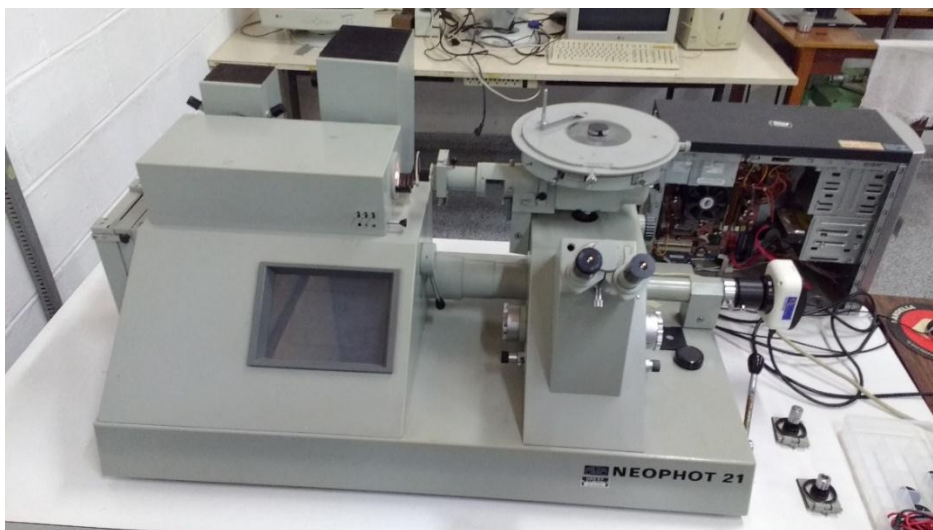
Figura 31 – Estereomicroscópio ZEISS, modelo DISCOVERY V.8.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A caracterização microestrutural das amostras foi realizada com o auxílio de um microscópio óptico (MO) da marca Carl Zeiss, modelo Neophot 21 (Figura 32) pertencente ao Laboratório de Microscopia Óptica da FEIS/UNESP. A caracterização foi realizada para identificar a microestrutura do metal de base, zona termicamente afetada pelo calor e a zona fundida.

Figura 32 – Microscópio óptico, marca: ZEISS, modelo Neophot 21



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.5 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE MICRODUREZA

Para a avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas com diferentes aportes térmicos, utilizou-se o ensaio de microdureza. Utilizou-se um ultramicrodurômetro digital da marca Shimadzu, modelo DUH 211S, apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Ultramicrodurômetro digital Shimadzu, modelo DUH 211S



Fonte: Elaboração do próprio autor.

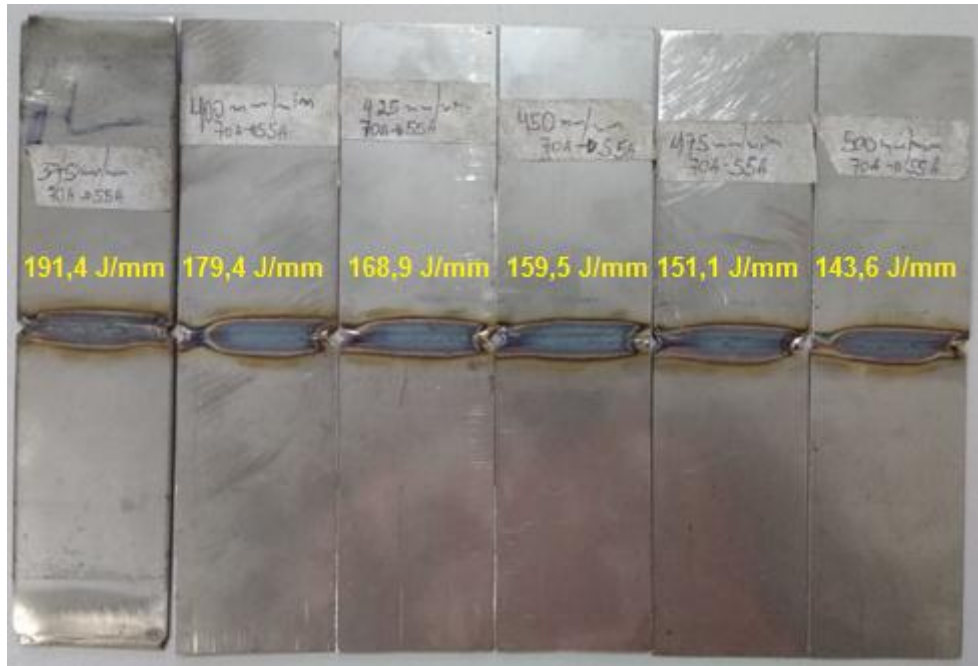
Os pontos de medida de microdureza foram realizados na secção transversal da junta de solda, na direção paralela à superfície da chapa. Foram realizadas medidas no centro do cordão e próximo a superfície da chapa em todas as regiões (MB, ZF e ZTA) do cordão de solda, afim de relacionar a variação da microdureza com o surgimento de heterogeneidades microestruturais. A endentação foi realizada com uma carga de 0,01kgf, com distância mínima entre as endentações adjacentes respeitadas para que não haja erros na obtenção das medidas.

### 3.6 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde. Depois de soldadas as amostras em diferentes velocidades e

consequentemente gerando aportes térmicos para cada uma dessas amostras e determinados na Tabela 10, pode-se visualizar na Figura 34 as amostras soldadas para a confecção dos corpos de provas para o ensaio de tração.

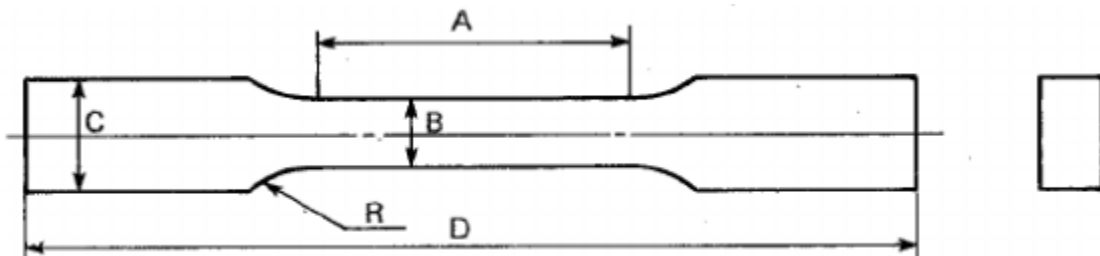
Figura 34 – Amostras soldadas para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para cada aporte térmico, foram confeccionados 2 corpos de provas, de acordo com o método MB-4 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), onde são indicadas as dimensões e formas dos corpos de prova. A Figura 35 mostra o formato de um corpo de prova para ensaios de tração com chapa fina.

Figura 35 – Formato de corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Souza (1982).

A Tabela 11, fornece os valores numéricos dos métodos MB-4 da ABNT e E8 da ASTM para as dimensões especificadas na Figura 35 acima. Pode-se observar na Tabela 11



que foi assinalado em vermelho as dimensões para corpos de prova de chapa fina, a qual foi seguido o mesmo padrão para a confecção dos corpos de prova desse estudo.

Tabela 11 – Dimensões dos corpos de prova

| Corpo de prova                | A (mm) | B (mm) | C (mm)<br>(aprox.) | D (mm)<br>(aprox.) | R (mm)<br>(mín.) |
|-------------------------------|--------|--------|--------------------|--------------------|------------------|
| Redondo – ABNT                | 70     | 10     | 18                 | 150                | 15               |
| Redondo – ASTM                | 60     | 12,5   | 18                 | 130                | 15               |
| Chapa fina – ABNT             | 75     | 12,5   | 20                 | 200                | 20               |
| Chapa grossa – ABNT           | 240    | 40     | 50                 | 400                | 25               |
| Chapa fina – ASTM             | 60     | 12,5   | 20                 | 200                | 12,5             |
| Chapa grossa – ASTM           | 225    | 40     | 50                 | 450                | 25               |
| Ferro fundido – ABNT – tipo A | 30     | 20     | 30                 | 100                | 25               |
| Ferro fundido – ABNT – tipo B | 105    | 20     | 30                 | 180                | 25               |
| Ferro fundido – ASTM – tipo A | 32     | 12,5   | 22                 | 95                 | 25               |
| Ferro fundido – ASTM – tipo B | 38     | 19     | 32                 | 100                | 25               |
| Ferro fundido – ASTM – tipo C | 57     | 31,5   | 47                 | 160                | 50               |

Fonte: Adaptado de Souza (1982).

Com o objetivo de evitar problemas microestruturais causados pelo efeito térmico decorrente da geração de calor que ocorre na maioria dos processos de corte, foi utilizado o processo de corte com jato de água para a confecção dos corpos de prova. O processo de corte com jato de água pode ser visualizado na Figura 36.

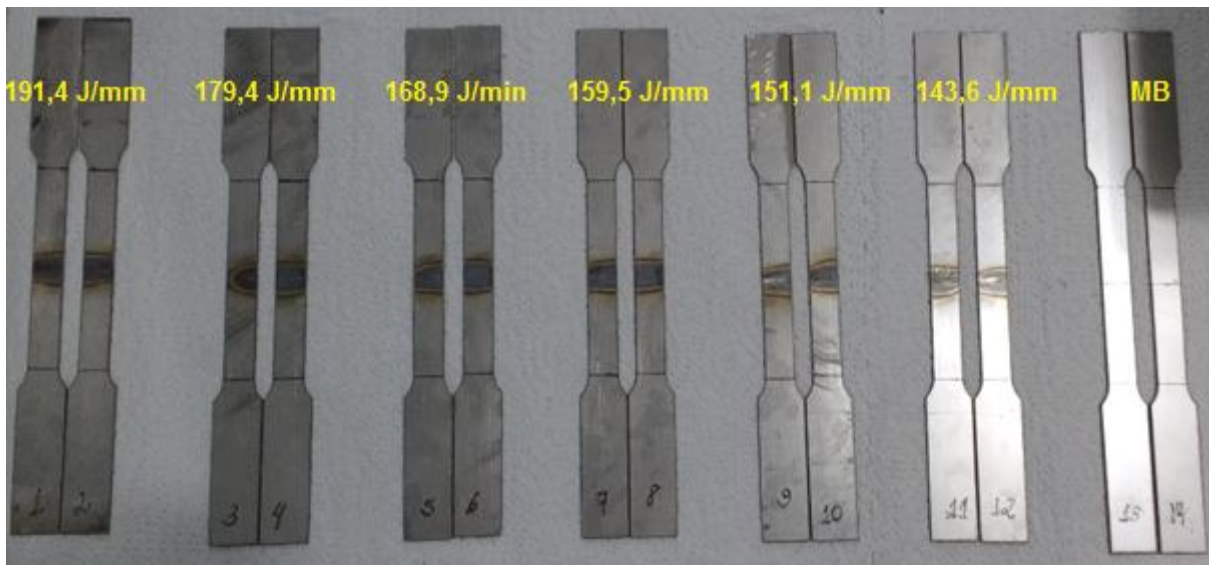
Figura 36 – Corpo de prova sendo confeccionado pelo processo de corte com jato de água



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Também foram confeccionados mais dois corpos de prova, formados somente do material de base, esses dois corpos de provas foram feitos para efeito de comparação do limite de resistência (Mpa) à tração obtidas nos corpos de prova soldados em relação aos corpos de prova com 100% de material de base e também para saber se as características mecânicas do material puro foram conservadas. Pode-se analisar todos os corpos de provas já prontos para o ensaio de tração na Figura 37.

Figura 37 – Corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os ensaios de tração foram realizados empregando-se uma máquina universal de ensaios do fabricante Oswaldo Filizola, modelo BME-20KN, com capacidade de até 2.000 kgf, controlada pelo Software DynaView 2.7.6 Standard/Pro M, que realiza cálculos e gera relatórios automaticamente, curso de ensaio de 1140 mm, acionamento através do fuso de esferas recirculantes de precisão com castanha pré-carregada. Os ensaios seguiram à norma ASTM A370-09a, em temperatura ambiente de 25 °C. A máquina de tração pode se visualizada na Figura 38.

Figura 38 – Máquina universal de ensaios, Oswaldo Filizola BME-20KN



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Buscou-se com os testes de tração os valores dos limites de resistência (MPa) de cada corpo de prova, onde foi feita uma análise comparativa, relacionando a variação do aporte térmico com os valores de limite de resistência à tração obtidos. Também foi feita uma relação entre os valores de dureza com os valores de limite de resistência a tração, para identificar e justificar possíveis falhas nas regiões que sofreram ação do calor de soldagem.



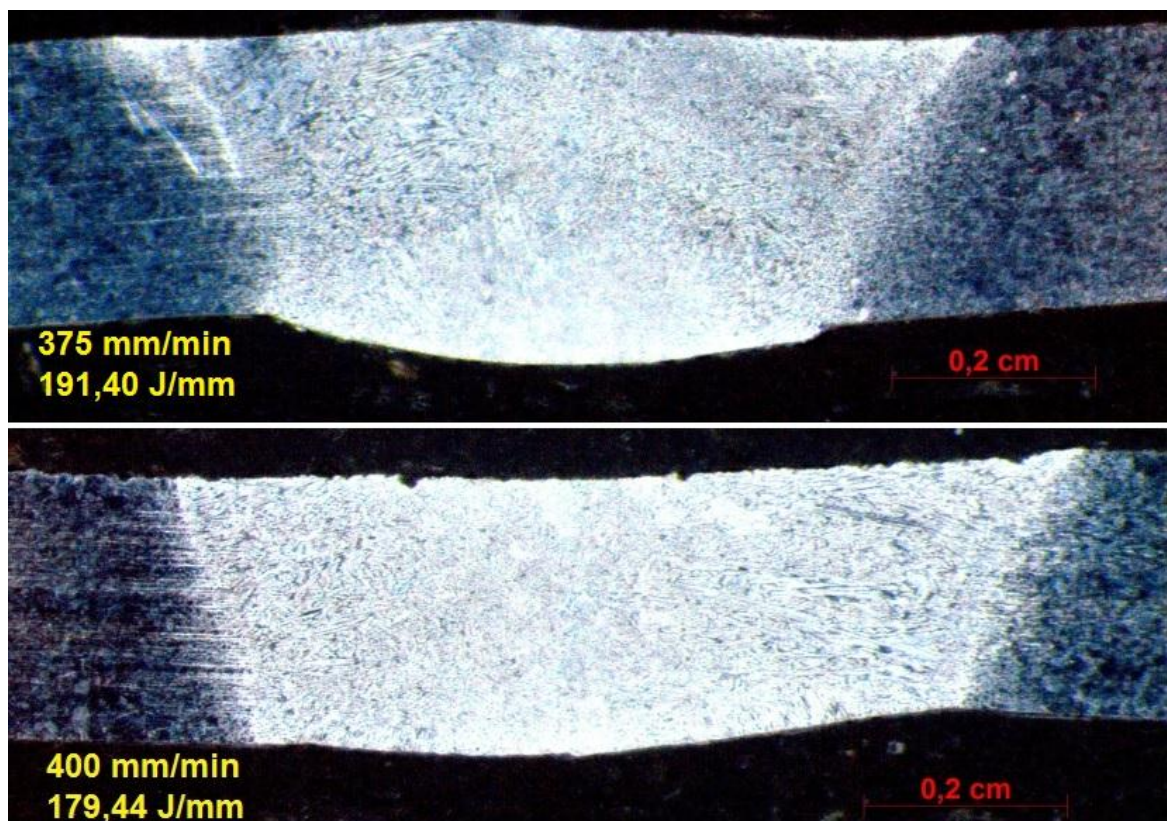
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo revela os resultados e discussões dos testes realizados neste estudo, com o objetivo de relacionar os resultados dos ensaios de dureza e tração, macro e micrografia com a variação do aporte térmico de soldagem dos corpos de prova.

### 4.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA E MICROGRÁFICA

As análises macrográficas foram realizadas com o objetivo de avaliar a largura e profundidade dos cordões de solda e também a presença de descontinuidades. Pode-se analisar nas Figuras 39, 40 e 41 os cordões de solda formados para cada variação de aporte térmico.

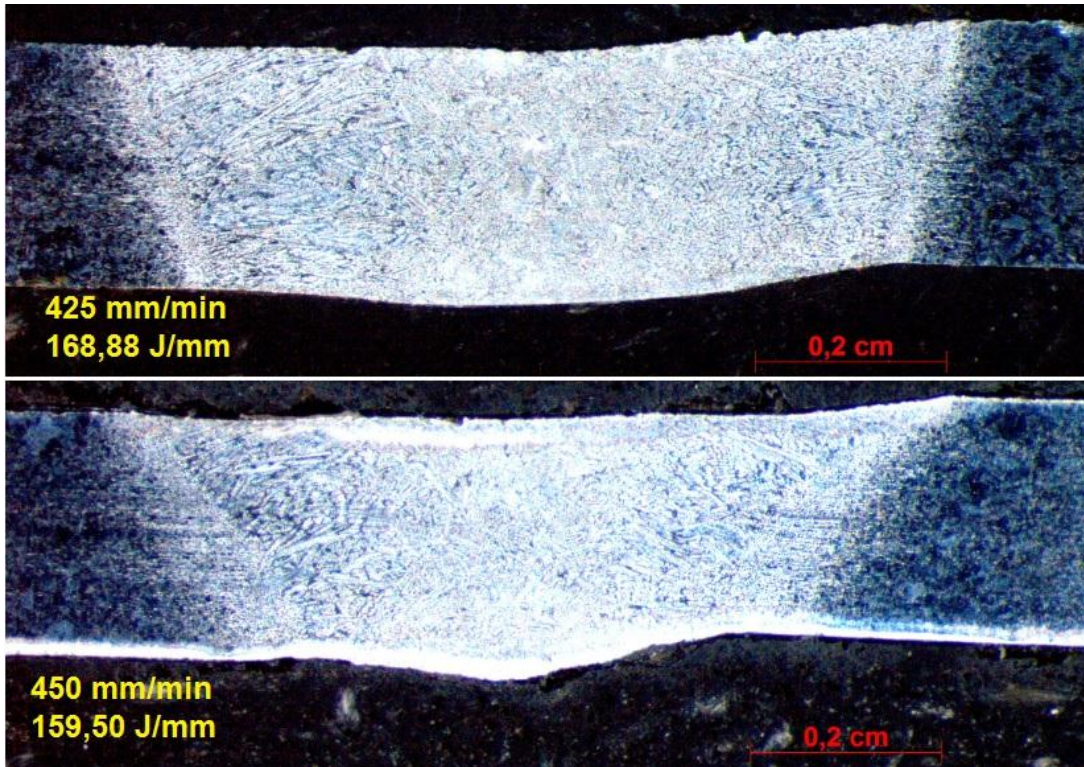
Figura 39 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 191,40 e 179,44 J/mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

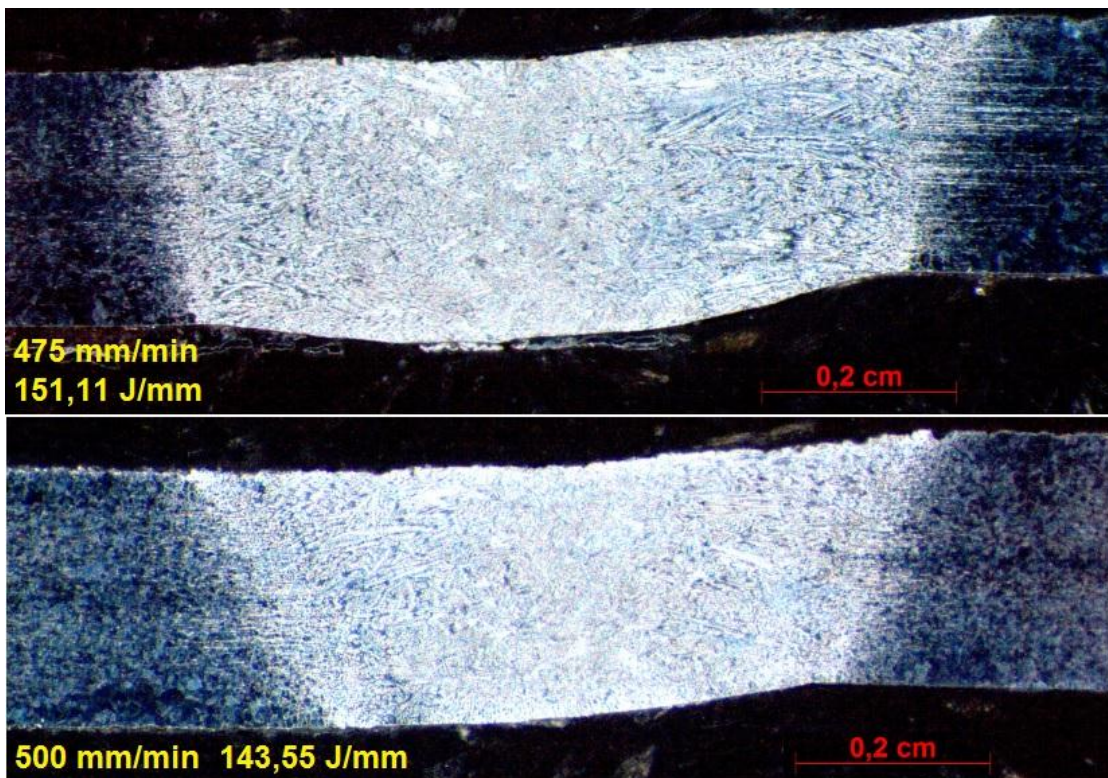


Figura 40 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 168,88 e 159,50 J/mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 – Macrografia da junta soldada para os aportes térmicos de 151,11 e 143,55 J/mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Perante aos resultados mostrados, pode-se analisar que em todos os corpos de provas soldados em velocidades diferentes e, conseqüentemente, com aporte térmico diferentes, houve total penetração dos cordões de solda, conseguindo preencher totalmente a parte inferior dos mesmos, com destaque no CP01 (191,40 J/mm) com o maior aporte térmico, que obteve maior penetração. A parte superior dos cordões de solda se mantiveram proporcionais em todas as condições, com pequena concavidade no centro do cordão de solda, com exceção novamente do CP01 (191,40 J/mm) que apresentou uma convexidade em sua parte superior e inferior.

Para uma melhor análise da geometria dos cordões de solda, é demonstrado na Tabela 12 as dimensões de largura e profundidade para cada variação de aporte térmico. As medidas apresentadas abaixo foram obtidas através da média das leituras tiradas ao longo da secção do cordão de solda.

Tabela 12 – Dimensões do cordão de solda para cada variação de aporte térmico

| <b>Aporte Térmico J/mm</b> | <b>Profundidade (mm)</b> | <b>Largura (mm)</b> |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| <b>191,40</b>              | 1,20                     | 2,42                |
| <b>179,44</b>              | 1,01                     | 2,78                |
| <b>168,88</b>              | 1,06                     | 2,98                |
| <b>159,50</b>              | 1,06                     | 2,52                |
| <b>151,11</b>              | 1,10                     | 2,87                |
| <b>143,55</b>              | 1,01                     | 2,40                |

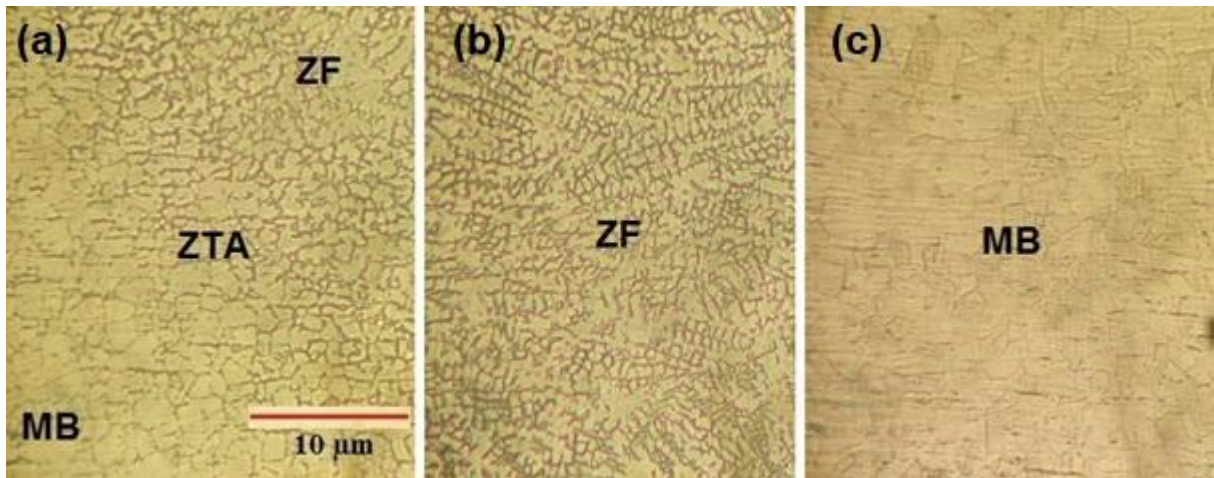
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Tabela12, pode-se observar que o maior aporte térmico (191,40 J/mm) obteve o cordão de solda com a maior profundidade (1,20 mm) em relação aos demais, que praticamente se mantiveram constantes e proporcionais em relação a espessura da chapa (1mm). Quanto à largura, o CP com aporte térmico com 168,88 J/mm e velocidade de 425 mm/min foi o que obteve a maior largura (2,98 mm).

A seguir, são demonstradas as microestruturas da microscopia ótica, com intuito de analisar a microrregião do metal de base (MB), ZTA e ZF. As características microestruturais se mantiveram as mesmas para todas as variações de aporte térmico. Pode-se citar como exemplo, na Figura 42, a microscopia ótica para o aporte térmico do CP04 (159,50 J/mm).



Figura 42 – Microscopia ótica das regiões do MB, ZTA e ZF do CP04(159,50 J/mm)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na Figura 42 (c), que a região do metal de base (MB) possui grãos típicos de uma estrutura austenítica com posições intersticiais grandes, a qual se pode comparar com a Figura 3 deste trabalho, comprovando a originalidade do material. Na ZTA, Figura 42 (a), começa-se a diminuir o tamanho dos grãos de forma progressiva, ficando mais evidenciados os contornos dos grãos e, possivelmente, a ocorrência de uma precipitação de carbonetos de Cromo (Cr) que se formam devido ao calor de soldagem.

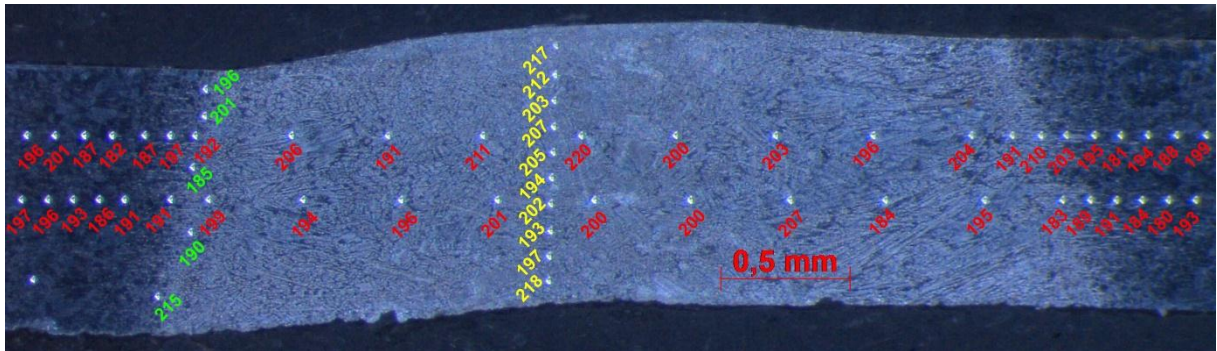
Ao chegar na Zona Fundida (ZF), Figura 42 (b), pode-se observar a formação de grãos menores e de uma região celular dendrítica, com a formação de dendritas de austenita, que pode ser explicado pelo diagrama de Schaeffler (Figura 6), a qual a proporção Cr/Ni equivalente para o aço inoxidável 316L é dada por:  $17,28/13 = 1,3$ . Esta proporção Cr/Ni = 1,3 indica que a zona fundida se solidifica totalmente com austenita primária, pois Cr/Ni < 1,5.

Cabe ressaltar que, de acordo com Padilha e Guedes (1994), os aços inoxidáveis ditos austeníticos, quando soldados, não são completamente austeníticos, pois dependendo da composição e história térmica do aço, a ferrita  $\delta$  pode estar presente.

#### 4.2 ENSAIO DE DUREZA

Os valores das medições de dureza Vickers (HV) obtidos nos corpos de provas estão representados na Figura 43 pelo CP05 (151,11 J/mm e 475 mm/min). Foram feitas impressões no centro do cordão de solda com carga de 1 kgf, sendo o centro de referência para as outras medidas e a partir deste foram feitas impressões com 1 µm de distância entre si com a mesma carga de 1 kgf, seguindo em direção à ZTA e ao MB, como demonstrado abaixo.

Figura 43 – Esquema utilizado para a medição da microdureza Vickers.

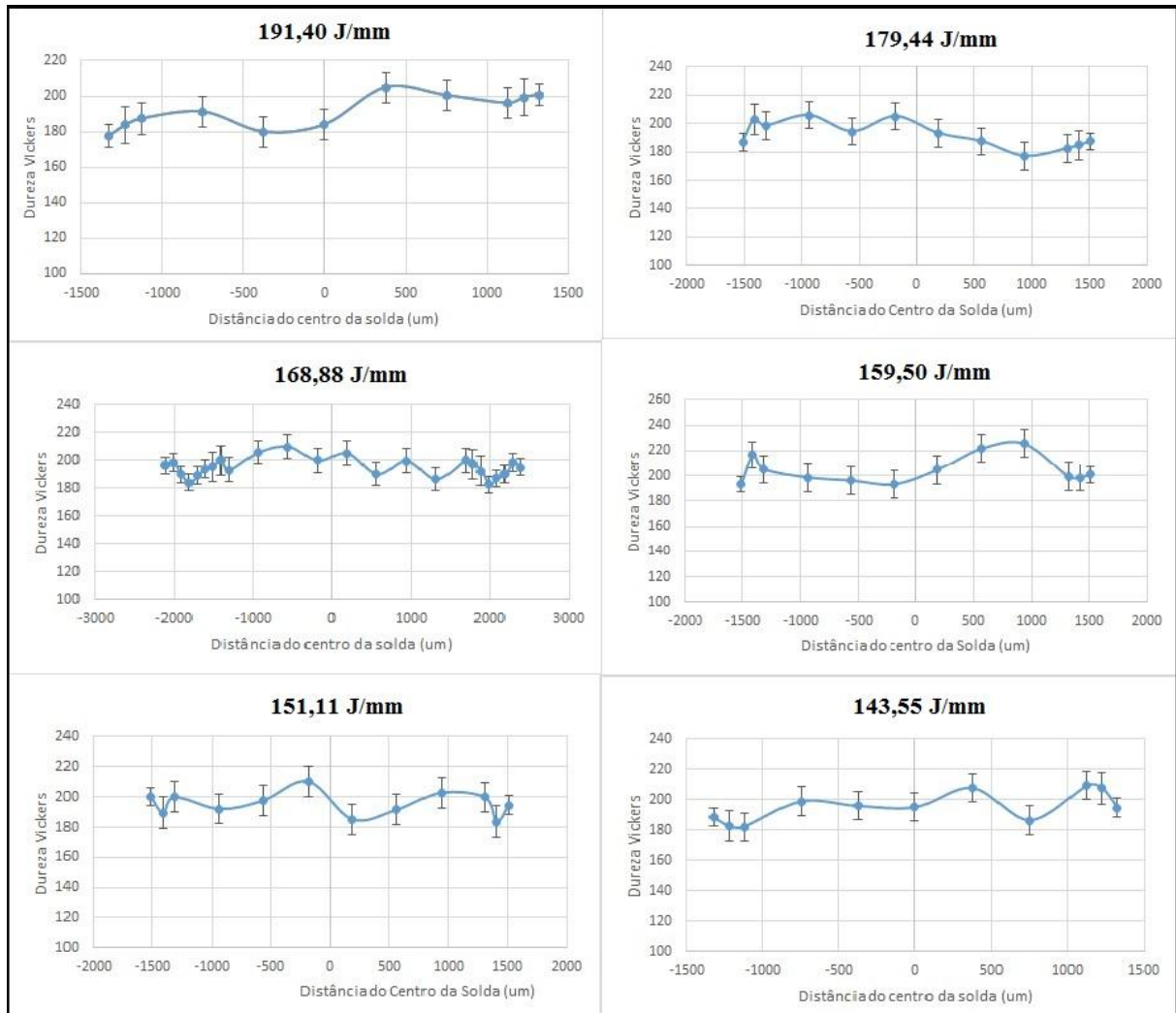


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando os valores das medidas de dureza Vickers, pode-se observar que foram obtidos valores maiores próximos a superfície, podendo ser explicado pelo processo de resfriamento ocorrido nas regiões do cordão de solda, que é mais rápido na superfície e mais lento na região central do cordão, pois é de conhecimento que o resfriamento rápido em aços, causam o aumento da dureza e resistência ao desgaste e a tração, mas ao mesmo tempo diminuem a ductilidade e aumento da fragilidade. Os aços austeníticos não fogem à regra.

Para uma melhor análise comparativa entre os resultados de dureza Vickers obtidas nas regiões do cordão de solda (ZF, ZTA e MB), apresenta-se na Figura 44 os gráficos das médias das durezas Vickers obtidas para cada condição de aporte térmico com seus respectivos desvios padrões, sendo que as impressões estão distanciadas entre si em 1  $\mu\text{m}$  a partir do ponto central do cordão de solda.

Figura 44 – Gráficos de Microdureza das Juntas para cada condição de variação de aporte térmico

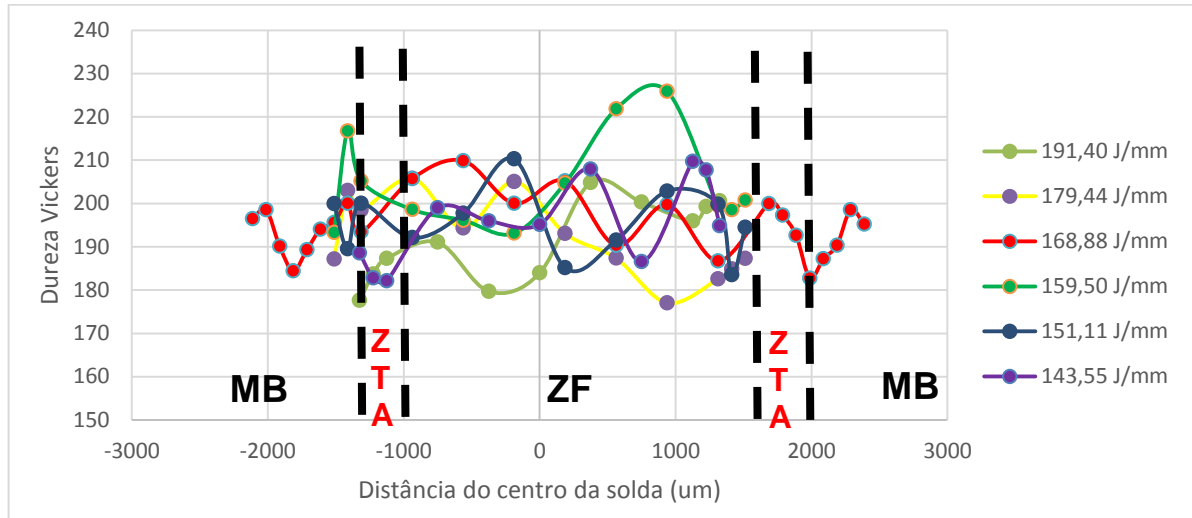


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fazendo a análise a partir do ponto central, tem-se que os valores de dureza ao se afastarem do centro do cordão de solda não sofreram alterações bruscas, alternando entre menor e maior em relação à média de dureza Vickers encontradas no centro de cordão de solda, sendo constatado em todas variações de aporte térmico.

Para uma análise comparativa geral, apresenta-se na Figura 45 o gráfico da média das medidas de microdureza em todas condições de variação do aporte térmico.

Figura 45 – Média das medidas de dureza Vickers (HV) para todas as amostras



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verificando o gráfico acima, pode-se observar que os maiores valores de dureza Vickers se concentram na Zona Fundida (ZF), cabe destacar o CP04 (159,50 J/mm), que obteve os maiores valores de dureza. Os valores da ZTA e das zonas de transição (MB/ZTA e ZTA/ZF) ficaram bem próximos ao da Zona Fundida. Os valores do Metal de Base (MB) se mantiveram constantes e sem variação excessiva em todas condições. De forma geral, são apresentadas na Tabela 13 as médias de todas as variações de aporte térmico nas suas respectivas zonas do cordão de solda.

Tabela 13 - Média das medidas de dureza Vickers (HV) para cada aporte térmico de respectivas zonas do cordão de solda

| Zonas cordão | Condições (J/mm) | Média Geral |        |        |        |        |        |      |
|--------------|------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|              |                  | 191,40      | 179,44 | 168,88 | 159,50 | 151,11 | 143,55 |      |
| ZF           | Desvio Padrão    | 9           | 10     | 8      | 11     | 10     | 9      | 9,5  |
|              | Média (HV)       | 194         | 193    | 200    | 202    | 202    | 197    | 198  |
|              | CV (%)           | 4,48        | 4,97   | 4,21   | 5,49   | 4,93   | 4,78   | 4,81 |
| ZTA          | Desvio Padrão    | 9           | 8      | 10     | 8      | 8      | 10     | 8,83 |
|              | Média (HV)       | 197         | 195    | 199    | 197    | 196    | 198    | 197  |
|              | CV (%)           | 4,85        | 4,37   | 5,18   | 4,09   | 4,41   | 5,19   | 4,68 |
| MB           | Desvio Padrão    | 6           | 5      | 5,5    | 6,5    | 7      | 6      | 6    |
|              | Média (HV)       | 192         | 194    | 190    | 193    | 189    | 192    | 192  |
|              | CV (%)           | 3,4         | 3,6    | 3,3    | 3,7    | 3,20   | 3,8    | 3,5  |

Nota: \*CV – Coeficiente de Variação (%).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Tabela 13, pode-se observar que a média geral das medidas de dureza foram maiores na Zona Fundida (ZF) juntamente com a ZTA com média praticamente equivalente as durezas da ZF, o Metal de Base (MB) obteve a menor média, o que já é esperado na soldagem de aços austeníticos, pois os aços austeníticos quando aquecidos a temperaturas elevadas (480 °C – 860° C) por alguma fonte de calor, neste caso a soldagem, e também dependendo da forma de resfriamento (lento, moderado e rápido), podem sofrer alteração de sua microestrutura, causando o endurecimento de sua estrutura.

#### 4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

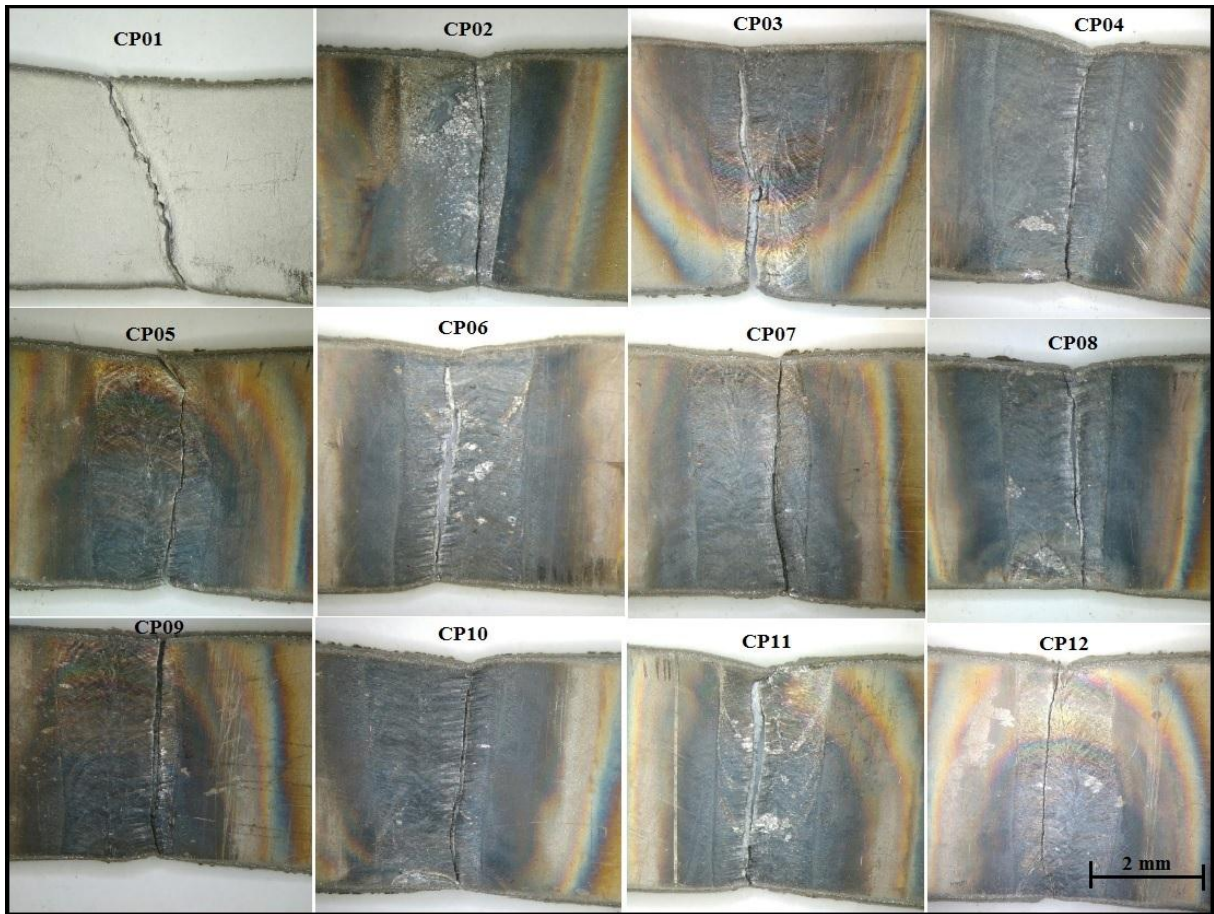
Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova com os diferentes aportes térmicos, fornecem informações importantes das propriedades mecânicas do material, como a tensão máxima ou limite de resistência (Mpa), Força máxima (N) e alongamento (mm ou %), revelando a qualidade do cordão de solda e se os parâmetros de soldagem selecionados foram os corretos.

No geral, com exceção do CP1, que rompeu no metal de base, todos os corpos de prova soldados romperam no cordão de solda e bem próximo a ZTA. A justificativa para a fratura no metal de base do CP01, pode estar relacionada a alguma descontinuidade gerada nos processos de fabricação da chapa ou durante o processo de corte com jato de água, criando-se um campo concentrador de tensão.

A geometria das fraturas ocorridas no cordão de solda também apresentou características próprias de uma fratura dúctil, com estreitamento da área de secção do cordão de solda e bem lineares. Para uma melhor visualização das fraturas, as mesmas são apresentadas na Figura 46.



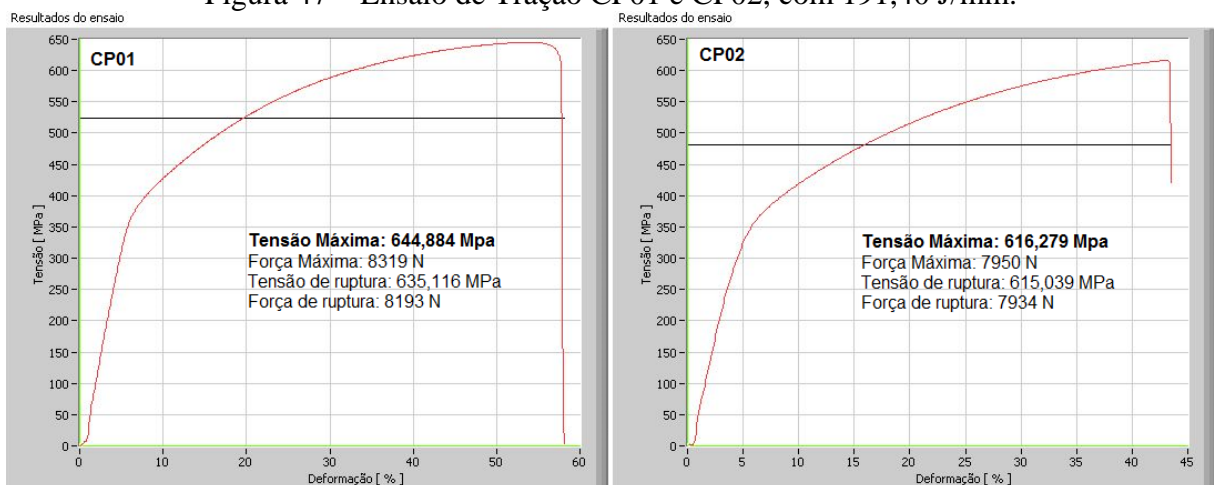
Figura 46 – Região de ruptura dos cordões de solda analisados no Estereomicroscópio ZEISS com aumento de 3x



Fonte: Elaboração do próprio autor.

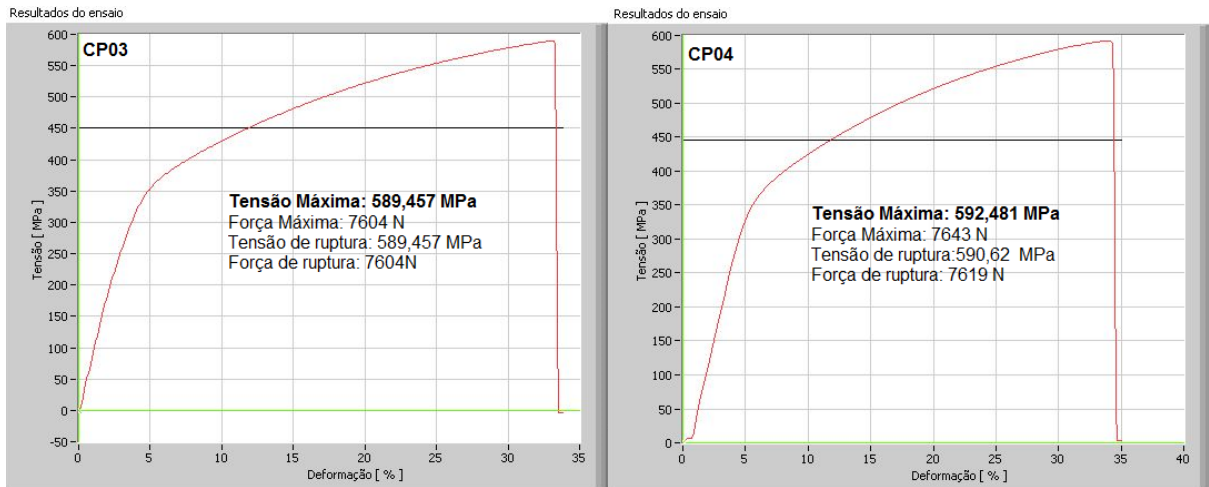
As principais grandezas geradas pelo ensaio de tração de cada corpo de prova, podem ser analisadas nos gráficos gerados pelo software da máquina de tração nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52 e 53.

Figura 47 – Ensaio de Tração CP01 e CP02, com 191,40 J/mm.



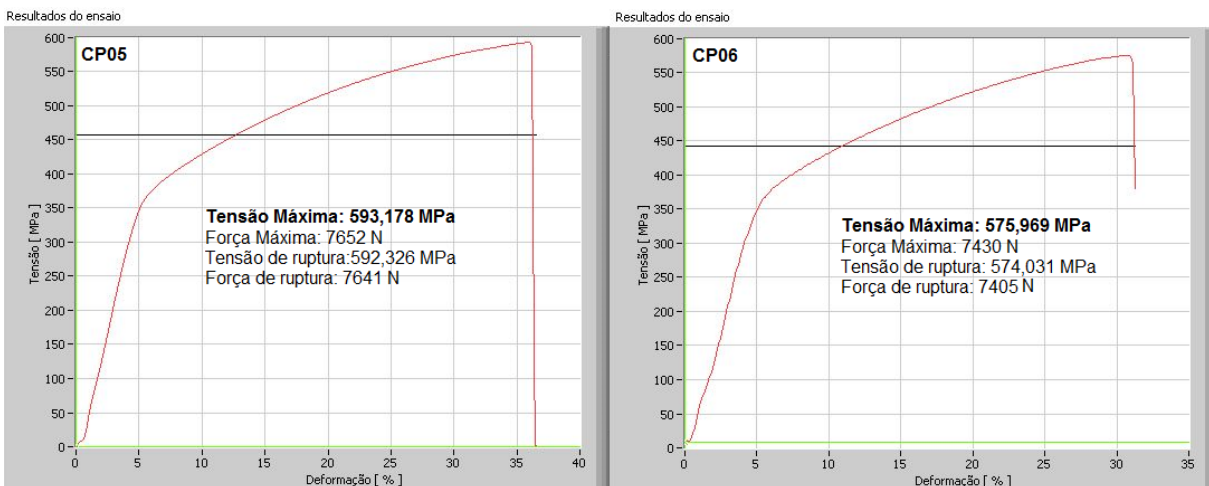
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 48 – Ensaio de Tração CP03 e CP04, com 179,44 J/mm.



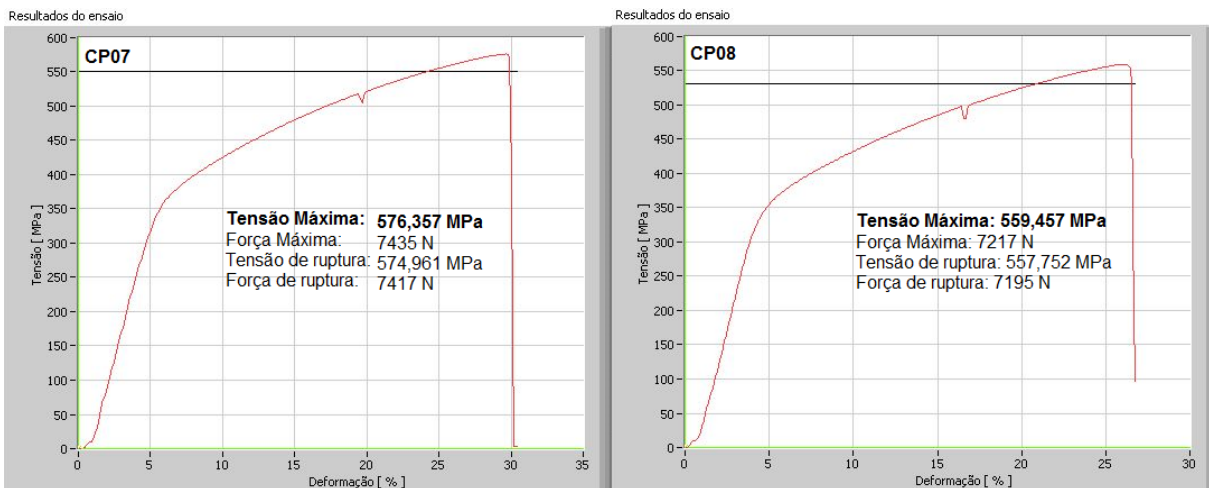
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 49 – Ensaio de Tração CP05 e CP06, com 168,88 J/mm.



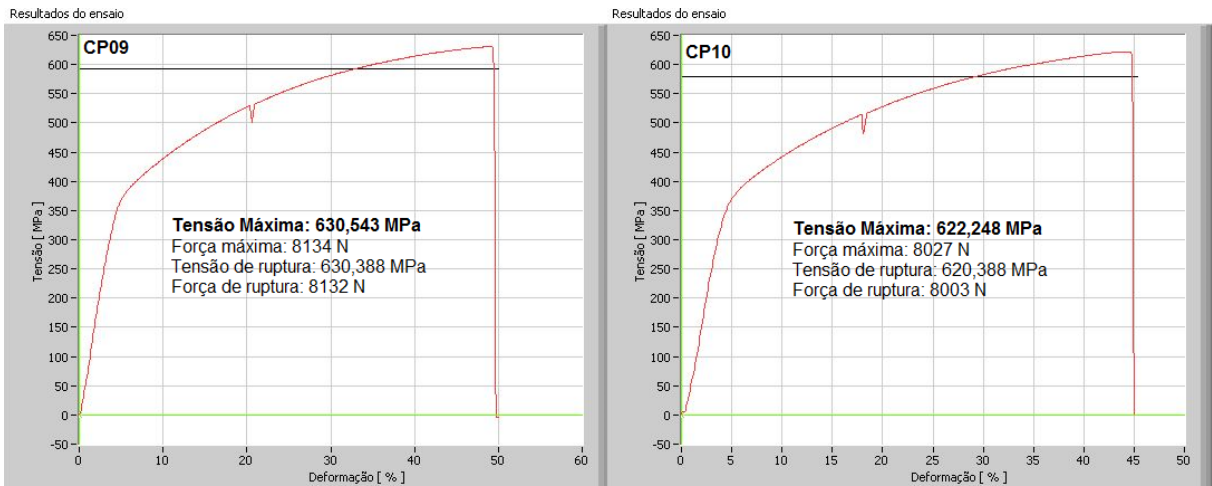
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 – Ensaio de Tração CP07 e CP08, com 159,5 J/mm.



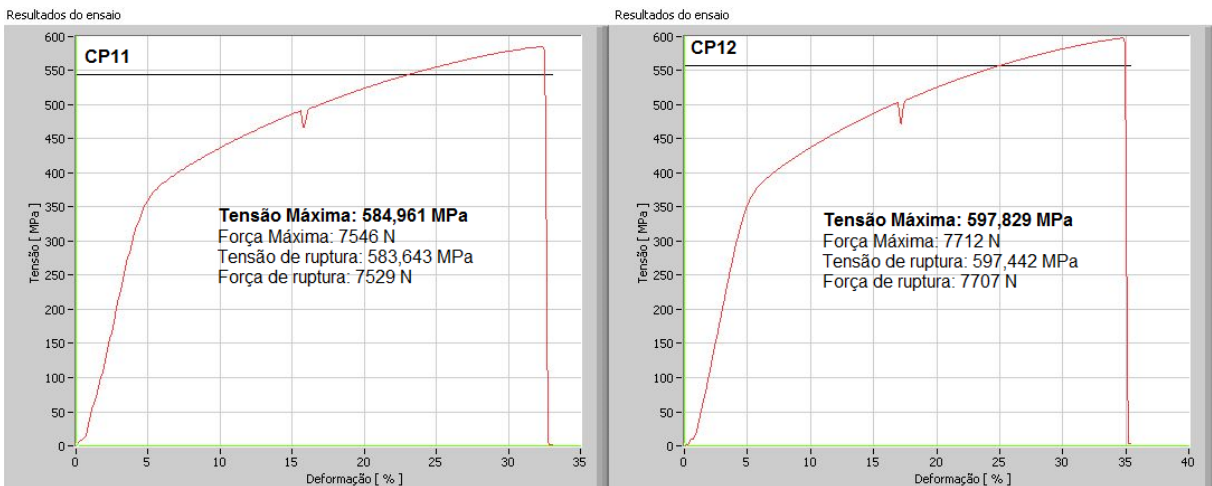
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 51 – Ensaio de Tração CP09 e CP10, com 151,11 J/mm.



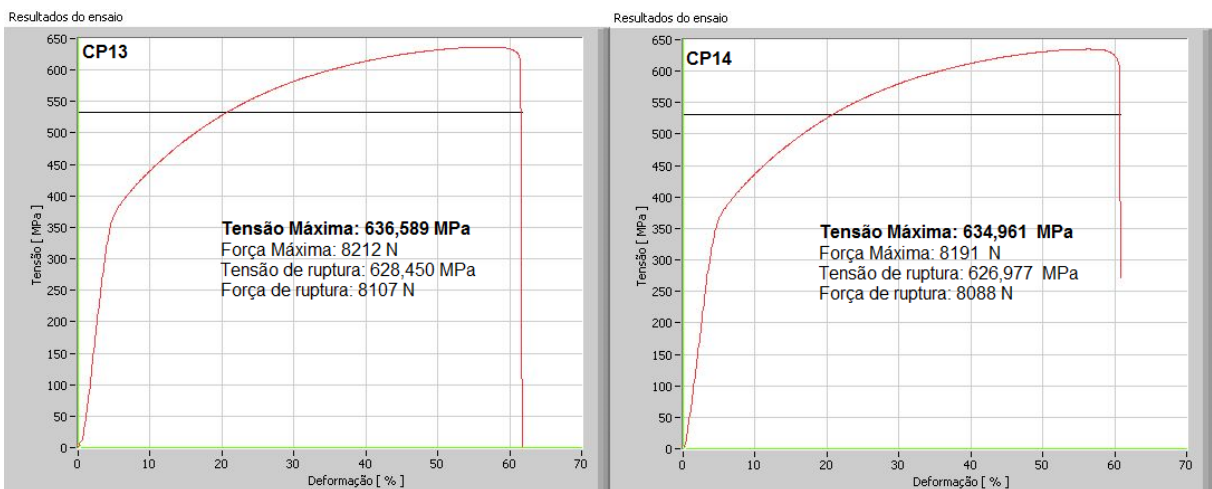
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 52 – Ensaio de Tração CP11 e CP12, com 143,55 J/mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 53 – Ensaio de Tração CP13 e CP14, Metal de Base



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando-se os gráficos gerados pelo ensaio de tração, a curva tensão-deformação apresentou um comportamento típico de materiais dúcteis e próprias dos aços inoxidáveis. Verificou-se também que quanto maior foi a tensão de ruptura, maior foi o alongamento (mm ou %), o que pode ser observado na Tabela 14, pois a deformação apresentada nos gráficos, está relacionada à distância percorrida entre as garras da máquina de tração, não sendo um alongamento real, o alongamento real foi calculado através da diferença entre o comprimento final e o inicial dos CPs.

Tabela 14 – Relação alongamento (mm e %) em relação a tensão de ruptura

| Corpo de Prova | Alongamento (mm e %) |       | Tensão de Ruptura (Mpa) |
|----------------|----------------------|-------|-------------------------|
| CP01           | 31                   | 41,33 | 635,17                  |
| CP02           | 21,5                 | 28,67 | 615,04                  |
| CP03           | 16,5                 | 22    | 589,46                  |
| CP04           | 16,5                 | 22    | 590,62                  |
| CP05           | 18                   | 24    | 592,33                  |
| CP06           | 15,5                 | 21    | 574,03                  |
| CP07           | 14                   | 18,67 | 574,96                  |
| CP08           | 12,5                 | 16,67 | 557,75                  |
| CP09           | 26,5                 | 35,33 | 630,39                  |
| CP10           | 23,2                 | 30,93 | 620,39                  |
| CP11           | 16,5                 | 22    | 583,64                  |
| CP12           | 17                   | 22,67 | 597,44                  |
| CP13           | 34,5                 | 46    | 628,45                  |
| CP14           | 34                   | 45,35 | 626,98                  |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vale observar também que as curvas tensão-deformação dos corpos de prova (CP07; CP08; CP09; CP10; CP11 e CP12) apresentaram uma pequena discordância ou descontinuidade na zona plástica, isso se deve a presença de pequenas impurezas no cordão de solda, apesar de todos os corpos de prova terem sido limpos com álcool antes da soldagem ou também devido a presença de descontinuidades no cordão de solda (poros, trincas e falta de penetração) que podem ocorrer em velocidades mais altas, ou também pelo escorregamento da garra da máquina de tração, mas nada que interferisse na continuidade do ensaio de tração.

Quanto ao limite de resistência, caracterizado pelos valores de tensão máxima apresentados nos gráficos, pode-se observar uma discrepância entre esses valores, principalmente quando houve a alteração da velocidade de soldagem (mm/min) e consequentemente do aporte térmico (J/mm). Para um melhor entendimento apresenta-se na Tabela 15 as médias do limite de resistência a tração (Mpa) para cada variação de aporte

térmico, logo em seguida na Figura 54, apresenta-se a relação do limite de resistência com a variação do aporte térmico, representada em forma de gráfico.

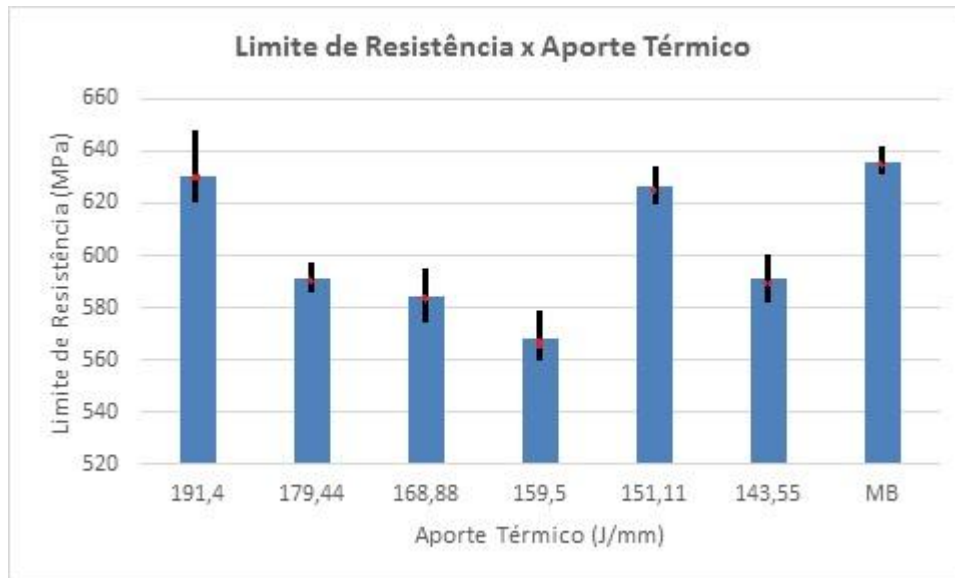
Tabela 15 – Média dos limites de resistência para cada variação de aporte térmico

| <b>CP</b>   | <b>Velocidade de soldagem (mm/min)</b> | <b>Aporte Térmico (J/mm)</b> | <b>Limite de Ruptura (Mpa)</b> | <b>Média (Mpa)</b> | <b>DP (Mpa)</b> |
|-------------|--|------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|
| <b>CP01</b> | 375                                    | 191,40                       | 644,884                        | 630,58             | 20,23           |
| <b>CP02</b> | 375                                    | 191,40                       | 616,279                        |                    |                 |
| <b>CP03</b> | 400                                    | 179,44                       | 589,457                        | 590,97             | 2,14            |
| <b>CP04</b> | 400                                    | 179,44                       | 592,481                        |                    |                 |
| <b>CP05</b> | 425                                    | 168,88                       | 593,178                        | 584,57             | 12,17           |
| <b>CP06</b> | 425                                    | 168,88                       | 575,969                        |                    |                 |
| <b>CP07</b> | 450                                    | 159,50                       | 576,357                        | 567,91             | 11,95           |
| <b>CP08</b> | 450                                    | 159,50                       | 559,457                        |                    |                 |
| <b>CP09</b> | 475                                    | 151,11                       | 630,543                        | 626,40             | 5,87            |
| <b>CP10</b> | 475                                    | 151,11                       | 622,248                        |                    |                 |
| <b>CP11</b> | 500                                    | 143,55                       | 584,961                        | 591,40             | 9,10            |
| <b>CP12</b> | 500                                    | 143,55                       | 597,829                        |                    |                 |
| <b>CP13</b> | MB                                     | MB                           | 636,589                        | 635,78             | 1,15            |
| <b>CP14</b> | MB                                     | MB                           | 634,961                        |                    |                 |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pode-se analisar também que, os corpos de prova (CP01e CP02) apresentaram maior média de limite de resistência a ruptura (630,58 Mpa) e soldados com aporte térmico de 191,40 J/mm, foram também os que tiveram a maior média de profundidade do cordão de solda (1,20 mm), Tabela 12. De forma geral, quanto maior foi a profundidade do cordão solda, maior foi o limite de resistência a ruptura, sendo grandezas diretamente proporcionais.

Figura 54 – Relação do limite de resistência a tração com o aporte térmico



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando os valores tabelados e equiparados no gráfico da Figura 54, relativo à influência do aporte térmico no limite de resistência a tração, pode-se afirmar que o limite de resistência à tração não foi diretamente proporcional a variação do aporte térmico.

Em comparação com os valores de limite de resistência a tração do corpo de prova formado somente de metal de base, os corpos de provas soldados com energia de soldagem de 191,4 e 151,11 J/mm, foram os que mais se aproximaram dos limites de resistência do metal de base e de suas características, mas no geral, todos os corpos de provas soldados com seus respectivos aportes térmicos tiveram limites de resistência menores que o metal de base puro e com menor deformação (mm) e com menor zona elástica, ou seja, apresentaram-se menos dúcteis, isso torna o material frágil no cordão de solda, explicando a ruptura na região do cordão de solda.

Outra justificativa para a ruptura dos corpos de prova no cordão de solda, pode ser explicada com a revisão de literatura da solubilidade dos aços austeníticos no item 2.5 deste trabalho, onde foi comentado que se a relação  $Cr/Ni < 1,5$  a zona fundida solidifica totalmente com austenita sólida primária com formação de trincas de solidificação por perda da ductilidade em temperaturas acima de 1250 °C (a temperatura de soldagem é entre 2.000 a 20.000°C) e que, de acordo com o diagrama Schaeffler, pode-se identificar que o aço inox 316L se encontra nesta região específica, pode-se concluir que, devido a formação de trincas de solidificação e a perda de ductilidade do cordão de solda, o mesmo sofreu uma fragilização e rompendo quando tracionado em conjunto com o MB.



## 5 CONCLUSÕES

Respondendo ao objetivo do trabalho e de acordo com as análises e discussões feitas ao longo do mesmo quanto a influência do Aporte térmico, ou seja, a influência do calor de soldagem nas características mecânicas e macro e microestrutura do aço inoxidável 316L, pode-se concluir que:

A variação do aporte térmico gerou pequenas discordâncias na geometria do cordão de solda, pois todos tiveram penetração total, com cordões totalmente preenchidos e com proporções (largura e profundidade) idênticas, com exceção do CP01(191,40 J/mm e 375 mm/min) que apresentou uma convexidade em sua parte superior e inferior.

Quanto à microestrutura, houve pouca alteração de uma condição para outra, com a formação de dendritas de austenita na ZF.

Para os ensaios de dureza, a variação do aporte térmico não gerou grandes discordâncias, pois a média geral das durezas geradas em todas as condições na ZF (198 HV) e ZTA (197 HV) foram praticamente as mesmas, mas sendo maiores que a do material puro ou de base (192 HV), portanto gerando uma região da ZF e da ZTA menos dúcteis, porém mais frágeis.

Os ensaios de tração demonstraram que a variação do aporte térmico (dentro do estabelecido neste trabalho) não mudou o comportamento do material, isto fica evidenciado nos gráficos de tensão x deformação, a qual as curvas geradas são características de um material dúctil, no caso do aço austenítico. Cabe observar que os aportes térmicos com energia de soldagem de 191,4 e 151,11 J/mm, foram os que mais se aproximaram dos níveis de tensão máxima do material puro. Os ensaios de tração também demonstraram que os CP's romperam praticamente todos no cordão de solda e que os mesmos se mostraram frágeis à tração em relação ao material de base.

De acordo com a proposta imposta e discutida neste trabalho, pode-se concluir, que é de suma importância a seleção de parâmetros corretos de soldagem para o controle do aporte térmico de soldagem, pois os testes iniciais para a seleção dos parâmetros de soldagem, geraram cordões de solda com várias discontinuidades e perceptíveis através da análise visual, e que depois dos vários testes chegou-se aos aporte térmicos desejáveis e parâmetros de soldagem ideais para a soldagem de chapas finas do aço inoxidável 316L. De forma geral, os parâmetros de soldagem selecionados na fonte de soldagem TIG (GTAW), geraram um cordão de solda com características mecânicas (dureza e tração) próximas ao do material de base (MB).

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Refazer os testes utilizando material de adição, para conservação dos elementos de liga no cordão de solda, podendo aumentar a resistência do material ou até mesmo atingir níveis superiores às características mecânicas do material puro;
- Repetir os testes injetando gás na parte oposta ao cordão de solda, para facilitar a fusão e maior penetração em velocidades mais altas;
- Trabalhar com intensidade de corrente (A) menor que 55 A, mas fazendo a soldagem dos dois lados do cordão de solda, com as mesmas velocidades testadas neste trabalho e refazer os mesmos ensaios desenvolvidos neste trabalho para verificação da influência do aporte térmico.



## REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 8. ed. Miami: AWS, 1998. v. 4. 213 p.
- ÁQUILA, V. **Processo de soldagem TIG**. Salvador: Escola de Soldagem L&A – Centro de Formação de Soldadores., 2012. 41p.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT. W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Trilha, 2016. p. 290-310.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem TIG - GTAW**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- BROWN JUNIOR, H. J. **Inteligentsia.net/frase**. Site. [S. l.], 2017. Disponível em: <[http://www.inteligentsia.net/frase?lightbox=image\\_1oqw](http://www.inteligentsia.net/frase?lightbox=image_1oqw)>. Acesso em: 2 jan. 2017.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed. NY: John Wiley & Sons. 2007. p. 255-256.
- CALLISTER, JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 99-101.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. p. 185-187.
- CAMPOS, W. R. da C. et al. Caracterização microestrutural de solda dissimilar; aço inoxidável austenítico Aisi 304 com adição de liga de níquel inconel 625. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 19-23, 2009.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. p. 10-11.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2005. p. 21-22.
- DAVIS, J. R. et al. (Ed.). **Stainless steels**. Ohio: Geauga County - Ohio American Society for Metals – ASM international, 1994. p. 3-4.
- EUTECTIC DO BRASIL LTDA. **Manual de instalação e operação inversor de soldagem modelo Castotig 2202 AC/DC**. Indaiatuba: Site Eutectic do Brasil, 2002. Disponível em: <[http://www.eutectic.com.br/manuais/equipamentos\\_descontinuados/manual\\_castotig\\_2202\\_parte2.pdf](http://www.eutectic.com.br/manuais/equipamentos_descontinuados/manual_castotig_2202_parte2.pdf)>. Acesso em: 29 dez. 2016.
- GIMENES JÚNIOR, L. et al. **Parâmetros de soldagem para o processo TIG**. São Paulo: NT - Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, 2002. p. 13-14. Apostila do curso de Técnico de Soldagem I.
- GIRALDO, C. A. S. **Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e**

mecanismo de sensibilização. 2006. 85 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 2006.

GONÇALVES, W. M. C. **Aços inoxidáveis**. 2013. Vitória: Instituto Federal do Espírito Santo, 2013. 41 p. Apostila da Disciplina de Tratamentos Térmicos do Curso Técnico de Metalurgia e Materiais.

LIMA, A. P.; FILHO, E. S.; MARIANO, N. A. Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de uma aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 4, p. 123-127, 2007.

LO, K. Ho; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, Hong Kong, v. 65, n. 4, p. 39-104, 2009.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. p. 88.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: Ed. SENAI-SP, 2001. 100 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I**: introdução aos processos de soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2006. p. 12-14.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. SANTOS. D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte; UFMG, 2006. p. 22-17.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf> >. Acesso em: 22 jan. 2017.

NILSSON, J. O. Super duplex stainless steels. **Materials science and technology**. Washington, v. 8, n. 8, p. 685-700, 1992.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 124.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos**: microestrutura e propriedades. São Paulo: Hemus, 1994. p. 63-70.

PEREIRA, S. A. L. **Estudo da influência da deformação plástica na cinética de nitretação em aços inoxidáveis AISI 304 e 316**. 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN, São Paulo, 2012.

QUITES, A. **Terminologia das imperfeições da soldagem**. Florianópolis - SC: Soldasoft, 2011. Disponível em: <<http://www.soldasoft.com.br/portal/generalidades/Terminologia%20das%20imperfei%C3%A7%C3%B5es%20da%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

SCHUMACHER, W. J. **Martensitic stainless steel**. U.S. Patent n. 5,089,067, 18 fev. 1992.

SERNA-GIRALDO, C. A. **Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização.** 2000. 197 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** 5.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. p. 7-15.

SOUZA PRESTES, J. F. **Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos nitretados submetidos à hidrogenação catódica.** 2006. 108 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 2010, n. 14, p. 1838-1843, 2010.

VENTRELLA, V. A. et al. Aplicação de laser pulsado de nd: yag na soldagem de lâminas de 100 microns de espessura de aço AISI 316L. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CBECiMat, 19., 2010, Campos do Jordão. **Anais...** [S. l.: s. n.], 2010. p. 6739-6746.

VIDEIRA, A. M. **Influência do aporte térmico da soldagem GTAW no balanço de fases ferrita/austenita do aço inoxidável duplex UNS S32205.** 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2016.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo: Edgard Blucher, 2004. p. 10-14.

ZANETIC, S. T.; FALLEIROS, N. A. **Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR.** São Paulo: FATECSP, 2014. Disponível em: <<http://bt.fatecsp.br/system/articles/133/original/trabalho22.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

ZEEMANN, A. **Soldagem dos aços austeníticos.** São Paulo: [s. n.], 1998.

ZOLIN, I. **Materiais de construção mecânica.** 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.