

**FRANCIANO FRANCA ROCHA  
SAMUEL FERRAZ LIMA  
VINÍCIUS DE ANGELI CORTI DAS NEVES  
VINICIUS PESSOTTI DE MARCHI  
YAGO OLIVEIRA DE OLIVEIRA**

**Solda TIG - Análise da influência dos parâmetros velocidade e energia de soldagem na tenacidade de aços super duplex**

**FRANCIANO FRANCA ROCHA**  
**SAMUEL FERRAZ LIMA**  
**VINÍCIUS DE ANGELI CORTI DAS NEVES**  
**VINICIUS PESSOTTI DE MARCHI**  
**YAGO OLIVEIRA DE OLIVEIRA**

**Solda TIG - Análise da influência dos parâmetros velocidade e energia de soldagem na tenacidade de aços super duplex**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. M.Sc. Daniel Ernesto Otárola Tasaico

**Aracruz - ES**  
**2021**

**FRANCIANO FRANCA ROCHA**  
**SAMUEL FERRAZ LIMA**  
**VINÍCIUS DE ANGELI CORTI DAS NEVES**  
**VINICIUS PESSOTTI DE MARCHI**  
**YAGO OLIVEIRA DE OLIVEIRA**

**SOLDA TIG - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS VELOCIDADE E  
ENERGIA DE SOLDAGEM NA TENACIDADE DE AÇOS SUPER DUPLEX**

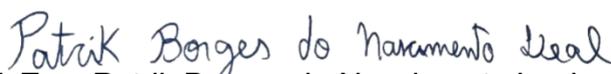
Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica  
das Faculdades Integradas de Aracruz, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

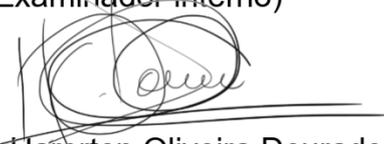
Aprovado em 17 de dezembro de 2021

**COMISSÃO EXAMINADORA**



Prof. Me. Daniel Ernesto Otárola Tasaico  
Faculdades Integradas de Aracruz  
Orientador

  
Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal  
Faculdades Integradas de Aracruz  
(Examinador interno)



Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado  
Faculdades Integradas de Aracruz  
(Examinador interno)

## **AGRADECIMENTO**

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça. Agradecemos a nossa vida, inteligência, família e amigos.

A nosso orientador, Prof. Daniel Ernesto Otárola que jamais deixou de nos incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

A nossos pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram nossos estudos.

A todos os funcionários da Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ pela dedicação e alegria no atendimento.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo das mudanças nos valores de tenacidade dos aços super duplex quando submetidos a soldagem TIG levando em consideração dois importantes parâmetros: energia de soldagem e velocidade, sendo realizado através de revisão bibliográfica, comparando a literatura que retrata as propriedades mecânicas e microestruturais dos aços super duplex com a influência dos parâmetros da soldagem TIG. Os resultados obtidos nesta análise, mostram que os parâmetros de soldagem, em especial a velocidade e a energia de soldagem, afetam a organização das fases microestruturais do material, que por consequência geram alterações nos valores de tenacidade da junta soldada.

**Palavras-Chaves:** Soldagem. TIG. Tenacidade. Super Duplex.

## **ABSTRACT**

The present work aims to study the changes in the toughness values of super duplex steels when subjected to TIG welding, taking into account two important parameters, welding energy and speed. Conducted through a literature review, comparing the literature that portrays the mechanical and microstructural properties of super duplex steels with the influence of TIG welding parameters. The results obtained in this analysis are that the welding parameters, in particular the welding speed and energy, affect the organization of the microstructural phases of the material, which consequently generate changes in the toughness values of the welded joint.

**Keywords:** Welding. TIG. Toughness. Super Duplex.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1– Processo de soldagem TIG .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2– Esquema de funcionamento soldagem TIG.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3- Microestrutura de um aço inoxidável duplex.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 4- Taxa de variação de fase austenita/ferrita no metal de base e zona de solda de acordo com a velocidade. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5- Curva isotérmica dos efeitos da precipitação das fases secundária durante resfriamento. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 6- Curva de tensão x deformação.....</b>	<b>30</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1- Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis.....</b>	<b>23</b>
<b>Quadro 2 - Quadro resumo da composição das principais fases secundárias e suas temperaturas de precipitação nos aços inoxidáveis super duplex. ....</b>	<b>24</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resultado de teste do 2205 DSS .....	29
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. GERAL .....	13
2.2. ESPECÍFICOS.....	13
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1. SOLDAGEM A ARCO TUNGSTENIO (TIG) .....	14
3.2. FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS DE SEUS PARAMETROS .....	17
3.3. RELAÇÃO ENTRE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	19
3.4. AÇOS SUPERDUPLEX E SUAS MICROESTRUTURAS .....	20
3.4.1. FASES.....	25
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>27</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço nas indústrias do ramo de óleo e gás, os fluidos de trabalho estão ficando cada vez mais agressivos, e há uma grande necessidade de utilização de materiais mais resistentes e analisar parâmetros que inferem na resistência de tal material é importante, pois tal resistência está diretamente ligada a segurança de uma planta industrial. A falta de controle sobre a solda durante a fabricação de linhas e estruturas de duplex pode gerar futuras falhas no material.

Os aços inoxidáveis duplex e super duplex vem sendo uma escolha bem comum nas plataformas de óleo e gás, visto que suas propriedades mecânicas, resistência a materiais e ambientes corrosivos é elevada. Suas propriedades físicas são alcançadas pela distribuição microestrutural desse material, que é composto por fase ferrítica e austenítica quase nas mesmas proporções.

Apesar das características boas, os aços super duplex, tendem a requerer um cuidado a mais quando se trata da união desses materiais por meio de processos de soldagem, visto que quaisquer erros nas definições dos parâmetros de soldagem estabelecidos podem gerar imperfeições, como precipitação de nitretos, carbonetos, novas fases, que iram prejudicar a junta soldada.

Muitos dos problemas inerentes à soldagem podem ser evitados levando-se em consideração as características e requisitos específicos do processo.

A seleção do processo adequado requer uma compreensão do grande número de opções disponíveis, a variedade de configurações de junta possíveis e as inúmeras variáveis que devem ser especificadas para cada operação.

Dentre os processos de soldagem conhecidos, o denominado TIG (Tungsten Inert Gas) se destaca por apresentar bom aspecto do cordão de solda (acabamento suave e liso), pela ausência de respingos e escórias (o que evita trabalhos posteriores de limpeza) e por sua aplicabilidade em espessuras mais finas (a partir de 0,3 mm). Neste é utilizado um eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera de gás inerte.

Durante o processo de soldagem apresentam-se grandes variações de temperatura, provenientes do alto calor do eletrodo para derreter e fundir o material de adição à peça. Esse brusco aumento e posterior resfriamento da temperatura podem vir a causar algumas imperfeições, se não coordenado corretamente com

outros parâmetros de soldagem, ocasionando a perda do material ou a necessidade de retrabalho. Portanto deve-se atentar com o “Heat input” ou energia de soldagem, que é basicamente a quantidade de calor que está sendo transferida para peça em questão, parâmetro que influencia diretamente nas propriedades termoquímicas da poça de fusão que podem modificar as propriedades do material soldado.

A velocidade de soldagem também é um parâmetro que influencia significativamente a configuração geométrica da solda. De maneira inevitável, velocidades de soldagem elevadas restringem o tamanho da zona fundida (ZTA) e, conseqüentemente, diminuem a penetração e largura do cordão. Tem sido aceito que nesta situação há uma redução na energia efetiva de soldagem que se dissipa pelo metal de base circundante a solda. O fator limitante é a ocorrência de defeitos na solda como falta de penetração e mordeduras.

Sendo assim, torna-se claro que a qualidade de uma junta soldada é fortemente influenciada pelos parâmetros do processo durante o processo de soldagem. Para obter soldas de alta qualidade, uma boa seleção das variáveis do processo deve ser utilizada, o que por sua vez resulta na otimização da geometria do cordão e têm efeito profundo em sua microestrutura. Logo, neste estudo é feita uma pesquisa sobre as mudanças que ocorrem na tenacidade de aços super duplex durante a solda TIG, realizando uma análise baseada nos parâmetros de energia de soldagem e a velocidade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Estudar a influência dos parâmetros velocidade de solda e energia de soldagem na resistência à tração dos aços super duplex quando submetidos a soldagem TIG.

### **2.2. Específicos**

- ✓ Estudar a soldagem à arco de gás tungstênio;
- ✓ Investigar os parâmetros velocidade de solda e energia de soldagem;
- ✓ Analisar os aços super duplex e sua microestruturas;
- ✓ Entender as mudanças causadas na microestrutura de aços super duplex quando submetidos a soldagem TIG;
- ✓ Estudar as principais mudanças nas propriedades mecânicas causadas pela soldagem a TIG em aços super duplex.

Utilizou-se um estudo de revisão bibliográfica quantitativa de cunho descritivo-exploratório, incluindo a análise crítica e interpretação científico-literária de conteúdos ligados ao tema. Os materiais utilizados passaram por prévia seleção, permitindo validá-los com vistas ao tema abordado. Essa separação viabilizou que os conteúdos pudessem se tornar uma base segura para a produção da pesquisa.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. SOLDAGEM A ARCO TUNGSTENIO (TIG)**

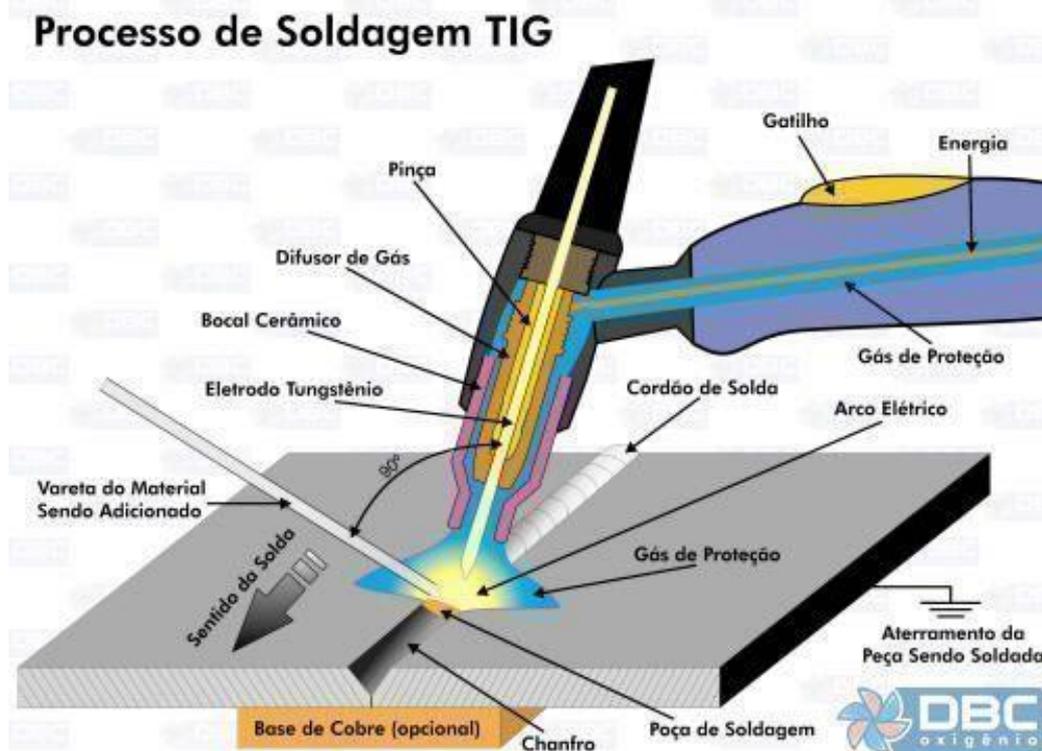
A soldagem é uma operação na qual duas ou mais partes são unidas por meio de calor ou pressão, ou ambas, sendo esse, geralmente, usado em metais e termoplásticos. Além de derreter o metal base, um material de enchimento é normalmente adicionado à junta para formar uma poça de material fundido, também denominado como poça de fusão, que esfria para formar uma junta que, com base na configuração da solda, pode ser mais forte que o material base. (MAGALHÃES; SILVA, 2017; FREITAS, 2019; LEITE, B. G. S. 2019).

A tecnologia de soldagem avançou rapidamente durante o início do século 20, quando as guerras mundiais impulsionaram a demanda por métodos de união confiáveis e baratos. Após as guerras, várias técnicas modernas de soldagem foram desenvolvidas, incluindo métodos manuais, como SA de metal blindado, além de processos semiautomáticos e automáticos, como soldagem por arco elétrico com gás de proteção, a Soldagem de arco submerso, soldagem por arco elétrico com arame fluxados e a SA com eletrodo revestido (CUNHA; BOHORQUEZ, 2014; CUNHA; RIBEIRO, 2018; LEITE, B. G. S. 2019).

A soldagem TIG é um método de soldagem relativamente difícil, devido à coordenação exigida do soldador, normalmente, requer duas mãos, pois a maioria das aplicações exige que o soldador alimente manualmente um metal de enchimento na área de solda com uma mão enquanto manipula a tocha de solda na outra. Manter um comprimento curto do arco, além de impedir o contato entre o eletrodo e a peça de trabalho também é importante (CUNHA; BOHORQUEZ, 2014; SOUZA et al., 2020).

Segundo Quites (2002) , o fluxograma do processo de soldagem TIG se inicia na “abertura do arco elétrico”, junto com a presença dos gases ionizantes de proteção (argônio ou hélio), após isso o calor é concentrado em um ponto para que ocorra a formação da chamada poça de fusão, com isso o material de adição é depositado na poça de fusão ao longo da peça, e com esse ato se origina o cordão de solda, ao final do processo, o arco elétrico se fecha junto dos gases de proteção, e assim está finalizado o processo de soldagem TIG.

Figura 1– Processo de soldagem TIG



Fonte: guias.oxigenio.com

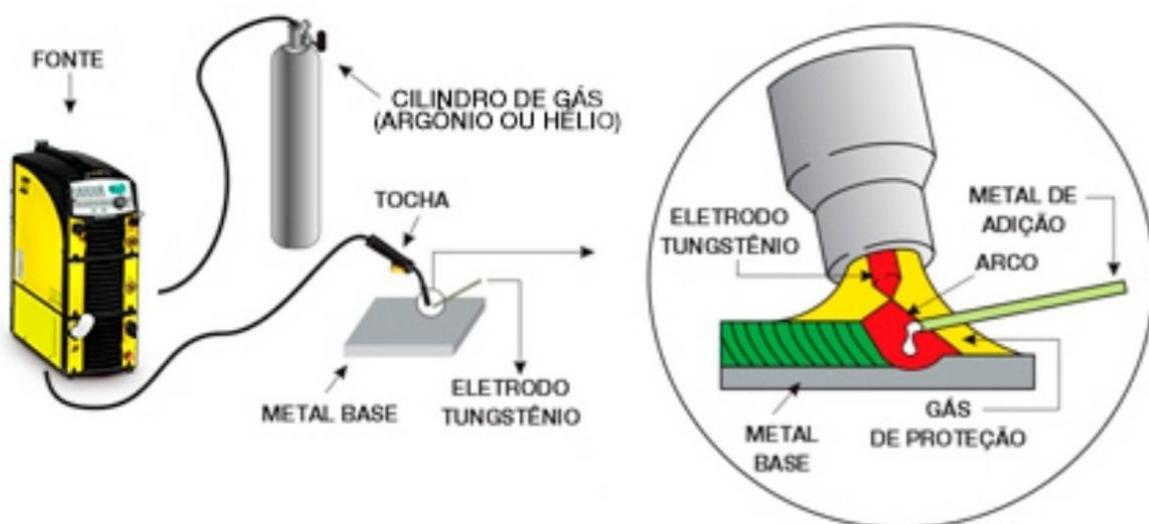
As principais variáveis do processo são: a tensão do arco elétrico, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção, há uma forte interação entre essas variáveis de modo que afeta diretamente no processo de soldagem, na mudança da poça de fusão como largura e penetração, que pode gerar alguns defeitos tais como: porosidade, falta ou excesso de fusão, inclusões de tungstênio ou sujeira, mordeduras, dentre outros. (BRACARENSE, 2000).

Segundo SCHWEDERSKY (2011) e MAGALHÃES (2017) a soldagem TIG é especialmente útil para soldar materiais finos, sendo esse processo de soldagem caracterizado por:

- Formar um arco estável e soldas de alta qualidade;
- Requerer habilidade, significativa alta do operador;
- Só poder ser realizado em velocidades relativamente baixas;
- Poder ser usado em quase todos os metais soldados, embora seja mais comumente aplicado em aço e metais leves;
- Frequentemente, empregado quando soldas de qualidade são extremamente importantes, como em bicicletas, aeronaves e aplicações marítimas.

A soldagem manual a arco de gás de tungstênio, Soldagem a Arco (SA) de gás de tungstênio (GTAW) ou, simplesmente, soldagem TIG é um processo de SA elétrico que produz um arco entre um eletrodo não consumível e a peça a ser soldado; sendo a solda protegida da atmosfera por um gás que forma um envelope ao redor da área de solda (MAGALHÃES; SILVA, 2017; LEITE, B. G. S. 2019; AVENTA, 2020).

Figura 2– Esquema de funcionamento soldagem TIG



Fonte: Esab

Embora a indústria aeroespacial seja uma das principais usuárias da soldagem TIG, a mesma pode ser amplamente utilizada em várias outras áreas na soldagem de peças complexas e/ ou finas, especialmente, de metais não ferrosos e aço agregado com nitrogênio, alumínio, silício, manganês, enxofre e carbono (MAGALHÃES; SILVA, 2017).

Como na soldagem TIG o metal de solda não é transferido diretamente pelo arco elétrico, tal como o observado junto a maioria dos processos de SA, uma vasta variedade de metal de solda está disponível para ser empregado no processo; de fato, nenhum outro processo de soldagem permite a soldagem através de tantas ligas e em tantas configurações de produtos (LEITE, B. G. S. 2019; SOUZA et al., 2020).

### 3.2. FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS DE SEUS PARAMETROS

O processo TIG pode ser operado de forma manual ou automática, sendo a manual a mais utilizada. A possibilidade de controle independente da fonte de calor e do metal de adição permite a soldagem de peças de espessuras pequenas e de difícil soldabilidade. O arco elétrico desse tipo de processo é considerado estável e suave, produzindo soldas que dispensam a necessidade de acabamentos, além de exigir pouca ou nenhuma limpeza ao final da operação. Apesar disso, a soldagem TIG mostra-se um processo lento e de custo elevado, sendo utilizada em situações em que a qualidade do processo é mais importante que o valor da operação. Devido a isso, esse processo é o mais utilizado na soldagem de alumínio, aços inoxidáveis, magnésio e titânio, utilizados em soldagem de alta precisão, além de passe raiz em tubulações de aço carbono (TEIXEIRA, 2011).

Em referida solda a temperatura é tão alta que se o metal derretido ficar exposto ao oxigênio acaba oxidando; a fim de proteger o metal da oxidação, na soldagem TIG, a peça da mão do soldador que segura o eletrodo alimenta um fluxo constante de gás não reativo sobre a área soldada, o qual mantém o oxigênio fora do cordão de solda por alguns segundos cruciais, sendo quente o suficiente para ser reativo. (SCHWEDERSKY et al., 2011; MAGALHÃES; SILVA, 2017).

Nesse contexto é interessante destacar que se não for utilizado na soldagem TIG nenhum gás de proteção, várias coisas acontecerão, dentre elas a corrosão e a quebra do eletrodo de tungstênio, gerando contaminação na solda com tungstênio, alta dificuldade em manter um arco, levando abaixo poder/tempo de soldagem, e oxidação da solda, fazendo com que o cordão de solda fique preto, quebradiço e fraco (SCHWEDERSKY et al., 2011; MODENESI, 2013; MAGALHÃES; SILVA, 2017).

Segundo BRACARENSE (2000), no processo TIG, os eletrodos diferentes de outros processos de soldagem, não são consumíveis, e executam a função de serem os terminais do arco, que irá gerar o calor para o processo. O eletrodo de tungstênio alcança a uma temperatura de 3410°C, se tornando uma fonte disponível de elétrons, essa temperatura só é possível porque o eletrodo irá se comportar como uma resistência, com o efeito de resfriamento do eletrodo causado pela saída dos elétrons através da tocha, faz com que não haja a fusão da ponta do eletrodo.

Para vários materiais e projetos de juntas soldadas, o conhecimento do campo de temperaturas, aliado a composição química e cinética de transformação, são

importantes ferramentas utilizadas para caracterizar a microestrutura presente na zona fundida (ZF) e na zona afetada (ZAC). Nos processos de soldagem por fusão, a fonte de calor gera um campo de temperaturas transiente responsável por modificar a microestrutura do material por solidificação, recristalização, crescimento de grão e transformações de fase. A microestrutura controla as propriedades térmicas e mecânicas do material soldado (GOLDAK; AKHLAGHI, 2005).

Cabe ser dito ainda que o nível de entrada de calor também afeta a qualidade da solda. A baixa entrada de calor, causada por baixa corrente de soldagem ou alta velocidade de soldagem, o que pode limitar a penetração e fazer com que o cordão de solda se afaste da superfície a ser soldada. Se houver muita entrada de calor, no entanto, o cordão de solda aumenta em largura, enquanto aumenta a probabilidade de penetração excessiva e respingos. Além disso, se a tocha de soldagem estiver muito longe da peça de trabalho, o gás de proteção se tornará ineficaz, causando porosidade na solda. Isso resulta em uma solda com furos, que é mais fraca que uma solda típica (MODENESI, 2013).

A energia fornecida pelo arco de solda a peça de trabalho, é conhecido como o aporte térmico, que vai ser caracterizado como a razão entre a potência do arco e a velocidade de deslocamento da solda. (APURV, C. AND VIJAYKUMAR, S.J ,2014).

$$H = \left( \frac{V \times I}{v} \right) \eta$$

*H = Aporte de calor*

*V = Tensão da solda aplicada*

*I = Corrente aplicada*

*v = Velocidade de soldagem*

*η = Eficiência Térmica da soldagem*

A característica mais importante da entrada de calor é que ela controla a taxa de resfriamento da solda, afetando assim a microestrutura do metal de solda e a zona afetada pelo calor. Outras especificações não a definem como uma variável básica específica, mas exigem que você controle a base da entrada de calor e sua relação com a tensão, corrente e velocidade de condução. A ideia básica por trás da importância da entrada de calor na soldagem é que, à medida que a entrada de calor aumenta, a taxa de resfriamento da solda diminui. À medida que a taxa de resfriamento diminui, a maioria dos materiais exibirá tamanhos e números de grãos

maiores, o que levará a mudanças nas propriedades mecânicas, especialmente na tenacidade do material, resultando em uma microestrutura mais fraca e desempenho efetivo inferior (Aventa, 2018).

Segundo JANUNKAR, R.G, ALLURKAR, S. e MAHESH, P. (2017), a velocidade de soldagem se baseia na taxa da “viagem” do eletrodo ao longo da junta a ser soldada. A velocidade de soldagem e igual tamanho do cordão sobre o tempo necessário para se o completar em mm/min. O efeito causado no aumento da velocidade de soldagem mantendo constante os valores de tensão e corrente, tende a abaixar o Heat input, aporte térmico. Um alto valor de velocidade de soldagem produz um decréscimo no tamanho da secção soldada, conseqüentemente menor penetração e menor largura do cordão de solda, isso indica que a velocidade não influencia a formação da poça de fusão, mas sim o volume e área que estão sendo impactadas pela solda. Velocidade de soldas normalmente são entre 100 e 500 mm/min dependendo da corrente, tipo do material e espessura da peça.

### **3.3. RELAÇÃO ENTRE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS**

É preciso, as vezes examinar se há fatores estruturais e defeitos que afetam as propriedades estruturais do material. Há alguns elementos estruturais que possuem dimensões macro; ou seja, eles são grandes o suficiente para serem vistos a olho nu. Na maioria dos materiais, entretanto, as partículas constituintes são microscópicas, com diâmetros possivelmente da ordem de 10 micrômetros, e seus detalhes devem ser estudados com algum tipo de microscópio. O tamanho e a forma da partícula são apenas duas características da microestrutura. (CALLISTER Jr, WILLIAM D. 7 EDIÇÃO).

Uma das razões para a versatilidade dos materiais metálicos é que suas propriedades mecânicas (resistência, dureza, ductilidade, etc.) são variáveis em uma faixa relativamente ampla. Refinamento do tamanho da partícula, aumento de resistência pela formação de solução sólida de endurecimento são três mecanismos para aumento de resistência. Existem outras técnicas nas quais as propriedades mecânicas de uma liga metálica são afetadas por sua microestrutura. (CALLISTER Jr, WILLIAM D. 7 EDIÇÃO).

O desenvolvimento da microestrutura em ligas tanto monofásicas quanto bifásicas envolve normalmente algum tipo de transformação de fases — uma

mudança no número e/ou na natureza das fases. (CALLISTER Jr, WILLIAM D. 7 EDIÇÃO)

A maioria dos processos de transformação de fase requer um tempo determinado para ser concluído, e a velocidade é frequentemente importante na relação entre o tratamento térmico e o crescimento da microestrutura. Uma limitação dos diagramas de fase é que eles não são capazes de mostrar o tempo necessário para atingir o equilíbrio. (CALLISTER Jr, WILLIAM D. 7 EDIÇÃO)

De acordo com a pesquisa LIMA, N. 2016, sendo uma solução sólida de carbono em ferro gama, a austenita, só é estável a temperaturas superiores a 723 °C. A mesma é produzida a partir da reação eutetóide, a temperaturas mais baixas, em ferro e cimento. Nos aços austeníticos é a única situação em que a fase austenítica pode ocorrer a temperatura ambiente, sendo que onde a temperatura ambiente é estável o aço austenítico tem baixa dureza, é resistente ao desgaste, possui características magnéticas, é deformável assim como ferro gama, é o componente mais denso do aço e não é atacado por reagentes. Em temperatura ambiente a resistência dessa fase é de 80 a 100 daN / mm<sup>2</sup> e o alongamento é de 20 a 25%. Ele pode dissolver até 171,8 de carbono e tem uma estrutura de corpo cúbico centralizado. (LIMA, NM 2016).

A ferrita é formada por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro  $\alpha$  (alfa). É o constituinte mais mole dos aços, porém é o mais tenaz, e o mais maleável, sua resistência a tração é de 28 N/mm<sup>2</sup> e alongamento de 35%. Sua solubilidade máxima é de 0,008 %. Pode também manter em solução de substituição a outros elementos tais como Si, P, Ni, Cr, Cu, que aparecem nos aços, bem como impurezas como elementos de ligação. A ferrita apresenta-se nos aços como constituinte e misturada com a cementita para formar parte da perlita. Se o aço é muito pobre em carbono, sua estrutura está formada quase que totalmente por grãos de ferrita cujos limites podem ser revelados facilmente com o microscópio, depois de um ataque com ácido nítrico diluído. Os grãos são equiaxiais (SILVA, S. K. C. 2019).

### **3.4. AÇOS SUPERDUPLEX E SUAS MICROESTRUTURAS**

O aço inoxidável duplex, atualmente conhecido como aço duplex, existe há mais de 70 anos e é uma liga fundamentada no sistema ferro (Fe) - cromo (Cr) - níquel (Ni) com estrutura mista de ferrita (estrutura cristalina cúbica de corpo centrado) e

austenita (estrutura cristalina cúbica de face centrada). Surgiu na França por volta de 1933 quando ocorreu um erro na adição de elementos de liga, na fundição de um aço inoxidável 18% Cr - 9% Ni - 2,5% Mo, resultando em uma composição química de 20% Cr - 8% Ni - 2,5% Mo, promovendo uma grande fração volumétrica de ferrita (fase  $\alpha$ ) na matriz austenítica (fase  $\gamma$ ). Então, essa liga foi estudada no laboratório de pesquisas da Unieux, na França, onde foi descoberto que todos os tipos de tratamento térmico empregado no material não o tornam suscetível ao ataque entre partículas em diferentes ambientes corrosivos, uma vez que a formação de carbonetos em sua superfície é descontínua (CHARLES J.; BERNHARDSSON, 1991).

Em sua primeira geração, o duplex apresentou limitações no seu uso. O aço só era empregado em operações onde não era necessário o processo de soldagem, já que, na região da zona termicamente afetada (ZTA), ele apresentava uma dureza menor, devido à formação excessiva de fase ferrita e uma redução da resistência à corrosão significativa em relação ao metal de base (ALVES N. S. A. 2011).

Com a adição de nitrogênio à liga, houve uma melhora das propriedades mecânicas do aço, dando origem à segunda geração do aço inoxidável duplex. A adição deste elemento de liga foi possível devido ao processo de Descarbonização Argônio-Oxigênio (DAO) para a obtenção do aço. A zona termicamente afetada obtida após a soldagem do aço duplex da segunda geração fornecia dureza e resistência à corrosão bem próximas a do metal de base (IMOA, 2008).

Atualmente, existem três grupos de aços inoxidáveis duplex:

- Duplex: Agrupa as ligas praticamente isentas de nitrogênio ou com adições discretas, da ordem de 0,15% em peso;
- Super duplex: Engloba as ligas com teores de cromo maiores (até 25% em peso) e com consideráveis adições de nitrogênio (até 0,30% em peso) (MARTINS; CASTELETTI; HARA, 2004). Com adições ainda maiores de nitrogênio se comparados a segundo grupo (0,4% em peso) e com teores de cromo na ordem de até 28% em peso (LEITE, R.A, 2009);
- Hiper duplex: Esse último faz parte de um grupo relativamente novo (SANDVIK, 2010).

A aplicação destes aços traz uma boa combinação de resistência à corrosão somada de boa resistência mecânica, praticidade de fabricação e, levando-se em

conta a relação custo-benefício, o aço duplex é mais acessível do que outros aços utilizados em ambientes corrosivos, como por exemplo, ligas de níquel. Além disso, possuem o dobro em resistência mecânica, quando comparados aos aços ferríticos ou austeníticos, portanto, são necessárias espessuras menores para realizar o mesmo trabalho (ALVES N. S. A., 2011).

Os principais elementos de liga, além do ferro, formadores do aço inoxidável duplex são:

- O cromo: é o elemento responsável pela formação da película passiva, sua concentração em peso nos duplex é de no mínimo 22%. O Cr estabiliza também a estrutura cúbica de corpo centrado, ou seja, ele é estabilizador da estrutura ferrítica. Contudo, é importante salientar que se deve controlar a concentração deste elemento de liga, pois, em altas concentrações, ele promove a formação de compostos intermetálicos (UNDERSTANDING STAINLESS STEEL, 2011);
- O Molibdênio: atua conjuntamente com o Cr para formar a fase ferrítica. Em altas concentrações, assim como o Cr, contribui para geração de compostos intermetálicos prejudiciais à liga;
- O Níquel: atua na formação da estrutura austenítica por provocar a mudança da estrutura básica do aço para cúbica de face centrada, além de atrasar a formação de fases intermetálicas. (UNDERSTANDING STAINLESS STEEL, 2011);
- O Nitrogênio: é o grande formador da estrutura austenítica, cerca de 30 vezes mais eficiente que o níquel. Além disso, o nitrogênio garante a elevada resistência mecânica (pela formação de uma solução sólida com a base metálica). Este elemento retarda a precipitação de carbonetos de cromo em temperaturas de tratamento entre 675 e 900°C, devido à formação preferencial de nitretos, evitando-se um empobrecimento acentuado de cromo em regiões intergranulares nessas condições. (PARK, LEE, 2001).

Aços super duplex são resistentes a corrosão com alta dureza e fortes propriedades mecânicas, bastante usado em indústrias químicas e petroquímicas. Em comparação com os aços inoxidáveis (AISI 304L, 316L) os aços super duplex são mais caros, mas por outro lado exibem grande níveis de resistência e principalmente

resistente a ambientes ricos em cloro (Cl) (M. YOUSEFIEH, M. SHAMANIAM, A.R. ARGHAVAN, 2021).

Como define COLPAERT (2008), os aços inoxidáveis duplex possuem frações aproximadamente iguais de austenita e ferrita. Dessa forma, combinam as propriedades de ambas as fases, possuindo elevada resistência mecânica, boa tenacidade e ótima resistência a corrosão, inclusive em situações de fadiga e tensão.

Os elevados teores de cromo e molibdênio possibilitam a obtenção dessa microestrutura, além da inclusão de nitrogênio que, como soluto intersticial, melhora as propriedades mecânicas.

As melhores propriedades mecânicas e de resistência a corrosão em aços super duplex são adquiridas quando temos perfil ferrita-austenita, e as outras fases não estão presentes (M. YOUSEFIEH.M. SHAMANIAM, A.R. ARGHAVAN, 2021).

Os aços inoxidáveis duplex têm sido desenvolvidos no sentido de se obter uma boa soldabilidade. Quase todos os processos de soldagem a arco convencionais podem ser aplicados para este material. A aplicação de processos com fonte de calor de alta densidade é limitada devido ao impedimento de formação da austenita devido as velocidades de resfriamento da junta (RAMÍREZ-LONDOÑO,2001).

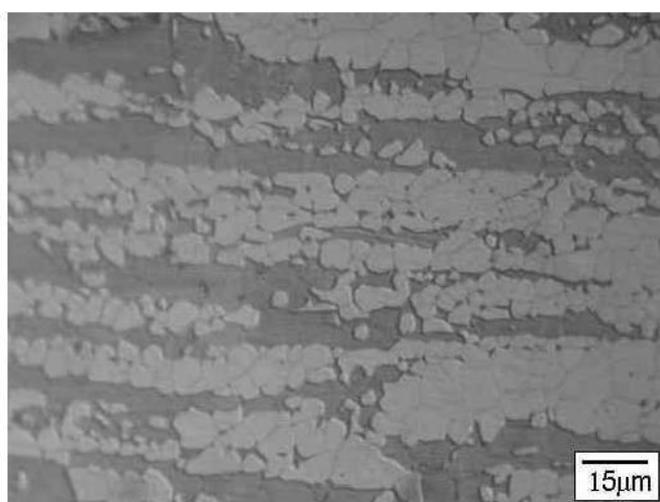
**Quadro 1- Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis**

Tipo	Grau UNS	Limite de Escoamento [MN/m <sup>2</sup> ]	Limite de Resistência [MN/m <sup>2</sup> ]	Alongamento [%]	Energia Absorvida no Ensaio Charpy V <sup>(a)</sup> [J]	Resistência à Fadiga <sup>(b)</sup> [MN/m <sup>2</sup> ]
Austeníticos	S 30400	210	515-690	45	>300	120 ± 120
Ferríticos	S 43000	205	450	20	-	-
Duplex	S 32304	400	600-820	25	300	245 ± 245
	S 31803	450	680-880	25	250	285 ± 285
	S 32750	550	800-1000	25	230	300 ± 300

Fonte: Ramíres-Londoño,2001

Os aços inoxidáveis duplex e super duplex, conforme mencionado anteriormente, são compostos basicamente por duas fases, ferrita e austenita, em proporções de 50% cada, podendo ter alguma variação, como de até 40% a 60%. Porém dependendo do processo utilizado na confecção de produtos a partir desses aços, peças fundidas e soldadas, pode surgir uma grande variedade de fases secundárias indesejáveis que comprometem as principais qualidades desses aços, como mostra o quadro 2 abaixo (PANISELLO, 2016). A ferrita é identificada pela parte escura e a austenita pela parte clara da figura.

**Figura 3- Microestrutura de um aço inoxidável duplex.**



Fonte: AIVAREZ-ARMAS, 2009

**Quadro 2 - Quadro resumo da composição das principais fases secundárias e suas temperaturas de precipitação nos aços inoxidáveis super duplex.**

Fase	Composição	Temp. de Precipitação (°C)	Fe	Cr	Ni	Mo
Sigma ( $\sigma$ )	Fe-Cr-Mo	650 - 1000	5,0	9,0	,0	1,0
Chi ( $\chi$ )	Fe-Cr-Mo	700 - 900	8,2	6,7	,3	1,8
R	Fe-Cr-Mo	550 - 800	0,0	5,0	5,0	5,0
Pi ( $\pi$ )	Fe-Mo-N	550 - 600	8,0	5,0	,0	4,0
Austenita Secundária	Fe-Cr-Ni-Mo	600 - 1000	6,8	5,3	1,2	,4
Nitretos	Cr-N	550 - 1000	,6	5,5		,8
Carbonetos	M7-C3	550 - 900	5,0	0,0	,0	,0
Carbonetos	M23-C6	550 - 900	5,0	0,0	,0	,0

Fonte: PANISELLO, 2016

Uma grande variedade de fases secundárias pode ser formada em uma faixa de temperaturas de 300 a 1.000 °C, bem como os nitretos e carbonetos, intergranulares ou localizados nos contornos de grão fragilizando o material. As fases secundárias mais comuns são a fase Sigma ( $\sigma$ ), fase Khi ( $\chi$ ), fase R, fase Pi ( $\pi$ ) e a austenita secundária. A fase Sigma é a mais significativa por afetar a resistência a corrosão e também por enfraquecer o aço tornando-o frágil, geralmente se sobrepõe as demais fases dificultando a identificação destas outras fases (PANISELLO, 2016).

A maioria das fases deletérias que podem se precipitar nos aços inoxidáveis duplex e super duplex são ricas em cromo e molibdênio e a precipitação destas fases deletérias pode causar a diminuição da concentração destes elementos na matriz e conforme descrito anteriormente as propriedades de resistência a corrosão e de resistência mecânica atribuídas aos aços por estes elementos podem ser diminuídas e/ou comprometidas (PANISELLO, 2016).

#### 3.4.1. FASES

- **Sigma ( $\sigma$ ):** É formada em uma grande variedade de Aços Inoxidáveis Duplex, porém com mais facilidade nos Aços Inoxidáveis Super duplex devido as maiores quantidades de Cromo e de Molibdênio presentes nestes aços. O Molibdênio é responsável pelo aumento da estabilidade da fase Sigma em altas temperaturas (PANISELLO, 2016). Além do Cromo e do Molibdênio também o Tungstênio e o Cobre contribuem para a formação desta fase indesejável, que geralmente ocorre no encontro de contornos de três grãos ou no encontro da ferrita com a austenita. Uma forma de minimizar ou até mesmo eliminar a fase Sigma é o tratamento térmico que faz com que essa fase seja diluída e absorvida pelos elementos formadores de ferrita (PANISELLO, 2016).
- **Chi ( $\chi$ ):** É encontrada em pequenas quantidades nos Aços Inoxidáveis Duplex em faixas de temperatura de 700 a 900 °C, esta fase coexiste com a fase Sigma e afeta a resistência a corrosão e a resistência mecânica, esta fase é de difícil detecção somente sendo identificada por meio de imagens geradas em microscópios eletrônicos com uso de elétrons retro espalhados (PANISELLO, 2016).
- **Fase R:** A fase R é se precipita entre 550 e 800 °C nos Aços Inoxidáveis Duplex, nas interfaces ferrita/austenita, tanto granulares quanto intergranulares, é um intermetálico rico em Molibdênio, e antecede a fase Sigma e pode ser mais

facilmente identificado por difração de elétrons. A presença desta fase reduz a resistência mecânica e também afeta a resistência a corrosão localizada puntiforme ou alveolar (PANISELLO, 2016).

- **Pi ( $\pi$ ):** A fase PI é encontrada dentro do grão nos Aços Inoxidáveis Duplex reduzindo sua resistência a corrosão localizada puntiforme ou alveolar e aumentando a fragilidade do material (PANISELLO, 2016).
- **Austenita secundária:** A formação da austenita secundária ocorre pela decomposição da ferrita metaestável em austenita (resultante de um resfriamento rápido). A austenita secundária pode se formar na interface ferrita/austenita primária ou no interior da ferrita e tem efeito deletério na resistência a corrosão (PANISELLO, 2016).
- **Nitretos:** Os mesmos se precipitam em temperaturas na faixa de 700 a 900 °C, sua formação geralmente ocorre nos rápidos resfriamentos pelo efeito da saturação de nitrogênio na ferrita, os precipitados geralmente são intergranulares e se depositam nos contornos de grão nas interfaces ferrita/austenita, afetando a resistência a corrosão localizada puntiforme ou alveolar e fragilizando o metal (PANISELLO, 2016).
- **Carbonetos:** Se precipitam em temperaturas abaixo dos 950 °C depositando-se nos contornos de grão e principalmente nas interfaces ferrita/austenita, podendo causar corrosão intergranular. Sua formação é desprezível nos Aços Inoxidáveis Duplex atuais (PANISELLO, 2016).

Segundo Vahid e colaboradores (2016), há a formação de várias fases secundárias durante soldagem em aços super duplex, as mais comuns são a fase sigma, fase chi e os nitretos.

De acordo com POHL M, STORZ O, GLOGOWSKI T (2007), as ligas metálicas tendem ter alta taxa de difusão em fase ferrítica comparada com austenítica, as precipitações de fases secundárias costumam acontecer rapidamente na ferrita ou na fronteira austenita/ferrita, não acontecem muito nos grãos de austenita.

A fase sigma acontece entre 850°C e 900°C, e se forma na fronteira da fase austenita/ferrita, a fase chi é mais rica em molibdênio do que a fase sigma e se forma em menores proporções (POHL M, STORZ O, GLOGOWSKI T, 2007).

Segundo TABAN E., KALUC E. 2011, durante a soldagem, os nitritos são formados na zona termicamente afetada se a taxa de resfriamento for muito alta.

Durante a soldagem e após a solda, muitas fases entram em transformações e podem tomar lugares na zona termicamente afetada e na área da solda, contato material de adição e metal base. De fato, a principal preocupação é durante a solda conseguir atingir um range de 1 para a microestrutura ferrita-austenita, para evitar a formação de fases deletérias como Cr<sub>2</sub>N durante esfriamento e etapas de reaquecimento. A presença considerável de precipitados como Cr<sub>2</sub>N e fase sigma podem deteriorar as propriedades mecânicas e corrosivas do material (M. YOUSEFIEH, M. SHAMANIAM, A.R ARGHAVAN, 2012).

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Foram estudados artigos e teses na área acadêmica sobre como a velocidade e energia de soldagem no processo TIG influencia na tenacidade de aços super duplex, estabelecendo-se os seguintes questionamentos a serem analisados:

- Qual a velocidade ideal;
- Qual a relação da velocidade com a energia de soldagem;
- Como a microestrutura se organiza durante os ciclos térmicos de solda;
- Quais parâmetros alteram a tenacidade;
- Qual a relação entre as frações de austenita e ferrita.

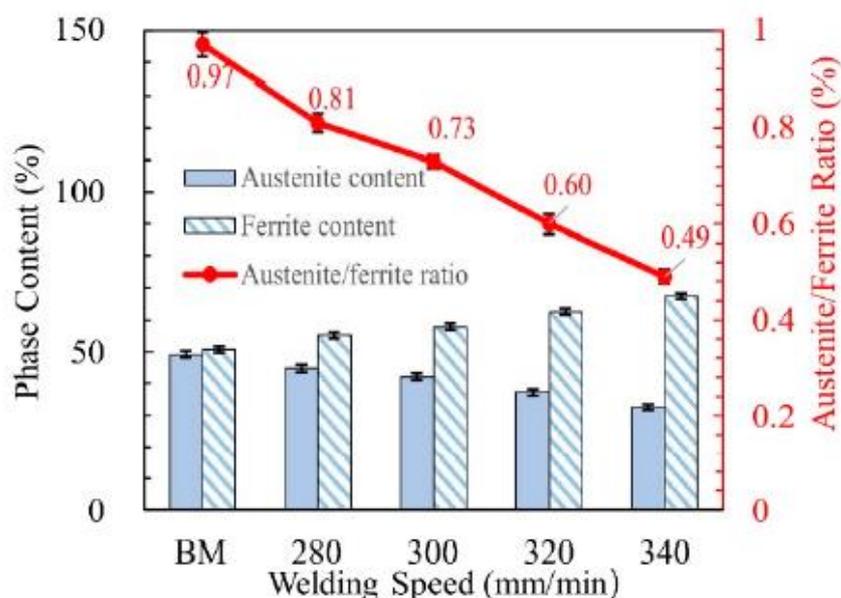
Segundo Mohammed e colaboradores (2017), o conhecimento sobre energia de soldagem durante os processos de solda é importante para se controlar e melhorar a qualidade da solda, pois a quantidade de energia empregada pode alterar as propriedades dos aços super duplex dependendo do modo de solidificação, transformando assim suas características como:

- A fase austenítica na solda é fortemente afetada pela taxa de resfriamento;
- As taxas de ferrita e austenita dependem da energia de soldagem durante a solda;
- Baixa energia de soldagem gera altas frações de ferrita e severas precipitações de nitreto de cromo, afetando assim as propriedades mecânicas e corrosivas do material;
- Alta energia de soldagem faz com que se tenha tempo necessário para a reformulação da austenita em alta temperatura;

- Variações irregulares da energia de soldagem causa mudanças drásticas no balanço de fases da solda do super duplex.
- A quantidade de ferrita no DSS, pode consideravelmente influenciar na tenacidade e ductilidade;

Cui (2021), mostra a partir dos ensaios realizados em 2205 DSS variando sua velocidade mantendo os demais parâmetros e medindo a resistência a tração, que na medida que aumenta se a velocidade ocorre um aumento proporcional da proporção de ferrita como pode ser observado na figura 4, conseqüentemente a tenacidade do DSS vai aumentar também como mostra na tabela 1, nesse contexto pode-se inferir que a quantidade de ferrita controla diretamente aumento da resistência a tração. Mas além disso existe outro fator que deve ser levado em consideração que as características do grão podem reduzir ou aumentam a tenacidade deste aço.

**Figura 4- Taxa de variação de fase austenita/ferrita no metal de base e zona de solda de acordo com a velocidade.**



Fonte: Cui (2021)

Tabela 1 Resultado de teste do 2205 DSS

Teste	Velocidade de solda (mm/min)	Resistencia a tração (Mpa)	Alongamento	Posição da fratura
Junta de solda	280	752,3 ±1,98	27,9 ±0,99	Zona de metal soldado
	300	789,5 ±1,34	24,7 ±0,99	Zona de metal soldado
	320	794,5 ±1,69	23,1 ±0,42	Zona de metal soldado
Metal de base	340	800,3±1,76	32,3±0,57	Metal de base
	/	804,3±2,12	46,6±0,71	/

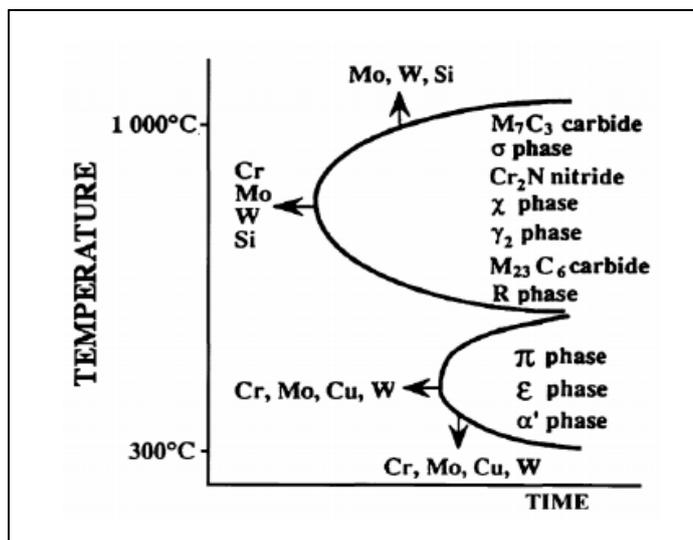
Fonte: Cui (2021)

O aumento da energia de soldagem ocorre na medida que diminui a velocidade e se aumenta a corrente, portanto a energia de soldagem é inversamente proporcional a velocidade, sendo a mesma podendo ser controlada pela corrente. Baseado nesses parâmetros após teste em chapas de GH99 ( $C \leq 0.08$ ,  $Fe \leq 2$ ,  $Mn \leq 0.4$ ,  $Si \leq 0.5$ ,  $Cr 17 \sim 20$ ,  $W 5 \sim 7$ ,  $Mo 3.5 \sim 4.5$ ,  $Nb 5 \sim 8$ ,  $Al 1.7 \sim 2.4$ ,  $Ti 1.0 \sim 1.5$ ) pode se dizer que a velocidade ideal seria de 25 cm/min nas condições de teste realizado. Nessas mesmas condições pode ser notar um limite mínimo e máximo para o parâmetro corrente, quando ela está baixa (50 a 60 amperes) a raiz tende a ter falta de fusão, o que diminui a resistência a tração, já quando muito alta (maior que 90 amperes) surgem alguns defeitos no cordão de solda. O aumento da corrente melhora a tenacidade até um certo ponto depois tende a diminuir, mesmo com o incremento, sendo assim o valor otimizado de corrente seria na faixa de 80 amperes (Q, WANG, 2011).

A fase secundária e a mais comum de se formar em aços super duplex durante a solda são a fase Sigma, chi e nitretos de cromo. Esta fase tem uma difusão maior das taxas de ferrita do que austenita, sendo influenciadoras diretas nas propriedades de tenacidade e corrosão do super duplex (HOSSEINI, 2016).

Segundo Mohammed e colaboradores (2016) a alta tenacidade pode ser obtida com implementação do controle de temperatura e resfriamento do aço duplex, como pode ser observado na figura 5, quando exposto a temperaturas entre 300 a 1000°C a microestrutura começa se organizar de acordo com alguma fase secundária. Ainda sobre a tenacidade do material pode se observar também que a quantidade a precipitação de nitretos de cromo diminui a fração de austenita e por consequência aumenta a fração de ferrita.

Figura 5- Curva isotérmica dos efeitos da precipitação das fases secundária durante resfriamento.



Fonte: Mohammed e colaboradores (2016)

Na averiguação da resistência, realizam-se testes mecânicos destrutivos. Neles, o ponto de solda é submetido a um esforço mecânico até quebrar ou ter a junta destruída por cisalhamento, arrancamento, tração em cruz ou rotação. Tal avaliação busca averiguar a eficiência da junta soldada, definindo-se o quociente com base nos limites de resistência à tração da junta soldada e do metal base. A figura 6 permite observar a relação entre a curva de tensão e a deformação, conduzindo à ruptura.

Figura 6- Curva de tensão x deformação



Fonte: CEFET-MG (2016).

No caso dos aços inoxidáveis duplex (AID) e super duplex (AISD), a microestrutura balanceada (50% de ferrita e 50% de austenita) é responsável pela alta resistência à corrosão e à deterioração mecânica. Entre as principais características dessas composições estão: a elevada resistência à corrosão, à tração e à fadiga, a boa tenacidade e a boa soldabilidade. Esse grupo de qualidades faz com que o AID e o AISD sejam atraentes para o setor industrial (PEREIRA, 2009).

No que se refere ao processo de soldagem, as variações térmicas a que o material é submetido criam tendências ao desequilíbrio na microestrutura. Com a ocorrência desse desbalanceamento, evidenciam-se reduções consideráveis na resistência mecânica e à corrosão.

A energia de soldagem está diretamente relacionada à modificação microestrutural e ao desempenho da junta de solda (PEREIRA, 2009). Portanto, a alta energia de soldagem cria baixas velocidades de resfriamento, beneficiando a precipitação de austenita e o equilíbrio microestrutural almejado. Entretanto, a baixa energia de soldagem leva a maiores velocidades de resfriamento, atrasando a precipitação da austenita e o equilíbrio de fases na microestrutura.

**Figura 7: Diagrama explicativo do tema proposto**



Fonte: Autores

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a analisar a influência da velocidade de soldagem na resistência à tração em juntas de liga duplex. Após o estudo da literatura acadêmica sobre esse tema foi concluído que:

- A velocidade e energia de soldagem são parâmetros que geram alterações microestruturais no cordão de solda em relação ao metal de base. Esses parâmetros geram desequilíbrio nas frações de austenita e ferrita.
- Ao soldar aços inoxidáveis duplex é de fundamental importância ter o controle da energia de soldagem, para se manter a resistência do material soldado próximo ao do metal de base. Não podendo ser muito alta nem muito baixa, pois quando ela é muito alta a taxa de resfriamento é maior e faz com que se aumente a precipitação de fase secundárias, e se for muito baixa pode ocorrer falta de fusão.
- A microestrutura ferrita está diretamente relacionada ao aumento da resistência a tração do material, por ser uma microestrutura tenaz, e o seu balanço dentro do cordão de solda está relacionado com a energia de soldagem.
- Para controlar a tenacidade do material deve-se ter o controle da temperatura e o resfriamento do aço duplex, como foi visto na figura 4 o tempo de permanência a uma determinada temperatura vai provocar a organização da microestrutura como alguma fase secundária, sendo que a precipitação de nitretos de cromo diminui a fração de austenita e por conta disso há o aumento da fração de ferrita. Ao aumentar a fração de ferrita faz com que o material se torne mais tenaz.
- Para avaliar qual a velocidade ideal deve se levar em consideração a taxa de resfriamento, por causa da precipitação de fases secundárias.
- Os parâmetros velocidade e energia de soldagem são inversamente proporcionais.

Sugere-se para futuros estudos, analisar a influência da adição de elementos de liga, de forma a aumentar a velocidade de soldagem sem a perda das características de tenacidade do material.

## 6. RERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APURV,C. AND VIJAYKUMAR,S.J (2014).**Influence of Heat Input on Mechanical Properties and Microstructure of Austenitic 202 Grade Stainless Steel Weldments**. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 9, 222-228.

AVENTA. **Conheça a Diferença Entre os Processos TIG e MIG/MAG**. S/ d. disponível em: <<https://aventa.com.br/novidades/conheca-diferenca-entre-os-processos-tig-e-migmag>>. Acesso 09/03/2021.

COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem ao Arco elétrico TIG (GTAW)**. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia. (Artigo- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte, 2000.

CUNHA, T. V.; BOHORQUEZ, C. E. N. **Ultrassom na SA: uma revisão acerca dos métodos de aplicação e seus efeitos**. Soldag. insp. 2014; vol.19: n.3, pp.221-230. (<https://www.scielo.br/pdf/si/v19n3/04.pdf>).

CUNHA, T. V.; RIBEIRO, H. O. **Avaliação do Uso do Tecimento na SA Submerso**. Soldag. insp. 2018; vol.23: n.1, pp.73-82. (<https://www.scielo.br/pdf/si/v23n1/0104-9224-si-23-1-73.pdf>).

SANDVIK. **Sandviken: Sandvik Materials Technology, Inc.**; c 2010 AB;]. Disponível em:<<http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/s001664.nsf/0/0261F4D58CB4844DC12572910047D73B>>. Acesso em 12 de novembro de 2021.

RAMÍREZ LONDOÑO, Antonio José. **Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na ZAC de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FREITAS, T. P. **Colagem e soldagem de madeira termorretificada de *Fraxinus excelsior***. 2019, 120f. Tese (Doutorado em Ciências). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2019.

CALLISTER JR., W.D., **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

PARK, Y. H.; LEE, Z. H.; **The Effect of Nitrogen and Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of 25Cr – 7Ni – 1.5Mo – 3W – xN Duplex Stainless Steel Casting**. Materials Science and Engineering A297, 2001.

GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M.; **Computer Simulation of Welding Processes**. In: GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M.; Computational Welding Mechanics. 1. ed. New York: Springer US, 2005. cap. 2, p. 16-69.

JANUNKAR, R.G, ALLURKAR, S. e MAHESH, P. (2017) **An Influence on Effect of Welding Speed on Strength of Welded Joint Using Tig Welding Process**. World Journal of Technology, Engineering and Research, 2, 337-342

LEITE, B. G. S. **Estudo comparativo de processos de soldagem em carretas pressurizadas**: Soldagem aplicado a carretas de transporte pressurizado para gás GLP. São Paulo: Novas edições acadêmicas, 2019. 100f.

MAGALHÃES, E. S.; SILVA, S. M. M. L. **Uma Análise Numérica e Inversa do Processo de Soldagem TIG em Alumínio**: Uma Análise Microestrutural Usando Problemas Inversos. São Paulo: Novas edições acadêmicas, 2017. 104f.

MODENESI, P. J. **A química da formação do cordão na soldagem TIG**. Soldag. insp. vol.18 no.3 São Paulo July/Sept. 2013.

POHL M, STORZ O, GLOGOWSKI T (2007) **Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel**. Mater Charact 58(1):65–71

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Editora: Soldasoft, Florianópolis, 2002.

SCHWEDERSKY, M. B. et al. **Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos**. Soldag. insp. 2011; vol.16; no.4.

LEITE, Raphael Aragonês. **Avaliação da tenacidade à fratura de uma junta soldada de um aço inoxidável super duplex com a utilização de proteção catódica**. 2009.

SOUZA, R. R. et al. **Soldagem de alumínio pelo processo TIG**: Uma abordagem teórica e prática na união do alumínio aa 5052-h34. São Paulo: Novas edições acadêmicas, 2020. 128f.

TEIXEIRA, G. S.; **Análise da Influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem**. 2011. 122 p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, São Paulo, 2011.

TABAN E., KALUC E. (2011) **Welding behaviour of Duplex and Superduplex Stainless Steels using Laser and Plasma ARC Welding processes**. Weld World 55(7–8):48–57

IMOA. **Columbia: International Molybdenum Association**, Inc. 2008. Disponível em:<[http://www.imoa.info/moly\\_uses/moly\\_grade\\_stainless\\_steels/duplex\\_stainless\\_steel.html](http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_stainless_steels/duplex_stainless_steel.html)>. Acesso em 15 de novembro 2021.

MARTINS; CASTELETTI; HARA, **Caracterização Microestrutural E Comportamento À Corrosão Do Aço Inox Super Duplex Astm A890 GR 6<sup>a</sup>**. 59<sup>o</sup> CONGRESSO ANUAL DA ABM, de 19 a 22 de Julho de 2004, São Paulo – SP.

CHARLES, J.; BERNHARDSSON, S.; **Superduplex stainless steels: structure and properties**. In: **DUPLEX STAINLESS STEELS'91**, Beaune, Proceedings. Ed: Charles, J.; Bernhardsson, S. Les Ulis, France, Les Éditions de physique, v.1, 1991.

**UNDERSTANDING STAINLESS STEEL**. British Stainless Steel Association Disponível em: <[http://www.bssa.org.uk/cms/File/BSSA\\_Guide\\_sample.pdf](http://www.bssa.org.uk/cms/File/BSSA_Guide_sample.pdf)>. Acesso em: 27 de novembro de 2021.

YOUSEFIEH, M.; SHAMANIAN, M.; SAATCHI, A. **Influence of heat input in pulsed current GTAW process on microstructure and corrosion resistance of duplex stainless steel welds**. Journal of iron and steel research, international, v. 18, n. 9, p. 65-69, 2011.

PEREIRA, Patrícia Apicelo de Souza. **Feito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex**. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ALVES N. S. A. et al. **Caracterização metalúrgica de juntas de aço inoxidável superduplex soldadas por processo TIG autógeno**. 2011.

MOHAMMED, G.R.; Ishak, M.; Aqida, S.N.; Abdulhadi, H.A. **Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex Stainless Steels: A Review**. Metals 2017, 7, 39.

HOSSEINI, V.A., Valiente Bermejo, M.A., Gårdstam, J. et al. **Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel**. Weld World 60, (2016).

Q. Wang, D.L. Sun, Y. Na, Y. Zhou, X.L. Han, J. Wang, **Effects of TIG Welding Parameters on Morphology and Mechanical Properties of Welded Joint of Ni-base Superalloy**, Procedia Engineering, Volume 10, 2011, Pages 37-41,

Cui, S., Pang, S., Pang, D. and Zhang, Z., 2021. **Influence of Welding Speeds on the Morphology, Mechanical Properties, and Microstructure of 2205 DSS Welded Joint by K-TIG Welding**. Materials, 14(12), p.3426.