

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Aplicação de Cobre e Níquel puro como metais de adição na soldagem de chapas de aço  
superduplex UNS S32750 com Laser Pulsado Nd: YAG**

Matheus Singh Cardoso

ILHA SOLTEIRA

2021

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIA MECÂNICA

**MATHEUS SINGH CARDOSO**

**Aplicação de Cobre e Níquel puro como metais de adição na soldagem de chapas de aço superduplex UNS S32750 com Laser Pulsado Nd: YAG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Affonso Ventrella

ILHA SOLTEIRA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C268a Cardoso, Matheus Singh .  
Aplicação de cobre e níquel puro como metais de adição na soldagem de chapas de aço superduplex uns s32750 com laser pulsado nd: IAG / Matheus Singh Cardoso. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021  
37 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Vicente Affonso Ventrella  
Inclui bibliografia

1. Aço superduplex uns S32750. 2. Cobre e níquel como metais de adição. 3.  
Soldagem laser nd:YAG.

  
Raiane da Silva Santos

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho”1 .  
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**TÍTULO:** *Aplicação de Cobre e Níquel puro como metais de adição na soldagem de chapas de aço superduplex UNS S32750 com Laser Pulsado Nd: YAG*

**ALUNO:** MATHEUS SINGH CARDOSO

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

**Aprovado ( X ) - Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora**

**Comissão Examinadora:**



Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella  
*Presidente (Orientador)*



*MSc. Bruna Berbel Seloto*



*Dr. Gillian da Silva Crespo*

*Ilha Solteira, 4 de outubro de 2021*

## RESUMO

Os aços Inoxidáveis superduplex (AISD) são materiais que apresentam elevados valores de resistência mecânica, aliados com altos níveis de resistência à corrosão, sua microestrutura é bifásica, consistindo em: ferrita ( $\delta$ ) e austenita ( $\gamma$ ), uma matriz ferrítica com ilhas de austenita nas mesmas proporções, estrutura que garante as suas propriedades. Entretanto, a utilização dos AISD apresenta uma dificuldade com relação à processos de soldagem. Isso acontece devido à quebra das proporções de austenita e ferrita, pois quando submetido a um processo de soldagem, a microestrutura resultante é predominantemente ferrítica, devido as altas velocidades de resfriamento. Dessa forma a adição de elementos gamagênicos para a formação de austenita na soldagem, garantindo o balanço de fases, é de extrema importância na utilização dos AISD. Tendo isso em vista, o objetivo deste trabalho é estudar a influência do cobre e do níquel puro, separadamente, na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750, analisando o balanceamento de fases na junta soldada, de forma que os metais de adição ajam como estabilizador da austenita, alterando as propriedades do material. Foram estudadas cinco condições de soldagem para o níquel e três para o cobre, comparando com a soldagem autógena (sem metais de adição). A adição de níquel foi feita com tiras finas do material entre as juntas soldadas e para o cobre a adição foi feita com revestimento eletrolítico. Para a adição de níquel, houve uma melhora na soldabilidade, possibilitando o balanço de fases e consequentemente boas propriedades e resistência à corrosão. Para a adição de cobre concluiu-se que o elemento não possui um potencial gamagênico alto, com formação apenas de austenita secundária nos contornos de grão e o aparecimento de trincas e poros no cordão de solda, diminuindo a soldabilidade.

*Palavras-chave: Aço Superduplex UNS S32750; Cobre e Níquel como metais de adição; Soldagem Laser Nd:YAG.*

## ABSTRACT

Superduplex Stainless Steels (SDSSs) are materials that have high values of mechanical strength, allied with high levels of corrosion resistance, its microstructure is biphasic, consisting of: ferrite ( $\delta$ ) and austenite ( $\gamma$ ), a ferritic matrix with austenite islands in the same proportions, structure that guarantees its properties. However, the use of SDSS presents a difficulty in relation to welding processes. This is due to the breaking of the proportions of austenite and ferrite, because when subjected to a welding process, the resulting microstructure is predominantly ferritic, due to the high cooling rates. Thus, the addition of gamma-genic elements for austenite formation in welding, ensuring phase balance, is extremely important. Therefore, the objective of this work is to study the influence of copper and nickel separately on pulsed laser beam welding Nd: YAG, of UNS S32750 superduplex steel, analyzing phase balancing on the welded joint. Five welding conditions for nickel and three for copper were studied, comparing with autogenous welding (without addition metals). The addition of nickel was made with metallic foils of the material between the welding joints, and the copper addition was made with electrolytic coating. For the addition of nickel, there was an improvement in weldability, enabling the balance of phases and consequently good properties and corrosion resistance. For the copper addition it was concluded that the element does not have a high gamma-genic potential, with formation only of secondary austenite in the grain contours and the appearance of cracks and pores in the weld bead, decreasing weldability.

*Keywords: Superduplex Steel UNS S32750; Copper and nickel as addition metals; Nd: YAG laser beam welding.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação dos filmes passivos em aços inoxidáveis. ....	12
Figura 2 – Microestrutura UNS S32750.....	14
Figura 3 – Micrografia da zona de transição de um cordão de solda UNS S32750 com laser pulsado Nd:YAG .....	15
Figura 4 – Formação do Cordão de Solda Laser .....	16
Figura 5 – Cristais Nd:YAG.....	17
Figura 6 – Máquina de Soldagem a Laser Pulsado Nd:YAG, modelo UW-150 <sup>a</sup> .....	20
Figura 7 - – Esquema ilustrando a adição de níquel na Soldagem.....	21
Figura 8 – Aparato Experimental da Eletrodeposição do Cobre.....	22
Figura 9 - Esquema ilustrando a adição de cobre na Soldagem .....	23
Figura 10 – Ilustração do ensaio de Microdureza Vickers .....	25
Figura 11 - Microestruturas para a adição de níquel, autógena e extremos 30 e 70 $\mu\text{m}$ .....	26
Figura 12 - Microestruturas para a adição de níquel, amostras intermediárias 40, 50 e 60 $\mu\text{m}$ .....	26
Figura 13 - Perfis de Microdureza para a adição de níquel .....	27
Figura 14 - Curvas CPT para as amostras de adição de níquel .....	28
Figura 15 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu60.....	30
Figura 16 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu80.....	30
Figura 17 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu100.....	30
Figura 18 – Macroestrutura para amostras de Cu100.....	31
Figura 19 - Perfis de Microdureza para a adição de cobre .....	32
Figura 20 – Curvas de polarização potenciodinâmica para as amostras de adição de cobre ...	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço UNS S32750.....	19
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do UNS S32750.....	19
Tabela 3 – Amostras de níquel e espessuras das tiras .....	21
Tabela 4 – Amostras de Cobre e espessuras das camadas depositadas .....	22
Tabela 5 – Média das Razões volumétricas da microestrutura das amostras de Níquel .....	27
Tabela 6 - Média da microdureza para as amostras de adição de níquel.....	28
Tabela 7 - Média das Razões volumétricas da microestrutura das amostras de Cobre .....	31
Tabela 8 - Média da microdureza para as amostras de adição de cobre.....	32
Tabela 9 – Valores de potencial de corrosão para as amostras de adição de cobre.....	33

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 – OBJETIVOS .....	11
<b>2 – REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
2.1 – AÇOS INOXIDÁVEIS.....	11
<b>2.1.1 – Classificação dos aços inoxidáveis.....</b>	<b>12</b>
2.2 – AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX .....	13
<b>2.2.1 – A liga de aço superduplex UNS S32750.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 – Soldabilidade do aço superduplex UNS S32750.....</b>	<b>14</b>
2.3 – SOLDAGEM A LASER PULSADO Nd:YAG .....	16
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
3.1 – LISTA DE MATERIAIS .....	18
3.2 – SOLDAGEM.....	19
3.3 – ADIÇÃO DE NÍQUEL .....	20
3.4 – ADIÇÃO DE COBRE.....	21
3.5 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	23
3.6 – ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	24
3.7 – ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	24
3.8 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO.....	25
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>25</b>
4.1 – RESULTADOS PARA A ADIÇÃO DE NÍQUEL.....	25
<b>4.1.1 – Caracterização microestrutural para a adição de níquel .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.2 – Ensaio de microdureza para a adição de níquel.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.3 – Ensaio de resistência à corrosão para a adição de níquel.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.4 – Discussão dos resultados para a adição de níquel .....</b>	<b>29</b>
4.2 – RESULTADOS PARA A ADIÇÃO DE COBRE .....	29
<b>4.2.1 – Caracterização microestrutural para a adição de cobre .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2 – Ensaio de microdureza para a adição de cobre .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2.3 – Ensaio de resistência à corrosão para a adição de cobre.....</b>	<b>33</b>

<b>4.2.4 – Discussão dos resultados para a adição de cobre.....</b>	<b>34</b>
<b>5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>6 – REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1 – INTRODUÇÃO

As atividades de exploração e produtividade em meios mais agressivos, vem crescendo e avançando muito no cenário industrial da engenharia. Esses fatores, impulsionaram a procura por materiais com propriedades mecânicas elevadas, bem como uma excelente resistência à corrosão, tendo em vista a severidade das condições ambientais e dos diversos tipos de esforços que serão exigidos dos mesmos. Dessa forma a utilização e o estudo de ligas como o aço superduplex são extremamente incentivadas nos dias de hoje.

Os aços Inoxidáveis superduplex (AISD) são materiais que apresentam elevados valores de resistência mecânica, aliados com altos níveis de resistência à corrosão, conseqüentemente são muito utilizados em componentes de processos industriais. Como exemplos de sua aplicação podemos citar: trocadores de calor, vasos de pressão em processos críticos, tubulações, digestores, reatores, indústrias químicas e petroquímicas offshore (SARAVAN, 2017). A microestrutura dos aços inoxidáveis superduplex é bifásica, consistindo em: ferrita ( $\delta$ ) e austenita ( $\gamma$ ), uma matriz ferrítica com ilhas de austenita nas mesmas proporções, microestrutura que garante as suas propriedades (ZHANG, 2017).

Entretanto, a utilização dos AISD apresenta uma dificuldade com relação à escolha de processos de soldagem. Isso acontece devido à quebra das proporções de austenita e ferrita, pois quando submetido a um processo de soldagem, a microestrutura resultante é predominantemente de ferrita, devido as altas velocidades de resfriamento (MIRAKHORLI; GHAINI; TORKAMANY, 2012). Sendo assim, resolver o problema de balanceamento da microestrutura desses aços requer um processo de soldagem mais refinado, que possibilite a adição de metais para contornar a quebra de proporções na microestrutura.

O processo de soldagem a laser Nd:YAG oferece algumas vantagens quando comparado à processos convencionais como o arco elétrico. A soldagem a laser (Laser Beam Welding - LBW) é um processo de soldagem rápido e eficiente, aplicado devido a sua alta precisão de incidência do feixe, em uma pequena e estreita área de soldagem. O que promove a fusão do material é o bombardeamento de luz concentrada de alta intensidade no ponto de incidência. Devido essa energia ser promovida de forma extremamente concentrada, em uma área estreita de focalização do feixe, o volume de material afetado pelo calor nesse processo é mínimo, fazendo com que a ZTAs (Zona Termicamente Afetada) seja praticamente inexistente (BOLUT, 2016). Esse processo possibilita também a soldagem de formas complexas com muita precisão e velocidade, além disso permite a adição de metais para evitar

a quebra no equilíbrio da matriz, promovendo o aumento da sua temperatura inicial de transformação, fazendo com que as propriedades não sejam perdidas durante a solda.

Metais de adição como o cobre e o níquel são responsáveis por alterar a microestrutura da liga, proporcionando uma maior ductilidade, resistência mecânica, soldabilidade e aumento na resistência à corrosão. Caso o equilíbrio não for estabelecido, as vantagens do aço superduplex podem ser arruinadas, resultando em uma drástica queda na resistência mecânica e à corrosão (MUTHUPANDI, 2005).

## 1.1 – OBJETIVOS

Tendo em vista que o equilíbrio de fases em chapas soldadas de aços inoxidáveis superduplex é de extrema importância para propriedades do material como a resistência mecânica e à corrosão, esta pesquisa tem como objetivo geral:

- Estudar a influência da adição de elementos gamagênicos na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750, analisando o balanceamento de fases na junta soldada, de forma que os metais de adição ajam como estabilizador da austenita.

E como objetivos específicos:

- Estudar os efeitos da adição de níquel puro na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750 por meio de: caracterização microestruturais (microscopia óptica – MO e microscopia eletrônica de varredura -MEV) e ensaios de microdureza e resistência à corrosão.
- Estudar os efeitos da adição de cobre eletrolítico na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750 por meio de: caracterização microestruturais (microscopia óptica – MO e microscopia eletrônica de varredura -MEV) e ensaios de microdureza e resistência à corrosão.

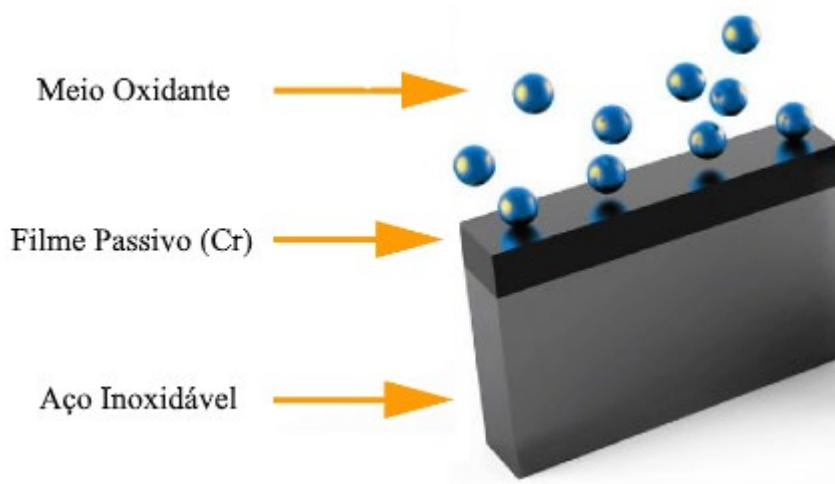
## 2 – REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 – AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro, carbono e cromo, que surgiram para suprir a necessidade de ligas resistentes à corrosão. Outros elementos metálicos também podem

integrar a composição dos aços inoxidáveis, mas o principal elemento que garante as suas características é o cromo, exigindo um mínimo de 11% desse elemento na sua formação (ASM Handbook, 1990). O cromo é importante pois ele é o agente responsável pelo fenômeno chamado de passividade, que constitui na reação do cromo em meios oxidantes formando filmes passivos, os quais protegem essas ligas de ataques subsequentes (LIMA, 2006). A Figura 1, ilustra o processo de formação dos filmes passivos.

Figura 1 – Formação dos filmes passivos em aços inoxidáveis.



Fonte: STAINLESS STEEL PASSIVATION PROCESS; Nitty Gritty. 2021

### 2.1.1 – Classificação dos aços inoxidáveis

Existem três tipos principais de aços inoxidáveis: os ferríticos, os martensíticos e os austeníticos.

Os ferríticos contêm em sua composição uma quantidade de cromo superior aos outros tipos de aços inoxidáveis, variando de 10% a 30%, proporcionando assim uma melhora na resistência à corrosão, entretanto, isso causa alterações em sua microestrutura, deixando-a predominantemente ferrítica, sacrificando outras propriedades, como a resistência ao impacto. Esse tipo de aço inoxidável apresenta dureza e ductilidade satisfatórias, ocupando cerca de 50% do campo de aplicação das ligas com alta resistência à corrosão (LIPPOLD; 2005).

Os martensíticos possuem determinadas concentrações de carbono, entre 0.1% e 0.5%, que permitem a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas e durante a etapa

de resfriamento a austenita se transforma em martensita. Esses aços possuem alta dureza e baixa ductilidade, mas com alta resistência à corrosão. Geralmente são vendidos no estado recozido, para que possam sofrer o tratamento térmico adequado e só assim obterem a estrutura martensítica (ROWCLIFFE, 2018).

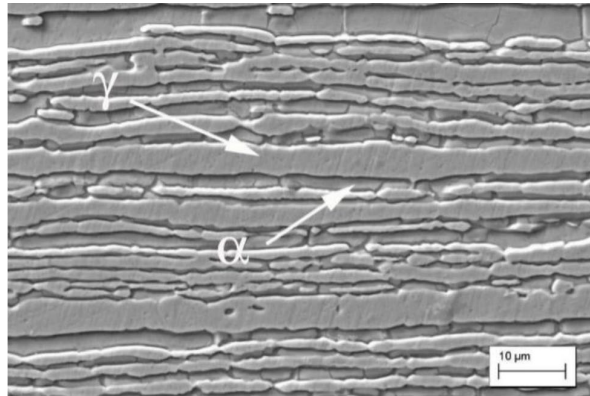
Os austeníticos tem como característica a adição de níquel como elemento de liga, permitindo transformar a estrutura ferrítica em austenítica, conseqüentemente alterando as suas propriedades. O aço mais popular dentre esse tipo é o AISI 304, com 18% de cromo e 8% de níquel, possui excelente resistência à corrosão, soldabilidade e ductilidade, tendo inúmeras aplicações (SANTOS; ANDRADE; CASTRO, 2009).

## 2.2 – AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex (DSS) são tipos especiais de aços inoxidáveis, classificados dessa forma por conta da sua microestrutura bifásica, contendo austenita (fase  $\gamma$ ) e ferrita (fase  $\alpha$ ), nas mesmas proporções. Em decorrência disso, os aços duplex apresentam excelentes resistência mecânica e à corrosão, quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos comuns. Esse tipo de aço é mais adequado para aplicações pesadas na engenharia industrial, como exemplo: indústria petroquímica, mineração, motores, indústrias offshore de óleo e gás, papel e celulose, destilarias, etc. (SARAVAN, 2017).

Os aços duplex, são usados frequentemente em ambientes agressivos, com corrosão elevada e temperaturas em torno de 350 °C. Possuem elevada resistência à corrosão em ambientes com íons halogênicos, corrosão por pite e corrosão intersticial. Essas ligas possuem uma composição de 24 a 26% de cromo (Cr), 5 a 8% de níquel (Ni), 3 a 5% de molibdênio (Mo) e 0.2 a 0.3% de nitrogênio (N). A Figura 2 caracteriza a microestrutura dos aços duplex, com a micrografia do aço UNS S32750.

Figura 2 – Microestrutura UNS S32750



Fonte: LEITE, 2019

A diferença entre os aços duplex e superduplex (SDSS) se baseia nas concentrações dos elementos de liga, fazendo com que os aços superduplex apresentem uma resistência à corrosão por pite mais elevada.

### 2.2.1 – A liga de aço superduplex UNS S32750

A microestrutura dos aços superduplex são compostas por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita, com frações volumétricas aproximadamente iguais, ou seja, 50% de ferrita e 50% de austenita. Dessa forma ele possui característica de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, com maior resistência mecânica e à corrosão que os aços austeníticos convencionais.

### 2.2.2 – Soldabilidade do aço superduplex UNS S32750

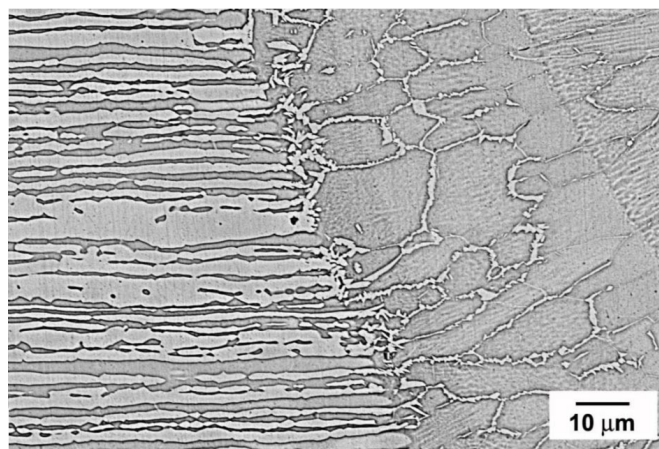
Soldagem é um processo de fabricação utilizado para realizar a união de metais por meio da fusão quase imediata do material, seguida da solidificação. A soldabilidade de um aço é a propriedade que caracteriza a facilidade com que o mesmo é soldado, sem alteração em suas propriedades mecânicas.

De maneira geral, os aços duplex e superduplex apresentam uma microestrutura desbalanceada, predominantemente ferrítica, após serem submetidos ao processo de soldagem, fato que compromete as suas propriedades. Isso acontece decorrente das altas

velocidades de resfriamento, favorecendo a formação de uma grande quantidade de ferrita, não tendo tempo suficiente para a formação da austenita. (MOHAMMED; 2017)

A Figura 3 mostra a microestrutura resultante da soldagem do aço superduplex UNS S32750 com altas velocidades de resfriamento, utilizando soldagem a laser pulsado Nd:YAG. Na Figura 3 é possível observar o metal base do lado esquerdo com a microestrutura balanceada em contraste com o cordão de solda predominantemente ferrítico do lado direito.

Figura 3 – Micrografia da zona de transição de um cordão de solda UNS S32750 com laser pulsado Nd:YAG



Fonte: DA CRUZ JUNIOR; 2019

Por isso o balanço entre a fase ferrítica e austenítica deve ser preservado na soldagem, para não se perder as vantagens que os aços inoxidáveis superduplex apresentam sobre os aços inoxidáveis convencionais. O balanço pode ser obtido por meio da escolha correta dos parâmetros de soldagem, como a quantidade de calor e a velocidade de resfriamento adequada, ou por meio da adição de elementos estabilizadores. (MUTHUPANDI, 2005)

Nesta pesquisa o níquel e o cobre eletrolítico puro são estudados como elementos austenitizante, promovendo a formação e estabilização de austenita, desenvolvendo um ganho nas propriedades do aço como resistência mecânica e resistência a corrosão. O percentual de austenita é elevado pois o elemento estabilizador realiza do aumento da temperatura inicial de transformação do aço, fazendo com que as propriedades não sejam perdidas durante a solda.

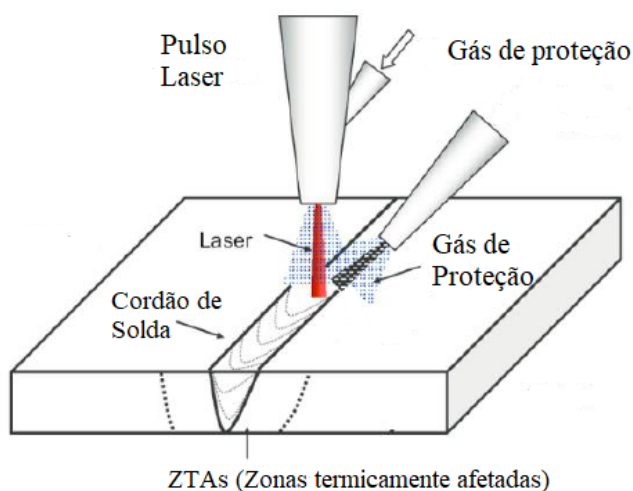
Entretanto nem todos os métodos de soldagem proporcionam a possibilidade de adição de um elemento estabilizador. Dessa forma é importante escolher um processo adequado.

### 2.3 – SOLDAGEM A LASER PULSADO Nd:YAG

O processo de soldagem a laser é bastante utilizado nas indústrias atuais, pois é um processo muito versátil e veloz, garantindo uma ótima qualidade de solda sem o intermédio do operador. (BONUTI, 2018)

A soldagem a laser (Laser Beam Welding - LBW) é muito empregada devido a sua alta precisão na incidência do feixe. O bombardeamento de luz altamente concentrada realiza a fusão do material no ponto em que incide, originando uma abertura conhecida como keyhole, a qual atinge uma determinada profundidade do material. Esse tipo de soldagem é caracterizado pelo balanço entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume no qual uma poça líquida é formada, cuja as dimensões são resultantes da radiação absorvida do laser incidente, a linha de junta original é eliminada pela propagação dessa poça líquida unindo os componentes desejados. Esquema representado na Figura 4.

Figura 4 – Formação do Cordão de Solda Laser



Fonte: CZERWINSKI F. 2011

A soldagem a laser é classificada como um processo de alta velocidade, ausência de contato entre a fonte de calor e o material a ser soldado, baixo aquecimento de entrada e ZTAs (Zonas termicamente afetadas, ou “Heat Affected Zone – HAZ”) praticamente inexistentes, por conta de a energia gerada ser muito concentrada, resultando em um volume de material afetado muito pequeno.

As variáveis do processo de soldagem a laser que devem ser escolhidos com cuidado são: Energia do feixe, Distância focal, velocidade de soldagem, refletividade das peças e duração do pulso (para equipamentos de laser pulsado). (CZERWINSKI F. 2011)

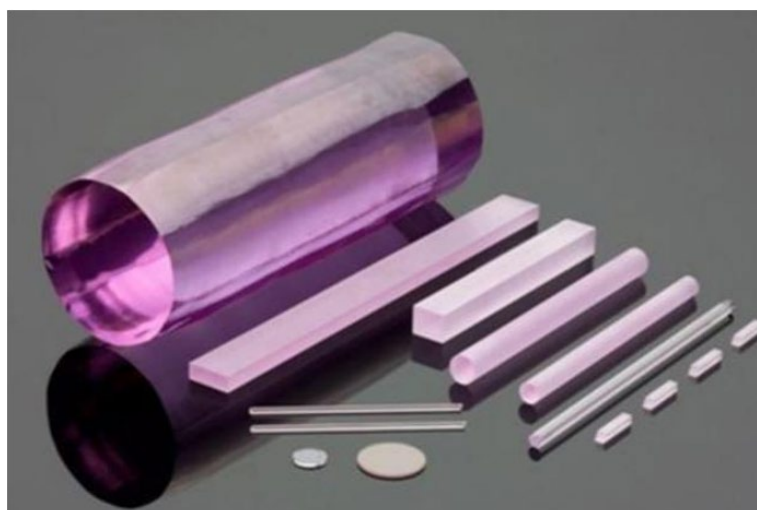
Esses processos podem ser classificados de acordo com diferentes grupos, de acordo com a excitação do meio ativo, a técnica utilizada na soldagem ou a forma como o feixe incide sobre o material. Neste trabalho, o processo de soldagem a laser estudado utiliza como meio ativo o cristal artificial de Nd: YAG, o qual é excitado de forma pulsada com luz de criptônio. Para evitar problemas com a qualidade do cordão, relacionados ao afundamento na poça de fusão, é recomendado o uso de um gás inerte para proteger a zona de fusão (“Shielding Gas”). Exemplo de gases inertes: hélio, argônio e nitrogênio.

Para realizar a soldagem a laser são necessários os equipamentos: fonte de energia e seus controles, a fonte do laser e seu sistema de refrigeração.

O laser Nd:YAG está inserido na categoria de lasers no estado sólido. O termo YAG significa Yttrium Aluminum Garnet ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), é um material muito utilizado como base para vários lasers de estado sólido. O cristal Nd:YAG é transparente e considerado o mais comum nas aplicações industriais. Ele proporciona uma radiação com comprimento de onda de 1.06 micrometros ( $\mu m$ ), facilmente transmitidas. (DA CRUZ JUNIOR; 2019)

A Figura 5, ilustra o cristal Nd:YAG.

Figura 5 – Cristais Nd:YAG



Fonte: DA CRUZ JUNIOR; 2019

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve o planejamento experimental e os procedimentos utilizados para obter a caracterização das microestruturas e as propriedades de microdureza e resistência à corrosão.

#### 3.1 – LISTA DE MATERIAIS

Para realização deste projeto foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Equipamento de Soldagem Laser Pulsado Nd:YAG modelo UW-150A (United Winners);
- Chapas de aço superduplex UNS S32750 de 1.5 mm de espessura;
- Guilhotina para chapas metálicas;
- Retificadora Plana de Precisão MELLO P25;
- Lixadeiras e lixas de granulometria 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1200 e 1500;
- Politriz com solução de alumina 1, 0.3 e 0.05  $\mu\text{m}$ ;
- Cuba Ultrassônica de 1 litro com temporizador analógico;
- Resina acrílica com catalisador, para embutimento a frio;
- Molde siliconado para embutimento metalográfico  $\text{Ø}30$  mm;
- Reagente Behara modificado;
- Microscópio Óptico Estéreo ZEISS, Discovery V8;
- Microscópio Eletrônico de Varredura, ZEISS, modelo EVO LS15;
- Tiras de níquel eletrolítico com diferentes espessuras;
- Barra de Cobre eletrolítico puro;
- Fonte de corrente contínua;
- Sulfato de Cobre pentahidratado para realização da eletrólise;
- Software para processamento de Imagens ImageJ freeware;
- Shimadzu DUH 211S Dynamic Ultra Micro Hardness Tester;

### 3.2 – SOLDAGEM

Foi escolhido como metal base o aço UNS S32750 inoxidável superduplex (SDSS), a sua composição é apresentada na Tabela 1 e suas propriedades mecânicas na Tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do aço UNS S32750

<b>%C máx.</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Ni</b>	<b>%N</b>	<b>%Mo</b>	<b>%Si</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Mn</b>
0.030	25.0	7.0	0.30	4.0	0.8	-	1.2

Fonte: Adaptado de (ROSSI; ROCHA; NEVES, 2013)

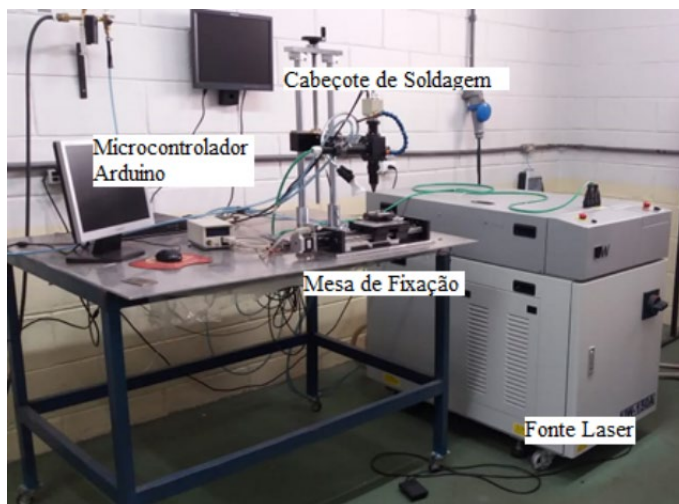
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do UNS S32750

<b>UNS</b>	<b>Limite Resistência (Mpa)</b>	<b>Limite Escoamento (Mpa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Dureza Vickers</b>
S32750	800 - 1000	550	25	290

Fonte: Adaptado de (ROSSI; ROCHA; NEVES, 2013)

Os parâmetros de soldagem foram pré-definidos e mantidos constantes durante todo o estudo, tanto para o cobre quanto para o níquel: energia de pulso igual a 10J, potência de pico de 2 kW, largura temporal de 5 ms, velocidade de soldagem 1 mm/s, profundidade de penetração próxima de 1 mm e frequência de 9 Hz para atingir sobreposição de 90%.

As soldas posicionadas em juntas de topo, com feixes de diâmetro aproximadamente igual a 1 mm, ângulo de 90° e utilizando o gás inerte Argônio para proteção.

Figura 6 – Máquina de Soldagem a Laser Pulsado Nd:YAG, modelo UW-150<sup>a</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor.

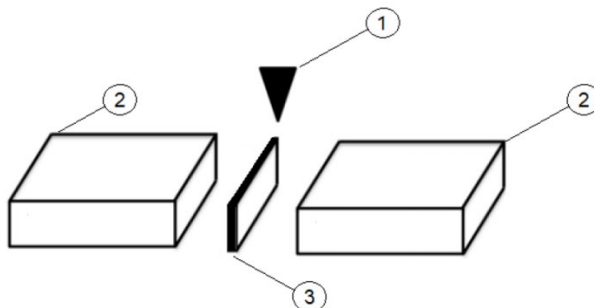
Para um bom procedimento de soldagem, é necessário garantir um bom contato entre as juntas, para isso as superfícies das amostras foram retificadas por meio da Retificadora Plana de Precisão MELLO P25, bem como um processo de limpeza por meio do lixamento com lixa d'água número 1500 removendo impurezas que poderiam prejudicar a análise das amostras. Alguns corpos de prova não necessitaram da retificação pois os cortes foram realizados pelo procedimento de eletroerosão a fio, garantindo um bom contato entre as superfícies.

### 3.3 – ADIÇÃO DE NÍQUEL

A adição de níquel foi feita por meio da inserção de tiras finas do material entre as peças de metal base, como mostra a Figura 7. Foram avaliadas 5 condições diferentes com os mesmos parâmetros de soldagem, mas variando as espessuras da tira de níquel, de 30  $\mu\text{m}$  até 70  $\mu\text{m}$ , variando de 10 em 10  $\mu\text{m}$ . A Tabela 3 identifica as 5 amostras de níquel e as respectivas espessuras de cada tira.

Figura 7 -- Esquema ilustrando a adição de níquel na Soldagem

1) Pulso Laser; 2) Metal Base; 3) Tira de Níquel



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Amostras de níquel e espessuras das tiras

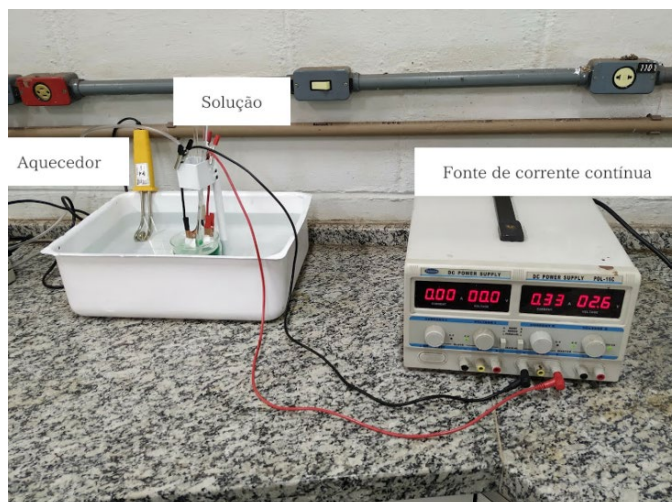
Nome da amostra	Espessura da tira de Níquel ( $\mu\text{m}$ )
Ni30	30
Ni40	40
Ni50	50
Ni60	60
Ni70	70

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 – ADIÇÃO DE COBRE

A adição do cobre puro foi feita por meio de revestimento eletrolítico, realizado em uma das superfícies da junta soldada. A área de cada eletrólise foi mantida aproximadamente constante, próxima de  $650 \text{ mm}^2$ , e a densidade de corrente de  $2 \text{ A/dm}^2$ , para que as espessuras de camada de cobre fossem função apenas do tempo de reação. Foram feitas três amostras com diferentes tempos, buscando obter a espessura ideal para o balanço de fases austenítica e ferrítica. A Figura 8 ilustra o aparato utilizado para realizar a eletrodeposição.

Figura 8 – Aparato Experimental da Eletrodeposição do Cobre



Fonte: Elaborado pelo autor.

A solução eletrolítica foi ionizada com o sal sulfato de cobre pentahidratado e ácido sulfúrico nas seguintes proporções: 10 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 50g de CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O e 500ml de água deionizada.

Inicialmente foram adotados tempos pequenos como 5 minutos e 10 minutos, porém os resultados apresentaram diferenças insignificantes quando comparados. Em decorrência disso, foram adotados tempos maiores e devido à dificuldade de preparação das amostras foram adotadas apenas 3 condições com intervalos de tempo de 20 minutos.

Os tempos de eletrolise das amostras foram: 60, 80 e 100 minutos. As respectivas espessuras calculadas estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Amostras de Cobre e espessuras das camadas depositadas

Nome da amostra	Espessura da Camada depositada (µm)
Cu60	38,70
Cu80	75,90
Cu100	163,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

A espessura da camada de cobre, obtida com a eletrodeposição, foi calculada com a Equação 1<sup>[13]</sup>:

$$L = \frac{m}{A \cdot \rho} \quad [1]$$

Na qual L é a espessura, A é a área da superfície,  $\rho$  a densidade do metal de deposição e m é a massa depositada. Na eletrólise, a massa depositada pode ser calculada utilizando a Lei de Faraday<sup>[13]</sup>:

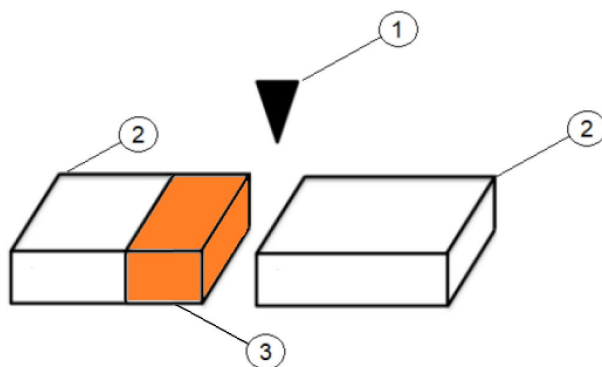
$$m = \frac{M \cdot i \cdot t}{n \cdot F} \quad [2]$$

Na qual M é a massa molecular do elemento a ser depositado, i é a corrente, t o tempo de deposição, n a carga iônica e F a constante de Faraday.

A Figura 9 ilustra o esquema de soldagem para as amostras de Cobre, identificando que apenas uma superfície é revestida para a soldagem.

Figura 9 - Esquema ilustrando a adição de cobre na Soldagem

1) Pulso Laser; 2) Metal Base; 3) Eletrodeposição de Cobre



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a realização da soldagem, foi retirada de cada corpo de prova amostras para realizar as análises da microestrutura e de suas propriedades.

Primeiramente o corpo de prova foi seccionado utilizando a guilhotina ou por meio de um Cut-off metalográfico obtendo amostras do cordão por meio de cortes transversais (sentido perpendicular à soldagem).

Em seguida foi realizado o embutimento em resina a frio com resina EPOXI 2001 0,670 kg e endurecedor EPOXI 3154 0,330 kg, misturados em uma proporção de 2:1. Após a secagem das amostras, foi realizado um tratamento superficial, com lixamento gradual até a lixa de granulometria 1500, seguindo as normas ASTM E3-01<sup>[14]</sup> seguidas de polimento gradual com aluminas de 1, 0.3 e 0.05  $\mu\text{m}$ .

Realizado o tratamento superficial, foi feito o ataque químico, utilizando o reagente Behara modificado (0,4 g de metabissulfito de potássio, 20 ml de HCl, e 100 ml de H<sub>2</sub>O), embebidos em algodão e friccionados de 10 a 15 segundos.

### 3.6 – ANALISE DA MICROESTRUTURA

A caracterização microestrutural foi feita por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que realizou fotografias das zonas de transição do metal base para o cordão de solda, e zona fundida. Proporcionando a análise da formação da microestrutura em cada corpo de prova, buscando observar o balanceamento de fases austenita-ferrita, com processamento de imagens realizado pelo freeware ImageJ.

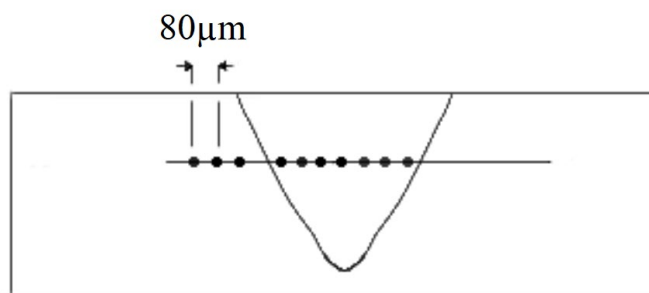
Para as amostras com adição de cobre foi feita uma análise macroscópica, utilizando Estéreo Microscópio Zeiss – Discovery V8, possibilitando identificar a qualidade do cordão, verificando a presença de trincas ou coloração das ZTAs.

### 3.7 – ENSAIOS DE MICRODUREZA

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado também com amostras de corte transversal, por meio de indentações na horizontal do cordão de solda, a Figura 10 ilustra a esquematização do ensaio de microdureza.

As indentações foram realizadas com distância de 80 $\mu\text{m}$ , respeitando-se a norma ASTM E384<sup>[15]</sup> que estabelece uma distância mínima de 2,5 vezes o diâmetro da indentação.

Figura 10 – Ilustração do ensaio de Microdureza Vickers



Fonte: Adaptado de [12].

### 3.8 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Para as amostras de cobre foi feito um ensaio de polarização e potenciodinâmica, que permitiu determinar os potenciais de resistência à corrosão e os potenciais de Pitting.

Já para as amostras de níquel, foi feito o estudo de ensaios CPT (Critical Pitting Temperature), visto que os aços inoxidáveis duplex, muitas vezes, mostram resistência ao ensaio tradicional de polarização e potenciodinâmica. (DA CRUZ JUNIOR; 2019)

A partir do ensaio CPT, se determina uma faixa de potenciais de pite em função da temperatura. De forma que quanto maior a temperatura, maior a resistência do material. O ensaio é feito utilizando um verniz termicamente resistente nas amostras, deixando uma área exposta de 1 cm<sup>2</sup>, para avaliar a formação dos pites. Com o auxílio de um potenciostato, equipados com duas células contendo uma solução aquosa de NaCl, é possível simular as temperaturas marítimas a fim de obter a formação dos pites.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

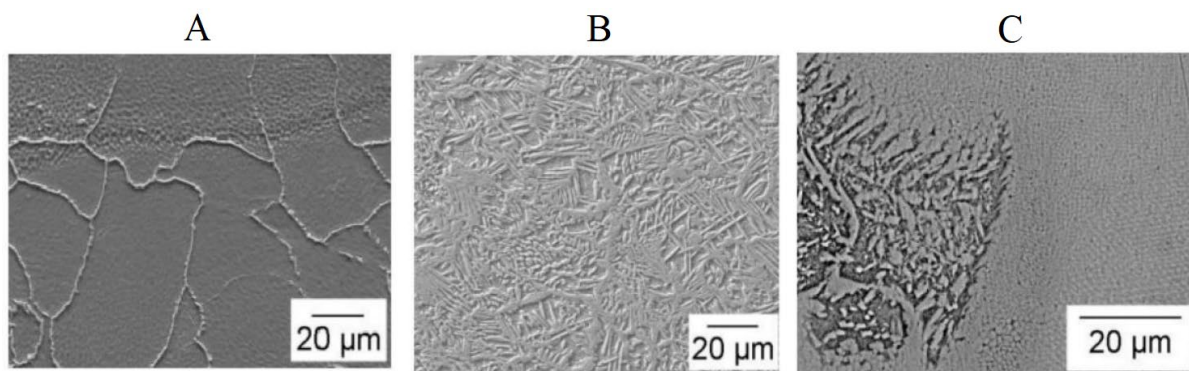
### 4.1 – RESULTADOS PARA A ADIÇÃO DE NÍQUEL

#### 4.1.1 – Caracterização microestrutural para a adição de níquel

As microestruturas para as 5 condições de espessura de níquel e para a soldagem autógena estão representadas nas Figuras 11 e 12. A austenita é a parte mais clara da imagem, enquanto a ferrita é a parte escura.

Figura 11 - Microestruturas para a adição de níquel, autógena e extremos 30 e 70  $\mu\text{m}$

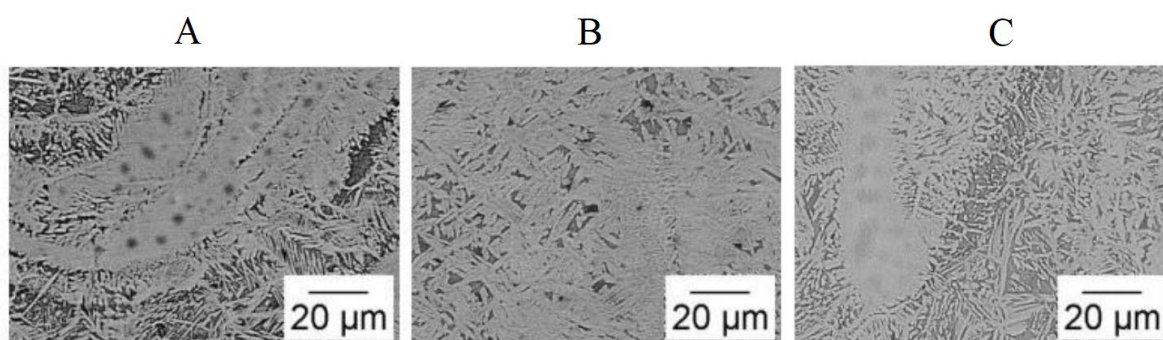
A- Condição autógena; B – Ni30; C – Ni70



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 - Microestruturas para a adição de níquel, amostras intermediárias 40, 50 e 60  $\mu\text{m}$

A- Ni40; B – Ni50; C – Ni60



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se por meio das Figuras 11 e 12 que a adição do níquel promove o enriquecimento da fase austenítica após o processo de soldagem, formando grãos primários, não apenas nos contornos de grão. A adição da tira de 30  $\mu\text{m}$  proporcionou um bom balanceamento de fases, enquanto as outras amostras apresentaram uma predominância de

austenita, que aumentou conforme o aumento da espessura da tira adicionada. A análise do balanceamento de fases foi feita utilizando o software ImageJ e está representada na Tabela 5.

Tabela 5 – Média das Razões volumétricas da microestrutura das amostras de Níquel

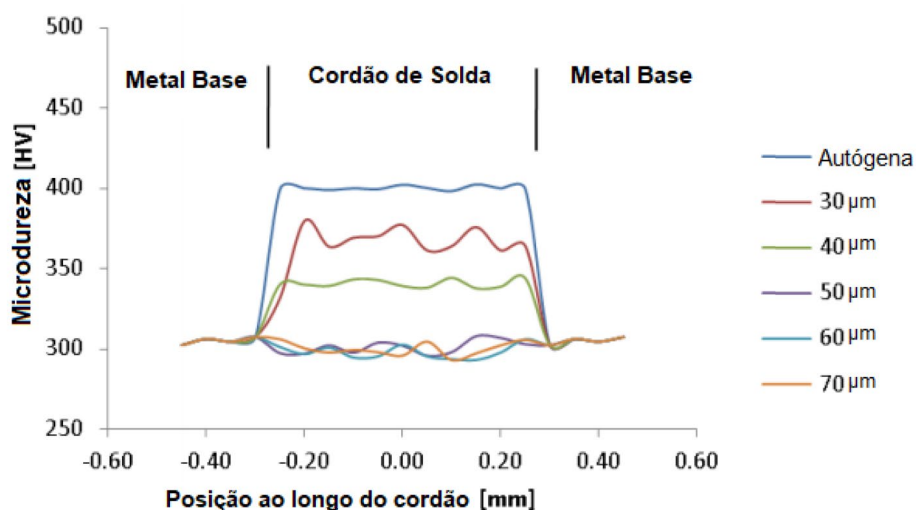
Amostras	30 $\mu\text{M}$	40 $\mu\text{M}$	50 $\mu\text{M}$	60 $\mu\text{M}$	70 $\mu\text{M}$
<b>Razão</b>					
<b>%AUSTENITA</b>	51,8	69,8	78,9	81,3	95,4
<b>%FERRITA</b>	48,2	30,2	21,1	18,7	4,6

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.2 – Ensaio de microdureza para a adição de níquel

O perfil de microdureza foi obtido para cada amostra e colocado no mesmo gráfico, Figura 13.

Figura 13 - Perfis de Microdureza para a adição de níquel



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no perfil do gráfico da Figura 13, foi tirada a média da microdureza das amostras, os valores foram representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Média da microdureza para as amostras de adição de níquel

Amostras Região	30 $\mu\text{M}$	40 $\mu\text{M}$	50 $\mu\text{M}$	60 $\mu\text{M}$	70 $\mu\text{M}$
Cordão de solda [HV]	365	342	303	298	298
Metal base [HV]	307	307	307	307	307

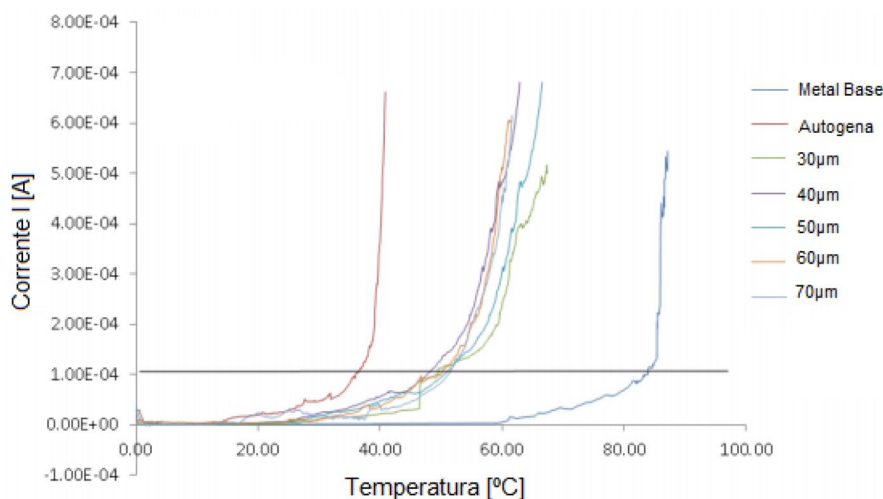
Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que os valores de microdureza diminuem conforme a espessura da tira de níquel aumenta, ou seja, quando a quantidade de austenita na microestrutura aumenta. Para as tiras de 50, 60 e 70  $\mu\text{m}$  os valores são próximos visto que a quantidade de austenita na microestrutura é parecida, já para os valores de 30 e 40  $\mu\text{m}$  os valores de dureza foram mais altos, visto que a fração volumétrica de austenita é menor, com maior quantidade de ferrita, resultando em uma maior dureza.

#### 4.1.3 – Ensaio de resistência à corrosão para a adição de níquel

Os resultados do ensaio CPT estão representados pelo gráfico da Figura 14.

Figura 14 - Curvas CPT para as amostras de adição de níquel



Fonte: Elaborado pelo autor

Para os ensaios de corrosão, a soldagem autógena mostra uma redução drástica na resistência a corrosão, visto que a razão de ferrita é mais alta, a média das temperaturas de

Pitting foi aproximadamente 36°C, enquanto para o metal base é próximo de 84°C. A adição de níquel mostrou-se eficiente no aumento da resistência à corrosão, com temperaturas de pite próximas de 50°C, sendo que quanto mais níquel adicionado maior a temperatura.

#### **4.1.4 – Discussão dos resultados para a adição de níquel**

A adição de níquel afetou diretamente na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material, na medida que quanto mais níquel adicionado, mais austenita é atingida na razão volumétrica. Como dito anteriormente nos resultados, a condição que apresentou um melhor balanço de fases, foi a soldagem com adição da tira de 30 µm de níquel, resultando na proporção de 48,2% ferrita e 51,8% austenita, sendo possível conseguir bons valores das propriedades mecânicas, conseqüentemente uma boa soldabilidade, com cordões sem trincas ou muitos poros.

Entretanto, mesmo o balanço de fases sendo próximo do metal base, o valor de microdureza foi mais elevado, podendo ser explicado pela diferença na disposição da austenita na microestrutura. Os Valores de microdureza foram diminuindo conforme a quantidade níquel adicionado foi aumentando, valores próximos do metal base foram obtidos nas amostras de 50, 60 e 70 µm, entretanto o balanço de fases apresentou elevada razão de austenita.

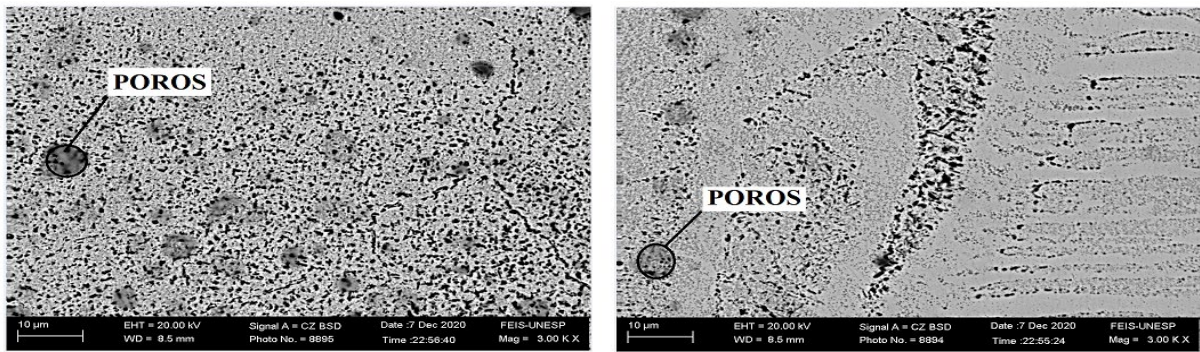
Portanto a adição de níquel mostra-se efetiva para atingir uma boa soldabilidade e a conservação da propriedade mecânicas de dureza e propriedade de resistência à corrosão. Entretanto é necessário encontrar o equilíbrio da quantidade de níquel a ser adicionado, com as propriedades desejadas.

## **4.2 – RESULTADOS PARA A ADIÇÃO DE COBRE**

### **4.2.1 – Caracterização microestrutural para a adição de cobre**

As microestruturas para as 3 condições de eletrodeposição de cobre estão representadas nas Figura 15, 16 e 17. Foi feita também uma análise macroscópica dos cordões de solda, com vistas superior e frontal, no intuito de visualizar poros e trincas que a solda da amostra Cu100 apresentou, Figura 18.

Figura 15 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu60

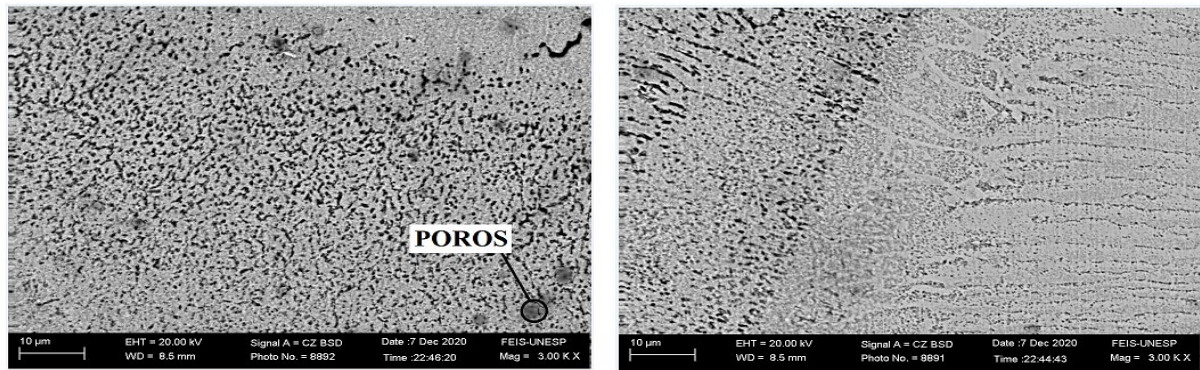


A - Zona Fundida

B - Zona de Transição

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu80

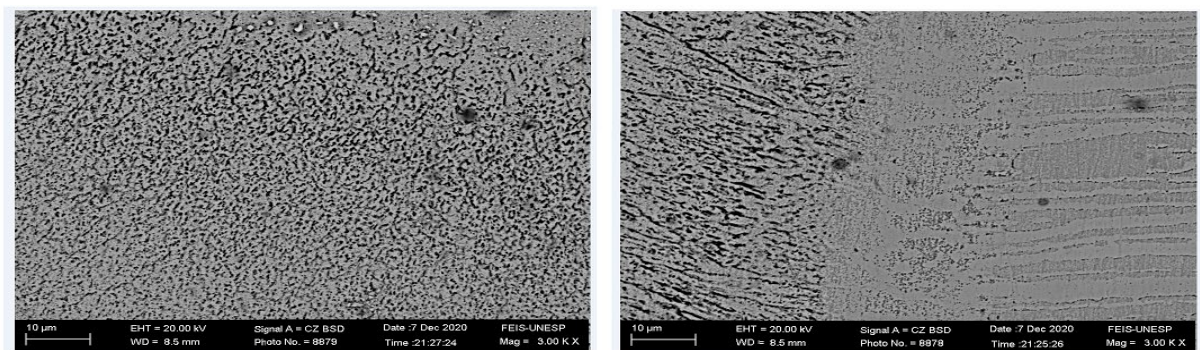


A - Zona Fundida

B - Zona de Transição

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Microestruturas para a adição de cobre, Cu100



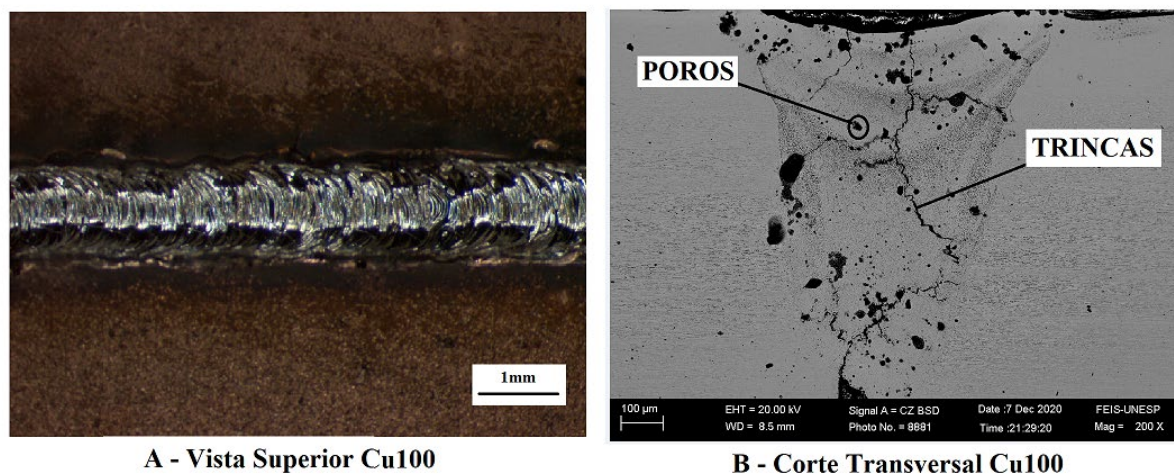
A - Zona Fundida

B - Zona de Transição

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que para todas as amostras de cobre, na região fundida, há uma microestrutura predominantemente ferrítica, com austenita secundária. Observa-se também a presença de poros.

Figura 18 – Macroestrutura para amostras de Cu100



Fonte: Elaborado pelo autor

Com as imagens da Figura 18, pode-se observar que ocorre a formação de trincas e poros visíveis macroscopicamente, prejudicando a soldabilidade com adições de cobre em grande quantidade.

A análise do balanceamento de fases foi feita utilizando o software ImageJ e está representada na Tabela 7.

Tabela 7 - Média das Razões volumétricas da microestrutura das amostras de Cobre

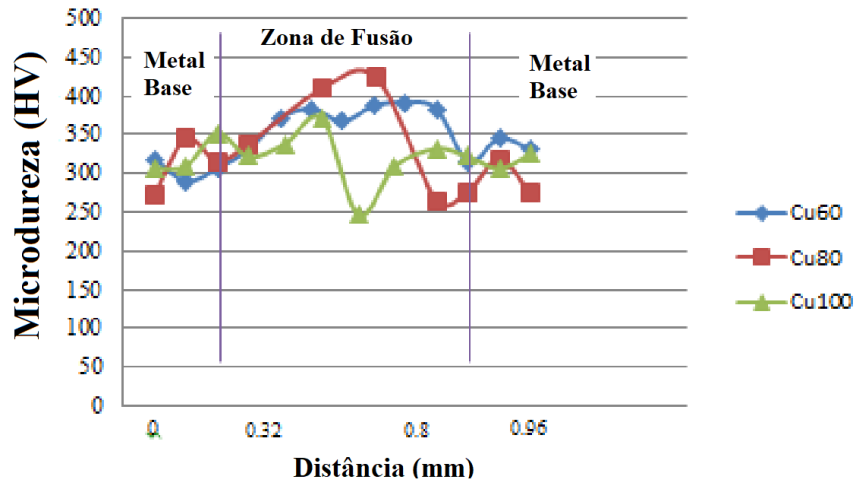
AMOSTRAS	CU60	CU80	CU100
<b>RAZÃO</b>			
<b>% AUSTENITA</b>	38,07	33,88	48,43
<b>% FERRITA</b>	61,93	66,12	51,57

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 – Ensaio de microdureza para a adição de cobre

O Gráfico da Figura 19 ilustra o perfil de microdureza para as 3 amostras de cobre.

Figura 19 - Perfis de Microdureza para a adição de cobre



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que a microdureza é mais alta na zona fundida, quando comparada com o metal base, tornando o metal mais frágil, notando a ocorrência de trincas no processo de soldagem, fazendo com que a soldabilidade diminua conforme o aumento das proporções de cobre.

A partir dos perfis da Figura 19, foi tirada a média dos valores de microdureza para as amostras de cobre, Tabela 8.

Tabela 8 - Média da microdureza para as amostras de adição de cobre

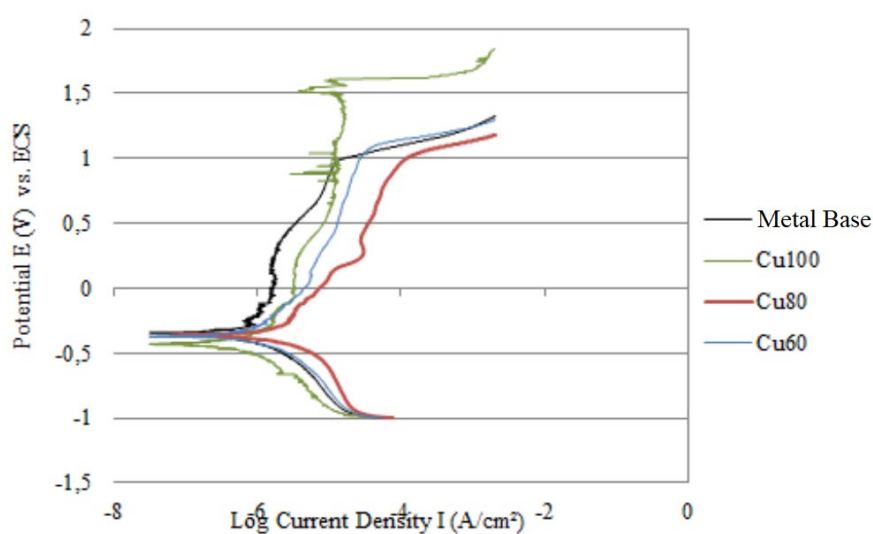
AMOSTRAS	CU60	CU80	CU100
<b>REGIÃO</b>			
<b>ZONA DE FUSÃO</b>	376	371	352
<b>[HV]</b>			
<b>METAL BASE [HV]</b>	307	307	307

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.3 – Ensaio de resistência à corrosão para a adição de cobre

O ensaio de corrosão estudado para a adição de cobre foi o de polarização potenciodinâmica. A amostra de material metálico é disposta em uma solução eletrolítica, na qual ocorre a diferença de potencial entre o metal e a solução. O estudo foi feito em uma circunferência de 10 mm, de modo que fosse incluído partes do cordão de solda e do metal base. O Gráfico da Figura 20 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica para as amostras de cobre.

Figura 20 – Curvas de polarização potenciodinâmica para as amostras de adição de cobre



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das curvas da Figura 20, foram tirados os valores de potencial de corrosão e potencial de Pitting, Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de potencial de corrosão para as amostras de adição de cobre

AMOSTRAS	CU60	CU80	CU100	METAL BASE
Potencial de corrosão (mV)	-377,5	-361,1	-437,0	-357,8
Potencial de Pitting (mV)	1050	790	1611	997

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação a resistência à corrosão, foi possível observar um aumento no potencial de pite para as amostras de cobre, quando comparado com o metal base. A amostra com

maiores resistências é a amostra Cu100, com potencial de pite próximo de 1611 mV, no entanto a austenita secundária não é tão resistente à corrosão quanto a austenita primária, este fator somado ao fato de aparecimento de trincas, favorecem a formação de pites no cordão de solda.

#### **4.2.4 – Discussão dos resultados para a adição de cobre**

A partir dos resultados apresentados para a adição de cobre, pode-se observar que o cobre é um elemento com potencial gamagênico muito baixo, visto que as amostras apresentaram apenas a formação de austenita secundária.

A proporção de austenita mais alta foi apresentada na amostra de 100 minutos e mesmo sendo próxima de 50% não é o suficiente para garantir as propriedades.

Sendo assim, aumentar o tempo de eletrodeposição para tentar atingir as proporções de austenita desejadas e a formação de grãos primários da mesma se torna inviável, visto que os tempos de eletrodeposição vão ficando cada vez mais altos, restringindo os benefícios da velocidade da soldagem a laser.

### **5 – CONCLUSÕES**

As seguintes conclusões podem ser tiradas com relação à adição de níquel como elemento gamagênico na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750:

- O níquel demonstra um grande potencial como elemento gamagênico. A sua adição afetou diretamente a formação de austenita, de forma proporcional, ou seja, quanto mais níquel adicionado mais austenita será formada. Além de apresentar a formação de austenita primária.
- A amostra de Ni30 foi a que mais se aproximou da proporção de austenita desejada, com o melhor balanceamento de fases. Entretanto a sua dureza foi um pouco maior do que a dureza do metal base. Fato que ocorre por conta da morfologia e distribuição da austenita na zona fundida.
- As amostras com quantidade de níquel mais elevada apresentaram valores de dureza mais baixos, visto que ocorre a formação de uma proporção mais alta de austenita e mais baixa de ferrita, diminuindo assim a dureza.

- As amostras com adição de níquel apresentaram maior resistência à corrosão quando comparadas com a soldagem autógena.
- De maneira geral, a adição de níquel apresenta boa performance na soldagem a laser, possibilitando atingir o balanço de fases e boas propriedades mecânicas.

As seguintes conclusões podem ser tiradas com relação à adição de cobre como elemento gamagênico na soldagem a laser pulsado ND: YAG, do aço superduplex UNS S32750:

- O cobre demonstra um potencial muito baixo como elemento gamagênico, com baixo poder austenitizante, fazendo com que para atingir o balanço de fases é necessária uma grande quantidade do elemento e um maior tempo de eletrodeposição, dificultando a soldagem.
- A adição de cobre causa defeitos no cordão de solda, como a formação de trincas e porosidades, por conta do baixo ponto de fusão quando comparado com o metal base.
- A amostra de cobre mais próxima de atingir o balanço de fases foi a Cu100, porém o valor não foi satisfatório, de forma que ocorreu apenas a formação de austenita secundária.
- Os resultados do teste de resistência a corrosão para o cobre foram um pouco melhores quando comparados com o metal base, com potenciais de pite mais elevados, principalmente para a amostra Cu100. Entretanto, a presença de poros e trincas contribuem para a formação de pites no cordão de solda.

## 6 – REFERÊNCIAS

[1] - S. Saravan, K. Raghukandan, N. Sivagurumanikandan, Pulsed Nd: YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Illinois, v. 25, p. 284-289, 2017.

- [2] - Z. Zhang et al., Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joints, *Applied Surface Science*, Breda, v. 404, p. 110-128, 2017.
- [3] - MIRAKHORLI, F.; GHAINI, F. M.; TORKAMANY, M. Development of weld metal microstructures in pulsed laser welding of duplex stainless steel. *Journal of materials engineering and performance*, Springer, v. 21, n. 10, p. 2173–2176, 2012.
- [4] - BOLUT, M. et al. Yb-fiber laser welding of 6 mm duplex stainless steel 2205. *Physics Procedia*, Elsevier, v. 83, p. 417–425, 2016.
- [5] - V. Muthupandi et al., Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31803) weld metals, *Materials Letters*, Erlagen, v. 59, p. 2305-2309, 2005.
- [6] – STAINLESS STEEL PASSIVATION PROCESS; Nitty Gritty: Stainless steel specialists; c2021; Disponível em: <https://www.nitty-gritty.it/en/stainless-steel-passivation-process/> - Acesso em: 24/05/2021
- [7] - LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [8] - C. G. S. Leite et. al., Nd: YAG Pulsed Laser Dissimilar Welding of UNS S32750 Duplex with 316L Austenitic Stainless Steel, *Materials*, Basel, v. 12, 2019.
- [9] - ROSSI, W. de; ROCHA, G. A. da; NEVES, M. D. M. das. Soldagem de Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32750 com Laser Pulsado de Nd: YAG. 2013. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/PDFS/COBEF2013-0056.PDF>
- [10] - BONUTI, R. d. S. Efeito da Adição de Níquel e Nitrogênio na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Superduplex UNS S32750 Soldadas com Laser Pulsado Nd: YAG. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/handle/11449/154774>

[11] - CRUZ JUNIOR, Eli J. Application of nickel as metal addition in the union of UNS S32750 superduplex stainless steel plates with Nd: YAG pulsed laser welding; Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira 2019.

[12] – SELOTO B. B. Adição de elementos gamagênicos na soldagem de chapas de aço superduplex uns s32750 por laser pulsado Nd:YAG. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira 2021.

[13] - PEREIRA, L. A. Deposição eletrolítica de filmes metálicos sem banho de imersão. Educação & Tecnologia, v. 5, n. 1, 2000.

[14] - ASTM E3-01, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, [www.astm.org](http://www.astm.org)

[15] - ASTM E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)

[16] – SELOTO, Bruna B. et al., ANALYSIS OF COPPER ADDITION BY ELECTROLYSIS ON THE MICROSTRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE OF LASER WELDED SUPER-DUPLEX STAINLESS STEEL Department of Mechanical Engineering, São Paulo State University COBEM – November 22-26, 2021 Virtual Congress, Brazil.