

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

**RAIRTON BARBOSA MONTEIRO**

**SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO ND:YAG ENTRE  
A LIGA INCONEL 625 E O AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750**

Ilha Solteira

2021

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

**RAIRTON BARBOSA MONTEIRO**

**SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO ND:YAG ENTRE  
A LIGA INCONEL 625 E O AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

Ilha Solteira  
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Monteiro, Rairton Barbosa.

M775s Soldagem dissimilar autógena com laser pulsado Nd:YAG entre a liga Inconel 625 e o aço inoxidável superduplex UNS S32750 / Rairton Barbosa Monteiro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021  
66 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2021

Orientador: Vicente Afonso Ventrella  
Inclui bibliografia

1. Soldagem dissimilar autógena. 2. Laser pulsado Nd:YAG. 3. Inconel 625 e superduplex UnNS S32750.

  
Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO ND:YAG  
ENTRE A LIGA INCONEL 625 E O AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS  
S32750

AUTOR: RAIRTON BARBOSA MONTEIRO

ORIENTADOR: VICENTE AFONSO VENTRELLA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA  
MECÂNICA, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ELI JORGE DA CRUZ JUNIOR (Participação Virtual)  
Campus de Votuporanga / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 08 de março de 2021

## DEDICO

Aos meus familiares, amigos e docentes que me apoiaram nessa conquista e são minha inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por pela vida e por se fazer presente durante minha vida.

Ao professor Vicente Afonso Ventrella pela orientação deste trabalho, meu eterno agradecimento e inspiração.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica de UNESP – Ilha Solteira por colaborarem com a minha formação profissional e pessoal.

Ao professor Carlos Alberto Picone e Vitor Silveira Rolin.

Aos meus pais Sebastião Monteiro de Araújo e Mauryvoneida Aparecida Barbosa Monteiro por todo apoio, conselhos e compreensão, em especial por todo carinho ao longo desta caminhada.

Aos amigos que acompanharam mais de perto esta etapa.

A todos os técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização deste trabalho.

Aos professores Ruis Camargo Tokimatsu e Juno Gallego pelos conselhos e por toda ajuda concedida de bom grado.

Ao professor Eli Jorge Cruz, que desde a época da minha graduação me inspirou a continuar estudando.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Sonhar é o verbo mais bonito que existe, mas realizar é o verbo mais importante da vida”

(Raphael Gouvea Monteiro)

## RESUMO

O aço inoxidável superduplex e o Inconel 625 são materiais muito importantes tanto economicamente, quando pelas suas aplicações. O superduplex é conhecido por sua microestrutura binária, com frações aproximadas em 50% ferrita e 50% austenita combinando resistência à corrosão com resistência mecânica, quando soldado ocorre o desbalanceamento entra as fases da microestrutura do metal de solda, havendo formação excessiva de ferrita. O Inconel é conhecido por sua ótima resistência a corrosão por se tratar de uma liga de níquel, que possui papel estabilizador de austenita nos aços inoxidáveis duplex. Este trabalho tem como objetivo avaliar a soldagem à laser Nd:YAG pulsado, autógena e dissimilar, do Inconel 625 e superduplex UNS S32750, a fim de analisar a manutenção das resistências a corrosão de ambos materiais. A soldagem foi feita em uma junta de topo, variando a frequência do laser em quatro parâmetros de 2,2 hertz até 9,0 hertz. O gás de proteção utilizado foi o argônio puro, com vazão de 15 l/min. Os ensaios realizados para a pesquisa foram: análise macrográficas, caracterização microestrutural e teste de corrosão. Para revelar os detalhes no metal de solda foi utilizado um ataque químico com o ácido oxálico. As macrografias revelaram que as amostras estão livres de descontinuidades macroscópica no cordão de solda, além de possuir penetração adequada do cordão. As soldas não apresentaram descontinuidades como porosidades e trincas, além de penetração adequada. Os corpos de prova foram submetidos a testes de corrosão em água do mar com eletrólito AMN Guarujá –SP, os testes corrosão se mostraram promissores sendo mais resistente que o superduplex, graças a grande quantidade de níquel e cromo oriundos do Inconel.

**Palavras-chave:** Soldagem à laser. Superduplex. Inconel 625. Corrosão.



## ABSTRACT

Superduplex stainless steel and Inconel 625 are very important materials both economically and for their applications. The superduplex is known for its binary microstructure, with approximate fractions of 50% ferrite and 50% austenite combining corrosion resistance with mechanical resistance, when welded there is an imbalance between the phases of the weld metal microstructure, with excessive formation of ferrite. Inconel is known for its excellent resistance to corrosion because it is a nickel alloy, which has a stabilizing role of austenite in duplex stainless steels. This work aims to evaluate the pulsed, autogenous and dissimilar Nd: YAG laser welding of the Inconel 625 and UNS S32750 superduplex, in order to analyze the maintenance of the corrosion resistance of both materials. The welding was done in a top joint, varying the frequency of the laser in four parameters from 2.2 hertz to 9.0 hertz. The shielding gas used was pure argon, with a flow rate of 15 l / min. The tests carried out for the research were: macrographic analysis, microstructural characterization and corrosion test. To reveal the details in the weld metal, a chemical attack with oxalic acid was used. The macrographs revealed that the samples are free of macroscopic discontinuities in the weld bead, in addition to having adequate bead penetration. The welds showed no discontinuities such as porosity and cracks, besides adequate penetration. The specimens were subjected to seawater corrosion tests with AMN Guarujá –SP electrolyte, the corrosion tests were promising, being more resistant than the superduplex, thanks to the large amount of nickel and chromium from Inconel.

**Palavras-chave:** Laser welding. Super duplex. Inconel 625. Corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de ligas de níquel-base.....	20
Figura 2: Comparativo das características de corrosão de ligas de níquel .....	21
Figura 3: Diagrama de Schaeffler-Delong .....	29
Figura 4: Conjunto para soldagem a laser. ....	34
Figura 5: Retificadora Plana Tangencial. ....	38
Figura 6: Equipamento de solda a laser pertencente à FEIS/UNESP.....	39
Figura 7: Imagem do display do equipamento do laser .....	40
Figura 8: Operação de corte.....	41
Figura 9: Resina, catalisador e forma para embutir as amostras. ....	41
Figura 10: VoltaLab PGZ 402.....	43
Figura 11: Recipiente do experimento.....	43
Figura 12: Área da superfície ensaiada.....	44
Figura 13: Gaiola de Faraday.....	44
Figura 14: Equipamento completo para realizar os ensaios de corrosão. ....	45
Figura 15: Corpo de prova 1, soldado com frequência 2,2 hz .....	46
Figura 16: Corpo de prova 2, soldado com frequência 3hz .....	47
Figura 17: Corpo de prova 3, soldado com frequência 4,5 hz.....	47
Figura 18: Corpo de prova 4, soldado com frequência 9 hz.....	48
Figura 19: Micrografia da solda com frequência 2,2 hz utilizando o MEV. ....	49
Figura 20: Micrografia da solda com frequência 3,0 hz utilizando o MEV. ....	49
Figura 21: Micrografia da solda com frequência 4,5 hz utilizando o MEV. ....	49
Figura 22: Micrografia da solda com frequência 9,0 hz utilizando o MEV. ....	50
Figura 23: Composição por EDS no Inconel na amostra 2,2hz.....	50
Figura 24: Composição por EDS no cordão de solda na amostra 2,2Hz .....	51
Figura 25: Composição por EDS no UNS S32750 na amostra 2,2hz: .....	51
Figura 26: Análise dos principais elementos .....	52
Figura 27: Composição por EDS na amostra 3hz .....	52
Figura 28: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP2 (3Hz). ....	53
Figura 29: Composição por EDS na amostra 4,5hz .....	53
Figura 30: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP3 (4,5Hz). ....	54
Figura 31: Composição por EDS na amostra 9hz .....	54
Figura 32: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP4 (9hz).....	55
Figura 33: PCA.....	56

Figura 34: Potencial de Pite .....	58
Figura 35: Curva de polarização potenciodinâmica.....	59

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Composição química (%) Inconel 625 .....	24
Tabela 2: Composição dos materiais em peso por cento.....	37
Tabela 3: Parâmetros de soldagem. ....	40
Tabela 4: Composição por EDS na amostra 2,2hz .....	51
Tabela 5: Composição por EDS na amostra 3hz .....	52
Tabela 6: Composição por EDS na amostra 4,5hz .....	53
Tabela 7: Composição por EDS na amostra 9hz .....	54
Tabela 8: Parâmetros eletroquímicos das curvas de polarização .....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	NÍQUEL .....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Utilização do Níquel</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Ligas de Níquel</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Inconel 625</b> .....	<b>22</b>
2.2	AÇOS INOXIDÁVEIS.....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Séries e famílias dos aços inoxidáveis</b> .....	<b>25</b>
2.2.1.1	<i>Aços inoxidáveis martensíticos</i> .....	25
2.2.1.2	<i>Aços inoxidáveis ferríticos</i> .....	26
2.2.1.3	<i>Aços inoxidáveis austeníticos</i> .....	26
2.2.1.4	<i>Aços inoxidáveis duplex e superduplex</i> .....	26
<b>2.2.2</b>	<b>Efeitos dos principais elementos de liga</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Soldabilidade dos aços duplex e superduplex</b> .....	<b>28</b>
2.2.3.1	<i>Soldabilidade do aço inoxidável superduplex</i> .....	30
2.3	CORROSÃO.....	30
<b>2.3.1</b>	<b>Corrosão geral</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Corrosão localizada</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Corrosão por pite</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Potencial de circuito aberto (PCA)</b> .....	<b>32</b>
2.4	LASER.....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Laser breve histórico</b> .....	<b>33</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Soldagem a Laser</b> .....	<b>34</b>
2.4.2.1	<i>Soldagem a LASER por penetração</i> .....	35
<b>2.4.3</b>	<b>Vantagens e desvantagens da soldagem a LASER</b> .....	<b>35</b>
2.4.3.1	<i>Vantagens da solda a LASER</i> .....	35
2.4.3.2	<i>Desvantagens da solda a LASER</i> .....	36
<b>2.4.4</b>	<b>Cordão de solda laser</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
3.1	MATERIAIS .....	37
3.2	PREPARAÇÃO DAS CHAPAS PARA SOLDAGEM.....	37

<b>3.2.1</b>	<b>Soldagem das chapas</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Parâmetros de soldagem.</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Preparação das amostras para macrografias e micrografias</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4</b>	<b>CORROSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>ANÁLISE MACROGRAFICA</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1.1</b>	<b>CP1 frequência de solda 2,2HZ</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1.2</b>	<b>CP2 frequência de solda 3 HZ</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.3</b>	<b>CP3 frequência de solda 4,5 HZ</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.4</b>	<b>CP4 frequência de solda 9 HZ</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2</b>	<b>MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR EDS</b> .....	<b>50</b>
<b>4.3.1</b>	<b>CP 1, frequência de solda 2,2HZ.</b> .....	<b>50</b>
<b>4.3.2</b>	<b>CP2, frequência de solda 3hz.</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3.3</b>	<b>CP 3, frequência de solda 4,5hz.</b> .....	<b>53</b>
<b>4.3.4</b>	<b>CP4, frequência de solda 9hz.</b> .....	<b>54</b>
<b>4.4</b>	<b>ENSAIO DE CORROSÃO.</b> .....	<b>55</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Potencial de circuito aberto (PCA)</b> .....	<b>56</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Potencial de Pite</b> .....	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos materiais em ambientes agressivos é uma das preocupações mais importantes na indústria de petróleo e gás, ambientes marinhos apresentam partículas de areia suspensa que contribuem para a corrosão, erosão e o desgaste superficial. A corrosão eletroquímica pode ser a responsável pela perda de metal superficial de componentes internos em equipamentos rotativos e estacionários, juntamente com a erosão e a interação dos dois tipos de corrosão (1).

As novas descobertas das recentes jazidas petrolíferas, em especial as localizadas no pré-sal, tem despertado grande preocupação das áreas técnicas por conta da dificuldade na sua exploração e extração. As maiores preocupações no segmento de exploração de petróleo e gás natural em águas profundas estão relacionadas, às propriedades mecânicas e a resistência à corrosão dos diversos componentes. Uma alternativa encontrada para evitar o processo de corrosão na parte interna de uma tubulação ou componente do setor petrolífero, é usar um revestimento com elevada resistência à corrosão (2).

Aumentar a vida útil e a confiabilidade dos equipamentos e tubulações de plantas de produção e processamento de petróleo é uma busca continua no setor de petróleo e gás. Esse aspecto depende principalmente do uso de ligas resistentes a corrosão. Uma alternativa interessante encontrada é a soldagem de revestimento com superligas a base de níquel, já que confere aos equipamentos alta resistência à corrosão a um custo menor, se comparado com a fabricação de componentes ou tubulações inteiras de níquel (3).

Aços com teor de cromo superior a 12% possuem alta resistência à oxidação e são comumente designados como aços inoxidáveis (4). Os surgimentos dos aços inoxidáveis se deram no começo do século passado, na Inglaterra, nos Estados Unidos e na Alemanha, por volta de 1912. Os primeiros inoxidáveis que foram descobertos são os austeníticos e os martensíticos, na década seguinte, em 1920 foram os ferríticos (5, 6).

A necessidade constante da humanidade em buscar soluções nos vários setores da metalurgia acarreta uma busca no controle da corrosão; o avanço das atividades de exploração e produção de petróleo juntamente com o aumento em atividades em meios agressivos. O desenvolvimento de materiais resistentes à

corrosão trouxe um grande avanço na fabricação de materiais, tais ligas surgiram para atender solicitações resistentes à corrosão (7).

Uma maneira de unir esses materiais é através da soldagem a laser. A soldagem a laser atende alguns requisitos interessantes, como uma solda com acabamento melhor, possui uma menor zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), o que não provoca muita alteração nas propriedades dos materiais que utilizam essa técnica. Há vários estudos em busca de parâmetros para que a região soldada seja a mais próxima possível do metal base. É uma área de grande importância. A soldagem pode ser definida como um processo de união permanente de duas partes (8).

As pesquisas pioneiras que culminaram na descoberta do feixe de laser foram realizadas por Albert Einstein em 1917, onde analisou os fenômenos físicos da emissão espontânea e estimulada da luz. Essa emissão estimulada da luz foi teorizada e demonstrada por Einstein. Porém, não ocorreu de imediato a aplicação dessa teoria em equipamentos (9).

Os equipamentos de laser possuem elevado custo se comparados a alguns outros processos de soldagem convencionais, mas também possui alta taxa de produção e ótima qualidade de união, seu custo passa a ser economicamente viável dependendo da confiabilidade exigida.

A soldagem a Laser, dentre os outros processos de soldagem, especificamente o processo de soldagem a laser pulsado Nd:YAG teve um aumento de pesquisa nessa área (10).

### 1.1. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da soldagem do aço inoxidável superduplex UNS S32750 com o Inconel 625 pelo processo de soldagem a laser Nd:YAG pulsado, visando manter os níveis satisfatórios de resistência a corrosão que apresentam esses materiais isoladamente.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a resistência de corrosão da junta soldada;



- Avaliar a influência da frequência de soldagem sobre os resultados de resistência à corrosão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 NÍQUEL

O níquel é amplamente conhecido como metal puro ou na forma de ligas para suas muitas aplicações industriais. O metal foi isolado (1751) por um químico e mineralogista sueco, Barão Axel Fredrik Cronstedt, que preparou uma amostra impura de um minério contendo *niccolite* (arseneto de níquel). Mais cedo, um minério desse mesmo tipo era chamado *Kupfernickel* depois de “*Old Nick*”, embora parecesse minério de cobre, produzia um metal frágil e desconhecido. Duas vezes mais abundante que o cobre, o níquel constitui cerca de 0,007% da crosta terrestre; é um constituinte bastante comum de rochas ígneas, embora singularmente poucos depósitos se qualifiquem em concentração, tamanho e acessibilidade para o interesse comercial. O níquel tem alta condutividade elétrica e térmica. Mais da metade do níquel produzido é usado em ligas com ferro (particularmente em aços inoxidáveis), e a maior parte do restante é usada em ligas resistentes à corrosão com cobre (incluindo Monel, que contém cerca de 60 a 70% de níquel, 30 a 40% de cobre e pequenas quantidades de outros metais, como o ferro). Tem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada. A China é o maior produtor mundial de níquel. Outros países produtores de níquel são Rússia, Japão, Austrália e Canadá (11).

O níquel é um dos mais versáteis e importantes metais industriais. É um elemento de liga importante em aços (principalmente aços inoxidáveis austeníticos contendo 8 a 35% de Ni) e ligas não ferrosas. As ligas à base de níquel são usadas em aplicações que necessitem serem resistentes à corrosão e ao calor (12).

A estrutura normal do níquel ao longo de toda a faixa de temperaturas até o ponto de fusão é cúbica de face centrada (CFC). A constante de rede da forma de CFC é 0,35167nm a 20°C (68°F). O níquel, em quantidades suficientes, tende a estabilizar a estrutura austenítica; isso aumenta muito as propriedades mecânicas (12).

Um dos usos mais importantes para o níquel é como o metal base para uma grande variedade de ligas. As ligas de níquel são importantes para a indústria moderna, pois são eficientes devido a sua capacidade de resistir a uma ampla variedade de condições operacionais que possam envolver ambientes corrosivos e

altas temperaturas. Existem várias razões para esses recursos. O níquel puro é dúctil e resistente porque possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) até seu ponto de fusão (1453 ° C ou 2647 ° F) (12).

O Monel, liga de níquel e cobre, é empregado em geral para melhorar as propriedades de temperatura elevada. Auxiliam na redução do coeficiente de expansão térmica (13).

O níquel puro possui densidade de 8,9 g/cm<sup>3</sup> e ponto de fusão de 1455°C, sua estrutura cristalina é CFC (cúbica de face centrada). A densidade da maioria das superligas de níquel fica entre 7,79 e 9,32 g/cm<sup>3</sup>. Por exemplo, a densidade da Inconel 625 (contém cerca de 60 % de níquel) é de 8,84 g/cm<sup>3</sup>, devido aos elevados teores de alumínio e de titânio, ao passo que as superligas com altos teores de tungstênio e tântalo chegam a densidades da ordem de 9,07 g/cm<sup>3</sup> [14].

As aplicações das ligas de níquel e à base de níquel são variadas, a maioria delas envolvem resistência à corrosão e / ou resistência ao calor. Algumas incluem o seguinte:

- a) Indústrias químicas e petroquímicas: parafusos, ventiladores, válvulas, vasos de reação, tubulações, tubulações de transferência, bombas;
- b) Fábricas de papel e celulose: tubulações, equipamentos de circuito de branqueamento;
- c) Turbinas a gás para aeronaves: discos, câmaras de combustão, parafusos, carcaças, eixos, sistemas de exaustão, pás, pás, latas de queimador, pós-combustão, reversores;
- d) Usinas de turbinas a vapor: parafusos, lâminas, reaquecedores de gás de chaminé;
- e) Motores alternativos: turbo compressores, válvulas de escape, plugues quentes, insertos para sede de válvula;
- f) Processamento de metal: ferramentas de trabalho a quente e matrizes;
- g) Aplicações médicas: usos odontológicos, dispositivos protéticos;
- h) Veículos espaciais: peles aerodinamicamente aquecidas, peças de motores de foguetes;
- i) Equipamento de tratamento térmico: bandejas, acessórios, correias transportadoras, cestos, ventiladores, silenciadores de fornos;
- j) Sistemas de energia nuclear: mecanismos de acionamento da haste de controle, hastes de válvulas, molas, dutos;

- k) Equipamento de controle de poluição: depuradores, equipamentos de dessulfurização de gases de combustão (revestimentos, ventiladores, reaquecedores de gás de chaminé, dutos)
- l) Usinas de processamento de metais: fornos, pós-combustores, exaustores;
- m) Sistemas de gaseificação e liquefação de carvão: trocadores de calor, repetidores, tubulações;
- n) Indústria automotiva: velas de ignição, velas incandescentes (em motores a diesel), conversores catalíticos (12).

### 2.1.1 Utilização do Níquel

O elemento níquel quando utilizado, é usado a fim de melhorar algumas propriedades como a dureza das ligas de alumínio-cobre-magnésio fundidas e trabalhadas a temperaturas elevadas (13).

A microestrutura das ligas de níquel consiste na austenita de solução sólida de CFC ( $\gamma$ ) na qual partículas dispersas e precipitadas podem se formar. O níquel forma uma solução sólida completa com cobre e tem solubilidade quase completa com o ferro. Pode dissolver 35% de Cr, 20% de molibdênio e tungstênio e 5 a 10% de alumínio, titânio, manganês e vanádio. Com isso, a matriz de CFC pode dissolver grandes quantidades de elementos em várias combinações para fornecer o endurecimento da solução, bem como resistência melhorada à corrosão e à oxidação (12).

O estágio de endurecimento por solução sólida tem uma relação direta com a diferença do tamanho atômico entre o níquel e os elementos de liga, e, portanto, a habilidade do soluto em interferir no movimento de discordância (12).

Os processos de soldagem para as ligas de níquel são semelhantes aos usados para aços inoxidáveis. No entanto, o depósito de solda fundido à base de níquel é menos fluido do que o aço inoxidável, nesse caso as configurações da junta e ângulos articulares devem ser abertos para a haste de solda melhor se acomodar durante a colocação do metal de solda na área da junta. Processos básicos de soldagem como arco de gás-tungstênio (GTAW), arco de gás de metal (GMAW), arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), brasagem e solda, podem ser usados para unir esses materiais. Em aplicações mais sofisticadas, soldagem a laser, soldagem por feixe de elétrons e soldagem ultra-sônica também podem ser usadas.

A escolha dos processos de soldagem tem que se levar em conta a espessura do metal a ser unido, no projeto da unidade, no projeto da junta, na posição em que a solda será feita, condições de serviço e ambientes corrosivos (13).

### **2.1.2 Ligas de Níquel**

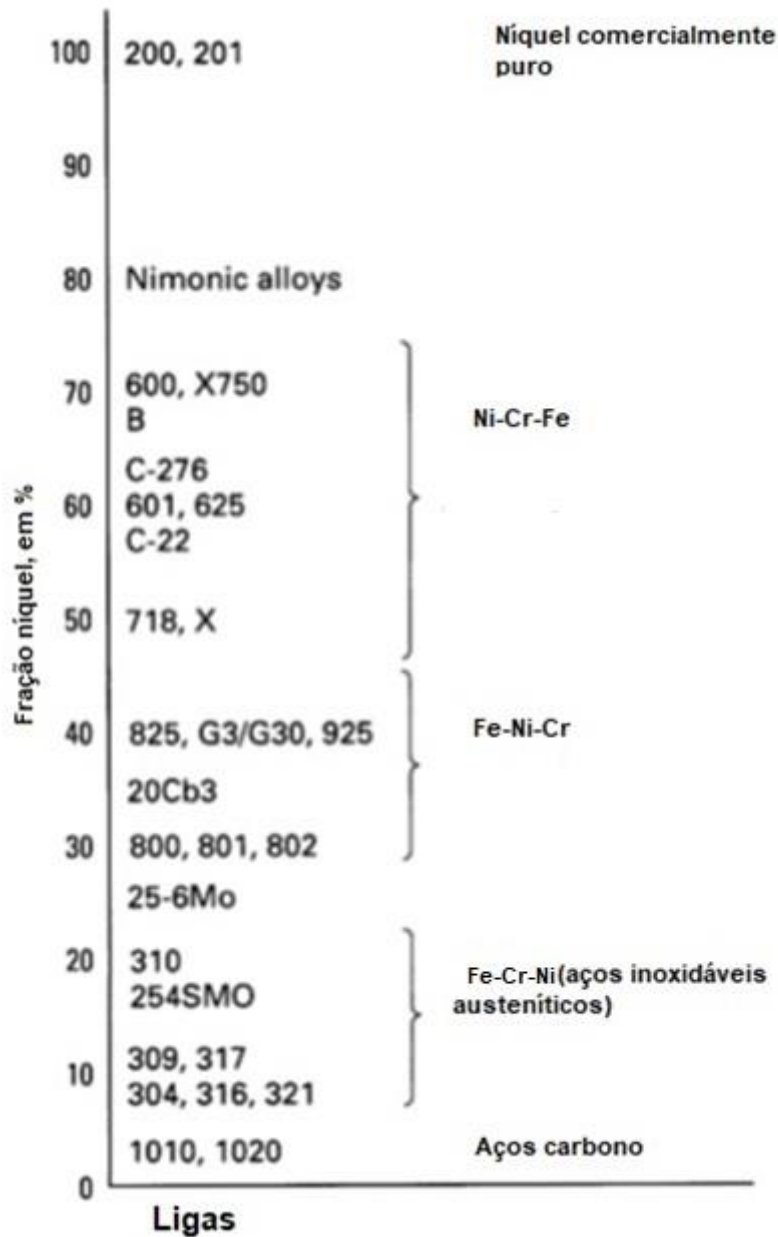
As formas que são encontradas comercialmente das ligas à base de níquel são totalmente austeníticas e estão sendo utilizadas e/ou selecionadas por sua resistência à alta temperatura e à corrosão aquosa. Do ponto de vista da nomenclatura, são ligas que contêm mais de 30% de níquel em seu conteúdo (13).

As superligas à base de níquel são conhecidas desde a década de 1930, e vem sendo utilizadas principalmente em aplicações aeroespaciais e plantas de geração de energia. Para essas aplicações é necessário o uso de um material com elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e à fluência, boa resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas (15).

Ambas ligas Inconel 600 e Inconel 690 são utilizadas em condições severas de oxidação, graças as suas características de serem resistentes a oxidação, sendo usadas principalmente como revestimento já que possuem um custo elevado (16).

A Figura 1 categoriza essas ligas pelo teor de níquel, relacionando as ligas aos aços inoxidáveis austeníticos mais comuns. Todos esses materiais são caracterizados por terem 15 a 23% de cromo e, portanto, podem ser classificados pelo conteúdo de níquel. Os aços austeníticos, portanto, são ligas de ferro-cromo-níquel (13).

Figura 1: Gráfico de ligas de níquel-base



Fonte: adaptado de ASM International. The Materials Information Company (20)

As temperaturas operacionais máximas sugeridas para cada um dos agrupamentos caracterizados são as seguintes:

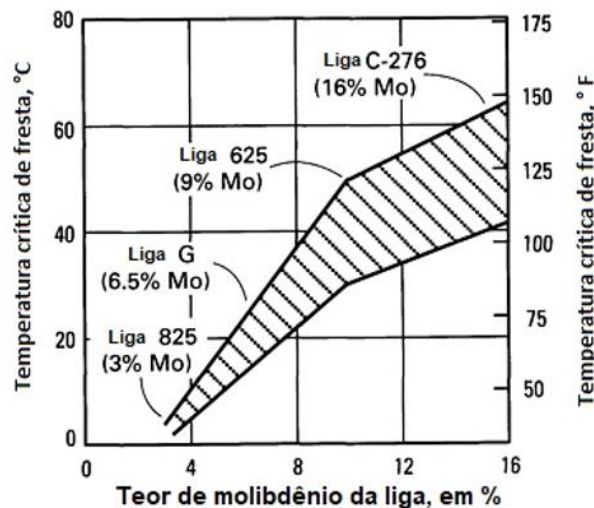
- Fe-Cr-Ni 1050°C (1920°F)
- Fe-Ni-Cr 1150°C (2100°F)
- Ni-Cr-Fe 1200°C (2200°F)

Existem variações para cada um desses materiais a fim de melhorar suas características de corrosão ou suas propriedades mecânicas. Portanto, o molibdênio

e o nitrogênio podem ser adicionados a esta série de ligas para melhorar sua resistência à corrosão por pite; adições de cromo melhoram a resistência à sulfidação; alumínio, titânio e nióbio auxiliam no fortalecimento através do endurecimento por precipitação. Mas, em todos os casos, o teor de níquel permite melhorias na resistência à fadiga e no desempenho em altas temperaturas, especialmente na redução de ambientes como os que envolvem carburização e nitretação (13).

Na Figura 2 podemos ver o comparativo das características de corrosão de várias ligas à base de níquel usando o procedimento de teste do Instituto de Tecnologia de Materiais (MTI), esse teste envolve o uso de solução de cloreto férrico a 6% para determinar a resistência relativa da liga a corrosão em fendas em ambientes de cloreto oxidante. Como mostrado na Fig. 2, podemos ver que o aumento do teor de molibdênio é o principal contribuinte para a resistência à corrosão em frestas em ambientes agressivos contendo cloretos (17).

Figura 2: Comparativo das características de corrosão de ligas de níquel



Fonte: adaptado de ASM International. The Materials Information Company (20).

O alumínio e titânio são adicionados nas superligas de níquel pois atendem a uma função: esses elementos se combinam com o níquel para formar a fase  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ), que é responsável pelo endurecimento das superligas, de modo semelhante ao que ocorre nas ligas de alumínio endurecidas por precipitação, porém sendo muito mais estável do ponto de vista termodinâmico, o que favorece a

manutenção da elevada resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas. Portanto, a resistência mecânica das superligas de níquel é muito influenciada pelas características das partículas de fase  $\gamma'$ , como sua fração volumétrica, tamanho médio, formato e distribuição, uma vez que essas partículas, coerentes com a matriz, induzem o aparecimento de distorções no reticulado da mesma, as quais estão associadas a tensões elásticas, que dificultam o movimento de discordâncias. Superligas modernas são caracterizadas por uma fração volumétrica alta desses precipitados (14, 18).

A fase  $\gamma''$  é encontrada principalmente em ligas Ni-Fe que contém nióbio, onde o ferro atua como um catalisador para formação da fase  $\gamma''$ , que é uma fase metaestável de estrutura tetragonal de corpo centrado (14, 18).

### **2.1.3 Inconel 625**

O Inconel 625 é uma liga de níquel-cromo-molibdênio, com adição de nióbio. A liga resiste a uma ampla gama de ambientes severamente corrosivos e é especialmente resistente à corrosão por pites e fissuras. Usado em processamento químico, engenharia aeroespacial e marinha, equipamentos de controle de poluição e reatores nucleares (13).

Comumente usados em equipamentos de processamento químico, motor de aeronave e componente de estrutura. O Inconel 625 permite suportar uma ampla variedade de ambientes corrosivos. A liga é quase completamente resistente a ambientes suaves, como a atmosfera, água doce e água do mar, sais neutros e meios alcalinos. Em ambientes mais severos, a combinação de níquel e cromo fornece resistência a produtos químicos oxidantes, e a combinação de níquel e molibdênio oferece resistência a condições redutoras. O teor de molibdênio também torna o Inconel 625 altamente resistente à corrosão por pites e fissuras (12).

Desenvolvida para serviço em temperaturas abaixo de 973 K, essa liga combina a alta resistência das ligas à base de níquel, endurecedoras da idade, com excelentes características de fabricação. Além de suas aplicações generalizadas nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, marinha, química e petroquímica, também está sendo usado em componentes de haste de controle em reatores de água pressurizada. Excelente comportamento de corrosão em ambientes de amônia e



excelente resistência à fluência são as principais características responsáveis pela importância desta liga em plantas de água pesada (19, 20).

O Inconel 625 possui como elementos de liga, Mo e Nb. Tem sido amplamente aplicado em várias áreas, especialmente na indústria aeroespacial desde a década de 1960. Este material chamou particularmente a atenção devido às suas excelentes características, incluindo a combinação perfeita de bom rendimento, resistência à tração e à fluência, bem como forte resistência à corrosão em alta temperatura na exposição prolongada a ambientes agressivos (21, 22).

A liga de níquel, Inconel625 (IN625), é amplamente utilizada em ambientes aquosos de alta temperatura e alta pressão. Essa liga em específico já foi utilizada como material de reforço de superfície e modificação, utilizando vários métodos como fusão a laser seletiva e revestimento a laser. Superligas à base de níquel como Inconel®625 (IN625) tem sido uma das ligas de níquel mais utilizadas em aplicações aeroespaciais, petroquímicas, químicas e marítimas. Essa liga também é amplamente utilizada como material de revestimento para ambientes marítimos e também para o revestimento duro de ferramentas e aços de matriz (23, 24).

O níquel e o cromo proporcionam resistência ao ambiente oxidante, enquanto o níquel e o molibdênio ao ambiente não oxidante. A corrosão por pite e em fresta é evitada pelo molibdênio. O nióbio estabiliza a liga contra a sensibilização durante a soldagem. Sua resistência à trinca por corrosão por cloreto é excelente. Também resiste a incrustações e oxidação a altas temperaturas. Algumas aplicações típicas do Inconel-625 são blindagens térmicas, ferragens de fornos, dutos de motores de turbinas a gás, camisas de combustão e barras de aspersão, equipamentos de instalações químicas e aplicações especiais de água do mar (25, 26).

A detentora da marca INCONEL®, a empresa Special Materials Fornece a seguinte tabela:

Tabela 1: Composição química (%) Inconel 625

Níquel.....	58,0 min.
Cromo.....	20,0-23,0
Ferro.....	5,0 máx.
Molibdênio.....	8,0-10,0
Nióbio(+tântalo) .....	3,15-4,15
Carbono.....	0,10 máx.
Silício.....	0,50 máx.
Fosforo.....	0,50 máx
Enxofre.....	0,015 máx.
Alumínio.....	0,40 máx.
Titânio.....	0,40 máx.
Cobalto.....	1,0 máx.

Fonte: Durand-Charre (27)

Para aumentar a resistência da liga, são adicionados elementos como W, Mo e Cr, que promovem o aumento da dureza. As ligas endurecidas por precipitação são reforçadas por um controle de temperatura, que resulta na precipitação de uma segunda fase conhecida como  $\gamma'$  (28, 14).

Essa liga se tornou aplicável em vários setores industriais com já mencionado pela sua resistência a corrosão. Essa resistência é vista também nos aços inoxidáveis. No entanto como o preço dessas ligas é elevado, o custo é algo que precisa ser analisado, pois pode ser algo limitante. Com isso, a soldagem de revestimento se torna uma ótima opção para fabricação de equipamentos para inúmeros setores industriais, onde características internas ou externas precisem de ação específica como resistência a corrosão.

## 2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem resistência à corrosão, essa resistência se dá por ter mais de 12% de cromo. São de grande interesse para a engenharia, em função de sua resistência à oxidação e à corrosão (29).

O fenômeno de passivação é a formação de uma camada de óxido misto e sua dissolução, isso garante a resistência a corrosão de ligas à base de Fe + Cr. Sua formação ou não controlará a resistência à corrosão do material, no meio corrosivo. Tanto a corrosão uniforme quanto a localizada (“pitting”) são importantes para que os aços inoxidáveis tenham bom desempenho (29).

Os aços inoxidáveis são utilizados pelos mais diversos setores da indústria, como por exemplo na metalúrgica, automobilística, química, ou ainda na indústria aeronáutica, nuclear em trocadores de calor, aplicações hospitalares e utensílios de cozinha. Porém, para lidar com ambientes extremamente corrosivos são necessários materiais mais nobres, como os aços inoxidáveis superaustenítico e superduplex. No Brasil, um dos grandes consumidores deste tipo de material é a indústria petrolífera. No ano de 2016 o Brasil atingiu o recorde histórico de produção média de 2.144.256 barris por dia (30).

### 2.2.1 Séries e famílias dos aços inoxidáveis

As propriedades mecânicas, física, química que um dado material apresentará, são influenciadas pela maneira de como a microestrutura é em temperatura ambiente, por isso os aços inoxidáveis foram divididos em famílias ou séries. De acordo com esse critério os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro classes: martensíticos, ferríticos, austeníticos e duplex.

#### 2.2.1.1 Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de Fe-Cr-C, com teor de cromo entre 11% a 18% e teor de carbono entre 0,1% a 0,5%, apresentando assim uma maior quantidade de carbono se comparado com as outras famílias de aços inoxidáveis (31). Essa quantidade superior de carbono aumenta a resistência mecânica e a capacidade de endurecimento do material. Tem uma estrutura tetragonal de corpo centrado (29).

### 2.2.1.2 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas que possuem teor de cromo em torno de 10,5% a 30% e porcentagem de carbono inferior a 1%. Possuem uma microestrutura ferrítica. Sua microestrutura CCC (Cúbica de Corpo Centrado) o torna magnético (32).

### 2.2.1.3 Aços inoxidáveis austeníticos

São ligas que contém Fe-Cr-Ni. Com porcentagem entre cerca de 16% a 30% de Cr, e uma porcentagem de Ni entre 6% a 26% e menos de 0,3% de carbono. Dentre os aços inoxidáveis, os austeníticos são os mais comuns e possuem uma resistência à corrosão muito boa, não são magnéticos (29).

### 2.2.1.4 Aços inoxidáveis duplex e superduplex

Os aços duplex possuem uma microestrutura bifásica, ferrítica, austenítica, em frações volumétricas aproximadamente iguais dessas fases, isto é 50% austenita CFC (cúbica de fase centrada) e 50% ferrita CCC (cúbica de corpo centrado), e elementos de alta liga como Cr, Mo e N que oferecem maior resistência a pites denominado PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) (33).

O PREN (Pitting Resistance Equivalent Number), é uma equação a fim de se identificar qual a resistência a corrosão por pite.

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3\% \text{Mo} + 16\% \text{N}$$

Para ser considerado um aço duplex, precisa apresentar microestrutura bifásica, o número obtido no PREN é entre 30 a 40, enquanto que os com PREN maior que 40 são denominados aços inoxidáveis superduplex (34).

Os aços inoxidáveis duplex possuem elevados teores de cromo e molibdênio, além da inclusão de nitrogênio que, como soluto intersticial, melhora as propriedades mecânicas.

Os aços superduplex são similares aos aços duplex, com maiores teores de Cr, Ni, Mo, N e também com adições de Cu e W. São caracterizados por transformações e precipitação complexa, contendo frações volumétricas comparáveis de austenita e ferrita, com diferentes propriedades físicas e mecânicas. Ele apresenta características de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos em apenas um material, e nesta forma possuem mais resistência mecânica e à corrosão que os aços inoxidáveis austeníticos convencionais. Os aços inoxidáveis superduplex são amplamente utilizados em ambientes contendo íons da família dos halogênios, principalmente por íon cloreto (Cl-) (35,36,37).

O aço inoxidável superduplex UNS S32750 apresenta uma resistência mecânica, resistência a corrosão à baixa temperatura, superiores aos aços inoxidáveis duplex comuns. Possui elevada resistência a corrosão por pites e a ambientes ricos em cloretos. Muito utilizado em indústrias química e petroquímica, assim como em plataformas de extração de petróleo e gás natural (38).

Estes materiais possuem uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, como por exemplo elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência a corrosão muito boa em diversos meios [39].

São empregados particularmente em ambientes com características corrosivas, já que possui boa resistência a corrosão em certos ambientes, ambientes empregados como em indústrias de processamento químico, de papel, de geração de energia. Utilizados também como componentes de equipamentos expostos à água do mar, trocadores de calor, bombas e tubos (32).

### **2.2.2 Efeitos dos principais elementos de liga**

Solução sólida substitucional ou intersticial são as maneiras que os elementos de liga podem estar presentes nos aços inoxidáveis, melhorando as propriedades dos aços para certas aplicações (40).

Os principais elementos de liga e seus efeitos são apresentados a seguir:

- a) Cromo (Cr): É um importante elemento de liga dos aços inoxidáveis, esses aços possuem no mínimo 10,5% de Cr, considerado formador de ferrita e de carboneto. Responsável pela resistência a corrosão;

- b) Níquel (Ni): Um elemento considerado como formador de austenita. Aumenta a ductilidade e tenacidade, aumenta a resistência à corrosão em meios ácidos;
- c) Molibdênio (Mo): também é um elemento considerado formador de ferrita e de carboneto, com isso aumenta a resistência mecânica. Eleva significativamente a resistência à corrosão uniforme (“geral”) e localizada (pitting). Aumenta o risco de formação de fases secundárias nos aços inoxidáveis duplex;
- d) Carbono (C): É um elemento que é considerado como sendo um forte formador de austenita, eleva consideravelmente a resistência mecânica e dureza. Porém, reduz a resistência a corrosão Inter granular causada por formação de carbonetos;
- e) Nitrogênio (N): é considerado como um forte formador de austenita, esse elemento eleva significativamente a resistência mecânica e a resistência a corrosão nas ligas ferrítica, enquanto que nos martensíticos afeta de forma semelhante ao carbono, elevando a dureza e resistência mecânica, mas reduzindo a tenacidade do material;

### 2.2.3 Soldabilidade dos aços duplex e superduplex

A “*American Welding – AWS*” define soldabilidade como sendo a capacidade de um material de ser unido através da soldagem nas condições de fabricação especificadas por uma estrutura projetada de forma adequada e para se comportar adequadamente em serviços.

As propriedades da solda dependem da composição química, do procedimento e processo de soldagem o qual foi submetida bem como do balanço entre a austenita e a ferrita na microestrutura. Os aços inoxidáveis quando soldados, devem manter sua resistência à corrosão na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (40).

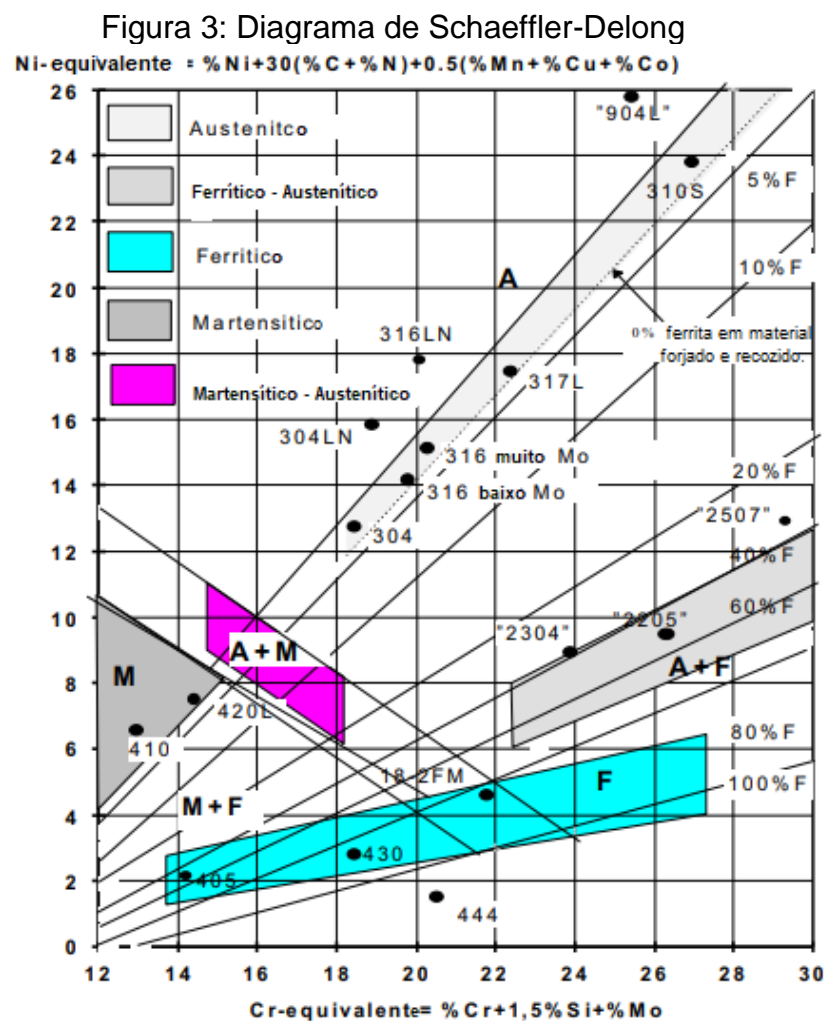
A microestrutura tem papel importante sobre o desempenho dos aços inoxidáveis, depende da composição química e do tratamento térmico realizado. Todos os elementos estabilizadores de austenita e ferrita são computados em um valor de “Cr equivalente” e os estabilizadores de CFC em um valor de “Ni equivalente” (39, 41).

$$\text{Creq} = \% \text{Cr} + 1,5 \times \% \text{Si} + \% \text{Mo}$$

$$\text{Nieq} = \% \text{Ni} + 30 \times (\% \text{C} + \% \text{N}) + 0,5 \times (\% \text{Mn} + \% \text{Cu} + \% \text{Co})$$

Schaeffler-Delong propõem uma maneira de buscar uma representação mais simplificada entre as relações de fases em função da composição química. Originalmente foi desenvolvido para prever o teor de ferrita (CCC) em metal depositado por solda e aços fundidos, pois esse diagrama fornece uma visão das fases presentes nos metais laminados e forjados (39).

A figura 3 apresenta o diagrama com faixas de composição aproximada de cada família de aços inoxidáveis indicados, e uma ferramenta utilizada para soldagem até dos dias de hoje.



Fonte: adaptado Leffler (40).

### 2.2.3.1 Soldabilidade do aço inoxidável superduplex

Os processos convencionais de soldagem dos aços inoxidáveis da família duplex afetam o equilíbrio entre as fases ferrita e austenita, também provocam a precipitação de fases como sigma e chi nas áreas soldadas [42 - 43]. Durante a soldagem a laser dos aços inoxidáveis duplex, a liga se solidifica completamente em ferrita, devido ao rápido resfriamento e baixo aporte térmico do processo, há transformação parcial da ferrita em austenita (44).

A soldagem dissimilar vem atraído bastante atenção, principalmente devido menor custo e menor consumo de material [45]. Juntas soldadas dissimilares dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L e superduplex UNS S32750 são feitas para unir tubos nas indústrias de óleo e gás, especialmente em trocadores de calor (46, 47).

## 2.3 CORROSÃO

A corrosão pode ser descrita como um processo de deterioração de um material metálico por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, com a ajuda ou não de esforços mecânicos. Isso faz com que ocorra danos ao material, como desgaste, variação química ou modificações estruturais. A corrosão ocorre por meio de reações químicas irreversíveis, acompanhadas da dissolução de elementos químicos do material para o meio corrosivo (48, 49).

É um processo que depende do tempo, nesse processo de oxidação química ou eletroquímica, o metal libera elétrons para o meio ambiente. Esses ambientes recebem o nome de eletrólitos, uma vez que eles têm sua própria condutividade para transferência de elétrons. Um eletrólito é uma solução condutora, que contém íons carregados positiva e negativamente chamados cátions e ânions, respectivamente. Um íon pode ser entendido como um átomo que perdeu ou ganhou um ou mais elétrons de valência. Não há apenas uma classificação única dos tipos de corrosão (50).



### **2.3.1 Corrosão geral**

Ocorre quando a superfície exposta de metal ou liga é totalmente corroída em um ambiente como um eletrólito líquido, eletrólito gasoso ou um eletrólito híbrido (sólido e água, organismos biológicos, etc.) (50, 51).

Pode ser entendido também como o processo de deterioração no qual há perda uniforme de espessura, já que as reações químicas de oxidação do metal ocorrem em toda extensão da superfície (48).

As ligas de níquel, assim como os aços inoxidáveis, apresentam excelente resistência à corrosão geral, graças ao mecanismo de proteção contra a corrosão (filme passivo de óxido de cromo e matriz de níquel) (48).

Pode-se ter os seguintes tipos de corrosão geral:

- a) Corrosão Atmosférica;
- b) Corrosão galvânica;
- c) Corrosão de alta temperatura;
- d) Corrosão líquido-metal;
- e) Corrosão Biológica;
- f) Corrente de dispersão.

### **2.3.2 Corrosão localizada**

Refere-se a partes específicas de uma área de superfície exposta que corrói em um eletrólito adequado (50, 51). Diferentemente da corrosão geral, a corrosão localizada ocorre em regiões específicas, ou seja, em pequenas áreas do material.

Dentro da corrosão localizada há a corrosão por Pites que será nosso alvo de estudo.

### **2.3.3 Corrosão por pite**

A corrosão por pites é um tipo de corrosão localizada, ela consiste na formação de pequena cavidade com extensão e profundidade razoável, causada pelo ataque dos íons do eletrólito na superfície do material. O potencial de pite pode ser influenciado por vários fatores, como composição química, microestrutura e estado superficial do material, composição do eletrólito, temperatura, entre outros.

A composição química é um dos fatores importantes que influenciam as propriedades dos filmes passivos. Com a adição de elementos de liga com elevado potencial de pite, como cromo (Cr), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e nitrogênio (N), pode-se aumentar o potencial de pite das ligas. O cromo forma uma fina camada de óxido de cromo aderente, que funciona como barreira contra a corrosão, protegendo o material de forma local e generalizada. A adição de molibdênio, mesmo em pequenas quantidades, pode aumentar consideravelmente a resistência à corrosão por pites em aços inoxidáveis, em aços duplex e em superligas (48). A microestrutura é também um fator importante a ser levado em conta na resistência a corrosão por pite.

A corrosão por pite representa o pequeno orifício localizado, que causa a falha catastrófica dos materiais. A resistência ao pite dos materiais é indexada por PREN.

#### **2.3.4 Potencial de circuito aberto (PCA)**

OCP (Open Circuit Potential) sigla em inglês para Potencial de Circuito aberto (PCA), pode ser descrito como um metal, que sofre corrosão numa dada solução de baixa resistividade elétrica, assume um potencial característico, designado como potencial de corrosão. Esse potencial é dado pela intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica. Como se trata de um potencial assumido pelo metal, é suficiente proceder a medida direta desse potencial com relação a um eletrodo de referência.

O material metálico, cujo potencial de corrosão irá ser medido, é designado por eletrodo de trabalho (ET). As extremidades do eletrodo de trabalho e do eletrodo de referência (ER) são conectadas diretamente aos terminais de um multímetro, e com isso é possível medir diretamente o potencial de corrosão. O eletrodo de referência utilizado neste trabalho é o eletrodo de calomelano. O eletrodo de calomelano tem ampla aplicação em ensaios de laboratório (52).

Entende-se que o cordão de solda é uma área mais sensível que o metal base, por isso na soldagem, devido à energia de soldagem para a realização da solda podem ocorrer algumas modificações na microestrutura e nas propriedades do material (42). Portanto, é fundamental manter o controle dos parâmetros de

soldagem e, na medida do possível, evitar uma microestrutura heterogênea (presença de micros segregações, inclusões, precipitados não metálicos).

## 2.4 LASER

Laser significa “Light amplification by Stimulated Emission of Radiation”, podendo ser traduzida como “Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação”. Essa luz é produzida a partir de algum tipo de fonte de energia, como uma lâmpada, ela estimula um grande número de elétrons em repouso, onde esses são capazes de produzir fótons de luz o que desencadeia uma ação repetida de emissão de energia gerando uma luz intensa. Os aparelhos de laser mais comuns usados na indústria são o laser de CO<sub>2</sub> e o laser Nd:YAG (53).

### 2.4.1 Laser breve histórico

Albert Einstein realizou os primeiros trabalhos de pesquisa que ajudou na descoberta do laser, por volta de 1917. Townes, mais de três décadas depois, em 1954 confirmou experimentalmente o fenômeno através da aplicação da emissão estimulada à amplificação de ondas ultracurtas (53).

O primeiro LASER foi construído em 1960 por Maimann, era um sólido de rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal. Dentro dos Laboratórios da AT&T Bell pouco tempo depois se desenvolveu um laser gasoso de He-Ne, e somente após alguns anos surgiu o LASER de CO<sub>2</sub>. O feixe LASER se propaga no ar, orientando-se por óticas sem perder ou alterar suas características físicas. Atualmente existem diversos tipos, indo do sólido ao gasoso, com comprimentos de onda na faixa do Infravermelho (IF) até o Ultravioleta (UV) (53).

A história do laser pode ser acompanhada pelos fatos abaixo:

1917 – Einstein publica a teoria da emissão estimulada

1958 - Townes e Shawlow publicam suas hipóteses para a construção de um laser.

1960 – Maimann constrói o primeiro laser

1961 – Javan e Herriot desenvolvem laser de HeNe

1962 – Rediker, Nathan e Hall desenvolvem o laser de diodo

1964 – Patel constrói o laser de CO<sub>2</sub>

1964 – Geusic desenvolve o laser Nd:YAG

Década de 70 e 80 – Utilização industrial do laser de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG

Década de 80 e 90 – Disseminação do uso de laser em vários campos.

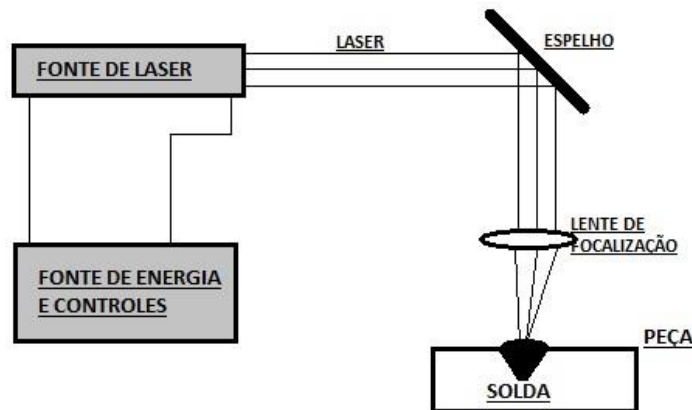
O que irá determinar a aplicação do laser são o comprimento de onda e a potência de saída. Atualmente os lasers são aplicados em diversos campos, tais como:

- a) Optoeletrônicas -CD players; CD-ROM drivers;
- b) Medicina – oftalmologia; dermatologia; odontologia;
- c) Medição e Instrumentação – alinhamento de máquinas; medidas superficiais;
- d) Fabricação – corte; soldagem; tratamento superficial.

#### 2.4.2 Soldagem a Laser

Os equipamentos necessários para a soldagem a laser são uma fonte de energia e seus controles, a fonte do laser e seu sistema de refrigeração, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Conjunto para soldagem a laser.



Fonte: Próprio Autor.

O feixe concentrado de laser proporciona uma radiação com qualidade alta, permitindo diversas aplicações, dentre elas a soldagem. Quando se utiliza o laser para soldar, obtém-se características ótimas, difíceis de serem obtidas em outros processos, como por exemplo, alta velocidade de soldagem, baixa distorção, ausência de contato entre a fonte de calor e o material a ser soldado e pequenas

áreas termicamente afetadas pelo calor (54).

Segundo Modenesi (2011) quando se trabalha com fontes de alta intensidade pode ser utilizada duas técnicas: a da fusão convencional, como em outros processos de soldagem (conhecida como condução) e a técnica “Keyhole” (conhecida como penetração).

A diferença básica entre elas está na superfície da poça de solda, que permanece íntegra durante a solda por condução e é alterada na solda por penetração pelo feixe de laser que penetra na região de fusão [55].

#### *2.4.2.1 Soldagem a LASER por penetração*

A soldagem “keyhole”, ou penetração, é bastante utilizada, só é possível ser utilizada se a densidade da energia for suficientemente alta para fundir a espessura da junta toda, por tanto o feixe precisa ser perpendicular à superfície da peça [56].

Quando o feixe de laser se move ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço atrás do furo e se solidifica (54).

### **2.4.3 Vantagens e desvantagens da soldagem a LASER**

Já a décadas o laser vem sendo utilizado pela indústria como um todo. Os trabalhos que utilizam desse processo de soldagem já são aprofundados e conhecidos no mundo. Por isso à várias vantagens e desvantagens do laser [56].

#### *2.4.3.1 Vantagens da solda a LASER*

- a) O processo produz distorções pequenas nas peças soldadas;
- b) ZTA pequena.
- c) Possibilita altas velocidades de soldagem.
- d) Resulta em geral na formação de soldas de alta qualidade.
- e) Melhor acabamento final;
- f) Flexibilidade e versatilidade para a automação do processo através de robôs.

#### 2.4.3.2 *Desvantagens da solda a LASER*

- a) Requer um nível de automação alto como robôs e dispositivos;
- b) Limitação de profundidade de penetração do cordão de solda;
- c) Os investimentos necessários são altíssimos se compararmos com outros processos, de soldagem convencional.
- d) Requer um volume de produção relativamente alto para amortizar o investimento.

#### **2.4.4 Cordão de solda laser**

O cordão é estreito e a ZTA (Zona Termicamente Afetada) pequena é formado pelas variações de temperaturas nas pequenas áreas. Esse processo é bem rápido, somando isso com as altas velocidades de resfriamento, resulta em uma região soldada com características mecânicas, como dureza e resistência à tensão, próximas aos metais base antes da soldagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados para obtenção dos resultados. O processo de preparação das amostras, soldagem, embutimento, polimento, macrografias e micrografias, corrosão, foram realizados na Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho – Campus de Ilha Solteira (UNESP).

#### 3.1 MATERIAIS

Foram utilizados dois materiais diferentes, o Inconel 625 e o aço inoxidável superduplex UNS S32750, ambos materiais em chapas de 1,5 mm de espessura. A tabela 2 apresenta a composição química do aço inoxidável superduplex UNS S 32750 e do Inconel 625.

Tabela 2: Composição dos materiais em peso por cento.

Composição	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	N	Nb
UNS S32750	0.018	0.29	0.63	25.61	6.97	3.84	0.003	0.022	0.269	---
Inconel 625	0,10 max	0,50 max	--	20,0- 23,0	58,0 min	8,0- 10,0	0,015 max	0,50 max	--	3,15- 4,15

Fonte: Empresa Realum e Durand-Charre (27)

#### 3.2 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS PARA SOLDAGEM

As chapas do UNS S32750 e Inconel 625 possuem espessura de 1,5mm, elas foram retificadas em suas laterais na oficina mecânica da UNESP – campus de Ilha Solteira antes da soldagem para possibilitar o melhor contato possível entre as duas faces da junta desses dois materiais. A Figura 5 mostra a retífica plana hidráulica utilizada.

Figura 5: Retificadora Plana Tangencial.



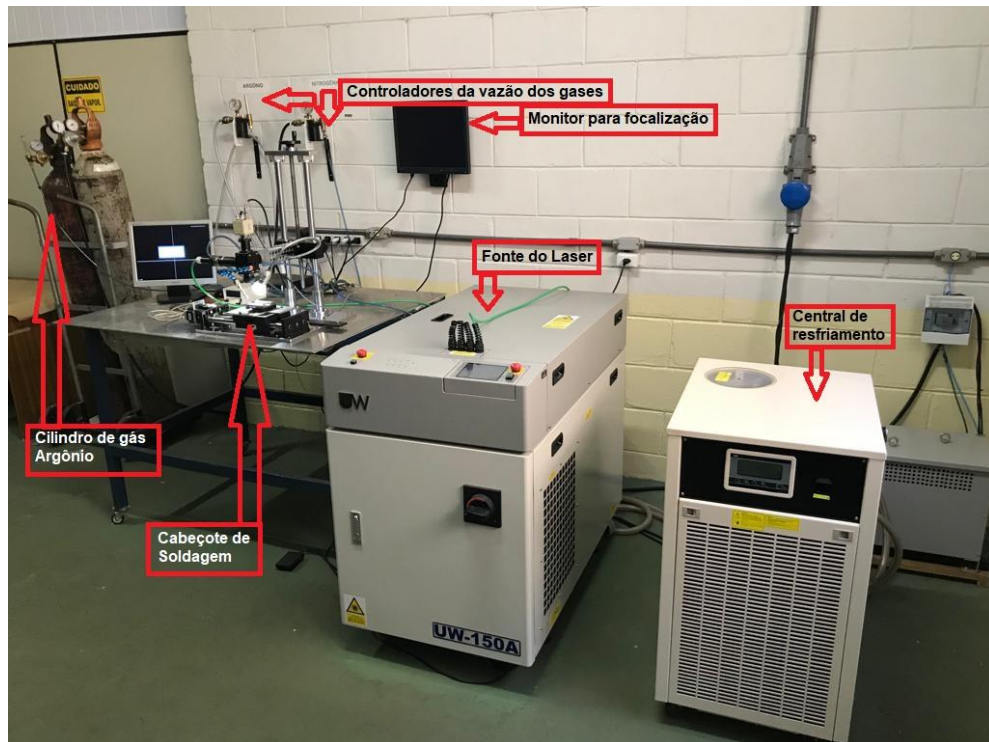
Fonte Próprio Autor.

### 3.2.1 Soldagem das chapas

A soldagem foi realizada no Laboratório de Soldagem da Unesp – Ilha Solteira. A soldagem foi autógena, ou seja, sem metal de adição. Foram soldados dois materiais diferentes, de um lado uma chapa de aço inoxidável superduplex UNS S32750 e do outro uma chapa de Inconel 625, portanto trata-se de uma soldagem dissimilar. O equipamento para soldagem à laser Nd:YAG do laboratório é fabricado pela United Winners, modelo UW 150A, composto pela fonte do laser, uma central de resfriamento, um cabeçote de soldagem, o sistema de alimentação do gás de proteção e uma mesa para fixação das chapas com velocidade controlada por um micro controlador Arduino. Também possui uma câmera para monitoramento do processo de soldagem em tempo real, mostrado pelo monitor ao lado do cabeçote. O equipamento para soldagem à laser é mostrado na Figura 6.



Figura 6: Equipamento de solda a laser pertencente à FEIS/UNESP.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.2 Parâmetros de soldagem.

As chapas foram posicionadas em uma junta de topo, sem abertura de raiz, soldada apenas de um lado. O gás de proteção utilizado foi o argônio, com fluxo de 15 l/min. Os parâmetros de soldagem foram selecionados de forma que fosse obtida a profundidade de penetração adequada, determinada por experimentos realizados. Foi estudado a influência da frequência no cordão de solda na resistência a corrosão. Os parâmetros utilizados na soldagem são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem.

Corpo de Prova	Frequência (Hz)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Largura temporal (ms)	Potência de pico (kW)	Energia de pulso (J)	Diâmetro médio do cordão (mm)
CP1	2,2	1,1	5	2	10	1,5
CP2	3,0	1,1	5	2	10	1,5
CP3	4,5	1,1	5	2	10	1,5
CP4	9,0	1,1	5	2	10	1,5

Fonte: Próprio Autor.

Figura 7: Imagem do display do equipamento do laser



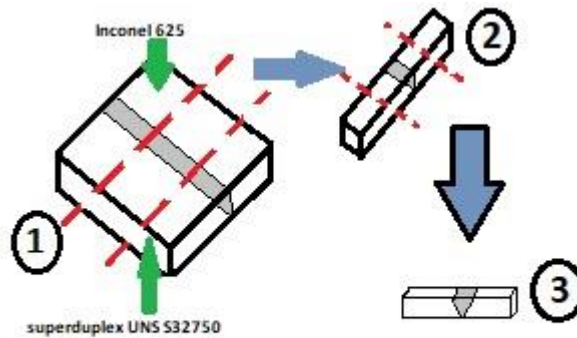
Fonte: Próprio Autor.

Display da máquina de laser mostrando a frequência de 9hz, tendo a potência de pico o valor de 2kW e a energia de pulso 5J.

### 3.2.3 Preparação das amostras para macrografias e micrografias

As chapas foram cortadas transversalmente ao cordão de solda, obtendo assim pequenas amostras para cada condição de soldagem. As operações de corte podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8: Operação de corte



Fonte: Próprio Autor.

Os procedimentos foram: 1-operação de corte transversal, 2-remoção do excesso de material, 3- a amostra pronta para embutimento.

As amostras foram embutidas utilizando resina epóxi transparente, em um molde de silicone, feito para acoplar várias amostras ao mesmo tempo.

Figura 9: Resina, catalisador e forma para embutir as amostras.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL

Após o embutimento, as amostras foram preparadas para o ataque químico, através do lixamento e polimento, utilizando os laboratórios da UNESP - Campus de

Ilha Solteira. A preparação das amostras foi realizada de acordo com o procedimento padrão: lixamento da superfície da amostra utilizando lixas de granulação mais grosseira (80) até granulações mais finas, seguido por polimento com alumina de 1 micrômetro, até que a superfície fique espelhada e livre de marcas de lixamento.

Após testar alguns ataques segundo os estudos realizados a microestrutura foi revelada utilizando um reagente contendo 10% de ácido oxálico, através de um ataque eletrolítico, utilizando 6V com duração de 35 segundos. Se tratando de uma soldagem dissimilar, cada material tem uma certa resistência a corrosão particular dele, após algumas tentativas conseguiu revelar a microestrutura.

As amostras foram levadas ao Estéreo Microscópio Zeiss – Discovery V8 do laboratório de microscopia da Unesp – Ilha Solteira, captando as imagens por uma câmera ligada a um microcomputador, que possui o software AxioVision.

Foi realizada a macrografia da seção transversal das amostras com intuito de observar a geometria do cordão de solda, o aparecimento ou não de descontinuidades como trincas e porosidades e verificar se há formação de uma zona afetada termicamente (ZAT).

Após a soldagem, embutimento, lixamento e polimento, as amostras foram atacadas com ácido oxálico 10% sob 4v por 15 segundos para que o cordão de solda ficasse mais visível.

A micrografia foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do laboratório multiusuário da Unesp – Ilha Solteira.

Além da análise de imagens, também se realizou a análise química do cordão de solda pela técnica de espectrometria por energia de dispersão, do inglês EDS, para determinar com maior precisão o cordão de solda e seus elementos constituintes.

### 3.4 CORROSÃO

Os ensaios de corrosão foram realizados no laboratório LAECO na UNESP campus de Ilha Solteira. Foi usado o aparelho VoltaLab® PGZ 402 conforme na figura a seguir.

Figura 10: VoltaLab PGZ 402



Fonte: Próprio Autor.

Os ensaios usaram uma superfície de  $0,5\text{cm}^2$  do material, foi usado o eletrólito água do mar natural AMN Guarujá – SP.

Figura 11: Recipiente do experimento.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 12: Área da superfície ensaiada.



Fonte: Próprio Autor.

Para evitar ruídos externos, todos os ensaios foram realizados dentro da gaiola de Faraday, onde permite criar uma barreira de isolamento para que não cause interferências.

Figura 13: Gaiola de Faraday



Fonte: Próprio Autor.

Figura 14: Equipamento completo para realizar os ensaios de corrosão.



Fonte: Próprio Autor.



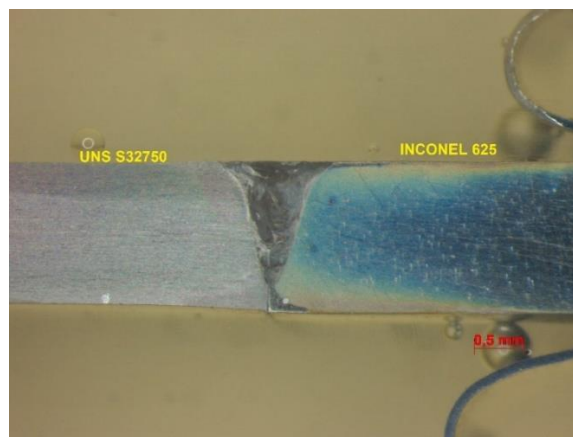
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE MACROGRAFICA

Foram realizadas as macrografias das seções transversais das amostras com intuito de observar a geometria do cordão de solda. As macrografias serão apresentadas nas figuras 15, 16, 17 e 18. Todas com aparência Keyhole, nota-se que com frequências maiores a largura da zona fundida fica maior, e com menores frequências a largura diminui.

#### 4.1.1 CP1 frequência de solda 2,2HZ

Figura 15: Corpo de prova 1, soldado com frequência 2,2 hz

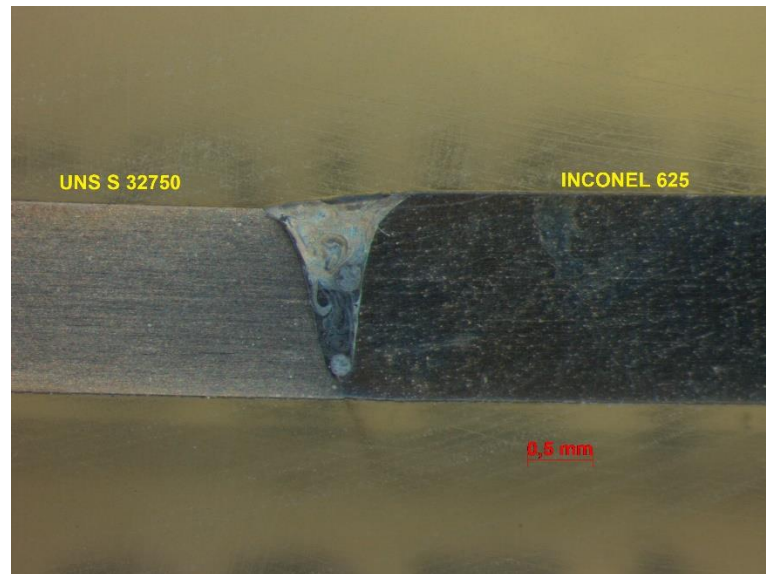


Fonte: Próprio Autor.



#### 4.1.2 CP2 frequência de solda 3 HZ

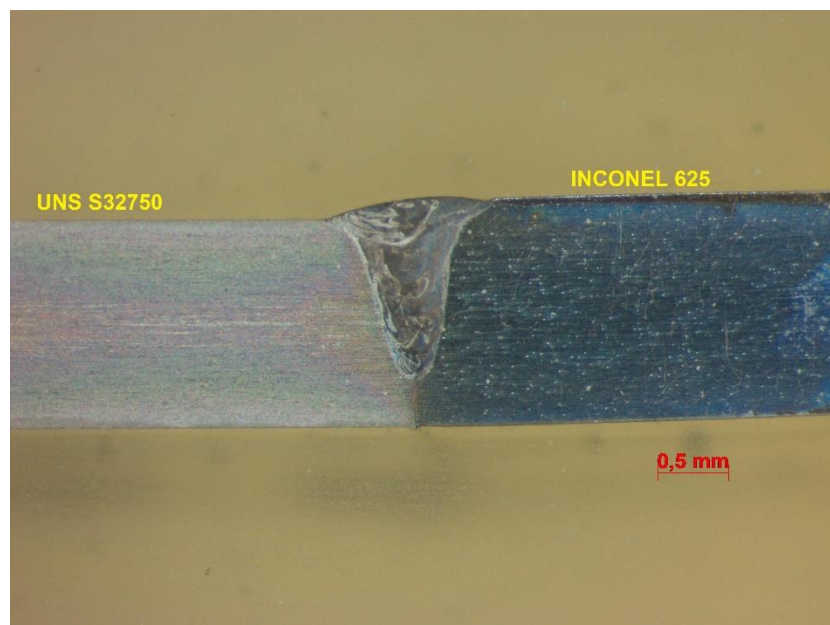
Figura 16: Corpo de prova 2, soldado com frequência 3hz



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.3 CP3 frequência de solda 4,5 HZ

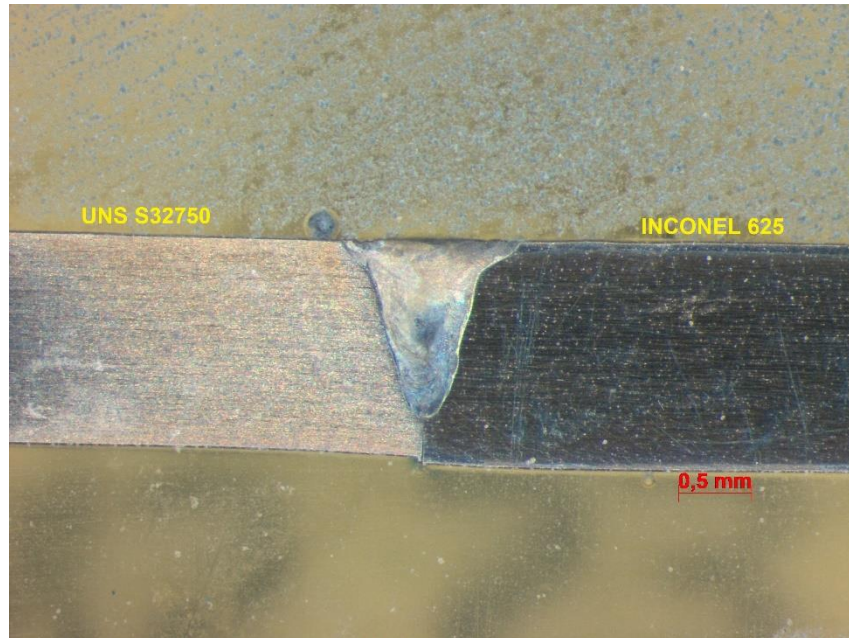
Figura 17: Corpo de prova 3, soldado com frequência 4,5 hz



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1.4 CP4 frequência de solda 9 HZ

Figura 18: Corpo de prova 4, soldado com frequência 9 hz



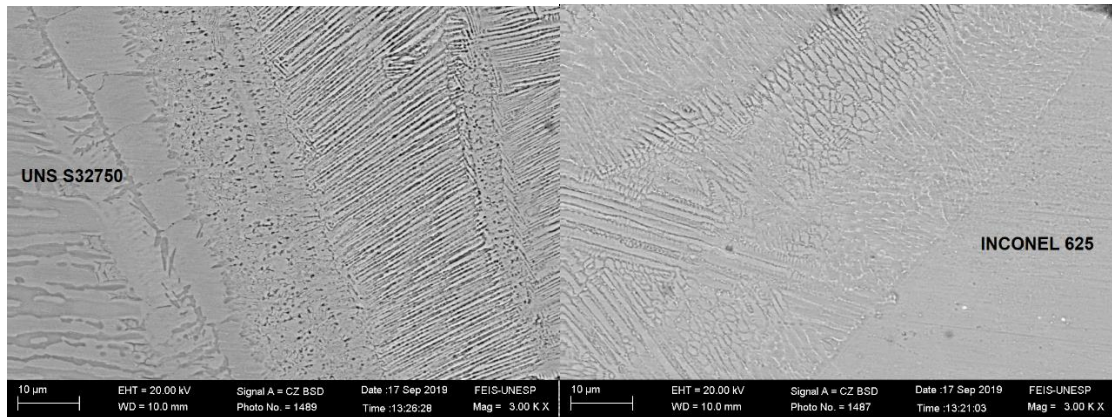
Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2 MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA

A micrografia foi realizada em todas as amostras. Houve dificuldade em revelar a microestrutura, pois cada material possui resistência à corrosão diferente, após testes, o ataque que se mostrou mais eficaz foi eletrolítico com o ácido oxálico 10% a 6V por 45 segundos. As Figuras 14, 15, 16, 17 mostram as micrografias dos cordões de solda utilizando o MEV.

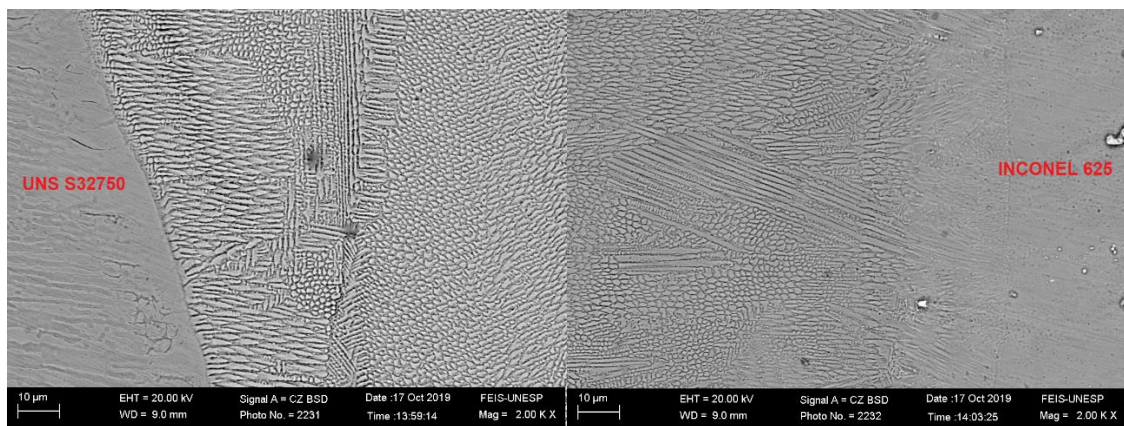


Figura 19: Micrografia da solda com frequência 2,2 hz utilizando o MEV.



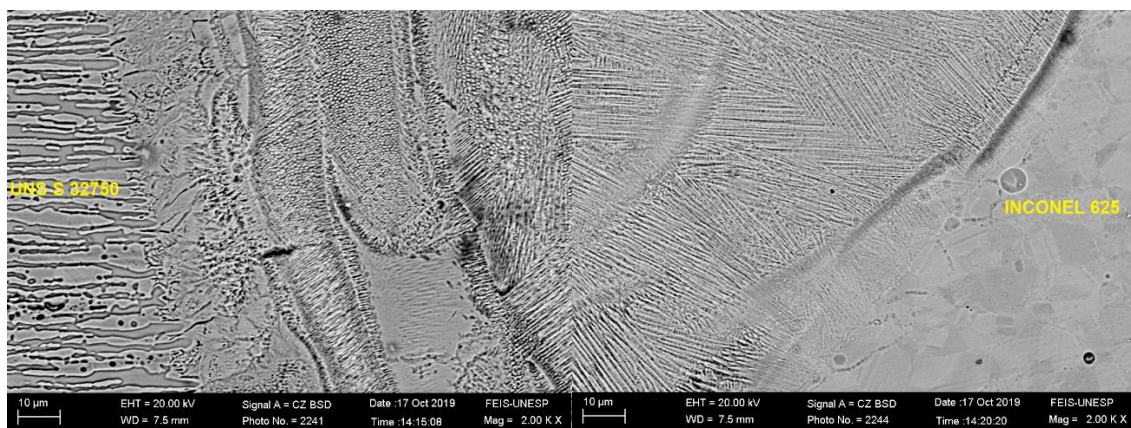
Fonte: Próprio Autor.

Figura 20: Micrografia da solda com frequência 3,0 hz utilizando o MEV.



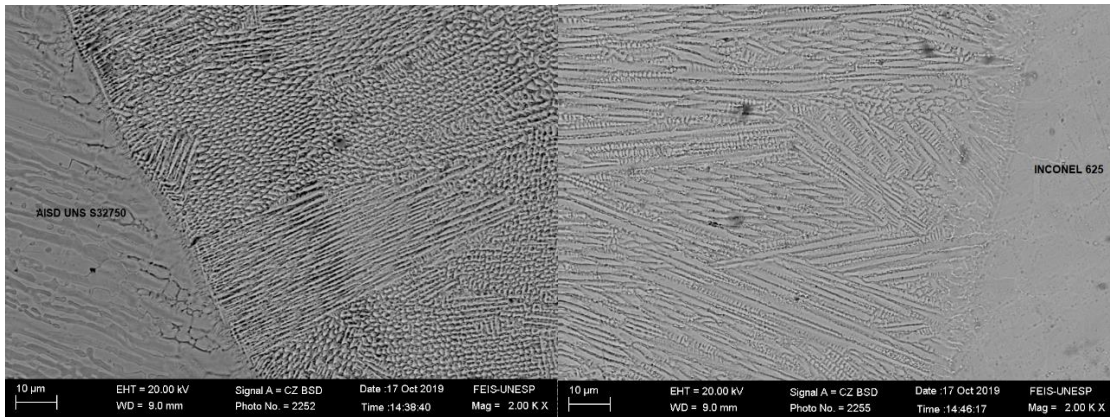
Fonte: Próprio Autor.

Figura 21: Micrografia da solda com frequência 4,5 hz utilizando o MEV.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 22: Micrografia da solda com frequência 9,0 hz utilizando o MEV.



Fonte: Próprio Autor.

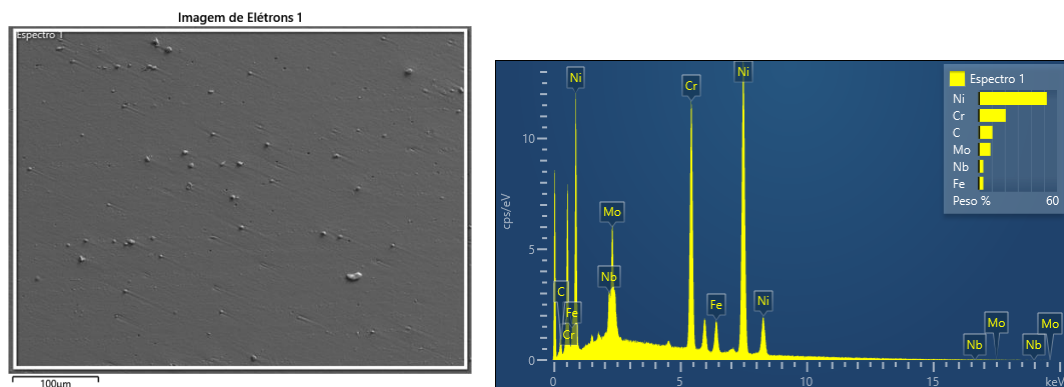
É possível observar nas figuras que há uma pequena e quase imperceptível ZAT (zona afetada termicamente), a soldagem a laser apresenta essa característica.

#### 4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR EDS

Foram analisadas amostras dos corpos de prova, com mesmo ataque utilizado para microscopia óptica. Todas as análises de EDS por varredura por linha começam da esquerda para a direita, na esquerda encontra-se o Inconel 625, ao meio o cordão de solda e mais à direita tem-se o UNS S32750. O Cromo de mantém na média, o Molibdênio e Níquel possuem maior concentração no Inconel, e vai caindo de concentração à medida que se aproximam do superduplex.

##### 4.3.1 CP 1, frequência de solda 2,2HZ.

Figura 23: Composição por EDS no Inconel na amostra 2,2hz



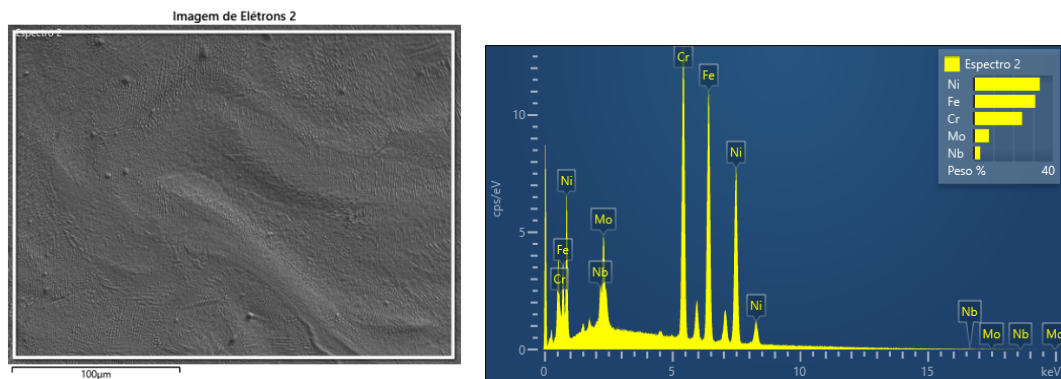
Fonte: Próprio Autor.



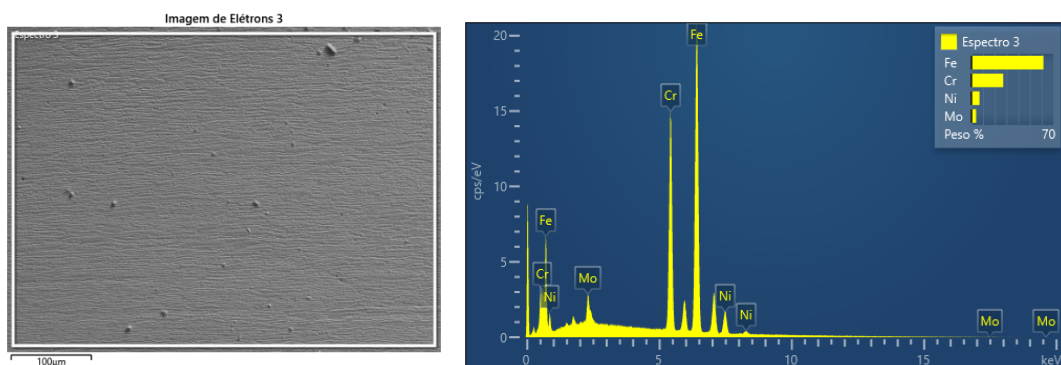
Tabela 4: Composição por EDS na amostra 2,2hz

CP1	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
<b>Inconel</b>	20,78	3,64	52,23	3,66	9,09
<b>UNS</b>	27,25	61,56	7,06	-----	4,13
<b>Cordão de solda</b>	24,46	31,11	33,40	3,32	7,70

Fonte: Próprio Autor

Figura 24: Composição por EDS no cordão de solda na amostra 2,2hz

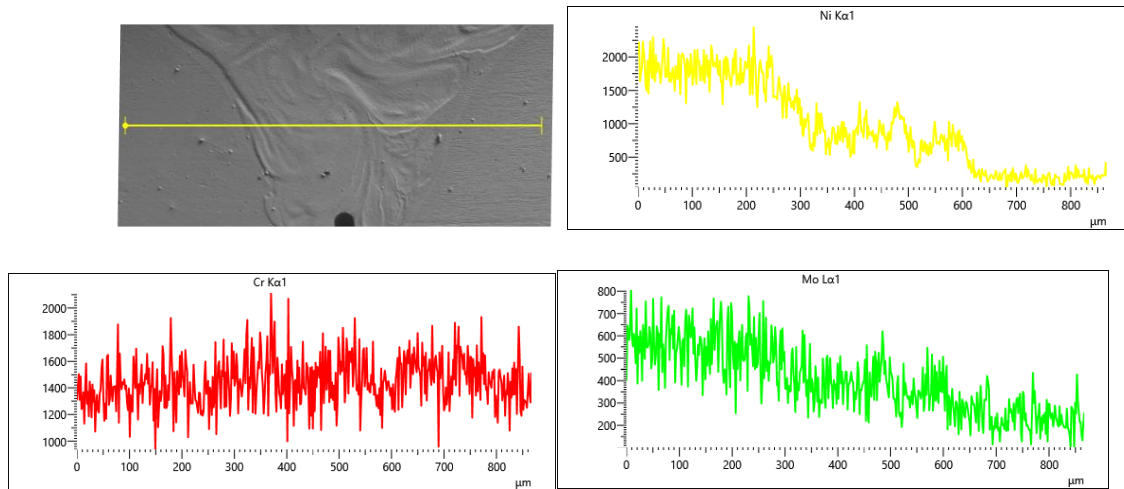
Fonte Próprio Autor.

Figura 25: Composição por EDS no UNS S32750 na amostra 2,2hz:

Fonte: Próprio Autor

Passando uma linha que começa no Inconel e passa pela solda e finaliza no superduplex mostra variação da quantidade dos elementos Ni, Cr e Mo no CP1 (2,2hz)

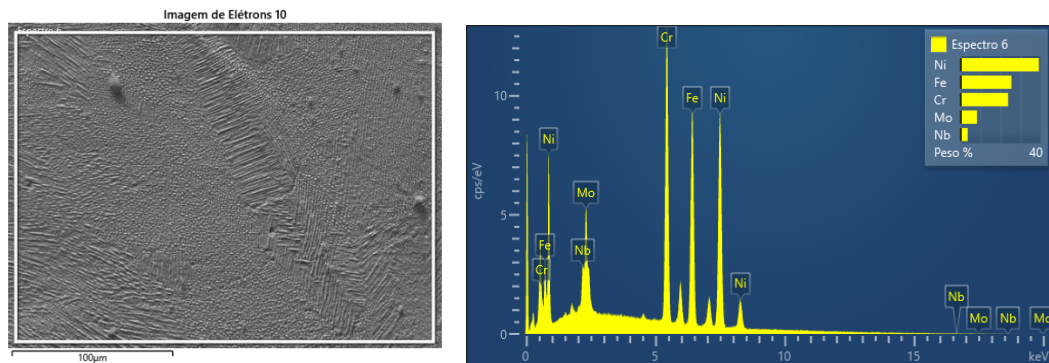
Figura 26: Análise dos principais elementos



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.2 CP2, frequência de solda 3hz.

Figura 27: Composição por EDS na amostra 3hz



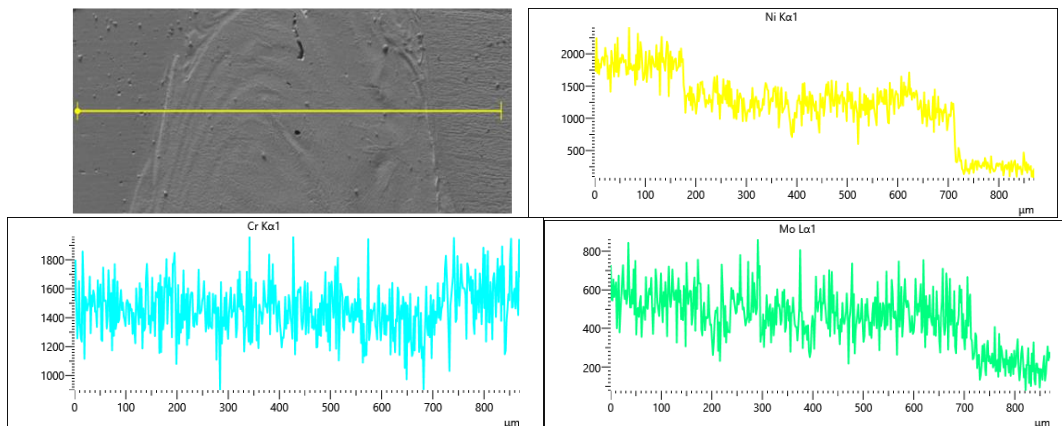
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5: Composição por EDS na amostra 3hz

CP2	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
<b>Cordão de solda</b>	23,77	25,39	39,10	3,53	8,20

Fonte: Próprio Autor.

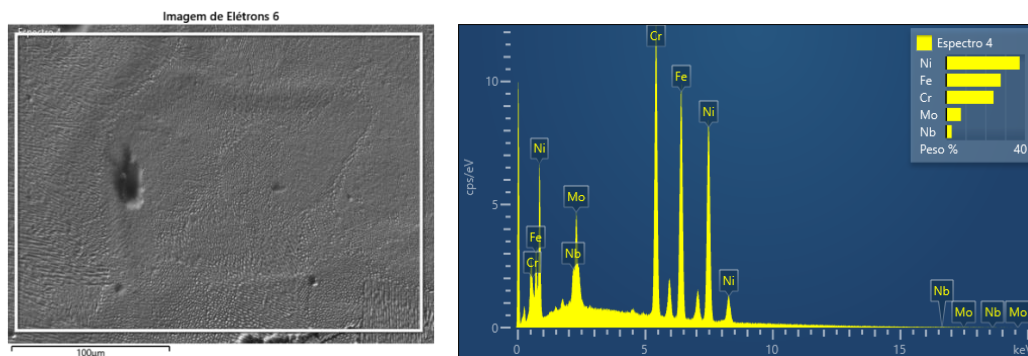
Figura 28: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP2 (3Hz).



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.3 CP 3, frequência de solda 4,5hz.

Figura 29: Composição por EDS na amostra 4,5hz



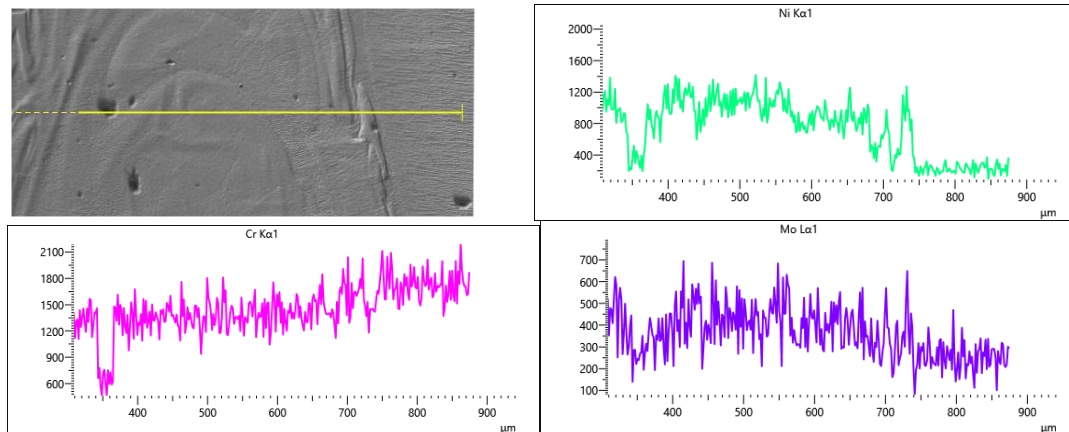
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 6: Composição por EDS na amostra 4,5hz

CP3	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
<b>Cordão de solda</b>	24,15	27,79	37,39	3,02	7,66

Fonte: Próprio Autor

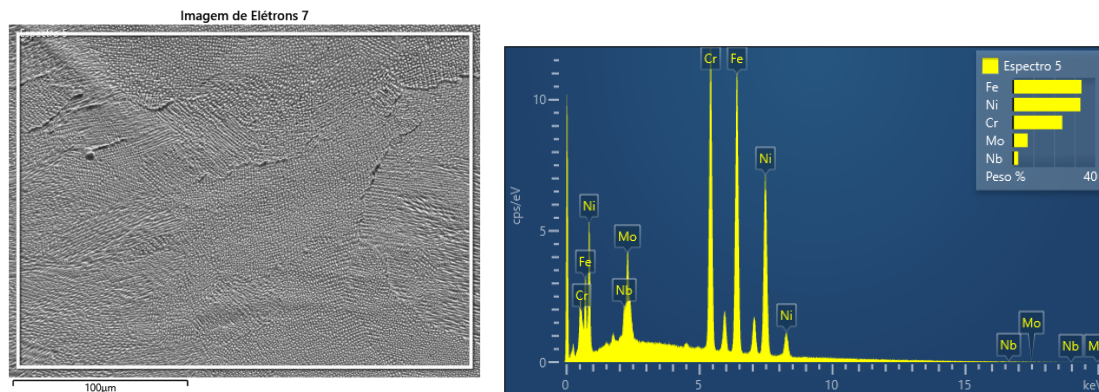
Figura 30: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP3 (4,5Hz).



Fonte: Próprio Autor

#### 4.3.4 CP4, frequência de solda 9hz.

Figura 31: Composição por EDS na amostra 9hz



Fonte: Próprio Autor

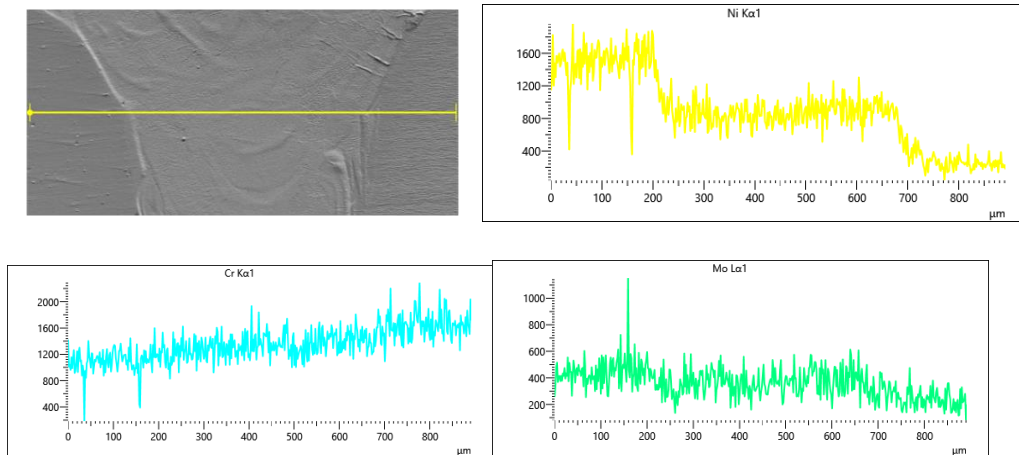
Tabela 7: Composição por EDS na amostra 9hz

CP4	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
<b>Cordão de solda</b>	23,98	33,33	32,83	2,63	7,24

Fonte: Próprio Autor



Figura 32: Variação dos elementos Ni, Cr e Mo no CP4 (9hz).



Fonte: Próprio Autor.

A tabela 10 mostra resumidamente a composição por EDS.

Tabela 10. Composição dos materiais usados.

	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>
<b>Inconel</b>	20,78	3,64	52,23	3,66	9,09
<b>UNS S 32750</b>	27,25	61,56	7,06	-----	4,13
<b>CP1</b>	24,46	31,11	33,40	3,32	7,70
<b>CP2</b>	23,77	25,39	39,10	3,53	8,20
<b>CP3</b>	24,15	27,79	37,39	3,02	7,66
<b>CP4</b>	23,98	33,33	32,83	2,63	7,24

Fonte: Próprio Autor.

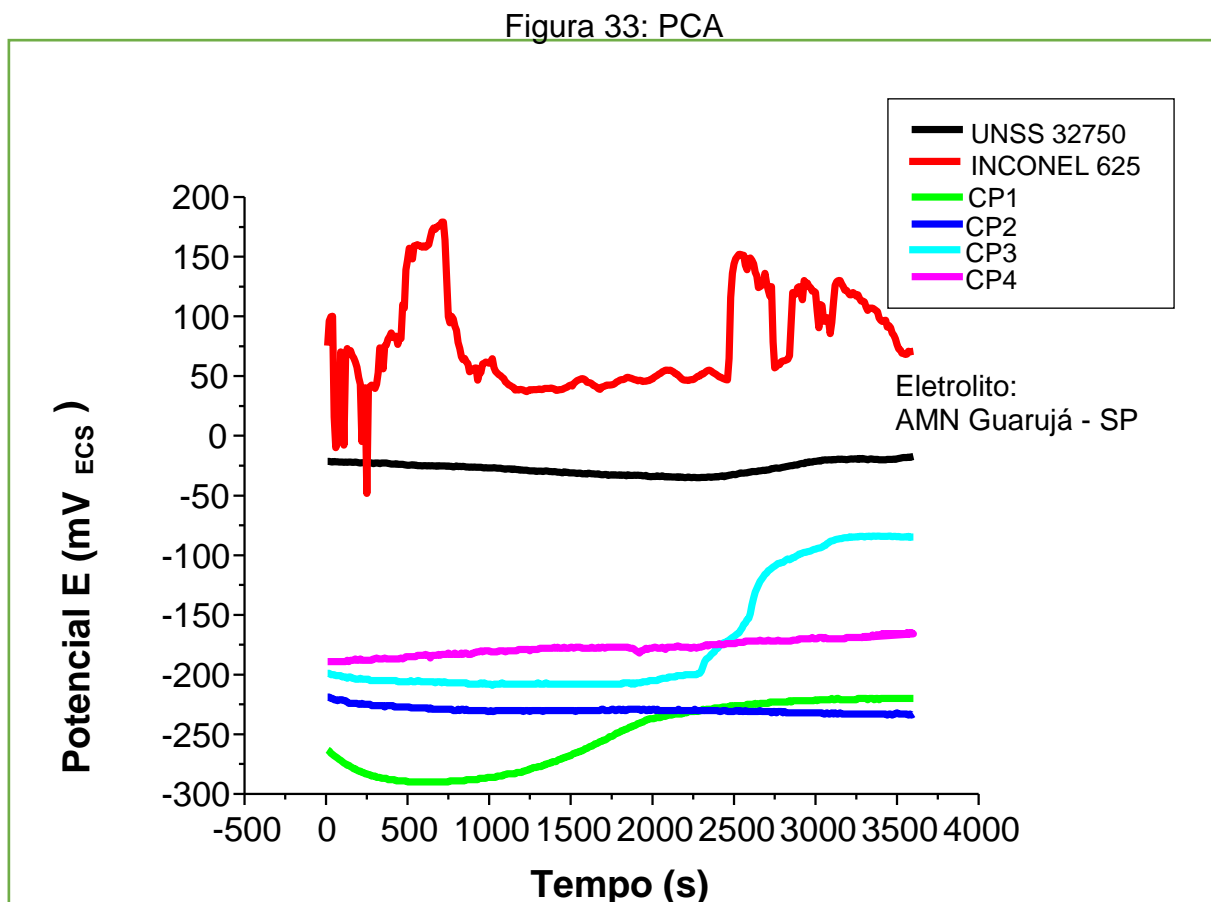
A composição química dos metais de solda não apresentou discrepâncias nos corpos de prova.

#### 4.4 ENSAIO DE CORROSÃO.

O ensaio de corrosão realizado, visou analisar o comportamento corrosivo das amostras mediante água do mar. Foram realizados ensaios de Potencial de circuito aberto (PCA), Potencial de Pite e Curva de polarização potencioestática

#### 4.4.1 Potencial de circuito aberto (PCA)

Ou na sigla inglesa OCP. O PCA mostra uma tendência a corrosão, quanto maior o potencial, menor a tendência a corroer, logo, o potencial vai influenciar a reação, quanto mais negativo o potencial mais rápida a reação de corrosão, a figura a seguir mostra o gráfico do PCA.



Fonte: próprio autor

O Inconel inicia e termina após o período do teste em 75mV mantendo-se estável. O UNS S32750 inicia em -24mV e finaliza o teste em -20mV uma variação mínima. O corpo de prova 1, soldado em 2,2Hz inicia em -265mV e encerra o teste em -215mV apresentando a segunda maior variação. O corpo de prova 2, soldado com frequência 3Hz se mantém praticamente estável, iniciando em -220mV e finalizando em -230mV. O corpo de prova 3, soldado com frequência de 4,5Hz apresentou a maior variação, iniciou o teste em -200mV e encerrou com -73mV. O

corpo de prova 4, soldado na condição de 9Hz apresenta variação de 25mV, iniciando o teste em -190mV e encerrando com 165mV. Sendo o corpo de prova 2 o único que apresentou diminuição no potencial, mas como é menor que 100mV considera estável dentro do tempo ensaiado.

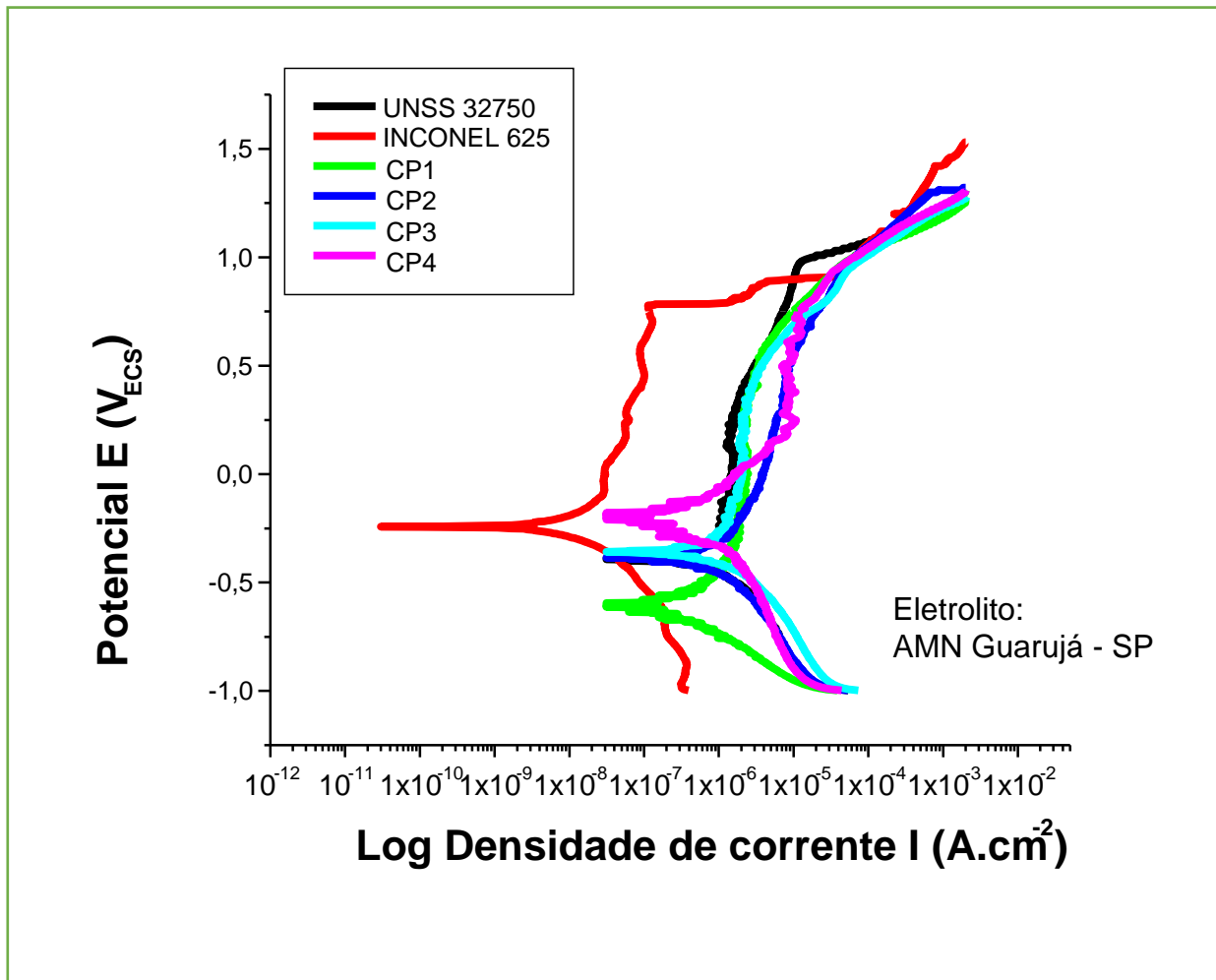
Todas regiões soldadas apresentaram potencial de corrosão inferior aos materiais base, porém como possuem variação no potencial inferior a 100mV, considera-se estável dentro do tempo estudado. Os CP1, CP3, CP4 aumentaram o potencial o que sugere uma criação de filme que atrasa a corrosão.

#### 4.4.2 Potencial de Pite

É uma curva de polarização potenciodinâmica das os parâmetros de corrosão: **E** (**i=0**) potencial de corrosão, **R<sub>p</sub>** resistência de polarização, **I<sub>corr</sub>** densidade de corrente de corrosão, **E<sub>pi</sub>** potencial de pite inicial e **E<sub>pf</sub>** potencial de pite final (2mA)

O ensaio iniciou em -1000mV. Taxa de varredura de 1mV/s. Encerrou ao atingir uma densidade de corrente de 2mA. Como apresentados nas figuras 34 e 35 a seguir.

Figura 34: Potencial de Pite



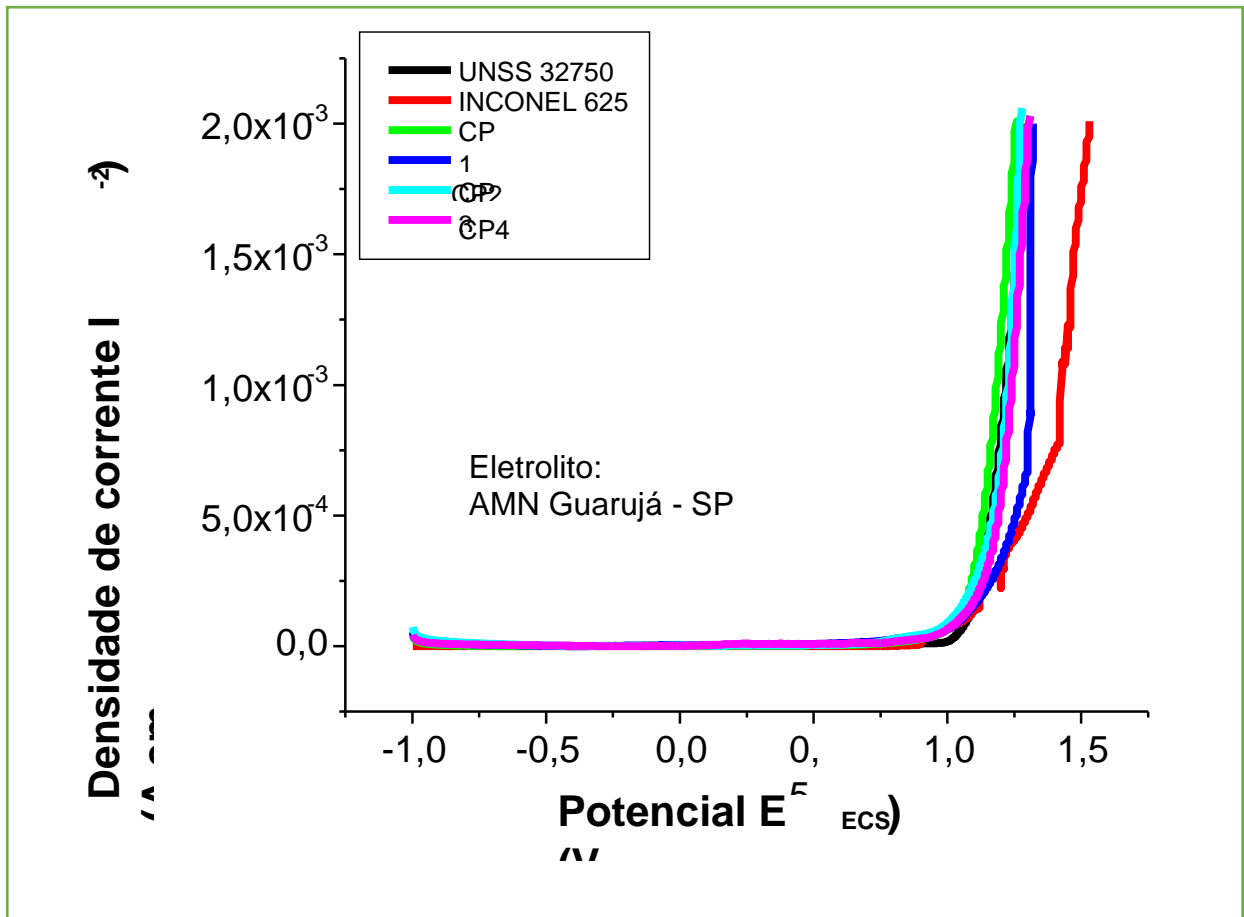
Fonte: próprio autor

O CP4 e o Inconel apresentam os maiores potenciais, o que induz a uma dificuldade de corroer. O CP1, CP2, CP3 e o superduplex apresentaram um potencial inferior aos citados anteriormente.

A corrente negativa indica que está depositando material, já a corrente positiva retira material, ou seja, quanto maior a corrente, maior a facilidade de corroer.

Na figura 35, polarização potenciodinâmica, nota-se uma vasta região de potencial onde os materiais tendem a passivação, até uma região de potencial onde sofre pite, perto de  $E_{corr} \approx 1000mV$ .

Figura 35: Curva de polarização potenciodinâmica.



Fonte: próprio autor

Tabela 8: Parâmetros eletroquímicos das curvas de polarização

	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	<b>I<sub>corr</sub> (μA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>p</sub> (kΩ.cm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>i</sub> (mV)</b>	<b>E<sub>f</sub> (mV)</b>
<b>UNSS 32750</b>	-357.8	0.5318	44.07	990	1320
<b>INCONEL 625</b>	-249.3	0.0102	2510	900	1520
<b>CP1</b>	-611.8	0.3468	35.08	820	1250
<b>CP2</b>	-393.1	0.9002	37.54	780	1320
<b>CP3</b>	-364.4	0.4961	30.46	770	1270
<b>CP4</b>	-205.9	0.1991	114.38	800	1300

Fonte: Próprio Autor

Os potenciais iniciais e finais se alteraram significativamente. Como esperado o Inconel apresentou maior potencial.

## 5 CONCLUSÕES

Nos ensaios de corrosão por potencial de circuito aberto (OCP) e espectroscopia de impedância eletroquímica, constatou-se que a resistência a corrosão varia de acordo com a frequência de soldagem utilizada, já que a composição química da região de solda não apresentou discrepâncias.

As macrografias dos cordões de solda apresentam geometria característica da soldagem à laser no modo “keyhole”, de formato delgado e profundo.

O cordão possui mais austenita do que ferrita, graças ao nitrogênio e níquel do AISD e a elevada quantidade de níquel presente no Inconel 625, conforme a análise de EDS no MEV.

Os CP1, CP3 e CP4 aumentaram o potencial no decorrer do tempo de ensaio, isso induz que houve a criação de filme que atrasa a corrosão.

A amostra com menor frequência 2,2hz, o CP1, é o que apresenta menores valores de resistência juntamente com o CP3, embora tenha aumento de potencial a resistência a corrosão é menor.

A corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) é proporcional à velocidade de corrosão do metal no sistema em questão. O potencial correspondente a esse ponto é o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ). No gráfico de PCA, nota-se uma vasta região de potencial onde os materiais tendem a passivação, até uma região de potencial onde sofre pite, perto de  $E_{corr} \approx 1000\text{mV}$ .

As curvas de Tafel obtidas para Inconel 625 e corpo de prova 04 (9hz) mostram que o Inconel é o mais resistente entre os testados e o CP4 é a melhor condição de soldagem. O CP4 se aproxima melhor dos resultados do Inconel que se saiu melhor nos testes. A frequência maior mostra uma combinação melhor dos elementos, resultando em uma resistência maior dos outros corpos de prova. O CP4 dentre as condições de soldagem apresentou a melhor resistência a corrosão por pite.

## REFERÊNCIAS

- [1] AL-FADHLI, H. Y. et al. The erosion–corrosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) thermally sprayed inconel-625 coatings on different metallic surfaces. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 200, n. 20/21, p. 5782-5788, 2006.
- [2] CANTARIN, T. N. **Caracterizações mecânicas e microestruturais do aço AISI 8630 modificado revestido com a liga de níquel 625 por soldagem GTAW**. 2011. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [3] SILVA, C. C. *et al.* Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga à base de níquel Inconel 625. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 251-263, 2012.
- [4] OUTOKUMPU. **Outokumpu stainless steel handbook**. Suécia: Outokumpu Oyj, 2013.
- [5] KEOWN, S. R.; PICKERING, F. B. Niobium in stainless steels. *In*: NIOBIUM INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1981, S. Francisco, 1981. **Proceedings** [of the ...] Warrendale: The Metallurgical Society of AIME, 1982. p.1137-1141.
- [6] POHL, M.; WISCHNOWSKI, F. Influence of the solution heat treatment temperature on the microstructure and the corrosion behaviour of ferritic-austenitic cast materials. *In*: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 49, 1994, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 1994. p. 363-377.
- [7] MODENESI, P. J. **Soldabilidade de aços austeníticos**. São Paulo: SENAI, 2001.
- [8] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Editora Blucher, 1992. 494 p.
- [9] READY, J. F. **Industrial applications of lasers**. 2. ed. Ed. São Paulo: Academic Press, 1997.
- [10] MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: [s. n.], 1996. 477 p. Disponível em: [http://joinville.ifsc.edu.br/~leonidas/soldagem/livro\\_completo.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~leonidas/soldagem/livro_completo.pdf). Acesso em: 20 abr. 2021.
- [11] NICKEL. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/nickel-chemical-element>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- [12] DAVIS, J. R. *et al.* (ed.). **Nickel, cobalt, and their alloys**. Materials Park: ASM International, 2000.

- [13] NUNES, R. K. *et al.* Properties and selecton: nonferrous alloys and special-purpose materials. The materials information company. *In: ASM Handbook International*®. Materials Park: ASM, 1990. V. 2.
- [14] OLIVEIRA, W. E. **Estudo do reparo do revestimento de inonel 625 em aços baixa liga sem tratamento térmico pós-soldagem.** 2014. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: [http://dippg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/34\\_Waldemiro%20Eccard%20de%20Oliveira.pdf](http://dippg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/34_Waldemiro%20Eccard%20de%20Oliveira.pdf). Acesso em: 20 abr. 2021.
- [15] RESENDE, D. L. *et al.* Estudo do comportamento mecânico da superliga inonel 718 em temperaturas elevadas. *In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, ENCITA*, 15, 2009, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: DCTA/ITA, 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/22965498-Estudo-do-comportamento-mecanico-da-superliga-inonel-718-em-temperaturas-elevadas.html>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [16] HAN, W. J.; BYEON, J. G.; PARK, K. S. Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd: YAG laser beam. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 113, n. 1-3, p. 234-237, 2001.
- [17] KAIN, R. M. Evaluation of crevice corrosion. *In: ASM International*®. 9. ed. **Metals handbook**, 1987. Materials Park: ASM International®, 1987. V. 13, p. 303-313.
- [18] ASM Metals Handbook. **Properties and selection: metallography technique and microstructures.** Materials Park: American Society of Materials International (ASM), 2004. V. 9.
- [19] LORIA, E. A. (ed.). **Superalloy 718, 625 e various derivatives.** TMS, Warrendale: TMS, 1991. 800 p.
- [20] SHANKAR, V.; RAO, K. B. S.; MANNAN, S. L. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. **Journal of Nuclear Materials**, Amsterdam, v. 288, n. 2-3, p. 222-232, 2001.
- [21] LI, S. *et al.* Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. **Journal of Materials Science & Technology**, Amsterdam, v. 31, n. 9, p. 946-952, 2015.
- [22] PAUL, C. P. *et al.* Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. **Optics & Laser Technology**, London, v. 39, n. 4, p. 800-805, 2007.
- [23] XU, X. *et al.* Morphologies, microstructures and properties of TiC particle reinforced Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdam, v. 740, p. 16-27, 2018.



- [24] XU, X. *et al.* Research on microstructures and properties of Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdam, v. 715, p. 362-373, 2017.
- [25] PAUL, C. P. *et al.* Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. **Optics & Laser Technology**, London, v. 39, n. 4, p. 800-805, 2007.
- [26] AL-FADHLI, H. Y. *et al.* The erosion–corrosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) thermally sprayed inconel-625 coatings on different metallic surfaces. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 200, v. 20/21, p. 5782-5788, 2006.
- [27] DURAND-CHARRE, M. **The microstructure of superalloys**. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [28] SMITH, W. F. **Nickel and cobalt alloys: structure and properties of engineering alloy**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1993. p. 487-536. Materials Science and Engineering.
- [29] OUTOKUMPU. **Outokumpu stainless steel handbook**. Suécia: Outokumpu Oyj, 2013.
- [30] CORREIO BRASILIENSE. **Produção média de petróleo no Brasil fecha 2016 com recorde anual**. Brasília, 2017. Disponível em: [http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2017/01/11/internas\\_economia,564345/producao-media-de-petroleo-no-brasil-fecha-2016-com-recorde-anual.shtml](http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2017/01/11/internas_economia,564345/producao-media-de-petroleo-no-brasil-fecha-2016-com-recorde-anual.shtml). Acesso em: 20 jun. 2017.
- [31] NERI, M. A.; COLA, R. Analysis of a martensitic stainless steel that failed due to the presence of coarse carbides. **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 47, p. 283- 289, 2001.
- [32] ASM Handbook. **Properties and selection: irons, steel and high-performance alloys**. 10. ed. Material Park: ASM International, 1990.
- [33] YAN, H. *et al.* Microstructure, texture and grain boundaries character distribution evolution of ferritic stainless steel during rolling process. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 209, p. 2627-2631, 2009.
- [34] NOBLE, D. N. **Selection of wrought duplex stainless steels: welding, brazing and soldering**. 10. ed. Materials Park: ASM International, 1993. V. 6, p. 471 – 480. ASM Handbook.
- [35] KU, J. S.; HO, N. J.; TJONG, S. C. Properties of electron beam welded SAF 2205 duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 63, p. 770-775, 1997.

- [36] ZAMBON, A.; BONOLLO, F. Rapid solidification in laser welding of stainless steels. **Materials Science and Engineering A**, Wilmington, v. 178, p. 203-207, 1994.
- [37] MATHUPANDI, V. *et al.* Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31805) weld metals. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 59, p. 2305-2309, 2005. Disponível em: [https://www.academia.edu/7699533/Effect\\_of\\_nickel\\_and\\_nitrogen\\_addition\\_on\\_the\\_microstructure\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_power\\_beam\\_processed\\_duplex\\_stainless\\_steel\\_UN31803\\_weld\\_metals](https://www.academia.edu/7699533/Effect_of_nickel_and_nitrogen_addition_on_the_microstructure_and_mechanical_properties_of_power_beam_processed_duplex_stainless_steel_UN31803_weld_metals). Acesso em: 20 abr. 2021.
- [38] VILLARES METALS. **Aço inoxidável superduplex / duplex**. Brasil, 2017. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Duplex-e-Super-Duplex/VDF53-UNS-S32750-WNr.-1.4410-F53>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- [39] COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 2006.
- [40] MODENESI, P. J. **Soldabilidade de aços austeníticos**. São Paulo: SENAI, 2001.
- [41] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: E. Blücher, 2008.
- [42] RAMKUMAR, K. D. *et al.* Metallurgical and mechanical characterization of electron beam welded super-duplex stainless steel UNS 32750. **Journal of Manufacturing Processes**, London, v. 16, n. 4, p. 527–534, 2014.
- [43] BADJI, R. *et al.* Phase trans-formation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds. **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 59, n. 4, p. 447–453, 2008.
- [44] PRAMANIK, A.; LITTLEFAIR, G.; BASAK, A. K. Weldability of duplex stainless steel. **Materials and Manufacturing Processes**, New York, v. 30, n. 9, p. 1053–1068, 2015.
- [45] SARKARI, M. *et al.* Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints. **Materials Science Engineering A**, Wilmington, v. 608, p. 35–45, 2014.
- [46] YILMAZ, R.; TUMER, M. Microstructural studies and impact toughness of dissimilar weldments between AISI, 316 L and AH36 steels by FCAW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 67, p. 1433–1447, 2013.

- [47] ARIVAZHAGAN, N. *et al.* An assessment of hardness, impact strength, and hot corrosion behaviour of friction-welded dissimilar weldments between AISI, 4140 and AISI, 304. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 39, p 679–689, 2008.
- [48] GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1996.
- [49] GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- [50] PEREZ, N. **Electrochemistry and corrosion science**. Puerto Rico: Department of Mechanical Engineering University of Puerto Rico. 2004.
- [51] POHLMAN, S. L. General corrosion. *In*: ASM Corrosion. 13. ed. Materials Park: ASM International, 1987.
- [52] WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Ed. USP, 2002.
- [53] MUNEKATA, R. M. **Soldagem em lâminas finas de hastelloy c-276 por laser pulsado Nd: YAG**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94473>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [54] MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Osasco: SENAI, 2001. 100 p.
- [55] DULEY, E. E. **Laser welding**. Nova York: A Wiley-Interscience Publication, 1998.
- [56] BERRETTA, J. R. *et al.* Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 45, p. 960-966, 2007. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2007/12263.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2021.