

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDA MEDEIROS JACQUES

**ANÁLISE DA CORROSÃO DE INCONEL 625 DEPOSITADO POR  
*DIRECTED ENERGY DEPOSITION* EM SUBSTRATOS DE AÇO  
ASTM A36 E ASTM A516 gr. 70**

Florianópolis  
2022

FERNANDA MEDEIROS JACQUES

**ANÁLISE DA CORROSÃO DE INCONEL 625 DEPOSITADO POR  
*DIRECTED ENERGY DEPOSITION* EM SUBSTRATOS DE AÇO  
ASTM A36 E ASTM A516 gr. 70**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Milton Pereira

Co-orientador: M. Sc. Eng. Adriano de Souza Pinto Pereira

Florianópolis  
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDA MEDEIROS JACQUES

**ANÁLISE DA CORROSÃO DE INCONEL 625 DEPOSITADO POR  
*DIRECTED ENERGY DEPOSITION* EM SUBSTRATOS DE AÇO  
ASTM A36 E ASTM A516 gr. 70**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheira de Materiais e aprovado em forma final pela Comissão Examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de setembro de 2022.

---

Prof. Celso Peres Fernandes  
Coordenador do curso

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Msc. Eng. Mec. Renato Camponogara Panziera

---

Msc. Eng. de Materiais Bruno Borges Ramos

*À minha família, meu maior orgulho  
e porto seguro.*

## **AGRADECIMENTO**

*Eu gostaria de agradecer à equipe do Laboratório de Mecânica de Precisão, ao meu orientador Professor Milton Pereira e coorientador Adriano de Souza Pinto Pereira, por me auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho.*

*À toda Coordenação do curso, mas principalmente ao Coordenador do curso, Professor Celso Peres Fernandes e à Secretária do curso Tatiane Tramontin da Silva Nunes, por me incentivarem a continuar a minha trajetória.*

*Aos meus pais, Alexandre Jacques e Betina Medeiros, que sempre me deram o amor incondicional, segurança e apoio durante toda a minha vida, independente das minhas escolhas.*

*À minha irmã e cunhado, Vanessa Jacques e Rickson Vasconcelos, por serem meus companheiros e me alegrarem sempre que estamos juntos.*

*E ao meu namorado, Márcio Ferreira, que esteve comigo em todos os momentos, bons e ruins, sempre me dando amor e trilhando o caminho ao meu lado.*

*“Se você pensa que pode ou se pensa que não  
pode, de qualquer forma você está certo.”*

*(Henry Ford)*

## RESUMO

Cada vez mais os processos na área petroleira requerem materiais com mais resistência à corrosão devido às condições extremas em que são submetidos. O desenvolvimento das novas tecnologias visa aumentar a vida útil do material com baixo custo de fabricação. Uma das alternativas encontradas para tal foi a utilização do aço carbono ASTM A516gr.70, revestido com superliga de níquel. Este trabalho utilizou o substrato de aço carbono ASTM A36 como sendo o material de base para a parametrização do processo de *laser directed energy deposition* (L-DED), ou deposição de energia direcionada a laser, visando demonstrar que é possível utilizar esse substrato, que é mais barato e mais simples, para parametrizar os testes de L-DED com alimentação a pó e ensaios de polarização cíclica para o aço ASTM A516gr.70. Pó de Inconel 625® foi depositado primeiramente sobre o substrato ASTM A36, e posteriormente em ambos, com diferentes parametrizações, variando velocidade, potência e distância focal do laser, sendo em seguida usinados até a camada atingir a altura de 0,5 mm, e submetidos ao ensaio de polarização cíclica, em uma solução aquosa de 3,5% de NaCl diluído em água destilada. As amostras selecionadas foram analisadas por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS). A partir do ensaio de corrosão, foi mostrado que as amostras com porcentagem de diluição de 2,0% tiveram um modo diferente de corrosão, além de corroerem menos, quando comparada com as de 23,1% e 40,0% de diluição, em ambos os substratos. Também foi constatado que a amostra com diluição de 23,1% corroeu menos que a de 40,0%. Ficou evidenciado que ao ser depositado, o molibdênio presente no pó do Inconel 625® precipitou primeiramente na base da deposição e entre os cordões, aumentando sua concentração, diminuindo a concentração de cromo, de forma a esse ser o motivo da corrosão preferencial entre os cordões.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Deposição de Energia Direcionada a Laser. Inconel 625. Corrosão. Superliga. Diluição. A516gr.70.*

## ABSTRACT

More and more processes in the oil field require materials with higher corrosion resistance, according to the extreme conditions in which they are submitted. The development of new technologies aims to increase the lifetime of the material, with low manufacturing costs. One of the alternatives found for this was the use of ASTM A516gr.70 carbon steel, coated with nickel superalloy. This work used the ASTM A36 carbon steel substrate as the base material for parameterization of the laser directed energy deposition (L-DED) process, aiming to demonstrate that it is possible to use this substrate, which is cheaper and simpler, to parameterize the L-DED tests with powder feeding and cyclic polarization tests for ASTM A516gr.70 steel. Inconel 625® powder was first deposited on the ASTM A36 substrate, and later on both, with different parameterizations, varying laser speed, power and focal length, and then machined until the layer reached a height of 0.5 mm, and subjected to cyclic polarization testing, in an aqueous solution of 3.5% NaCl diluted in distilled water. The selected samples were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). From the corrosion test, it was shown that the samples with 2.0% dilution percentage had a different mode of corrosion, and also corroded less, when compared to those with 23.1% and 40.0% dilution, on both substrates. It was also found that the sample with 23.1% dilution corroded less than the 40.0% dilution. It was evidenced that when deposited, the molybdenum present in Inconel 625® powder precipitated firstly at the base of the deposition and between the bead, increasing its concentration, decreasing the chromium concentration, so that this could be the reason for the preferential corrosion between the beads.

**KEY WORDS:** *Laser Directed Energy Deposition. Inconel 625. Corrosion. Superalloy. Dilution. A516gr.70.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes métodos de l-DED: a) Pré deposição. b) Alimentador de Pó. c) Alimentador de Arame. ....	18
Figura 2 – Diferentes formas de alimentação de pó. a) Fora do eixo. b) Coaxial contínuo. c) Coaxial descontínuo. ....	19
Figura 3 – Representação de um bocal coaxial contínuo completo. ....	20
Figura 4 – Esquema de célula de três eletrodos. ....	23
Figura 5 – Formas de corrosão: a) Pite. b) Alveolar. c) Por placas. ....	24
Figura 6 – Formas de pite, segundo a Norma ASTM. ....	25
Figura 7 – Esquema de curva de polarização potenciodinâmica. ....	26
Figura 8 – Extrapolação de Tafel. ....	27
Figura 9 – Representação de uma curva de polarização cíclica. ....	28
Figura 10 – Gráficos de corrosão com histerese positiva e negativa. ....	29
Figura 11 – Esquema de resistência à corrosão de superligas de níquel. ....	31
Figura 12 – Fluxograma Metodologia Utilizada. ....	34
Figura 13 – Sistema IPG/YLS 10000 LASER. ....	35
Figura 14 – Painel de comando numérico CNC SINUMERIK 840D SL. ....	36
Figura 15 – a) Alimentador de pó GTV. b) Figura esquemática do funcionamento de um alimentador de pó. ....	37
Figura 16 – Representação de um cordão diluído no substrato. ....	39
Figura 17 – Retificadora com rebolo de alumina. ....	40
Figura 18 – Potenciostato AUTOLAB da Metrohm. ....	41
Figura 19 – Célula de 3 eletrodos de corrosão utilizada. ....	41
Figura 20 – Cordões a) A22 b) A26 c) A29 d) A33 falhos da parametrização. ....	43
Figura 21 – Cordões a) A9 b) A10 c) A11 da parametrização inicial. ....	43
Figura 22 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.), substrato ASTM A36. ....	44
Figura 23 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.), substrato ASTM A516gr.70. ....	44
Figura 24 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.) usinados, substrato ASTM A36. ....	45
Figura 25 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.) usinados, substrato ASTM A516gr.70. ....	45
Figura 26 – Amostra cortada em Cut-off para ensaio de corrosão e metalografia. ....	46
Figura 27 – Amostra A516gr.70 A11. Aproximação 2000x. ....	46
Figura 28 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A9 e b) A516gr.70 A9, ambos 50x. ....	47
Figura 29 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A10 e b) A516gr.70 A10, ambos 50x. ....	47
Figura 30 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A11 e b) A516gr.70 A11, ambos 50x. ....	47
Figura 31 – MO transversal da amostra ASTM A36 A10, com aproximação de 50x. ....	48
Figura 32 – Comparativo entre MO e MEV, amostra A36 A10. ....	48
Figura 33 – Amostras após ensaio de polarização cíclica. ....	49
Figura 34 – Tracejado evidenciando que as regiões corroídas coincidem com as regiões entre os cordões. Amostra A516gr.70 A11. ....	50
Figura 35 – Gráficos de OCP obtidos no ensaio de polarização cíclica das amostras a) ASTM A516gr.70 A9 e b) ASTM A36 A9. ....	50
Figura 36 – Gráficos das polarizações cíclicas das amostras ASTM A36 a) A9, b) A10 e c) A11. ....	51
Figura 37 – Gráficos das polarizações cíclicas das amostras ASTM A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11. ....	51

Figura 38 – Gráficos de corrosão comparativos entre os substratos ASTM A36 e A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11.....	52
Figura 39 – Gráficos A9 de A36 e A516gr.70, respectivamente. ....	54
Figura 40 – Gráficos A10 de A36 e A516gr.70, respectivamente. ....	54
Figura 41 – Gráficos A11 de A36 e A516gr.70, respectivamente. ....	55
Figura 42 – MEV nas superfícies das amostras A36 a) A9, b) A11, com ampliação de 30x. ....	56
Figura 43 – Análise de EDS nos pontos escuros da superfície, voltagem de 15kV. Amostra A36 A11, com ampliação de 6 mil vezes. ....	56
Figura 44 – Análise de espectro nos pontos escuros da amostra A36 A11. ....	57
Figura 45 – MEV na superfície da amostra A36 A11, com ampliação de 150x, apontando os itens comentados. ....	57
Figura 46 – Corrosão provavelmente do tipo alveolar. MEV na amostra A36 A11, com ampliação de 2 mil vezes. ....	58
Figura 47 – MEV nas superfícies das amostras A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11, com ampliação de 30x. ....	59
Figura 48 – Linha de escaneamento do EDS na amostra A516 gr. 70 A9, sendo analisado de cima para baixo, com voltagem de 15 kV. Ampliação de 60x.....	60
Figura 49 – Gráficos de composição química resultantes do EDS na amostra A516gr.70 A9....	60
Figura 50 – Linha de escaneamento do EDS na amostra A516 gr.70 A11, sendo analisado de cima para baixo, com voltagem de 15 kV. Ampliação de 60x.....	61
Figura 51 – Gráficos de composição química resultantes do EDS na amostra A516gr.70 A11..	61
Figura 52 – Mapeamento de elementos químicos por EDS, com voltagem de 15 kV. Amostra A36 A11.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros importantes no processo de l-DED.....	21
Tabela 2 – Composição química do Inconel 625®.....	31
Tabela 3 – Composição química do aço ASTM A36. ....	32
Tabela 4 – Composição química do aço ASTM A516 gr.70. ....	33
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nos cordões A9, A10 e A11. ....	44
Tabela 6 – Tabela de resultados do ensaio de polarização cíclica das amostras ASTM A36.....	53
Tabela 7 – Tabela de resultados do ensaio de polarização cíclica das amostras ASTM A516gr.70. ....	53
Tabela 8 – Tabela referente à análise de espectro na corrosão alveolar da amostra A36 A11. Análise feita com voltagem de 15kV. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
I-DED	<i>Laser Directed Energy Deposition</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
ZTA	Zona Termicamente Afetada
CFC	Cúbica de Face Centrada
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
OCP	<i>Open Circuit Potential</i> (Potencial de Circuito Aberto)
Ag/AgCl	Prata-Cloreto de Prata
ESC	Eletrodo de Calomelano Saturado
SCE	<i>Saturated Calomel Electrode</i>
EDS	Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	[V]	Potencial
$E_{corr}$	[V]	Potencial de Corrosão
$E_{pro}$	[V]	Potencial de Proteção ou Repassivação
$E_{pite}$	[V]	Potencial de Pites
$i_{corr}$	[ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Corrente de Corrosão
$\Delta i$	[ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Densidade de Corrente
$\Delta i_{rev}$	[ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Densidade de Corrente de Reversão

# Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	15
1.1. Objetivo Geral .....	16
1.2. Objetivo Específico .....	16
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	17
2.1. <i>Laser Directed Energy Deposition</i> a Pó .....	17
2.1.1. Parâmetros do Processo l-DED.....	20
2.2. Corrosão .....	21
2.2.1. Formas de Corrosão.....	23
2.2.2. Polarização Potenciodinâmica .....	25
2.2.3. Polarização Cíclica .....	27
2.3. Superligas de Níquel para Resistência à Corrosão.....	29
2.3.1. Inconel 625® .....	30
2.4. Aço A36 .....	32
2.5. Aço A516 gr.70.....	32
<b>3. Metodologia</b> .....	34
3.1. Sistema Laser .....	35
3.2. Parametrização de Processo.....	37
3.2.1. Cordões individuais .....	38
3.2.2. Sobreposição .....	39
3.3. Usinagem .....	39
3.4. Ensaio de corrosão .....	40
<b>4. Resultados e Discussões</b> .....	42
4.1. Parametrização de Processo.....	42
4.1.1. Cordões individuais .....	42
4.1.2. Sobreposição .....	44
4.2. Usinagem .....	45
4.3. Microscopia Óptica .....	46
4.4. Ensaio de corrosão .....	49
4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura .....	55
4.5.1. EDS .....	59
<b>5. Conclusão</b> .....	63
5.1. Sugestão de trabalhos futuros .....	64
<b>6. Referências</b> .....	65
<b>Apêndice A</b> .....	69
<b>Apêndice B</b> .....	71

## 1. Introdução

Com a exploração de petróleo, como nos campos do Pré-Sal, a perspectiva é crescente para a produção de óleos mais ácidos, gases com maiores índices de contaminantes, além da água produzida com concentrações de íons de cloreto acima do percentual normal. Dessa forma, os processos se tornam mais críticos e complexos, demandando que novas tecnologias e novos materiais sejam desenvolvidos, buscando cada vez mais a resistência dos componentes dos equipamentos de acordo com as condições extremas em que serão submetidos (ALBUQUERQUE MADALENA *et al.*, 2013).

Por esse motivo, existe a necessidade de encontrar alternativas com melhor custo-benefício quando falado de materiais para a fabricação de vasos de pressão, esses normalmente sendo fabricados em ligas Super Duplex (ASTM A 240, UNS 32750). Os vasos de pressão são utilizados nas plantas de processamento e nos tratamentos dos fluidos em instalações *offshore*, portanto visa-se a redução de peso, dimensões e custo na fabricação desses equipamentos, mantendo a resistência à corrosão (ALBUQUERQUE MADALENA *et al.*, 2013).

Uma das alternativas encontradas foi a utilização do aço carbono ASTM A516gr.70, revestido com superliga de níquel. Com esse método, a resistência à corrosão tende a melhorar, sem ter o aumento do custo de fabricação, principalmente quando comparado a um equipamento fabricado totalmente com material especial (SANDES *et al.*, 2016) (ALBUQUERQUE MADALENA *et al.*, 2013). No decorrer dos anos, ficou comprovado que as ligas de níquel-cromo-molibdênio estão entre os materiais mais adequados e economicamente viáveis para esse tipo de exposição (*“High Performance Alloys for Seawater Service”*, 2022).

Usualmente, a camada espessa é depositada por processo de soldagem (ALBUQUERQUE MADALENA *et al.*, 2013). Com o processo de *laser directed energy deposition* (l-DED), consegue-se depositar camadas finas de revestimento, com baixas diluições, sendo bem provável que somente isso seja suficiente para ter resistência à corrosão, não necessitando do processo de arco voltaico para depositar as camadas de Inconel 625® (ION, 2005).

## 1.1. Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo analisar e comparar o comportamento do Inconel 625® depositado via *laser directed energy deposition* a pó nos substratos de aço ASTM A36 e aço ASTM A516gr.70, sendo depositado com diferentes parâmetros visando obter diferentes níveis de diluição.

## 1.2. Objetivo Específico

- Utilizar o substrato de aço carbono ASTM A36 como sendo o material de base para a parametrização do processo l-DED, visando demonstrar que é possível utilizar esse substrato, que é mais economicamente viável, para parametrizar os testes de l-DED a pó e testes de polarização cíclica para o aço ASTM A516gr.70, visando a análise/redução da corrosão.



## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. *Laser Directed Energy Deposition* a Pó

*Laser directed energy deposition* (L-DED), ou deposição de energia direcionada a laser, é um processo de manufatura aditiva no qual um feixe de laser é utilizado como fonte de energia térmica focada para fundir uma camada de metal sobre um substrato enquanto o primeiro é depositado (“*Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals*”, 2016).

Este processo se tornou uma técnica relevante nas últimas décadas em aplicações que exigem resistência ao desgaste, reparo de componentes de custo elevado e proteção contra corrosão (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005) (ION, 2005). O principal objetivo da técnica é gerar um revestimento cujas propriedades se adequem a aplicação, tendo uma forte ligação metalúrgica com o substrato, menor uso de material de adição e menor distorção do componente base (ION, 2005).

As vantagens do processo em relação a outros processos de deposição de revestimento são:

- Maior eficiência no tempo de produção;
- Melhor controle térmico;
- Reparo de componentes que antes não podiam ser consertados;
- Produção de novas “*Functionally Graded Parts*” (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005).

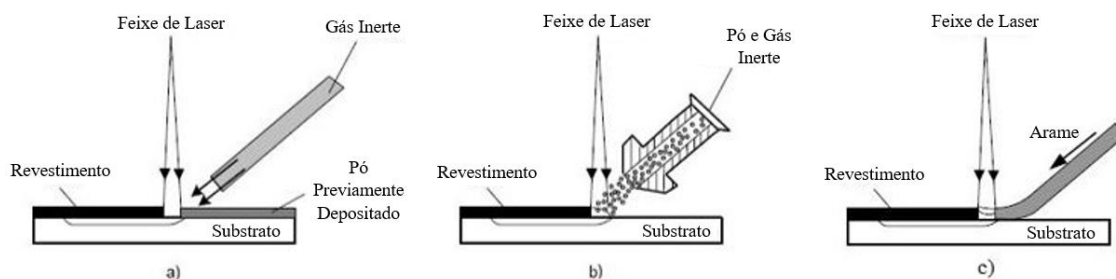
O revestimento final é, portanto, resultado da deposição de cordões que juntos formam uma camada de material, modificando as propriedades da superfície do substrato. Metais como cromo, titânio e suas ligas, níquel e suas ligas, cobre e cádmio são materiais que podem ser utilizados como revestimento, sendo as ligas de níquel e titânio as mais usuais para a deposição sobre substratos de aços não ligados, ligados, endurecidos, inoxidáveis etc. (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005) (ION, 2005).

Durante o processo, uma parcela do substrato é fundida, o que forma uma forte ligação metalúrgica entre a camada depositada e o substrato (ION, 2005) (LIU *et al.*, 2017), gerando um revestimento de alta densidade. Dado o feixe de laser ser altamente

focalizado e eficiente, a carga térmica alcançada é baixa, resultando em uma pequena zona termicamente afetada (ZTA). A vaporização para esse tipo de procedimento não é desejada, pois só significaria perda de material de alimentação, e esse pode ter um custo elevado (ION, 2005) (POPRAWA, 2011).

A alimentação de material para formação dos cordões pode ocorrer de algumas maneiras, sendo as principais: por pó pré-depositado, por alimentador de pó e por alimentador de arame. O primeiro caso ocorre em duas etapas, chamado de processo de pré deposição, no qual primeiramente é depositada uma cama de pó sobre o substrato e posteriormente é incidido o laser. Já no segundo e terceiro caso, os materiais são alimentados de forma simultânea ao feixe de laser (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005) (ION, 2005). Na Figura 1 são apresentados os diferentes processos.

Figura 1 – Diferentes métodos de l-DED: a) Pré deposição. b) Alimentador de Pó. c) Alimentador de Arame.



Fonte: Adaptado de (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005).

O sistema l-DED com alimentador de pó tem sido estudado extensivamente na literatura, sendo de grande interesse para a indústria. Os processos com alimentador de arame fornecem uma resolução mais baixa em comparação com os processos baseados em pó, mas têm uma taxa de deposição mais alta e a capacidade de construir estruturas maiores (DASS; MORIDI, 2019) (PISCOPO; SALMI; ATZENI, 2021).

Este trabalho utilizou como fonte de material o alimentador de pó, o segundo caso apresentado na Figura 1, e será descrito no decorrer do mesmo.

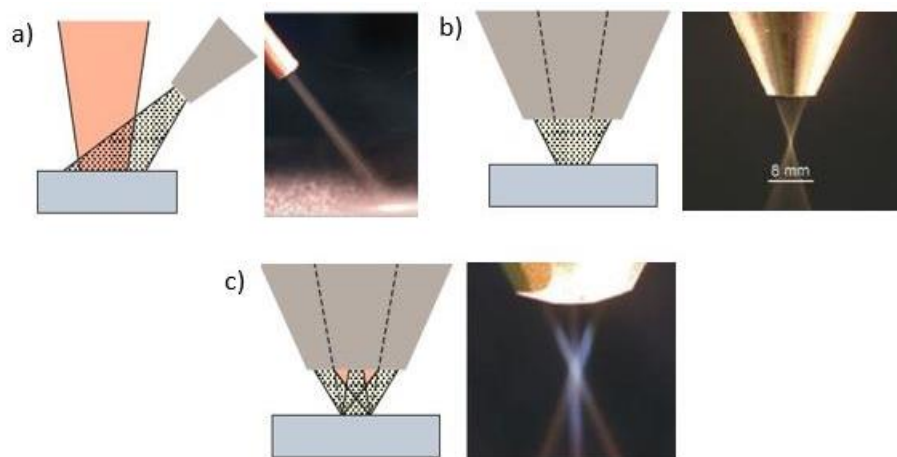
Algumas das propriedades da deposição que o l-DED via pó pode gerar são:

- Boa ligação metalúrgica entre substrato e material de adição;
- Baixa porosidade, defeitos e ressaltos;
- Baixa oxidação, mesmo para materiais suscetíveis;
- Possibilidade de formar camadas de baixa espessura;

- Mínima entrada de calor e distorção;
- Processo automático e de alta precisão (POPRAWE, 2011).

A granulometria do pó para o l-DED, de acordo com fabricantes, normalmente varia de 53  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$  (“*PTA and Laser cladding grades*”, 2022). Existem alguns tipos de alimentação de pó, sendo eles: o fora do eixo; o coaxial contínuo; e, o coaxial descontínuo (POPRAWE, 2011) apresentados na Figura 2, respectivamente com seus feixes de pó. Neste trabalho, foi utilizado o bocal coaxial contínuo.

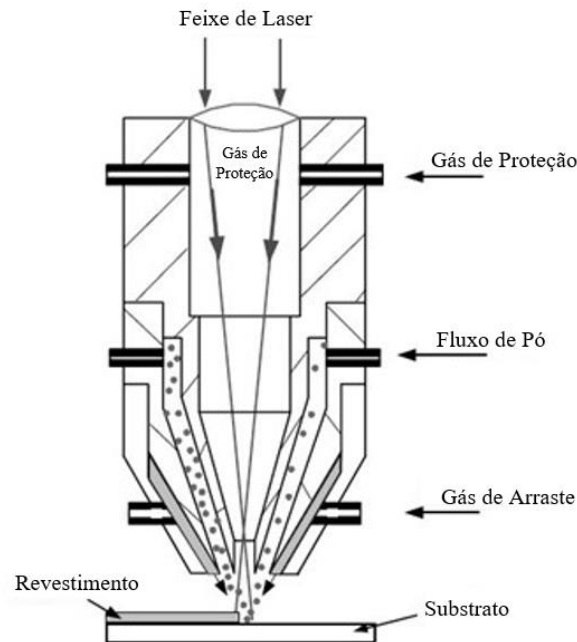
Figura 2 – Diferentes formas de alimentação de pó. a) Fora do eixo. b) Coaxial contínuo. c) Coaxial descontínuo.



Fonte: Adaptado de (POPRAWE, 2011).

A alimentação de pó com bocal coaxial contínuo pode ser integrada ao sistema óptico do laser. Nos bocais mais complexos que seguem este conceito, existem três saídas de fluxo, o de gás de proteção, o gás de arraste e gás de contenção, esse último utilizado como auxílio na proteção da poça fundida contra a oxidação e na condução das partículas de pó para dentro da mesma (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005) (POPRAWE, 2011). Os gases normalmente utilizados como gases de proteção são o argônio e o hélio (POPRAWE, 2011). A Figura 3 mostra um esquema de bocal coaxial contínuo.

Figura 3 – Representação de um bocal coaxial contínuo completo.



Fonte: Adaptado de (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005).

Com esse bocal, o fluxo de pó é posicionado em torno do feixe de laser, distribuindo o pó de forma homogênea, sendo a principal causa para criar um cordão por l-DED com boa qualidade (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005).

### 2.1.1. Parâmetros do Processo l-DED

Dentre os parâmetros do processo l-DED, aqueles classificados como variáveis de entrada que possuem maior influência sobre a qualidade dos revestimentos são: potência do laser [W], velocidade de avanço [mm/min] e vazão do pó metálico [g/min] (TOYSERKANI; CORBIN; KHAJEPOUR, 2005) (DAVIM, 2013).

Ao aplicar uma potência muito baixa, pode não ocorrer a fusão completa do material depositado no substrato, gerando uma aderência ineficiente. Em contrapartida, valores muito altos causam problemas como vaporização das partículas de pó, distorções nas peças, e alta diluição, devido ao excesso de fusão (ION, 2005).

A qualidade do revestimento é diretamente influenciada pela diluição e pela velocidade de resfriamento do sistema, que determina o regime de solidificação e a microestrutura final do revestimento. Uma alta velocidade de avanço indica menor tempo

de interação entre o material depositado e o feixe laser, resultando em menor quantidade de energia absorvida pelo substrato por unidade de tempo. Dessa forma, os cordões tendem a ter baixa penetração e diluição, além de menor altura e largura. Já baixas velocidades, geram gradientes térmicos que aumentam a diluição, alterando as propriedades mecânicas do revestimento (SOUSA, 2019).

Para evitar irregularidades no revestimento, a vazão do pó deve ser uniforme. Taxas muito baixas de alimentação ocasionam excesso de fusão dos materiais, elevando a diluição. Já em altas taxas, pode ocorrer o acúmulo de pó, dificultando a adesão do material depositado ao substrato (ION, 2005).

As variáveis de entrada apresentadas são responsáveis por importantes aspectos dos revestimentos, portanto o balanceamento entre estes parâmetros é fundamental para otimizar o processo de deposição (SOUSA, 2019).

Na tabela 1 estão os principais parâmetros e suas faixas de valores.

Tabela 1 – Parâmetros importantes no processo de I-DED. Adaptado de (POPRAWA, 2011).

<b>Parâmetro</b>	<b>Faixa de Valores</b>	<b>Unidade de Medida</b>
Potência do laser	200 – 4000	W
Diâmetro do feixe	0,6 – 8	mm
Velocidade	200 – 2000	mm/min
Taxa de alimentação do pó	0,5 – 30	g/min
Tipo de gás	He e Ar	-

## 2.2. Corrosão

Corrosão é o processo de deterioração, normalmente de modo espontâneo, de um material, metálico ou não, limitando a durabilidade e usabilidade dele. Na atualidade, o estudo desse tema assume uma importância muito grande para a área industrial, visando diminuir as perdas diretas, como de custo com substituições de peças, ou com perdas indiretas, por exemplo, de vazamento de óleo por fissuras em tubulações corroídas (GENTIL, 1996).

Muitos dos fenômenos de corrosão podem ser explicados em termos de reações eletroquímicas (PRINCETON APPLIED RESEARCH 1, 2022), ou seja, são reações

químicas que envolvem transferência de elétrons ou cargas através de um eletrólito ou interface, fazendo com que os elétrons de uma região sejam cedidos e recebidos em outra, formando uma pilha de corrosão (GENTIL, 1996).

Como dito anteriormente, a pesquisa nessa área é essencial, tanto quanto a aprimoração e o estudo dos materiais para a mitigação ou prevenção da corrosão. As análises feitas por meio de equipamentos eletrônicos possibilitam mensurar a corrosão muito antes da perda do material em si ser detectado, seja tal detecção feita por diferença de peso, ou pelo aspecto visual da superfície da peça (STEPHEN TAIT, 1994).

Dentre os diversos tipos de análises existentes para estudar a corrosão eletroquímica, a polarização é a fundamental. Com esse fenômeno é possível analisar a interação entre o material metálico de interesse e o eletrodo de referência em um meio normalmente aquoso condutor (eletrólito), ao se aplicar uma tensão e o sistema sair do equilíbrio.

Para os ensaios de polarização, potenciostatos são utilizados. Esses têm como finalidade controlar o potencial aplicado e ler a resposta da corrente, de forma que esses instrumentos possuem uma fonte de tensão acoplada em um amperímetro (GENTIL, 1996).

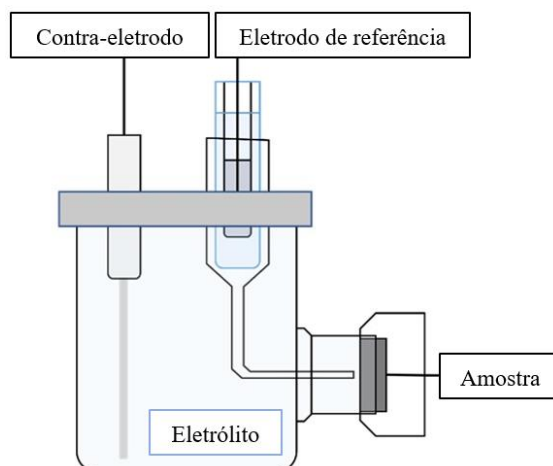
A partir desses ensaios obtém-se a chamada curva de polarização (GENTIL, 1996), a qual pode ser usada para determinar comportamentos de corrosão, tais como:

- Se o metal irá passivar, ou seja, não corroer;
- E qual será o modo de corrosão (STEPHEN TAIT, 1994).

A chamada célula de polarização, é o recipiente em que o ensaio de polarização ocorre. Existem diversos modelos de célula, contudo este trabalho irá focar na célula de três eletrodos, já que este foi o modelo utilizado na realização dos ensaios. Essa montagem consiste em um eletrodo de trabalho, ou seja, o metal de estudo, um eletrodo de referência de potencial conhecido, como de calomelano e Ag/AgCl, e um contra-eletrodo de material inerte, geralmente este último de platina (GENTIL, 1996).

Na Figura 4 está representado um esquema de uma célula de três eletrodos.

Figura 4 – Esquema de célula de três eletrodos.



Fonte: Adaptado de (VICENTE, 2020).

Neste ensaio, um potencial externo é aplicado para que o eletrodo de trabalho saia do potencial de circuito aberto (em inglês “*Open circuit potencial*”, OCP) e obtenha uma corrente elétrica que possa ser medida. Durante o OCP, a taxa de oxidação do eletrodo de trabalho é exatamente igual a taxa de redução (PRINCETON APPLIED RESEARCH 1, 2022). O eletrodo estará em OCP quando entrar em equilíbrio, sendo este dado monitorado em função do tempo. Para começar um ensaio de polarização, o sistema deve estar em potencial de circuito aberto.

A polarização do eletrodo de trabalho é definida como a diferença de potencial entre o eletrodo de referência e o de trabalho. Dado que o eletrodo de referência tem potencial constante, nenhuma corrente passa entre ele o potenciostato, de forma a fornecer uma referência corrigida para as medições de corrosão (STEPHEN TAIT, 1994). Essa informação, junto com a corrente registrada no sistema, nos permite caracterizar as reações eletroquímicas que se estabelecem, ajudando na compreensão do comportamento corrosivo dos materiais (MAGNABOSCO, 2001).

### 2.2.1. Formas de Corrosão

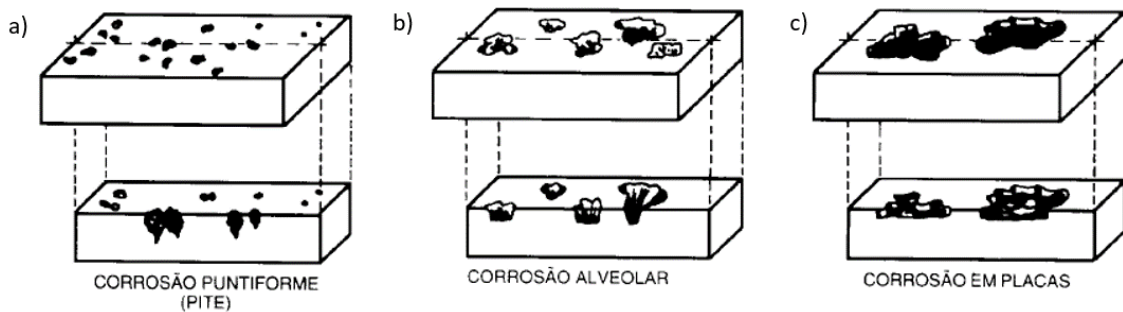
Para se classificar as formas, ou tipos de corrosão, deve ser considerado a aparência da mesma, avaliando a forma de ataque, as diferentes causas da corrosão, assim como seus mecanismos (GENTIL, 1996). Este trabalho vai focar na classificação analisando a aparência da corrosão por pites, alveolar, por placas e uniforme.

Corrosão por pite, ou puntiforme, é um tipo de corrosão em que na superfície metálica são encontradas cavidades em áreas pequenas e localizadas. O fundo destas cavidades é de formato anguloso, e a profundidade geralmente é maior que o seu diâmetro. Na Figura 5 (a) está a representação de uma corrosão puntiforme.

A corrosão alveolar também se processa na superfície do metal, porém seu formato é de sulcos, ou escavações que se assemelham a alvéolos. Possuem o fundo arredondado, e a profundidade é normalmente menor que o seu diâmetro. Na Figura 5 (b) tem um esquema da corrosão alveolar.

A corrosão por placas, que, assim como as anteriores, se localiza em partes da superfície metálica, formando, como o próprio nome diz, placas com escavações. Sua representação está na Figura 5 (c) (GENTIL, 1996).

Figura 5 – Formas de corrosão: a) Pite. b) Alveolar. c) Por placas.



Fonte: Adaptado de (GENTIL, 1996).

A nomenclatura utilizada para as duas últimas formas de corrosão pode não ser aceita em algumas línguas estrangeiras, preferindo se referir somente como pite. A Norma G 46-76-ASTM apresenta diferentes tipos de pites (Figura 6), alguns se assemelhando às corrosões alveolar e por placas (GENTIL, 1996).



Figura 6 – Formas de pite, segundo a Norma ASTM.



Fonte: Adaptado de (GENTIL, 1996).

O último tipo de corrosão a ser comentado é o uniforme, ou corrosão generalizada, é aquela em que se dá em toda a superfície da peça, ocorrendo perda uniforme de espessura (GENTIL, 1996).

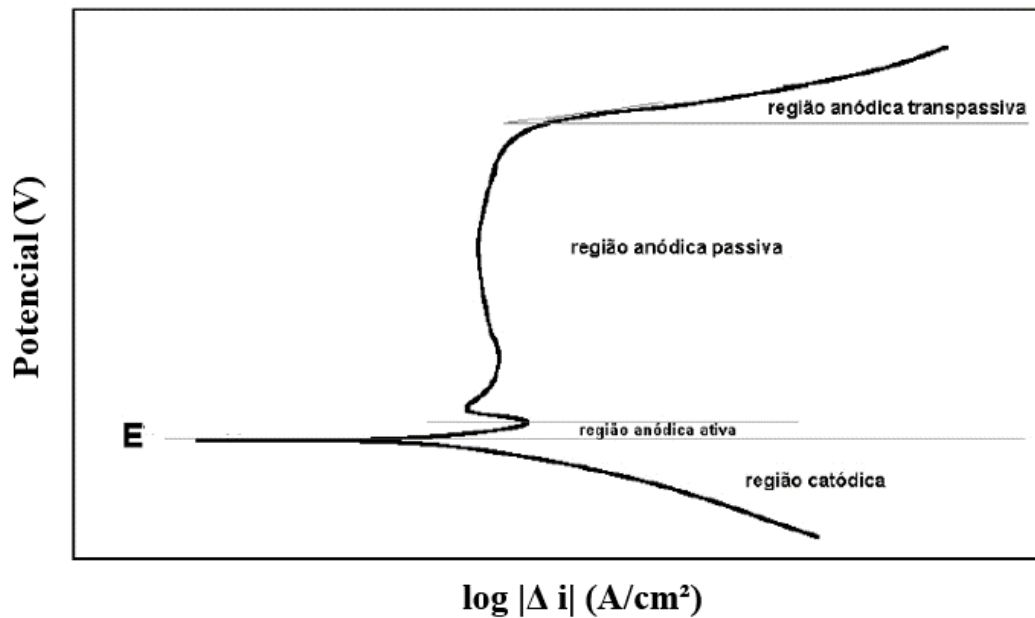
### 2.2.2. Polarização Potenciodinâmica

A polarização potenciodinâmica é uma das técnicas utilizadas para a obtenção das curvas de polarização. É iniciada no OCP, elevando o potencial a uma taxa de varredura constante. A velocidade de varredura pode influenciar na forma das curvas de polarização, sendo ela normalmente de 0,1 mV/s a 5 mV/s. Os dados mais confiáveis geralmente são os de menor taxa (MAGNABOSCO, 2001) (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

Os gráficos são plotados indicando o potencial aplicado [V] versus o logaritmo da corrente medida, ou seja, a densidade de corrente, expressa em A/cm<sup>2</sup> ou  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>. Ela nada mais é que o valor absoluto da corrente dividida pela área do material exposto às reações (MAGNABOSCO, 2001) (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

Na Figura 7 está um esquema de uma curva de polarização potenciodinâmica.

Figura 7 – Esquema de curva de polarização potenciodinâmica.



Fonte: Adaptado de (MAGNABOSCO, 2001).

Na imagem, é possível identificar diferentes regiões anódicas, subdivididas entre ativa, passiva e transpassiva, e uma catódica. Essa última, abaixo do potencial de corrosão  $E_{corr}$  (na figura representada por  $E$ ), não há taxa de dissolução, predominando reações catódicas.

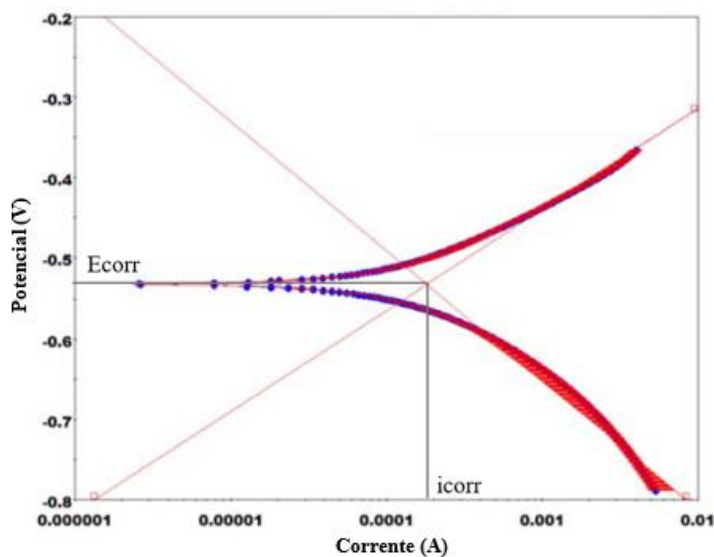
O trecho anódico é a região em que pode acontecer a corrosão do material. Na primeira, chamada de anódica ativa, a densidade de corrente cresce com o aumento do potencial, caracterizando a corrosão do metal. Diminuindo a densidade de corrente, se passa para a região anódica passiva, tendo baixa ou nenhuma taxa de corrosão, ocasionado pela formação de película protetiva (MAGNABOSCO, 2001). Correntes mais baixas na região passiva indicam maior passivação (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

Com o aumento do potencial, se dá início à região anódica transpassiva, em que a densidade de corrente aumenta novamente, causado pela desestabilização da película, gerando a dissolução do metal (MAGNABOSCO, 2001). Ter a região transpassiva com o potencial mais positivo, indica que a película formada na região passiva tem mais estabilidade (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

A partir da corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ), é possível calcular a taxa de corrosão do material. Um ponto importante a se ressaltar é que para encontrar a corrente de corrosão, se utiliza a extrapolação de Tafel na polarização. Explicando de maneira sucinta, a

extrapolação é realizada traçando uma linha no gráfico entre 30mV e 200mV no sentido anódico e catódico, a partir do potencial de corrosão (PRINCETON APPLIED RESEARCH 1, 2022), como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Extrapolação de Tafel.



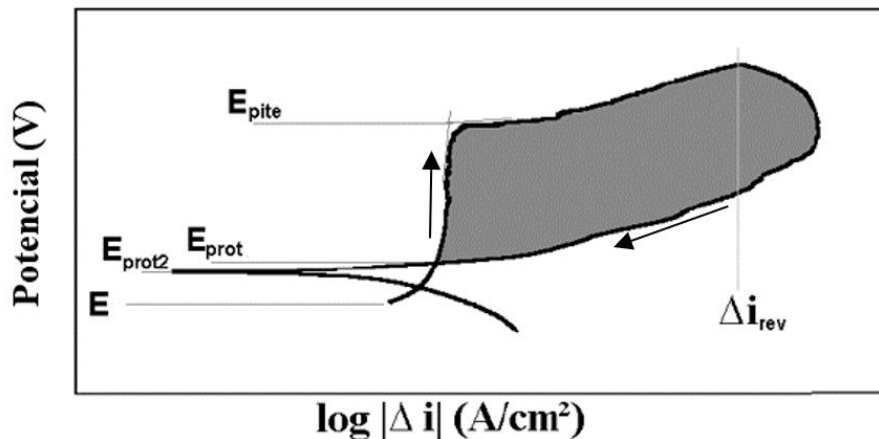
Fonte: Adaptado de (PRINCETON APPLIED RESEARCH 1, 2022).

### 2.2.3. Polarização Cíclica

A polarização cíclica pode ser considerada uma extensão da polarização potenciodinâmica. É usada para mensurar a tendência de formação de pites no metal (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022). O potencial dessa polarização aumenta na direção anódica até chegar a aproximadamente +1000mV a partir do OCP, ou então até alcançar a densidade de corrente escolhida. Ao atingir essa etapa, diminui o potencial em sentido negativo, indo em direção ao  $E_{corr}$ , permanecendo com a mesma velocidade de varredura de potencial (STEPHEN TAIT, 1994) (MAGNABOSCO, 2001) (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

A Figura 9 mostra a representação de uma curva de polarização cíclica.

Figura 9 – Representação de uma curva de polarização cíclica.



Fonte: Adaptado de (MAGNABOSCO, 2001).

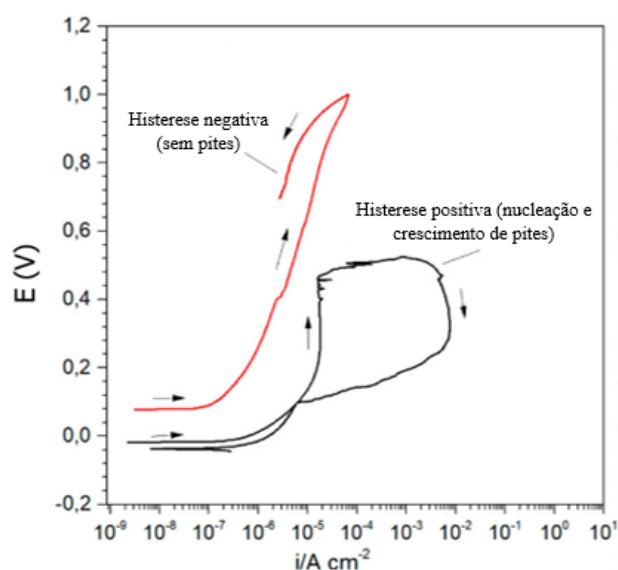
Como visto, a curva de polarização cíclica é muito semelhante à de polarização potenciodinâmica. O potencial relacionado ao ponto em que a densidade de corrente aumenta consideravelmente é chamado de potencial de pite ( $E_{pite}$ ), e representa a resistência do material ao início da formação de pites. Quanto mais elevado for este potencial, maior é a resistência do material (MAGNABOSCO, 2001) (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022).

Ao atingir a densidade de corrente de reversão, indicado no gráfico como  $\Delta i_{rev}$ , a varredura de potencial altera para sentido negativo, seguindo para potenciais catódicos (MAGNABOSCO, 2001). No instante em que a curva cruza a original, é estabelecido o potencial de proteção, ou repassivação  $E_{pro}$  (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022), identificado na figura como  $E_{prot}$ . Abaixo desse potencial não há possibilidade de quebrar a película passiva, ou de não regenerar, de forma que o metal fica imune a ocorrência de pites. Magnabosco (2001) também diz que alguns autores consideram o potencial de proteção como sendo o potencial em que ocorre a reversão da corrente para valores catódicos, apresentado na imagem como  $E_{prot2}$ .

A repassivação dos pites formados ocorre entre a inversão do sentido da varredura e o  $E_{pro}$ . A área em cinza da curva na Figura 9 corresponde ao trabalho elétrico necessário para repassar o pite formado. Pode-se concluir, então, que quanto maior a área, maior o trabalho elétrico, e, portanto, menor a resistência do material à propagação de pites (MAGNABOSCO, 2001).

Essa área mencionada é usualmente chamada no meio de histerese, embora o termo histerese em si se refira a inversão abrupta de comportamento da curva. Independentemente da terminologia usada, por meio da histerese é possível obter informações sobre a formação de pites e quão rapidamente a película passiva se repara. Na polarização cíclica, a histerese pode ser positiva, quando, na reversão, a densidade de corrente é maior do que a no sentido positivo (exemplo a própria Figura 9), ou negativa, quando a densidade de corrente é menor do que a do sentido original. O primeiro caso ocorre quando a camada protetora está danificada, e os pites se formam. Já no segundo, a película passiva danificada se repara e não há crescimento de pites (STEPHEN TAIT, 1994). Na Figura 10 está um gráfico com os dois tipos de histereses.

Figura 10 – Gráficos de corrosão com histerese positiva e negativa.



Fonte: Adaptado de (PROF. DR. LUIS HENRIQUE GUILHERME, 2022).

### 2.3. Superligas de Níquel para Resistência à Corrosão

Análises químicas mostraram que o níquel tem sido utilizado desde as civilizações antigas, em ferramentas, moedas e armas. Hoje, é um material muito empregado em situações críticas, tais como suportar condições severas de corrosão, altas temperaturas, e elevadas tensões de serviços. São muito utilizadas em engenharia aeroespacial, reatores nucleares etc. (MANKINS; LAMB, 1990) (MATTOS; VAREJÃO, 2009).

Devido à sua estrutura cúbica de face centrada (CFC), o níquel é um metal dúctil, possuindo ligas de matriz austenítica com elementos de liga que causam endurecimento por solução sólida, tais como Cr, Mo, W, Al. O endurecimento pode ser também por precipitação de carbonetos (MATTOS; VAREJÃO, 2009) (MANKINS; LAMB, 1990). A taxa de difusão do níquel é baixa, de forma a apresentar uma estabilidade microestrutural aceitável em elevadas temperaturas (TURAZI, 2014).

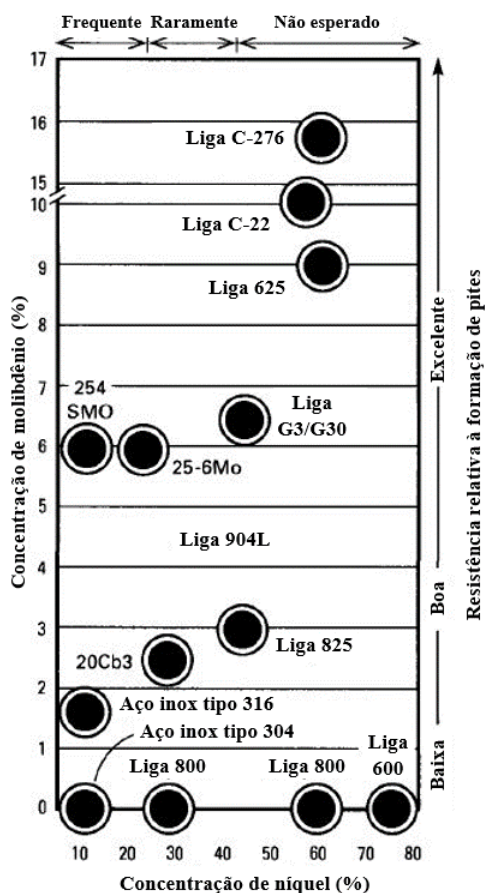
A ampla solubilidade entre cromo, ferro e níquel possibilita a criação de diversos tipos de ligas, oferecendo uma excelente resistência a corrosão em vários meios corrosivos (MANKINS; LAMB, 1990).

### 2.3.1. Inconel 625®

O Inconel 625® é uma superliga de níquel de Ni-Cr-Fe com adição de 9% de Mo e 3% de Nb, oferecendo a liga resistência a corrosão por pite, fissura e alveolar (MATTOS; VAREJÃO, 2009) (MANKINS; LAMB, 1990) (DAURE *et al.*, 2017). O fortalecimento da matriz Ni-Cr por Nb e Mo gera aumento da resistência à altas temperaturas e à corrosão (TIAN *et al.*, 2019), sem necessidade de tratamento térmico fortalecedor posteriormente (MANKINS; LAMB, 1990).

A Figura 11 mostra um esquema de diferentes ligas de níquel com variações de adição de molibdênio, relacionando-as com a sua resistência a pites em um ensaio de corrosão.

Figura 11 – Esquema de resistência à corrosão de superligas de níquel.



Fonte: Adaptado de (MANKINS; LAMB, 1990).

Na Tabela 2 está apresentada a composição química do Inconel 625®.

Tabela 2 – Composição química do Inconel 625®. Fonte: Adaptado de (DAURE *et al.*, 2017).

Composição Química (%wt)											
Inconel	% Ni	% Cr	% Mo	% Nb	% Fe	% C	% Si	% Al	% Ti	% Mn	% S
<b>625®</b>	61	21,5	9	3,6	2	0,05	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001

A densidade desta liga é de  $8,44 \text{ g/cm}^3$ , módulo de elasticidade a tração e a torção de 208 GPa e 81 GPa, respectivamente, todos os valores são a  $21^\circ\text{C}$ . A aplicação dessa liga está diretamente voltada para aquelas que requerem resistência à corrosão, tais como indústria naval, processamento químico, equipamento de controle de poluição e reatores de água supercrítica (MATTOS; VAREJÃO, 2009) (KARTHIK *et al.*, 2017).

## 2.4. Aço A36

O aço ASTM A36 é um aço carbono do tipo estrutural, e é dependente do seu teor de carbono para gerar a sua resistência (PANNONI, 2005). Esse aço é diferenciado dos SAE 1020 por possuir propriedades mecânicas bem definidas, sendo um bom material para aplicações de responsabilidade, como edifícios e plataformas de petróleo. É um material fácil de conformar e possui ótima soldabilidade (LUZ, 2017). Algumas de suas propriedades mecânicas são: limite de escoamento de 250 MPa, limite de resistência de 400 MPa a 550 MPa (PANNONI, 2005), alongamento de 23% (ALLGAYER, 2017) e condutividade térmica de 35,6 W/mK, acima de 600°C (ARRUDA *et al.*, 2019). Na Tabela 3 está apresentada a tabela de composição química do material.

Tabela 3 – Composição química do aço ASTM A36. Fonte: Adaptado de (PANNONI, 2005) (ALLGAYER, 2017).

Composição Química (%wt)						
ASTM	% C	% P	% S	% Si	% Cu	% Mn
<b>A 36</b>	0,26 máx.	0,04 máx.	0,05 máx.	0,40 máx.	0,20*	0,60 – 0,90

\*Caso solicitado

## 2.5. Aço A516 gr.70

O aço ASTM A516 gr.70 é um aço carbono pertencente ao grupo de aços de baixa liga, cuja aplicação está voltada para a fabricação de vasos de pressão, painéis de manuseio de aço líquido etc. É um aço que possui silício e manganês em sua composição com limite de escoamento mínimo de 260 MPa, limite de resistência de 485 MPa a 620 MPa, deformação mínima de 21% (CASTRO, 2013) e condutividade térmica de 52 W/mK (“Placa de caldeira ASTM A516 GR70”, 2022). A composição química está representada na Tabela 4.



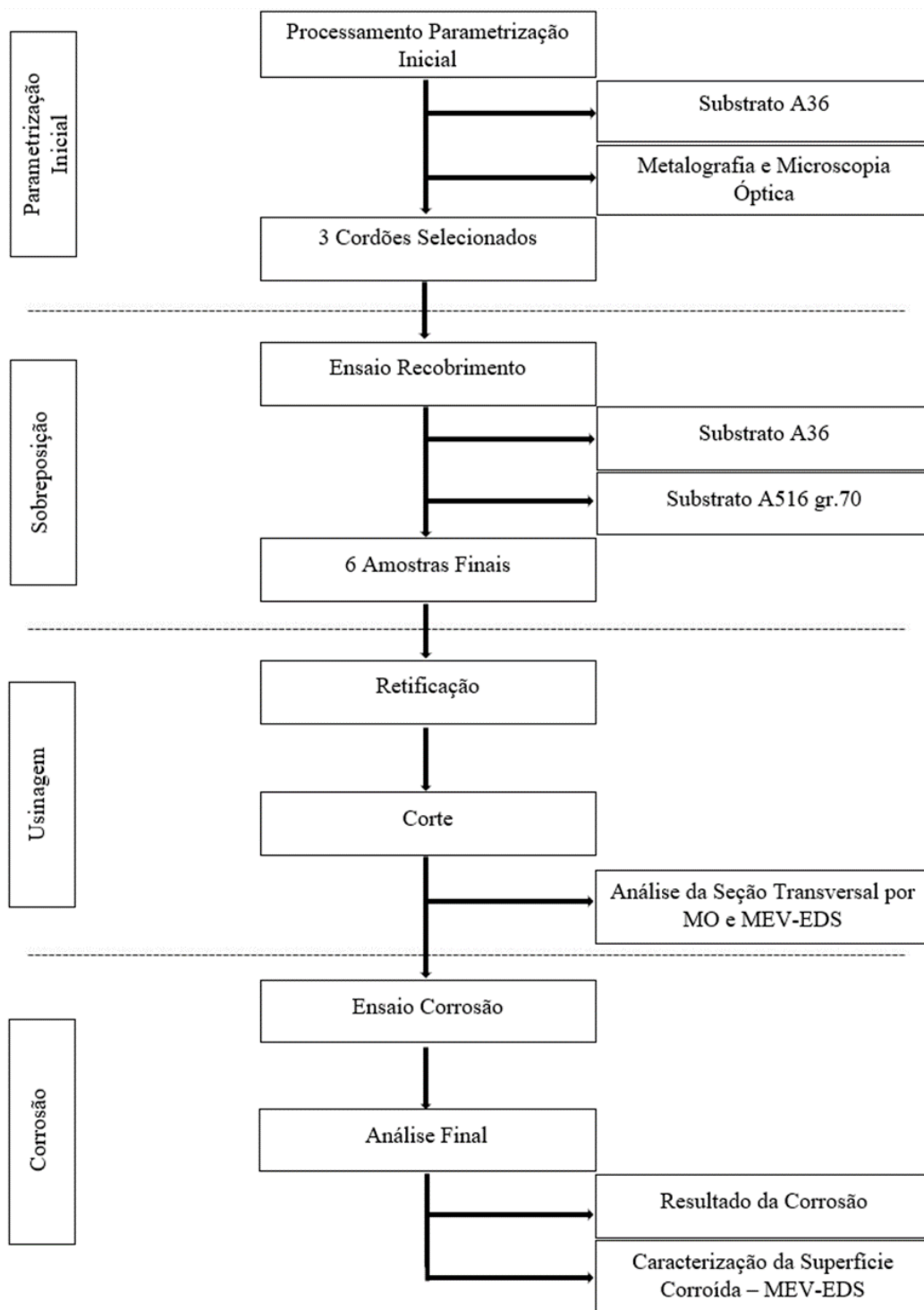
Tabela 4 – Composição química do aço ASTM A516 gr.70. Fonte: Adaptado de (TAHERI *et al.*, 2012).

<b>Composição Química (%wt)</b>							
<b>ASTM A516</b>	<b>% C</b>	<b>% Si</b>	<b>% Mn</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>
<b>GR.70</b>	0,24	0,33	1,05	0,035	0,04	0,0331	0,0387

### 3. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho foi resumida em fluxograma exposto na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma Metodologia Utilizada.



### 3.1. Sistema Laser

O sistema laser utilizado para realizar os testes foi o laser de fibra (Yb-Itérbio) IPG/YLS 10000 do fabricante IPG Photonics®, Figura 13, com potência de até 10kW e comprimento de onda entre 1070 nm e 1080 nm (GUTJAHR, 2016).

Figura 13 – Sistema IPG/YLS 10000 LASER.



Fonte: Adaptado de (GUTJAHR, 2016).

O sistema de movimentação do equipamento é feito através do comando numérico CNC SINUMERIK 840D SL da empresa Siemens, com configuração para os eixos X, Y e Z. A Figura 14 mostra o painel de comando. A linguagem de programação utilizada é o código-G.

Figura 14 – Painel de comando numérico CNC SINUMERIK 840D SL.

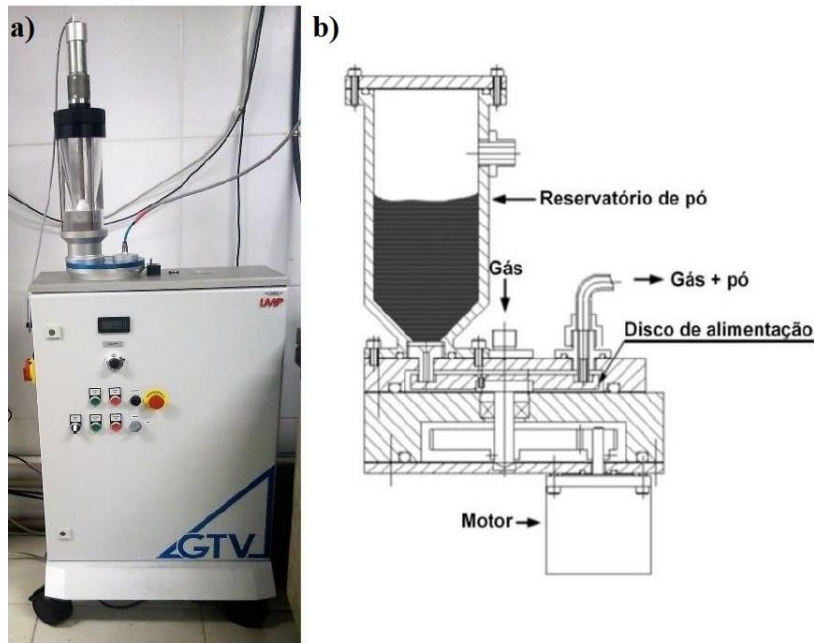


Fonte: Autora.

Neste sistema, o pó é depositado de forma coaxial ao feixe, como visto na seção 2.1., utilizando o argônio como gás de proteção e arraste, com vazão de 15 L/min para o gás de proteção e 5 L/min para o gás de arraste. O alimentador de pó consiste em um reservatório onde o material é armazenado, uma entrada para o gás de proteção, e um disco em que o pó é homogeneamente distribuído antes de ser levado pelo gás de arraste ao cabeçote laser.

A Figura 15 mostra o sistema de alimentação de pó, da marca GTV, utilizado e um desenho esquemático de um alimentador de pó de modelo similar.

Figura 15 – a) Alimentador de pó GTV. b) Figura esquemática do funcionamento de um alimentador de pó.



Fonte: Adaptado de (GUTJAHR, 2016).

Todos os ensaios, tanto os de parametrização quanto os de deposição foram realizados utilizando gás de argônio. Antes de fazer a deposição, todos os substratos foram limpos por meio de jateamento com microesferas de vidro, assim como foram manuseados utilizando luvas látex, de forma a assegurar a limpeza das superfícies.

### 3.2. Parametrização de Processo

Para este projeto, foi feito uma parametrização do processo de l-DED com substrato de aço ASTM A36, a fim de verificar qual, ou quais cordões iriam obter melhor resultado para o estudo. A escolha desse aço para a parametrização se deve ao seu menor custo, e similaridade de condutividade térmica com o aço ASTM A516gr.70.

Por esse motivo, se assume que as deposições serão iguais, geometricamente falando. Portanto, se a geometria é considerada igual, pode-se dizer que os substratos apresentarão os mesmos padrões de revestimento, seja na porosidade ou diluição, sendo possível parametrizar no aço A36 e replicar no aço A516gr.70.

### 3.2.1. Cordões individuais

A parametrização consistiu na construção de uma matriz de três variáveis, sendo elas: potência, velocidade de avanço e distância focal. A proposta era de se conseguir três cordões com diluições percentuais diferentes, para que fosse possível fazer análise dessa variável. Ao final obteve-se 48 cordões, variando a potência de 350 a 2100 W, com passo de 350 W, velocidade de avanço de 300 a 1800 mm/min, com passo de 500 mm/min e distância focal nos valores de +15 e +35. A taxa de alimentação de pó foi mantida constante em 11,23 g/min, tendo o pó granulometria entre 50 e 106  $\mu\text{m}$ .

Esses valores de parametrização foram baseados em conhecimento já estabelecido no laboratório (SOUSA, 2019) e em faixas de parâmetros obtidas de revisão bibliográfica (MARCHESE *et al.*, 2016) (NĚMEČEK; FIEDLER; FIŠEROVÁ, 2015). Após a finalização dessa etapa, os cordões foram cortados transversalmente e preparados para fazer a metalografia.

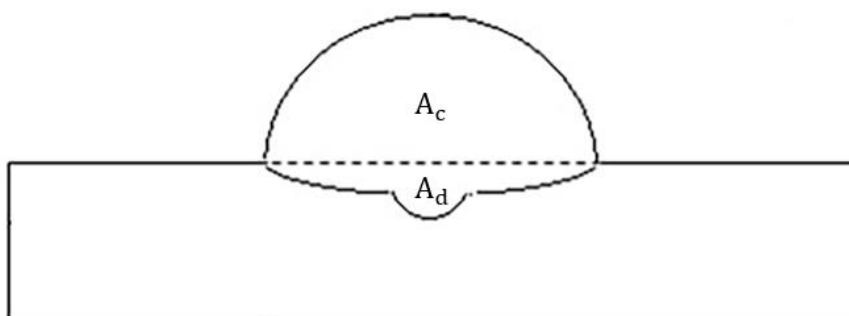
Na metalografia, as amostras foram embutidas e preparadas com lixas *mesh* 80, 220, 400, 600 e 1200, e polidas com pasta de diamante. O ataque químico foi com o reagente Nital 2%, por um período de dois a três segundos. A partir disso, foram escolhidos três parâmetros finais, por meio de análise feita no microscópio óptico (MO). Os critérios de escolha foram: ausência de defeitos e porosidade, ângulo de molhamento baixo, e diluição.

O percentual de diluição  $D$  foi medido a partir das imagens retiradas no MO, em que as áreas dos cordões, assim como a área diluída, foram calculadas no programa IMAGEJ. A partir daí foi possível retirar os dados para calcular o percentual na seguinte equação (BAUMGAERTNER FILHO; GONZALEZ, 2017):

$$D\% = \frac{A_d}{(A_d + A_c)} \times 100$$

Em que  $A_d$  é a área diluída e  $A_c$  é a área do cordão, como mostra a representação na Figura 16.

Figura 16 – Representação de um cordão diluído no substrato.



Fonte: Adaptado de (BAUMGAERTNER FILHO; GONZALEZ, 2017).

### 3.2.2. Sobreposição

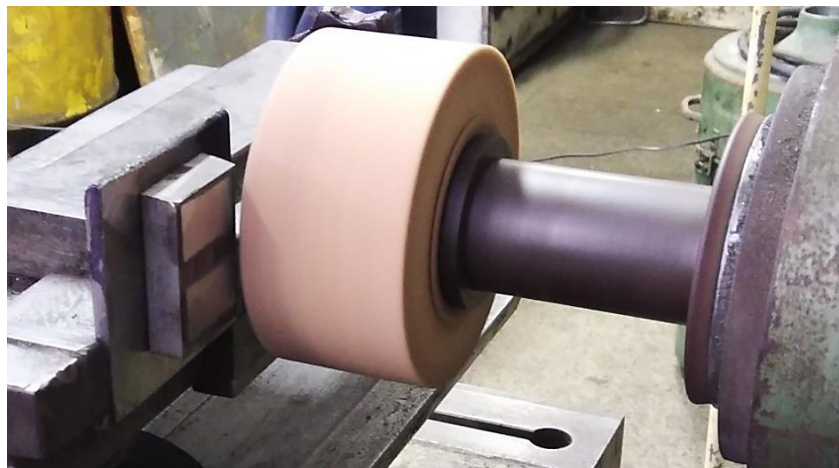
Novos ensaios de l-DED foram realizados após a escolha dos cordões, sendo esses dessa vez de recobrimento sobre os substratos de ambos os aços, ASTM A516gr.70 e A36. A sobreposição teve como objetivo, primeiramente criar corpos de prova para o ensaio de corrosão, e avaliar a interação entre os cordões, que por vezes apresentam trincas na sua interface. Esta análise foi realizada depois por MO na área transversal das amostras.

Para definir o percentual de sobreposição, foi utilizado um modelo similar ao de NENADL *et al.* (2016), a fim de obter uma camada de aproximadamente 0,7 mm de altura. Posteriormente, foram usinadas e deixadas com uma altura de 0,5 mm. Essa altura foi prevista pelo modelo de modo que todos os vales seriam removidos, e a peça seria considerada plana. Com estes parâmetros, o modelo determinou uma sobreposição de 30% entre os cordões. Para todas as comparações referentes às diluições dos cordões, foram utilizados os valores determinados na parametrização, ou seja, os valores dos cordões individuais.

### 3.3. Usinagem

Como comentado anteriormente, para o revestimento já depositado alcançar a altura de 0,5 mm, as amostras sofreram um processo de usinagem, em que um rebolo de alumina retificou a sua superfície, deixando-as planas para o ensaio de corrosão, e com a altura desejada, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Retificadora com rebolo de alumina.



Fonte: Autora.

Após serem usinadas, as peças foram cortadas com uma máquina de corte com disco abrasivo, usualmente denominada “*Cut-off*”, e separadas em 3 partes, uma destinada à corrosão, outra à metalografia transversal, e a última ao descarte. Para que pudessem ser colocadas dentro da célula de corrosão, as partes destinadas à corrosão foram cortadas para ter no máximo 30 mm de largura.

As peças designadas à metalografia foram avaliadas no MO, de modo a identificar a microestrutura do Inconel 625®, a deposição, e a diluição, além de verificar a existência de trincas e poros, como comentado anteriormente.

### 3.4. Ensaio de corrosão

Para este estudo, o ensaio realizado foi o de polarização cíclica, que tem como objetivo medir a tendência de formação de pites na amostra em um sistema metal-solução (PRINCETON APPLIED RESEARCH 4, 2022). As análises foram realizadas no potenciostato AUTOLAB da fabricante Metrohm, modelo PGSTAT 302 (Figura 18), com uma célula de 3 eletrodos (eletrodo de trabalho, contra-eletrodo e eletrodo de referência) (Figura 19). Os dados obtidos foram analisados com o *software* Nova 2.1 da mesma empresa.

Os parâmetros utilizados seguiram a Norma ASTM G61-86 (2014), com solução de 3,5% de NaCl diluído em água destilada, eletrodo de referência de calomelano saturado



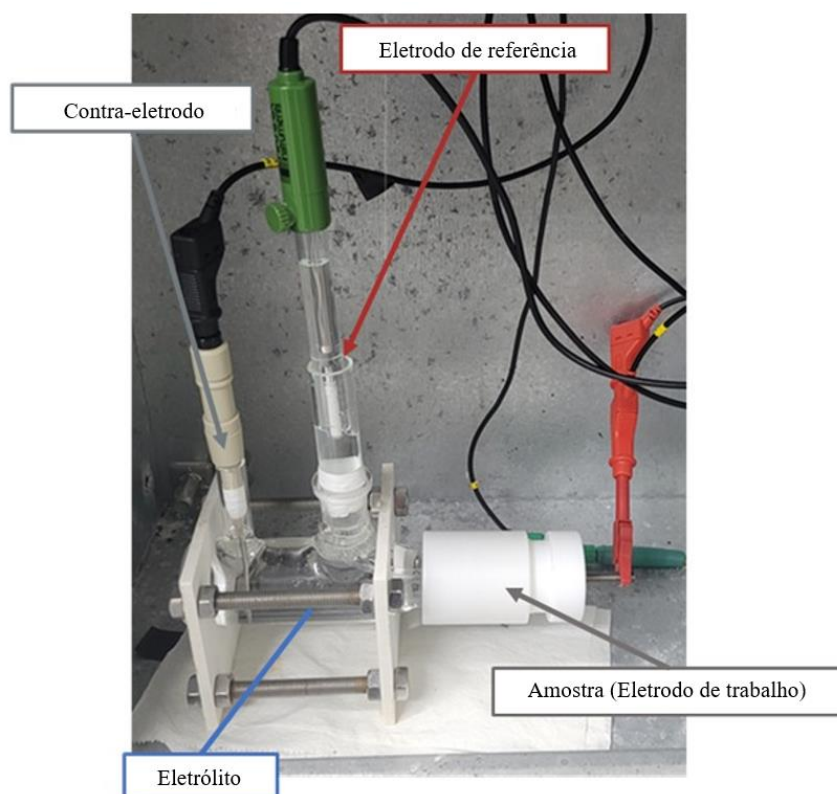
(ESC ou SCE, do inglês *Saturated Calomel Electrode*) e contra-eletrodo de platina, em uma sala à temperatura ambiente. A área de análise foi de  $0,785 \text{ cm}^2$ . O potencial de início foi de  $-0,15V_{\text{OCP}}$ , sendo aplicado até o potencial reverso de  $1,7V_{\text{OCP}}$ . A taxa de varredura foi de  $0,16 \text{ mV/s}$ .

Figura 18 – Potenciostato AUTOLAB da Metrohm.



Fonte: Autora.

Figura 19 – Célula de 3 eletrodos de corrosão utilizada.



Fonte: Adaptado de (VICENTE, 2020).

Ao finalizar, as amostras corroídas foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de identificar pontos de corrosão obtidos durante o ensaio, assim como outros aspectos da superfície, leia-se composição química. Juntamente com as amostras corroídas, foram analisados os cordões transversais das amostras não corroídas em MEV, para identificar o gradiente da composição do l-DED.

## **4. Resultados e Discussões**

Neste capítulo, são apresentados os resultados das deposições, a preparação das amostras e os resultados dos ensaios de corrosão.

### **4.1. Parametrização de Processo**

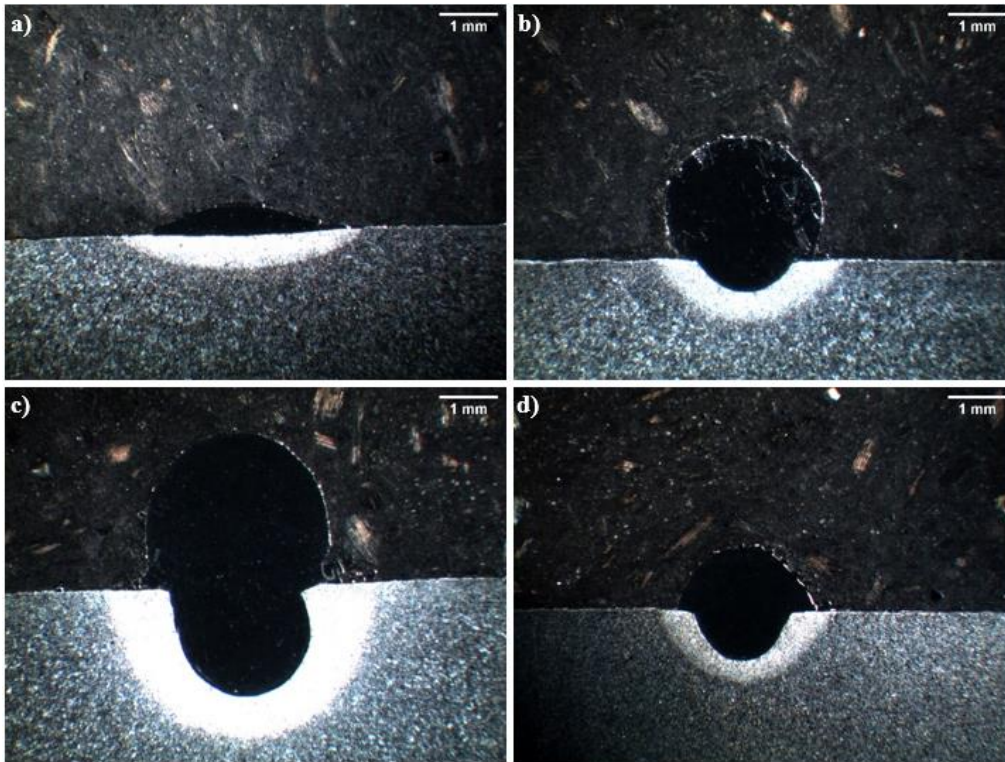
Serão analisados os cordões individuais e, a seguir, os revestimentos obtidos a partir da sobreposição lateral entre cordões.

#### **4.1.1. Cordões individuais**

Como mencionado anteriormente, a parametrização foi feita a partir da deposição de 48 cordões, cujas especificações estão apresentadas no Apêndice A. No Apêndice B estão as imagens dos 48 cordões.

A metalografia dos cordões individuais mostrou que alguns cordões não tiveram qualidade na deposição, de forma a apresentar porosidade, trincas aparentes, percentual de diluição muito elevado, e não apresentar um ângulo de molhamento menor que 90 graus, como mostram os cordões da Figura 20.

Figura 20 – Cordões a) A22 b) A26 c) A29 d) A33 falhos da parametrização.



Após análise, as amostras selecionadas são as dos cordões A9, A10 e A11, apresentadas na Figura 21, respectivamente. Essas foram as que melhor se enquadraram nos requisitos sem porosidade e defeito, ângulo de molhamento, além de possuírem diferentes percentuais de diluição entre pares, diferenças que neste caso foram causadas exclusivamente por diferentes valores de potência do laser.

Figura 21 – Cordões a) A9 b) A10 c) A11 da parametrização inicial.



Na Tabela 5 estão os parâmetros utilizados nas amostras finais.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nos cordões A9, A10 e A11.

Amostra	Potência Laser (W)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Vazão de Pó (g/min)	Distância Focal (mm)	Material de Substrato	Densidade de Energia por Milímetro (J/mm)	Diluição (%)
A9	1050	800	11,23	35	ASTM A36	78,8	2,0%
A10	1400	800	11,23	35	ASTM A36	105,0	23,1%
A11	1750	800	11,23	35	ASTM A36	131,3	40,0%

#### 4.1.2. Sobreposição

Com os resultados obtidos na fase anterior, foram feitas as deposições do pó de Inconel 625® sobre os substratos ASTM A36 e ASTM A516gr.70, com sobreposição de 30% entre os cordões.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos no substrato ASTM A36, na Figura 22, e do substrato ASTM A516GR.70 na Figura 23.

Figura 22 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.), substrato ASTM A36.

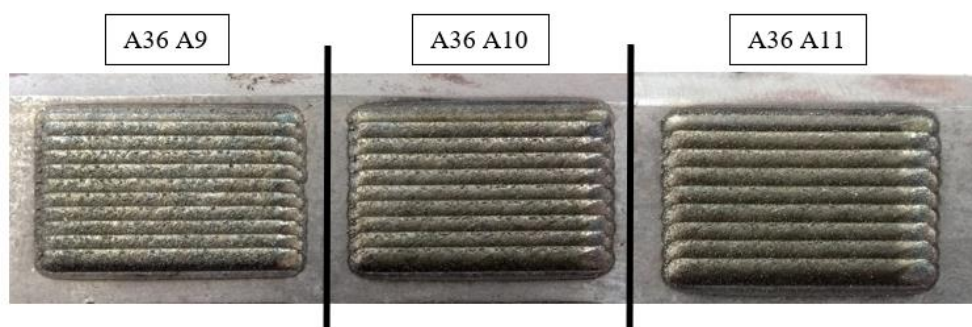
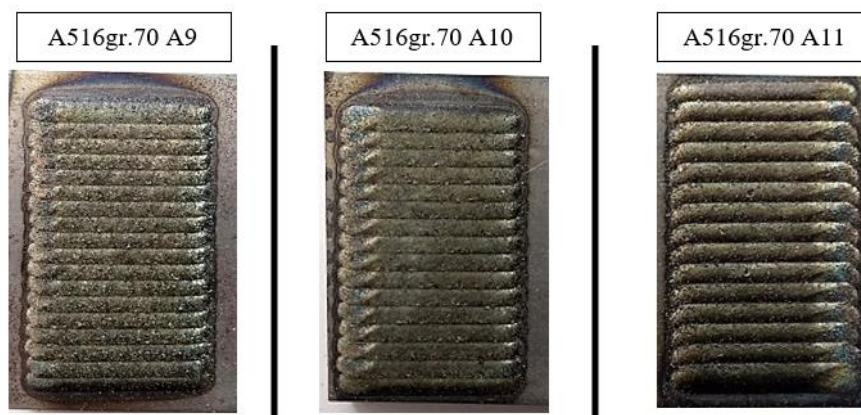


Figura 23 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.), substrato ASTM A516gr.70.



## 4.2. Usinagem

Com o revestimento por l-DED depositado, as amostras foram preparadas e usinadas para ficarem com altura de 0,5 mm, resultando nas peças apresentadas na Figura 24 e na Figura 25.

Figura 24 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.) usinados, substrato ASTM A36.

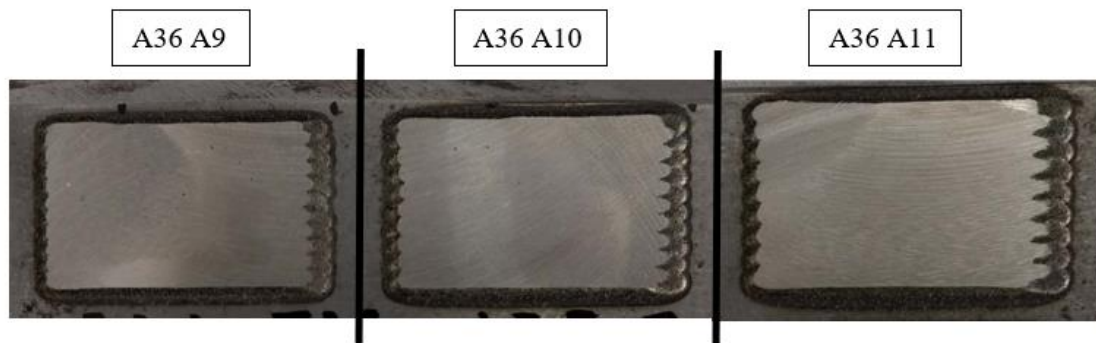
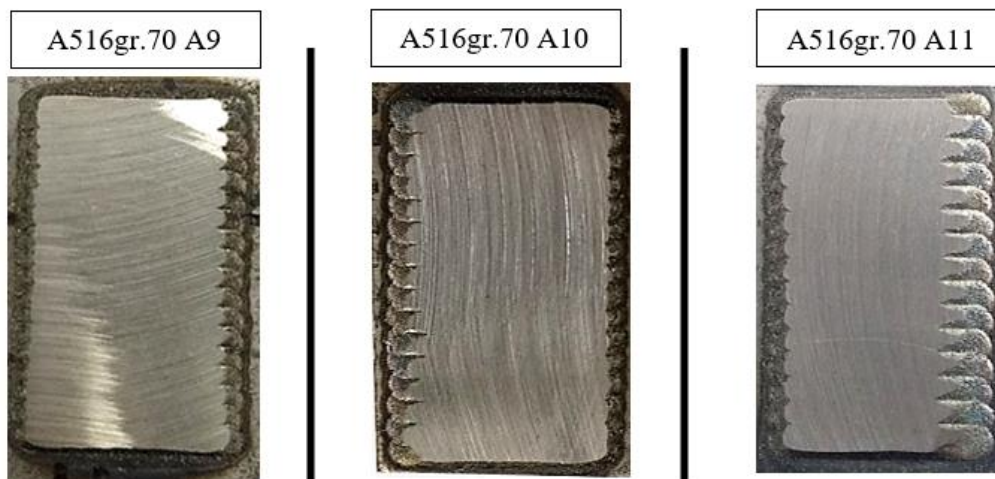
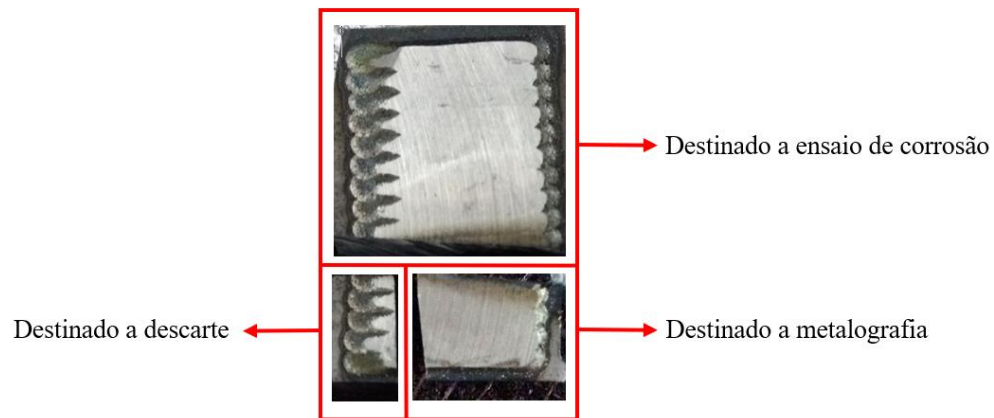


Figura 25 – Amostras A9 (esq.), A10 (centro) e A11 (dir.) usinados, substrato ASTM A516gr.70.



Após serem usinadas, as peças foram cortadas, como mostra a Figura 26. As partes destinadas à metalografia foram embutidas e preparadas para análise no MO.

Figura 26 – Amostra cortada em Cut-off para ensaio de corrosão e metalografia.

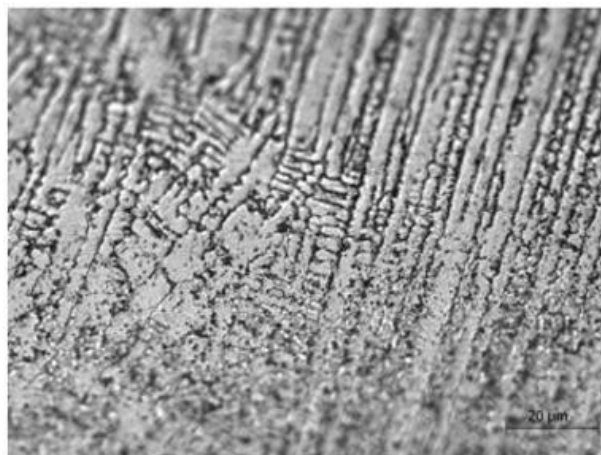


### 4.3. Microscopia Óptica

A partir das imagens obtidas por microscopia óptica, pode-se identificar a microestrutura do Inconel 625®, no qual, por ser um material resistente ao ataque químico utilizado para aços carbono, precisou-se aplicar um diferente reagente químico para atacá-lo.

O reagente utilizado de  $\text{FeCl}_3$  (1 parte de  $\text{FeCl}_3$ ; 2 partes de  $\text{HCl}$ ; 5 partes de  $\text{H}_2\text{O}$ ), foi estudado pelo acadêmico Rodolfo Pôrto em seu trabalho de conclusão de curso no curso de Engenharia de Materiais, sendo esse o melhor reagente indicado para se usar, de acordo com os resultados obtidos no referido trabalho (PÔRTO, 2019). Na Figura 27 pode-se identificar a microestrutura dendrítica característica do Inconel 625® (SOARES *et al.*, 2017).

Figura 27 – Amostra A516gr.70 A11. Aproximação 2000x.



As seções transversais foram analisadas com o intuito de verificar a qualidade dos cordões. Foi constatado que, de fato, as diluições dos cordões individuais são equivalentes às diluições dos revestimentos com cordões sobrepostos, e possuem similaridade entre os dois substratos. A partir das Figuras 28, 29 e 30, percebe-se que as amostras A9, A10 e A11 para os substratos A36 e A516gr.70 apresentaram boa qualidade de deposição, com baixa porosidade e sem trincas entre os cordões.

Figura 28 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A9 e b) A516gr.70 A9, ambos 50x.

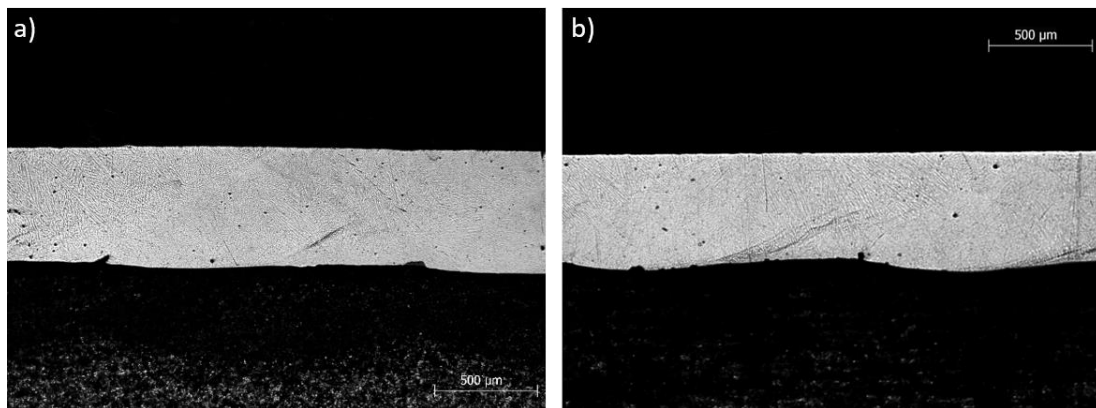


Figura 29 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A10 e b) A516gr.70 A10, ambos 50x.

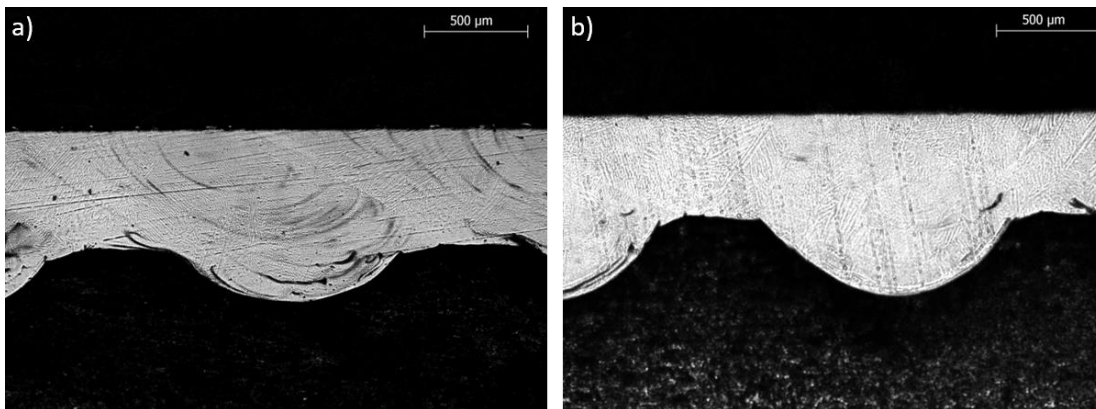
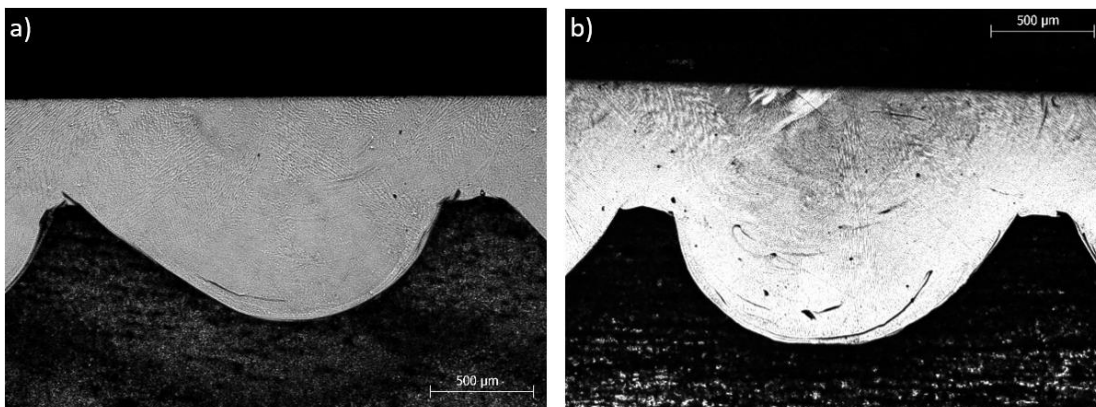
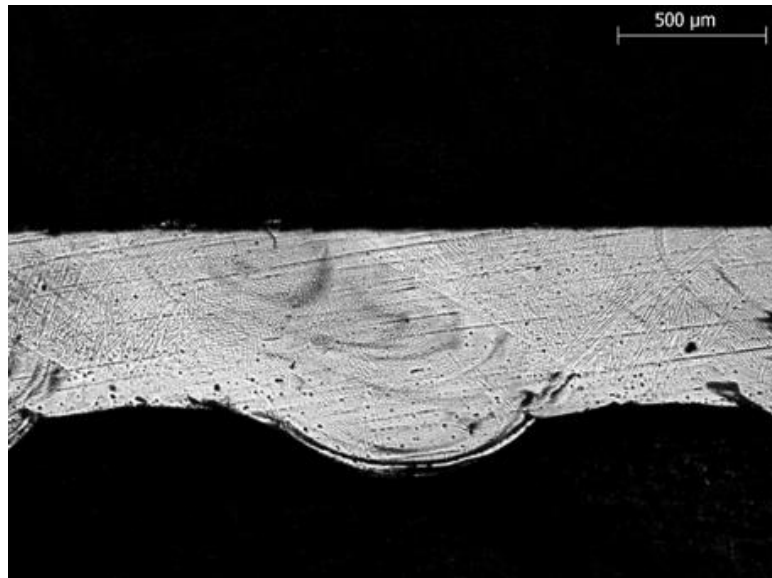


Figura 30 – Microscopia óptica transversal de a) A36 A11 e b) A516gr.70 A11, ambos 50x.



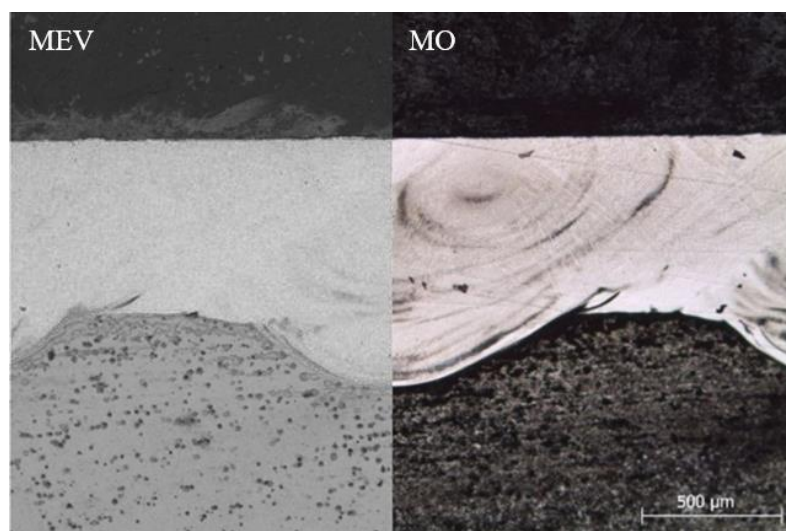
Ficou evidente nos cordões, principalmente os com diluições de 23,1% e 40,0%, que houve mistura dos materiais na poça de fusão, de forma a identificar que o material do substrato ficou diluído no meio do revestimento, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – MO transversal da amostra ASTM A36 A10, com aproximação de 50x.



A Figura 32 mostra um comparativo na mesma posição da amostra A36 A10 em MO e MEV, comprovando que as manchas são decorrentes da diluição do material, e não manchas de secagem devido à metalografia.

Figura 32 – Comparativo entre MO e MEV, amostra A36 A10.

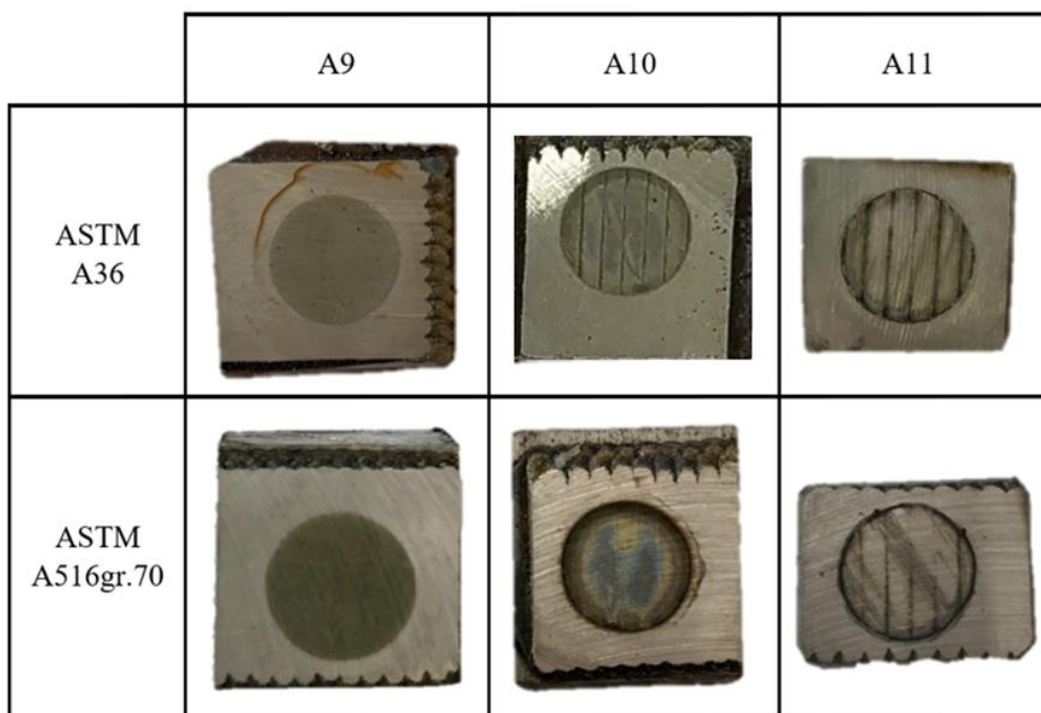




#### 4.4. Ensaio de corrosão

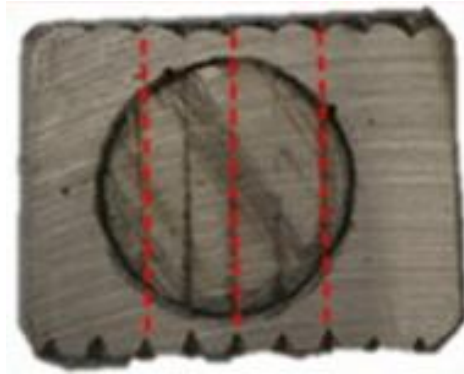
Na Figura 33 são apresentados os corpos de prova depois do ensaio de corrosão. Pelas imagens, pode-se observar que ocorreu corrosão nas amostras, devido a marca de corrosão circular ao centro das amostras, formada pelo ensaio de polarização cíclica. É possível perceber que nas amostras A9 ocorreram corrosões uniformizadas, enquanto nas amostras A10 e A11, as corrosões foram localizadas. Os resultados serão discutidos com mais detalhes na seção 4.5.1. EDS.

Figura 33 – Amostras após ensaio de polarização cíclica.



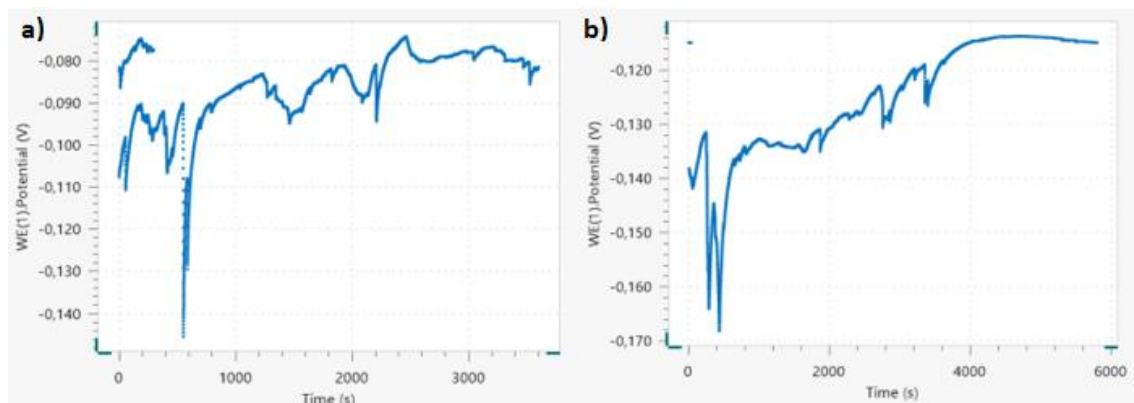
O tracejado na Figura 34 indica o centro entre os cordões, evidenciando o início e fim do cordão na área corroída.

Figura 34 – Tracejado evidenciando que as regiões corroídas coincidem com as regiões entre os cordões. Amostra A516gr.70 A11.



Como mencionado no item 2.2, o ensaio de polarização cíclica inicia com a estabilização do potencial de corrosão (OCP). Neste caso, a primeira parte levou de 3600 a 5800 segundos, dependendo da amostra, como mostra a Figura 35, em que está representado o OCP de a) ASTM A516gr.70 A9 e b) ASTM A36 A9, respectivamente.

Figura 35 – Gráficos de OCP obtidos no ensaio de polarização cíclica das amostras a) ASTM A516gr.70 A9 e b) ASTM A36 A9.



A partir do ensaio de polarização cíclica, foram obtidos gráficos do potencial de corrosão [V] em função da densidade de corrente [ $A/cm^2$ ] para os substratos A36 e A516gr.70 como mostra as Figuras 36 e 37, respectivamente.

Figura 36 – Gráficos das polarizações cíclicas das amostras ASTM A36 a) A9, b) A10 e c) A11.

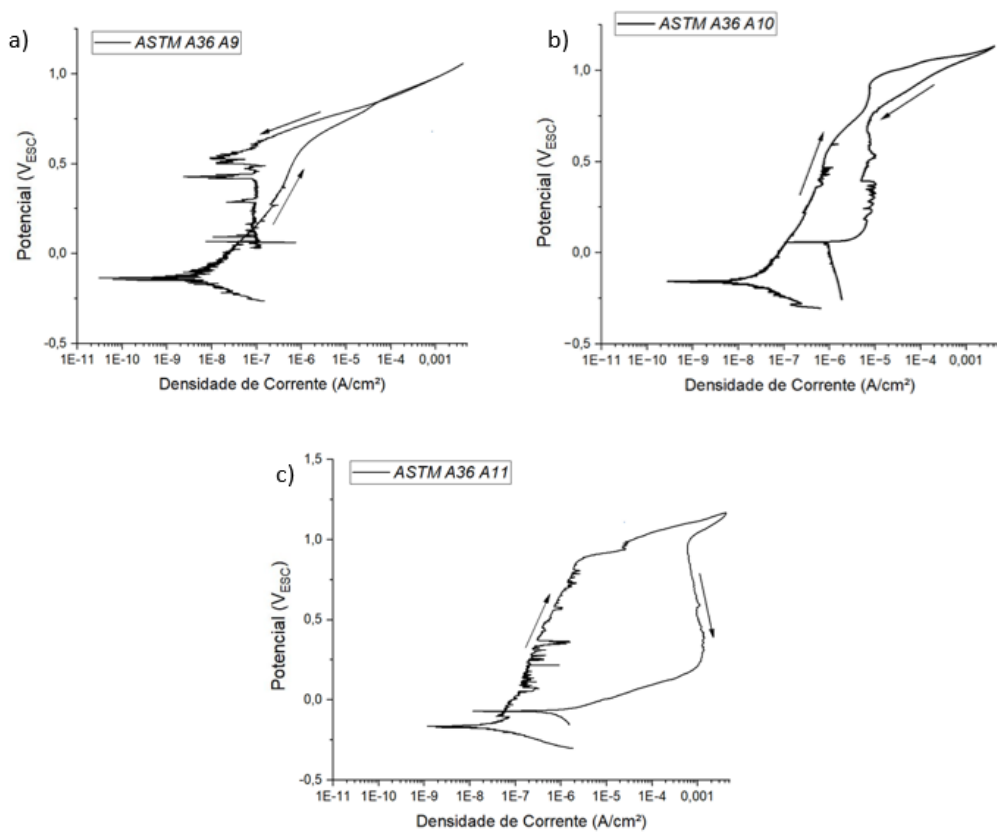
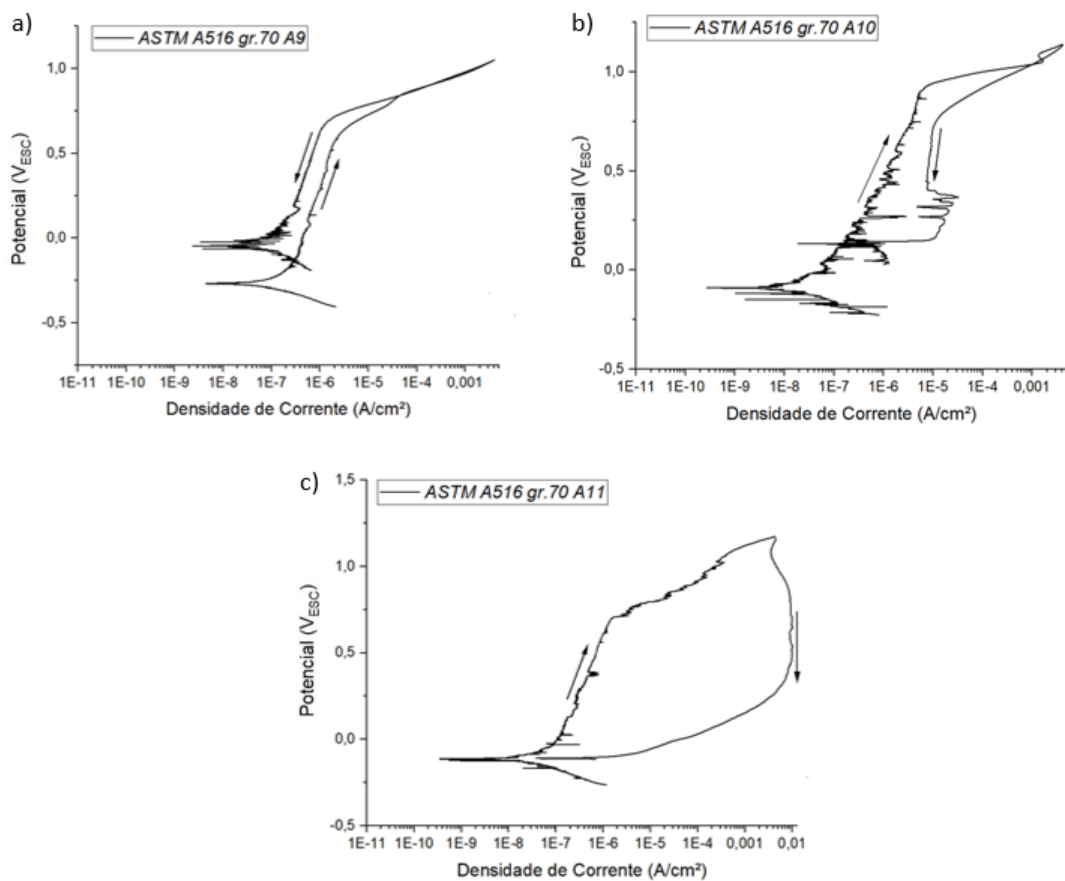


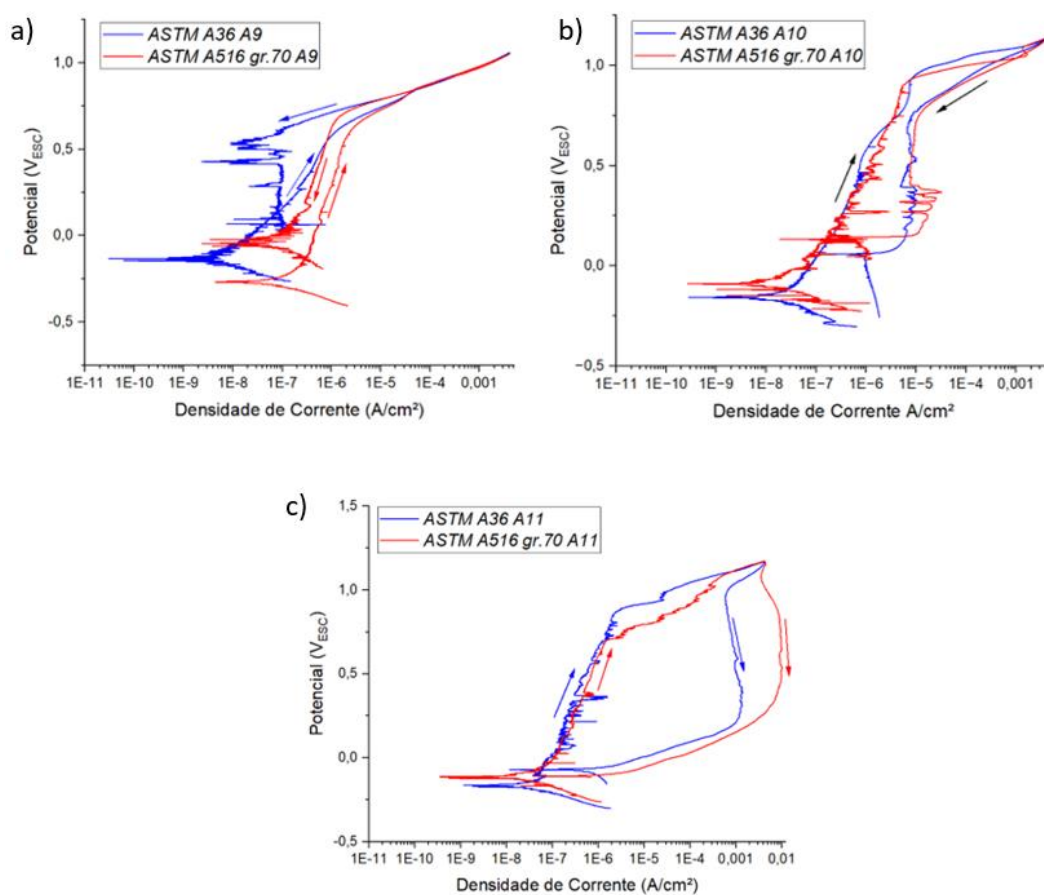
Figura 37 – Gráficos das polarizações cíclicas das amostras ASTM A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11.



Numa primeira análise nos gráficos, foi visto que as amostras, nos dois substratos, apresentaram um padrão, de forma a se pensar que a diluição interferiu no resultado da corrosão.

Na Figura 38, os gráficos das amostras de mesma diluição em diferentes substratos foram sobrepostos, evidenciando, a princípio, que os revestimentos dos substratos A516gr.70, em geral, foram os que melhor apresentaram resistência à corrosão, fato evidenciado devido ao seu potencial de corrosão ser mais elevado.

Figura 38 – Gráficos de corrosão comparativos entre os substratos ASTM A36 e A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11.



Das curvas de polarização cíclica, encontrou-se os valores de potencial de corrosão, corrente de corrosão (por meio da extrapolação de Tafel), potencial de pite e potencial de repassivação, apresentados nas Tabelas 6 e 7, das amostras A36 e A516 gr.70, respectivamente.

Tabela 6 – Tabela de resultados do ensaio de polarização cíclica das amostras ASTM A36.

Material de Substrato	Amostra	Potencial de Corrosão (V <sub>ESC</sub> )	Corrente de Corrosão (μA/cm <sup>2</sup> )	Potencial Pite (V <sub>ESC</sub> )	Potencial de Passivação (V <sub>ESC</sub> )	Potencial de Repassivação (V <sub>ESC</sub> )
ASTM A36	A9	-0,13	0,55	0,59	0,72	0,84
ASTM A36	A10	-0,15	0,18	0,60	0,75	0,06
ASTM A36	A11	-0,16	0,24	0,88	1,04	-0,07

Tabela 7 – Tabela de resultados do ensaio de polarização cíclica das amostras ASTM A516gr.70.

Material de Substrato	Amostra	Potencial de Corrosão (V <sub>ESC</sub> )	Corrente de Corrosão (μA/cm <sup>2</sup> )	Potencial Pite (V <sub>ESC</sub> )	Potencial de Passivação (V <sub>ESC</sub> )	Potencial de Repassivação (V <sub>ESC</sub> )
ASTM A516gr.70	A9	-0,26	0,55	0,62	0,88	0,84
ASTM A516gr.70	A10	-0,08	0,13	0,91	0,99	0,13
ASTM A516gr.70	A11	-0,11	0,27	0,71	0,82	-0,11

A partir das tabelas, em conjunto com as imagens da Figura 33, algumas informações podem ser constatadas. As amostras A9 tiveram as corrosões de pites forma generalizada, de modo que não é possível fazer uma comparação direta entre todas as peças, somente entre as A10 e A11. Viu-se, também, que as amostras A9 obtiveram a corrente de corrosão mais elevada que as demais, tendo em vista que a área corroída é maior.

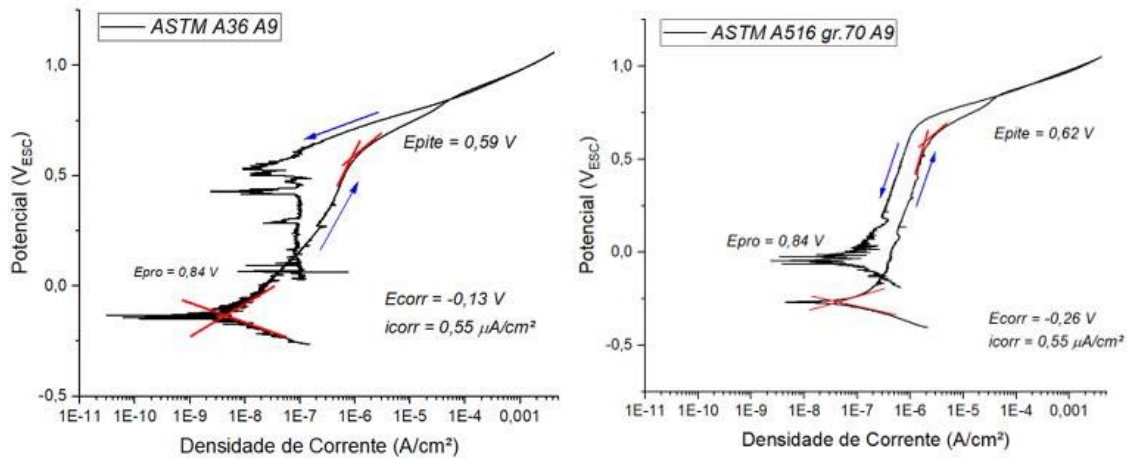
As amostras A10 possuem maiores valores de potencial de corrosão e menores valores de corrente de corrosão, comparado com as A11, evidenciando que são mais resistentes à corrosão.

Analisando separadamente os conjuntos de amostras (A9, A10 e A11 dos dois substratos), tem-se que:

- As curvas A9 (Figura 39) formaram um pequeno laço ao passar pela densidade de corrente de reversão, porém logo as curvas cruzaram a original, com um  $E_{pro}$  de aproximadamente  $0,84V_{ESC}$ , voltando pela esquerda, com uma histerese negativa, mostrando que as peças sofreram repassivação, ou seja, criaram uma camada protetora contra a corrosão uma vez que o potencial foi reduzido. Nesse

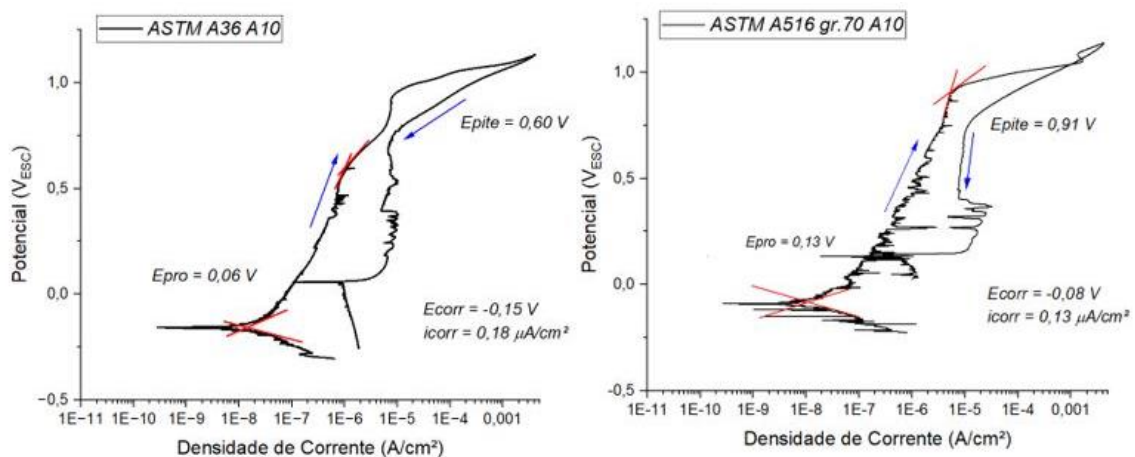
caso, em específico, a amostra do substrato A36 se mostrou mais resistente, com potencial  $E_{corr}$  maior, mesmo tendo valor de  $i_{corr}$  equivalente ao A516 gr.70. As setas nas imagens indicam a forma em que a curva foi gerada.

Figura 39 – Gráficos A9 de A36 e A516gr.70, respectivamente.



- Nas amostras A10, (Figura 40), por terem histerese positiva, indicam a formação de pites na peça. Comparando os dados, tem-se que, para estas peças, o  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  do substrato A516gr.70 A10 tiveram valores que indicam mais resistência à corrosão, com maior valor de  $E_{corr}$ , e menor de  $i_{corr}$ . Porém os resultados podem ser considerados equivalentes, sendo eles muito próximos para atestar a diferença de cada revestimento com somente esses dados.

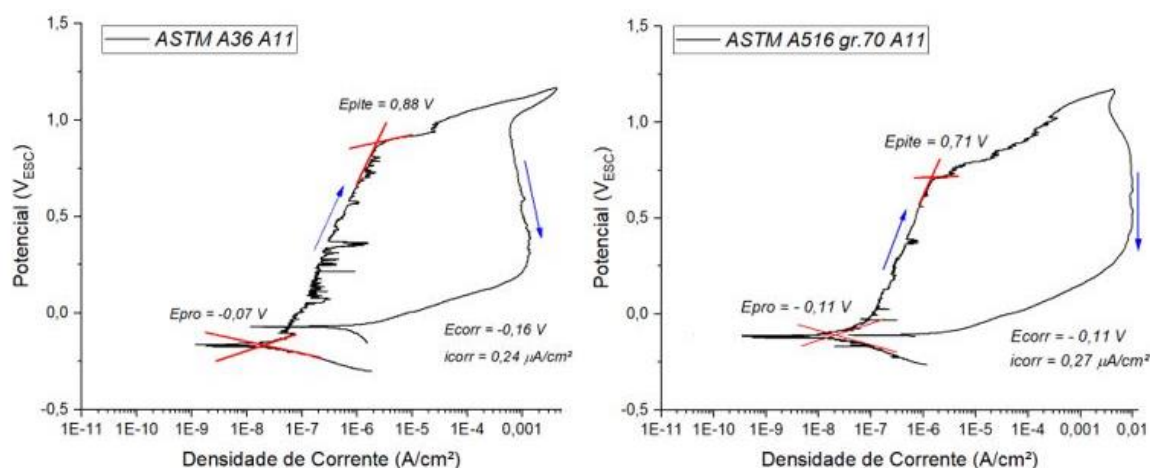
Figura 40 – Gráficos A10 de A36 e A516gr.70, respectivamente.



- Finalmente, as amostras A11 (Figura 41), foram as que obtiveram as maiores áreas de curvas de corrosão, corroborando o que era esperado a partir da análise

visual das superfícies corroídas. Nesses gráficos, as curvas obtiveram histereses positivas com áreas muito grandes, evidenciando o maior trabalho elétrico necessário para repassivar, demonstrando então, a menor resistência desses materiais com alta diluição a formação de pites. Ao mesmo tempo que o  $E_{corr}$  da peça A516gr.70 A11 foi mais alto que o do A36, os valores obtidos dos revestimentos ficaram muito próximos, assim como nas amostras A10, sendo necessário outros testes para verificar a real diferença entre as deposições nos substratos.

Figura 41 – Gráficos A11 de A36 e A516gr.70, respectivamente.



Fica comprovado assim a suposição da Figura 31, que mostra a mistura da poça fundida nos cordões, havendo a diluição do material do substrato no depositado. Por esta razão, é possível assumir que, dentre os parâmetros, ao aumentar somente a potência aplicada, resultará em uma maior diluição, e terá mais mistura de material, de modo a entender o motivo das peças A11 apresentarem as curvas de corrosão com menor resistência.

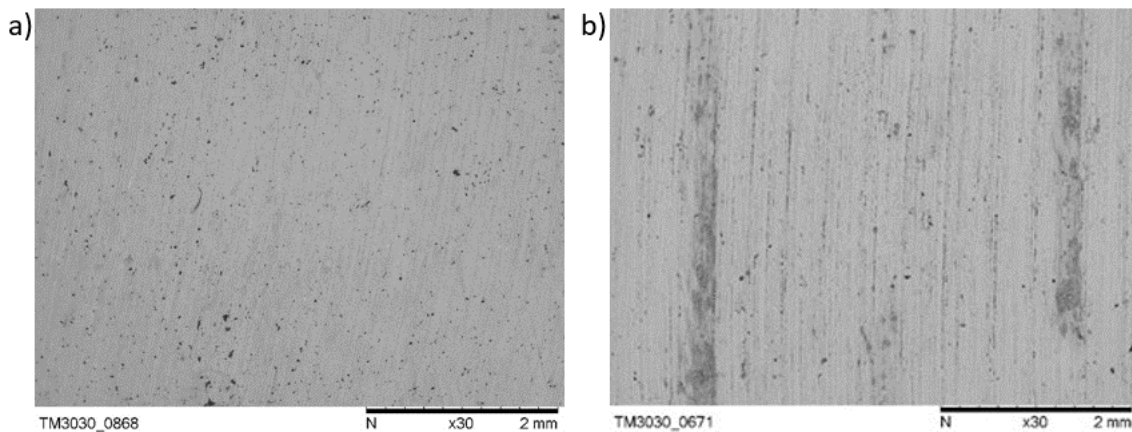
Com a análise dos gráficos, percebeu-se a equivalência dos revestimentos dos substratos. Isto leva à conclusão de que existe a possibilidade de utilizar o aço A36, um aço de menor custo, para a parametrização do processo de l-DED visando a realização de ensaios de corrosão do aço A516 gr.70.

#### 4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

Ao finalizar o ensaio de polarização cíclica, as superfícies das amostras foram analisadas no MEV, a fim de identificar as possíveis formações de corrosão.

Começando com as amostras do aço A36, observa-se pelas imagens da Figura 42 que na amostra A11 (b), ocorreu corrosão preferencial entre os cordões, já em A9 (a), houve corrosão uniforme, confirmando os resultados apresentados pelos gráficos da seção anterior. Não se obteve imagem da amostra A36 A10 por questões operacionais.

Figura 42 – MEV nas superfícies das amostras A36 a) A9, b) A11, com ampliação de 30x.



Ampliando a área de análise (Figura 43), percebe-se que há pontos escuros na superfície. Ao fazer uma análise na espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) (Figura 44), constatou-se uma alta concentração de Al, de forma a se assumir que os pontos escuros são partículas de alumina, resquícios da usinagem.

Figura 43 – Análise de EDS nos pontos escuros da superfície, voltagem de 15kV. Amostra A36 A11, com ampliação de 6 mil vezes.

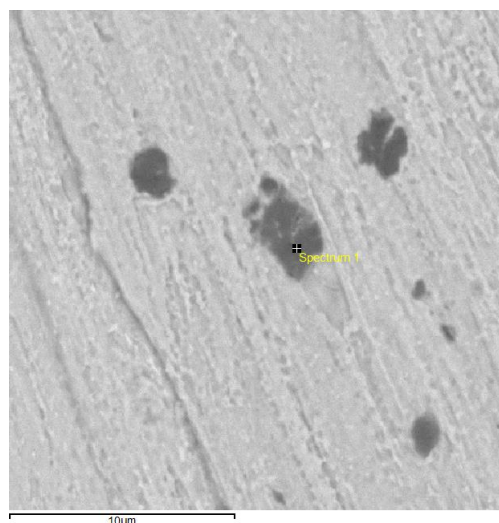
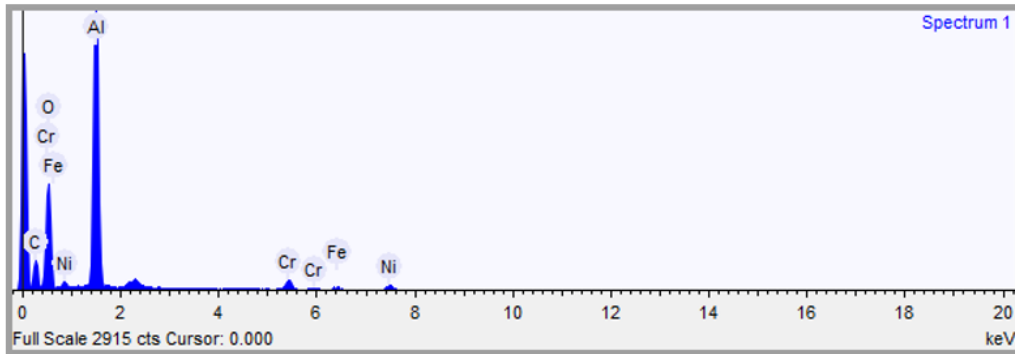




Figura 44 – Análise de espectro nos pontos escuros da amostra A36 A11.

### Spectrum details



Além disso, é possível identificar pontos de corrosão (Figura 45), possivelmente do tipo alveolar, devido ao seu formato arredondado. A corrosão é comprovada ao se utilizar uma ampliação de 2 mil vezes na região (Figura 46), e aferir a composição química por EDS. A Tabela 8 indica que nesta região há uma alta concentração de oxigênio e ferro. A corrosão deve ter ocorrido após a amostra perder a sua passivação nas amostras A10 e A11.

Figura 45 – MEV na superfície da amostra A36 A11, com ampliação de 150x, apontando os itens comentados.

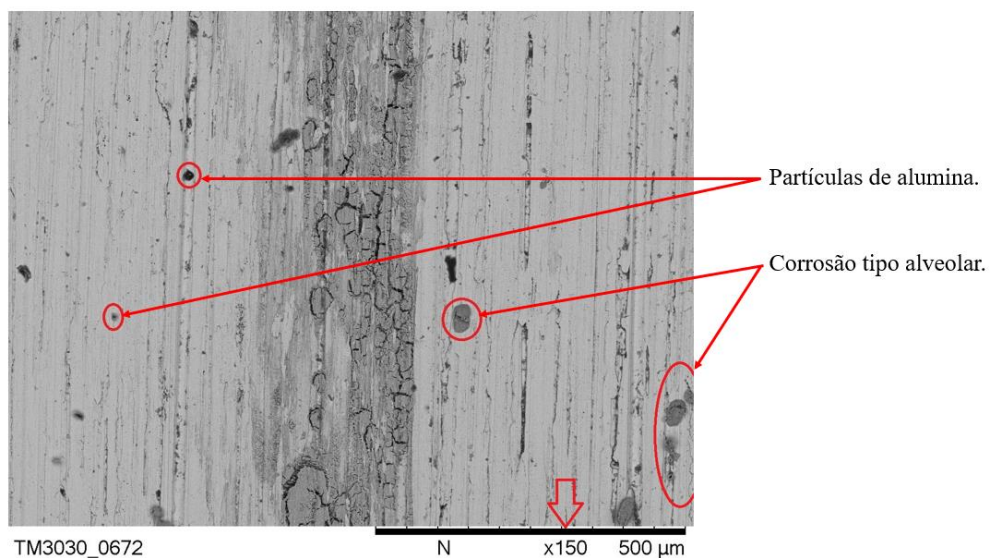


Figura 46 – Corrosão provavelmente do tipo alveolar. MEV na amostra A36 A11, com ampliação de 2 mil vezes.

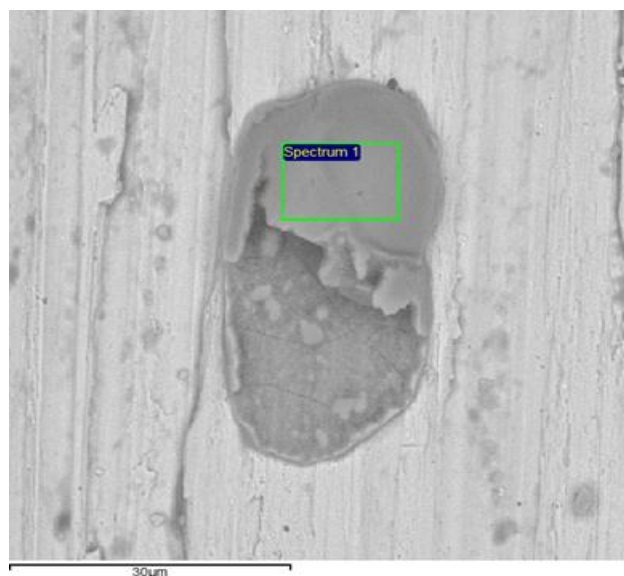
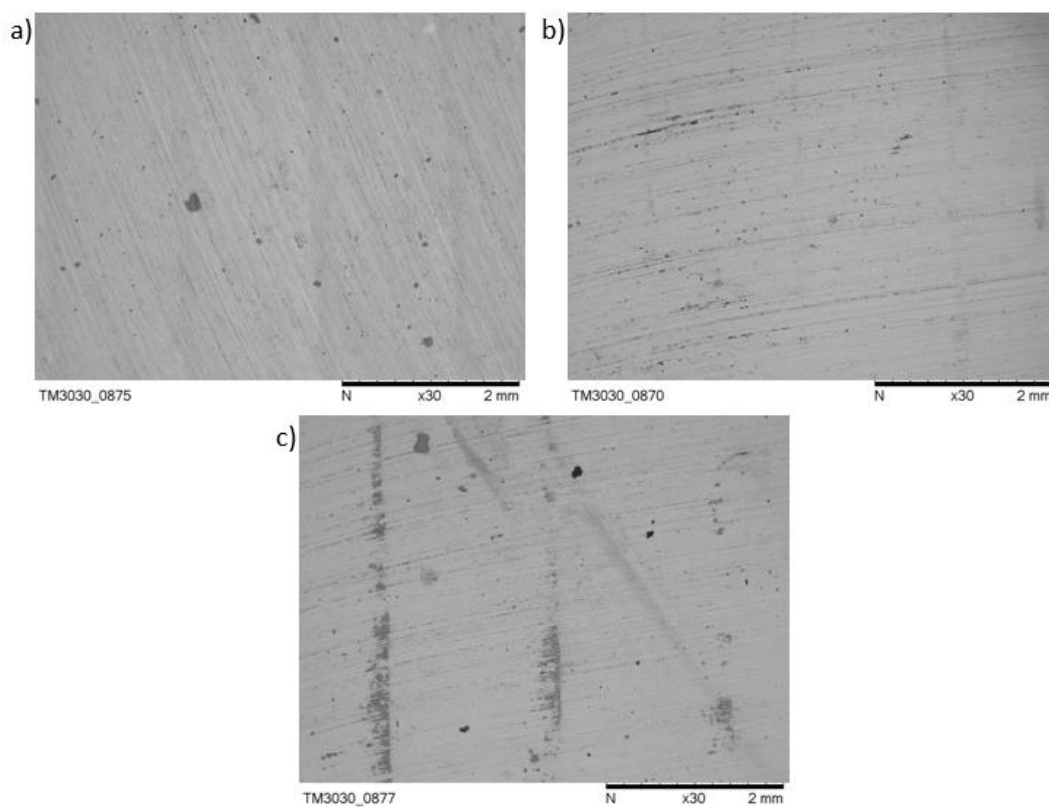


Tabela 8 – Tabela referente à análise de espectro na corrosão alveolar da amostra A36 A11. Análise feita com voltagem de 15kV.

<b>Elemento</b>	<b>Peso %</b>	<b>Peso % <math>\sigma</math></b>	<b>Peso atômico %</b>
Carbono	0.631	1.548	1.340
Oxigênio	44.056	0.970	70.181
Sódio	0.840	0.218	0.931
Cloro	10.721	0.308	7.707
Cromo	6.210	0.284	3.044
Ferro	22.499	0.621	10.268
Níquel	15.042	0.608	6.530

As amostras dos substratos A516gr.70, apresentaram um padrão condizente com o mostrado nos gráficos de corrosão. Também houve pontos escuros na superfície, resquícios de alumina do rebolo usado na usinagem. Na Figura 47 está o resultado da microscopia eletrônica de varredura feita nas superfícies das amostras.

Figura 47 – MEV nas superfícies das amostras A516gr.70 a) A9, b) A10 e c) A11, com ampliação de 30x.



#### 4.5.1. EDS

No MEV, as amostras sem corrosão foram analisadas pelo sistema EDS, com o intuito de identificar a distribuição dos elementos químicos nos revestimentos de Inconel 625®, de acordo com a linha representada na Figura 48. A partir dos gráficos da Figura 49, viu-se que ao passar a linha de escaneamento do Inconel para o substrato A516gr.70 A9, os elementos de maior concentração, Ni, Cr e Mo, passam a quase zero, enquanto o ferro aumenta consideravelmente.

Figura 48 – Linha de escaneamento do EDS na amostra A516 gr. 70 A9, sendo analisado de cima para baixo, com voltagem de 15 kV. Ampliação de 60x.

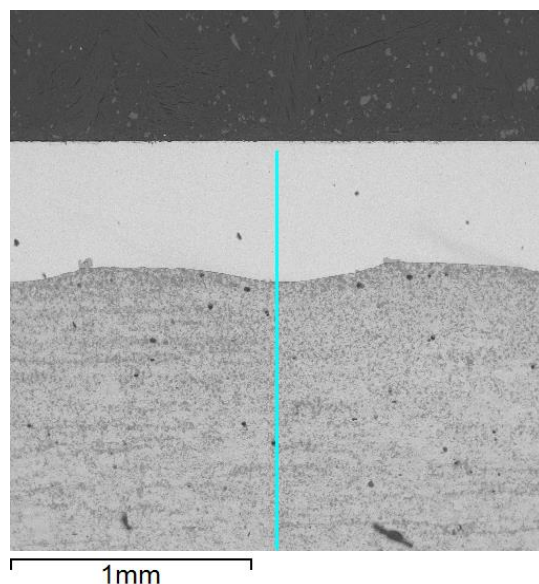
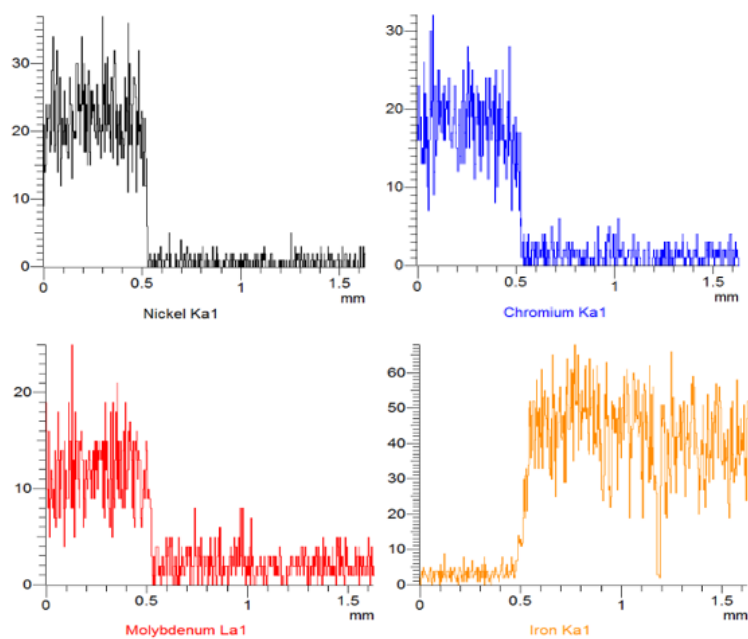


Figura 49 – Gráficos de composição química resultantes do EDS na amostra A516gr.70 A9.



Outra informação que se pode inferir a partir destes gráficos, é que a concentração de Mo ao se aproximar da base da deposição aumenta, quando comparado ao Ni e ao Cr. O mesmo ocorre com as amostras do substrato A36.

Para questão de comparação, foi feita a mesma análise com a amostra A516gr.70 A11 (Figura 50). Ficou evidente pelos gráficos (Figura 51) que a concentração dos

elementos está mais difundida pelo cordão, e não há uma queda brusca ao passar do Inconel 625® para o substrato.

Figura 50 – Linha de escaneamento do EDS na amostra A516 gr.70 A11, sendo analisado de cima para baixo, com voltagem de 15 kV. Ampliação de 60x.

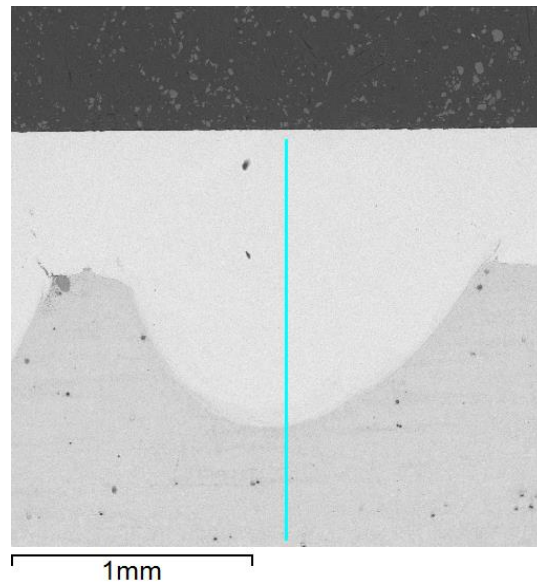
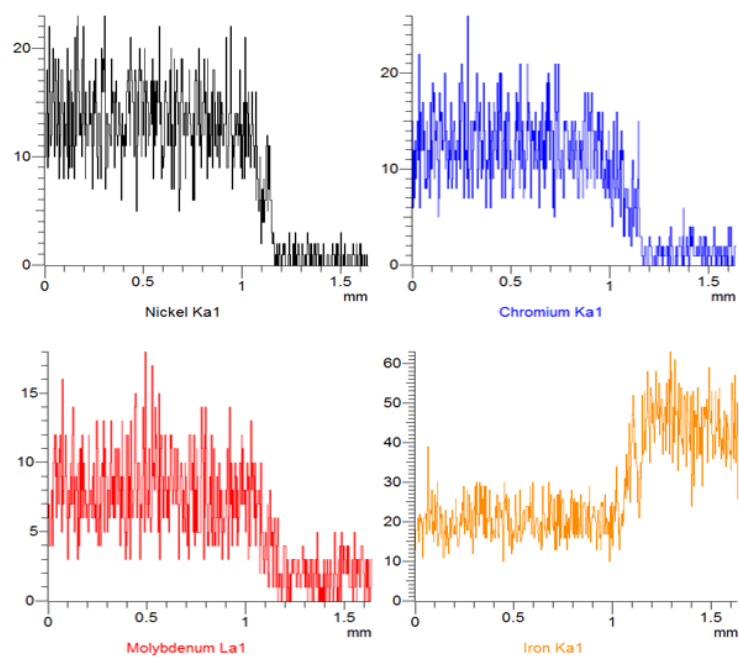


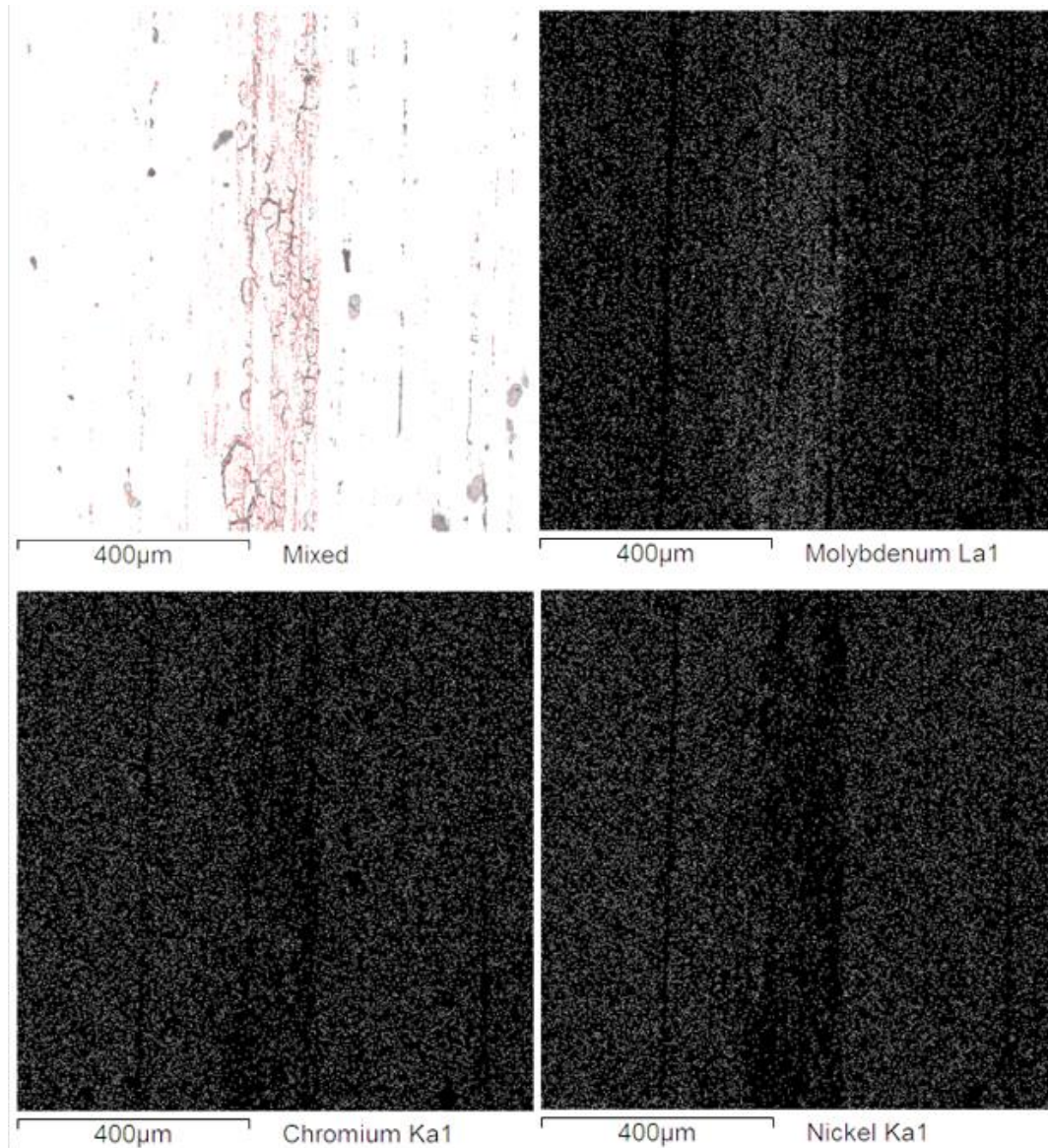
Figura 51 – Gráficos de composição química resultantes do EDS na amostra A516gr.70 A11.



Ao fazer-se a análise da superfície corroída pelo mapeamento de elementos químicos no EDS, foi observado que as concentrações de Ni e Cr diminuiram nas áreas

de corrosão, ao mesmo tempo que a concentração de Mo aumentou, como mostram os resultados nas imagens da Figura 52. A peça é a A36 A11.

Figura 52 – Mapeamento de elementos químicos por EDS, com voltagem de 15 kV. Amostra A36 A11.



A partir destes dois resultados, pode-se dizer que provavelmente o Mo do Inconel 625®, ao se solidificar, precipitou primeiro, sendo alojado entre os cordões e na base da deposição. Ao mesmo tempo que o Ni e Cr ficaram concentrados no centro do cordão. Desta maneira, pode se supor o porquê de ter ocorrido corrosão preferencial entre os cordões. Houve, portanto, a segregação do molibdênio, e por consequência diminuição da quantidade de níquel e cromo nessas áreas.

## 5. Conclusão

O estudo na área da resistência dos materiais à corrosão se provou ser de suma importância, como evidenciado por este trabalho. É fundamental que as universidades e centros de pesquisa continuem a investir e a incentivar os acadêmicos e profissionais da área a aprimorar seus conhecimentos, aperfeiçoando os materiais e criando métodos mais eficazes de proteção à corrosão, para evitar esse grande problema da indústria.

Com este trabalho, ficou comprovado que a parametrização do l-DED no substrato A36 pode ser replicada no aço A516gr.70, sendo que os melhores parâmetros para a deposição foram aqueles com velocidade de avanço de 800 mm/min, distância focal de 35 mm e potências de 1050W, 1400W e 1750W, proporcionando nas amostras diluições de 2,0%, 23,1% e 40,0%, respectivamente.

A análise dessas amostras pelo microscópio óptico deixou claro que com esses parâmetros, os cordões obtiveram pouca porosidade e ausência de trincas, fato percebido novamente ao reproduzir essas deposições nos substratos A36 e A516gr.70, com 30% de sobreposição.

Com o ensaio de corrosão, percebeu-se alguns fatos. Primeiro, os revestimentos dos substratos apresentaram valores de corrosão muito próximos uns dos outros, de forma a inferir que para se definir parâmetros de corrosão, seriam necessários outros ensaios de polarização cíclica. No entanto, o que se conclui é que há a equivalência dos revestimentos para os diferentes substratos.

O segundo indicativo é que a corrosão foi influenciada pela diluição. As amostras de 2,0% de diluição apresentaram uma corrosão de pites de forma generalizada, de forma a não ser possível compará-las às outras amostras.

Comparando as restantes, as amostras com diluição de 23,1% se mostraram mais resistentes, com maiores valores de  $E_{corr}$  e menores de  $i_{corr}$ . Com esse resultado, ficou comprovado que uma diluição menor gera mais resistência à corrosão.

O terceiro fato observado foi que utilizar o processo de l-DED a pó mostrou-se ser vantajoso, devido a possibilidade de depositar uma menor quantidade de material no substrato, com baixo porcentagem de diluição, aumentando o custo-benefício do processo.

A partir da análise do MEV, teve-se a comprovação que ocorreu corrosão nas amostras A10 e A11, podendo ela ser do tipo alveolar, devido ao seu formato arredondado.

Viu-se também, pelas análises de EDS, que o molibdênio segregou, provavelmente precipitando-se na base da deposição e entre os cordões, de forma a aumentar a sua concentração. Com isso, percebeu-se menos a presença de cromo e níquel nessas regiões, explicando o motivo da corrosão ter ocorrido de forma preferencial entre os cordões, causando aspectos de linhas na peça.

### 5.1. Sugestão de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, fica a sugestão de continuar com a análise do comportamento do Inconel 625® sob corrosão, nos substratos A516gr.70 e A36, realizando mais ensaios de polarização cíclica, de forma a fornecer estatística, comparar e identificar qual substrato apresenta maior resistência à corrosão quando revestido.

Além disso, se sugere também o estudo e a análise das propriedades mecânicas e tribológicas dos revestimentos aqui estudados, pois a aplicação destes revestimentos não exige deste somente resistência à corrosão, mas também resistência mecânica ao desgaste.



## 6. Referências

ALBUQUERQUE MADALENA, F. C. *et al.* **ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO AISI 904L UTILIZADO COMO REVESTIMENTO INTERNO DE VASOS DE PRESSÃO FABRICADOS EM AÇO CARBONO ASTM-A-516 GRAU 70.** Itatiaia: 7º COBEF, maio 2013.

ALLGAYER, A. A. **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DE UMA JUNTA DE AÇO ASTM A36 SOLDADO PELO PROCESSO DE ARCO SUBMERSO (SAW) COM DIFERENTES APORTES TÉRMICOS.** 2017. 72 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10737/1667>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

ARRUDA, N. F. DE *et al.* **Influence of the heat flow transient state on the microstructure and microhardness of ASTM-A36 and SAE-1045 steels welded by GMAW process.** *Soldagem e Inspecao*, v. 24, 2019.

BAUMGAERTNER FILHO, A. J.; GONZALEZ, A. R. **Estudo dos parâmetros de polaridade negativa na soldagem MIG/MAG polaridade variável para revestimento.** *Soldagem e Inspecao*, v. 22, n. 1, p. 46–58, 2017.

CASTRO, R. G. M. DE. **ANÁLISE DA FLUÊNCIA E PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DOS AÇOS ASTM A387, ASTM A516 E DIN 16MO3 APLICADOS NA FABRICAÇÃO DE CONVERSORES-LD.** 2013. 168 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, SÃO JOÃO DEL-REI, 2013.

DASS, A.; MORIDI, A. **State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design.** *Coatings*, v. 9, n. 7, p. 418, 29 jun. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6412/9/7/418>>.

DAURE, J. L. *et al.* **The effect of coating architecture and defects on the corrosion behaviour of a PVD multilayer Inconel 625 / Cr coating.** v. 324, p. 403–412, 2017.

DAVIM, J. P. *Laser in manufacturing*. 1. ed. [S.l.]: Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

**Designation: G61 – 86 Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys 1.** . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 6 set. 2022. , maio 2014

GENTIL, V. *Corrosão*. 3º Edição ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

GUTJAHR, J. **DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA CNC , MODULAR E RECONFIGURÁVEL , PARA PROCESSOS LASER.** 2016. 196 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

**High Performance Alloys for Seawater Service.** Disponível em: <[https://www.haynesintl.com/tech-briefs/corrosion-resistant-alloys/corrosion-resistant-alloy-applications/high-performance-alloys-for-seawater-service-\(H-2102\)](https://www.haynesintl.com/tech-briefs/corrosion-resistant-alloys/corrosion-resistant-alloy-applications/high-performance-alloys-for-seawater-service-(H-2102))>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ION, J. C. **CLADDING.** *Laser Processing of Engineering Materials*. 1. ed. Adelaide: Butterworth-Heinemann, 2005. p. 490.

KARTHIK, D. *et al.* **Electrochemical behavior of laser shock peened Inconel 625 superalloy.** *Surface and Coatings Technology*, v. 311, p. 46–54, 2017.

LIU, J. *et al.* **Surface & Coatings Technology Effect of dilution and macrosegregation on corrosion resistance of laser clad AerMet100 steel coating on 300M steel substrate.** *Surface & Coatings Technology*, v. 325, p. 352–359, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.035>>.

LUZ, G. **ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química.** Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205).** 2001. 1–181 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MANKINS, W. L.; LAMB, S. Nickel and Nickel Alloys. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** [S.l.]: ASM International, 1990. v. 2. p. 428–445. Disponível em: <<http://dl.asminternational.org/handbooks/book/14/chapter/199249/Nickel-and-Nickel-Alloys>>.

MARCHESE, B. G. *et al.* **Characterization and Comparison of Inconel 625 Processed by Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition** \*\*. n. Lmd, p. 1–9, 2016.

MATTOS, C. S. D. E.; VAREJÃO, T. O. **USINAGEM DA LIGA DE INCONEL 625 PARA A INDÚSTRIA DE PETRÓLEO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO.** 2009. 46 f. Projeto de Pós Graduação (Grau Pós Graduação lato Sensu) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

NĚMEČEK, S.; FIEDLER, L.; FIŠEROVÁ, P. **Corrosion Resistance of Inconel 625 and Austenitic Steel M41 after Laser Claddings.** *Key Engineering Materials*, v. 647, p. 115–120, 2015. Disponível em: <<https://www.scientific.net/KEM.647.115>>.

NENADL, O. *et al.* **A versatile model for the prediction of complex geometry in 3D direct laser deposition.** *Surface and Coatings Technology*, v. 307, p. 292–300, 15 dez. 2016.

PANNONI, F. D. **Aços estruturais.** . [S.l: s.n.] , 2005

PISCOPO, G.; SALMI, A.; ATZENI, E. **Influence of High-Productivity Process Parameters on the Surface Quality and Residual Stress State of AISI 316L Components Produced by Directed Energy Deposition.** *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 30, n. 9, p. 6691–6702, 1 set. 2021.

**Placa de caldeira ASTM A516 GR70.** Disponível em: <<http://m.pt.china-stainless-steels.com/hot-rolled-steel-plate/astm-a516-gr70-boiler-plate.html>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

POPRAWA, R. **Tailored Light 2.** Aachen: Springer-Verlag, 2011.

PÔRTO, R. M. **Metodologia de parametrização para refusão a laser de cordões de Inconel 625 em substrato de aço ASTM A36.** 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PRINCETON APPLIED RESEARCH 1. **Application Note CORR-1 Basics of Corrosion Measurements.** Disponível em: <[https://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download\\_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application\\_note\\_corr-1.pdf?revision=72ff248d-93aa-470e-a16b-ea23a8f8148a](https://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application_note_corr-1.pdf?revision=72ff248d-93aa-470e-a16b-ea23a8f8148a)>. Acesso em: 3 jun. 2022.

PRINCETON APPLIED RESEARCH 4. *Application Note CORR-4 Electrochemistry and Corrosion: Overview and Techniques*. Disponível em: < [https://www.ameteki.com/-/media/ameteki/download\\_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application\\_note\\_corr-4.pdf?revision=eabdb6b9-130e-4d45-85d2-ec3d8e6fdec6](https://www.ameteki.com/-/media/ameteki/download_links/documentations/library/princetonappliedresearch/application_note_corr-4.pdf?revision=eabdb6b9-130e-4d45-85d2-ec3d8e6fdec6) >. Acesso em: 3 jun. 2022.

PROF. DR. LUIS HENRIQUE GUILHERME. *Passivação química para otimizar a propriedade asséptica e de resistência à corrosão de equipamentos industriais em aço inoxidável AISI 316L com polimento Ra < 0.8 microns*. Disponível em: <<https://www.acwengenharia.com.br/passivacao-quimica-para-otimizar-a-propriedade-asseptica-e-de-resistencia-a-corrosao-de-equipamentos-industriais-em-aco-inoxidavel-aisi-316l-com-polimento-ra-0-8-microns/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

*PTA and Laser cladding grades*. Disponível em: <[https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/hoganas-brochures-and-datasheets/pta-and-laser-cladding\\_1940hog.pdf?mode=brochure#page=1](https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/hoganas-brochures-and-datasheets/pta-and-laser-cladding_1940hog.pdf?mode=brochure#page=1)>. Acesso em: 5 ago. 2022.

SANDES, S. S. *et al.* **Avaliação de revestimentos de liga de níquel 625 depositados pelo processo eletroescória**. *Soldagem e Inspecao*, v. 21, n. 4, p. 417–427, 1 out. 2016.

SOARES, J. P.; TERRONES, L. A. H.; PARANHOS, R. **Efeito dos Tratamentos Térmicos de Normalização e de Solubilização na Microestrutura de uma Junta Dissimilar Soldada entre um Tubo de Aço API 5L X-52 e o Inconel 625**. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, n. 4, p. 357–373, 21 dez. 2017. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242017000400357&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242017000400357&lng=pt&tlng=pt)>.

SOUSA, J. M. S. *Análise das Propriedades Tribológicas de Revestimentos de Ni-Cr-B-Si Depositados via Laser Cladding a Pó*. 2019. 137 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2019.

**Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals**. *ASTM F3187-16*, v. 10.04, p. 22, 2016.

STEPHEN TAIT, W. *AN INTRODUCTION TO ELECTROCHEMICAL CORROSION TESTING FOR PRACTICING ENGINEERS AND SCIENTISTS*. [S.l.]: PairODocs Publications, 1994.

TAHERI, H. *et al.* **The Effect of H<sub>2</sub>S Concentration and Temperature on Corrosion Behavior of Pipeline Steel A516-Gr70**. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, v. 1, n. 5, p. 41–47, 2012. Disponível em: <<http://www.cjasr.com>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

TIAN, Z. *et al.* **A Review on Laser Powder Bed Fusion of Inconel 625 Nickel-Based Alloy**. *Applied Sciences*, v. 10, n. 1, p. 81, 20 dez. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/81>>.

TOYSERKANI, E.; CORBIN, S.; KHAJEPOUR, A. *Laser Cladding*. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2005.

TURAZI, A. *METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE GRAU DE DEGRADAÇÃO E REJUVENESCIMENTO DE SUPERLIGAS À BASE DE NÍQUEL*. 2014. 197 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

VICENTE, F. A. *Avaliação da resistência à corrosão do aço SAE 1020 nitretado e com filme de DLC, utilizando-se como soluções eletrolíticas suor artificial e NaCl 3,5%*. 2020. Trabalho

de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

## Apêndice A

<b>Amostra</b>	<b>Potência Laser (W)</b>	<b>Velocidade de Avanço (mm/min)</b>	<b>Vazão de Pó (g/min)</b>	<b>Distância Focal (mm)</b>	<b>Material de Substrato</b>	<b>Densidade de Energia por Milímetro (J/mm)</b>	<b>Diluição (%)</b>
<b>A1</b>	350	300	11,23	35	ASTM A36	70,0	0,0%
<b>A2</b>	700	300	11,23	35	ASTM A36	140,0	0,0%
<b>A3</b>	1050	300	11,23	35	ASTM A36	210,0	2,9%
<b>A4</b>	1400	300	11,23	35	ASTM A36	280,0	19,5%
<b>A5</b>	1750	300	11,23	35	ASTM A36	350,0	31,1%
<b>A6</b>	2100	300	11,23	35	ASTM A36	420,0	40,1%
<b>A7</b>	350	800	11,23	35	ASTM A36	26,3	0,0%
<b>A8</b>	700	800	11,23	35	ASTM A36	52,5	0,0%
<b>A9</b>	1050	800	11,23	35	ASTM A36	78,8	2,0%
<b>A10</b>	1400	800	11,23	35	ASTM A36	105,0	23,1%
<b>A11</b>	1750	800	11,23	35	ASTM A36	131,3	40,0%
<b>A12</b>	2100	800	11,23	35	ASTM A36	157,5	49,7%
<b>A13</b>	350	1300	11,23	35	ASTM A36	16,2	0,0%
<b>A14</b>	700	1300	11,23	35	ASTM A36	32,3	0,0%
<b>A15</b>	1050	1300	11,23	35	ASTM A36	48,5	0,0%
<b>A16</b>	1400	1300	11,23	35	ASTM A36	64,6	13,9%
<b>A17</b>	1750	1300	11,23	35	ASTM A36	80,8	37,7%
<b>A18</b>	2100	1300	11,23	35	ASTM A36	96,9	49,3%
<b>A19</b>	350	1800	11,23	35	ASTM A36	11,7	0,0%
<b>A20</b>	700	1800	11,23	35	ASTM A36	23,3	0,0%
<b>A21</b>	1050	1800	11,23	35	ASTM A36	35,0	0,0%
<b>A22</b>	1400	1800	11,23	35	ASTM A36	46,7	12,7%
<b>A23</b>	1750	1800	11,23	35	ASTM A36	58,3	35,0%

<b>A24</b>	2100	1800	11,23	35	ASTM A36	70,0	49,0%
<b>A25</b>	350	300	11,23	15	ASTM A36	70,0	0,0%
<b>A26</b>	700	300	11,23	15	ASTM A36	140,0	12,2%
<b>A27</b>	1050	300	11,23	15	ASTM A36	210,0	23,5%
<b>A28</b>	1400	300	11,23	15	ASTM A36	280,0	25,7%
<b>A29</b>	1750	300	11,23	15	ASTM A36	350,0	34,4%
<b>A30</b>	2100	300	11,23	15	ASTM A36	420,0	43,0%
<b>A31</b>	350	800	11,23	15	ASTM A36	26,3	0,0%
<b>A32</b>	700	800	11,23	15	ASTM A36	52,5	21,3%
<b>A33</b>	1050	800	11,23	15	ASTM A36	78,8	36,1%
<b>A34</b>	1400	800	11,23	15	ASTM A36	105,0	40,4%
<b>A35</b>	1750	800	11,23	15	ASTM A36	131,3	49,2%
<b>A36</b>	2100	800	11,23	15	ASTM A36	157,5	36,7%
<b>A37</b>	350	1300	11,23	15	ASTM A36	16,2	0,0%
<b>A38</b>	700	1300	11,23	15	ASTM A36	32,3	26,5%
<b>A39</b>	1050	1300	11,23	15	ASTM A36	48,5	40,4%
<b>A40</b>	1400	1300	11,23	15	ASTM A36	64,6	49,1%
<b>A41</b>	1750	1300	11,23	15	ASTM A36	80,8	54,6%
<b>A42</b>	2100	1300	11,23	15	ASTM A36	96,9	59,0%
<b>A43</b>	350	1800	11,23	15	ASTM A36	11,7	0,0%
<b>A44</b>	700	1800	11,23	15	ASTM A36	23,3	29,0%
<b>A45</b>	1050	1800	11,23	15	ASTM A36	35,0	45,5%
<b>A46</b>	1400	1800	11,23	15	ASTM A36	46,7	53,9%
<b>A47</b>	1750	1800	11,23	15	ASTM A36	58,3	61,3%
<b>A48</b>	2100	1800	11,23	15	ASTM A36	70,0	66,2%

## Apêndice B

