



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MAXWELL LOPES BEZERRA FIGUEIRÊDO

**ANÁLISE DE CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L, SINTERIZADO,
SUBMETIDO A SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR ARTIFICIAL**

MOSSORÓ-RN

2020

MAXWELL LOPES BEZERRA FIGUEIRÊDO

**ANÁLISE DE CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L, SINTERIZADO,
SUBMETIDO A SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR ARTIFICIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido -
UFERSA, Centro de Engenharias, para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva
Júnior– UFERSA.

MOSSORÓ – RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F475a Figueirêdo, Maxwell Lopes Bezerra.
Análise de corrosão do aço inoxidável AISI 316L, sinterizado, submetido a solução de água do mar atificial / Maxwell Lopes Bezerra Figueirêdo.
- 2020.
51 f. : il.

Orientador: Manoel Quirino da Silva Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica, 2020.

1. Aço inoxidável austenítico. 2. Corrosão. 3. Metalurgia do pó. I. Júnior, Manoel Quirino da Silva, orient. II. Título.

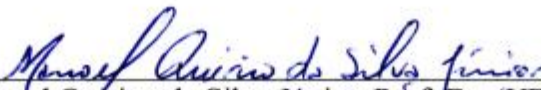
MAXWELL LOPES BEZERRA FIGUEIRÊDO

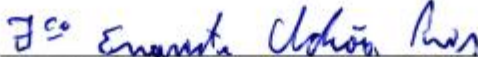
**ANÁLISE DE CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L, SINTERIZADO,
SUBMETIDO A SOLUÇÃO DE ÁGUA DO MAR ARTIFICIAL**

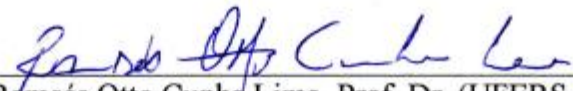
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido -
UFERSA, Centro de Engenharias, para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Defendida em: 04 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA


Manoel Quirino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente


Francisco Evaristo Uchoa Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Ramsés Otto Cunha Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao apoio de minha família em todos os momentos. E principalmente aos meus pais, Edvan Delfino e Silvana Lopes, que sempre me incentivaram e deram todo apoio necessário nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me guiar, dando saúde e sabedoria fundamental para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Edvan Delfino Figueirêdo e Silvana Lopes Bezerra Figueirêdo, por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, me dando todo o apoio e incentivo necessário, por nunca me deixarem faltar nada e por serem, nos momentos difíceis, meu porto seguro.

A minha família, em especial meus tios e padrinhos João Francisco Bezerra e Susana Lopes Bezerra, meus avós Sebastião Lopes e Marluza Marques Bezerra, e ao meu irmão Maxwendell Lopes Delfino, que assim como meus pais se dedicaram para me ajudar no decorrer da vida estando sempre próximos. Por me encorajarem na busca de meus objetivos com paciência e sabedoria.

Ao professor Manoel Quirino da Silva Júnior, pela orientação, pelos ensinamentos, e pelo suporte, colaboração e paciência durante a graduação. Aos professores Gecilio Pereira da Silva pela ajuda prestada nesse trabalho, e Zoroastro Torres Vilar, pela orientação no estágio e no projeto da Cactus Baja, me dando todo apoio e auxílio.

A minha namorada Ruth Anne Paxele de Sousa, que esteve sempre ao meu lado, por ter me incentivado, me ajudado bastante quando eu mais precisei e, principalmente, pela compreensão.

Aos amigos que conquistei durante a vida acadêmica meu muito obrigado. E a própria universidade, UFERSA, por fazer parte desta jornada.

A Equipe Cactus Baja pelo aprendizado e crescimento adquiridos durante a participação e a todos os ex-membros que me ajudaram no decorrer dessa experiência.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que pareciam impossíveis.”

Charles Chaplin

RESUMO

A corrosão é um processo degradante que acontece de forma espontânea nos materiais, principalmente em metais, provocado por uma ação eletroquímica do meio no qual está exposto e por esse motivo ela representa um grande problema para a indústria metalúrgica. O estudo e a inovação no uso de materiais resistentes a corrosão é crescente e vem apresentando uma ótima alternativa em meios corrosivos. Com base nisso, o trabalho em questão faz uma análise de corrosão do Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L, obtido através da metalurgia do pó, em solução de água do mar artificial. Esse aço possui boas propriedades mecânicas e uma das mais importantes é a alta resistência a corrosão. Na presente pesquisa, observou-se os efeitos do aumento da temperatura de sinterização por Microscopia Óptica em 3 amostras fabricadas com pó de aço AISI 316L, como também seus comportamentos corrosivos através de análises de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Curvas de Polarização Potenciodinâmicas (CPP) feitas em um potenciostato/galvanostato. Entre os resultados observados na Microscopia Óptica, as amostras se mostraram com microestruturas bem coalescidas, assim como o número de poros aumentou com a elevação da temperatura, possivelmente ocorrido pelo efeito degradante, a altas temperaturas, da atmosfera não controlada no processo de sinterização. Em segundo momento, nos resultados das análises de EIE e CPP, as amostras sinterizadas em menores temperaturas apresentaram maior resistência a corrosão, enquanto a de maior temperatura apresentou uma menor resistência, possivelmente por ser mais porosa que as demais, e menor coalescimento da matriz. Quando comparadas com uma amostra de mesmo material obtida por fundição, ambas as 3 amostras apresentaram resistências a corrosão bem menores, o que já era esperado pois a metalurgia do pó apresenta características como alta porosidade, a qual geralmente não está presente em materiais fundidos, além de serem menos densos.

Palavras-Chave: Aço Inoxidável Austenítico. Corrosão. Metalurgia do Pó.

ABSTRACT

Corrosion is a degrading process that occurs spontaneously in materials, especially metals, caused by an unqualified electrochemical action of the medium that is exposed and for this reason it represents a major problem for the metallurgical industry. The study and innovation in the use of materials resistant to corrosion is growing and has been showing a great alternative in corrosive media. Based on this, the work in question makes a corrosion analysis of AISI 316L Austenitic stainless steel, applied to powder metallurgy, in the artificial seawater solution. This steel has good mechanical properties and one of the most important is its high resistance to corrosion. In the present research, the effects of increasing the sintering temperature by Optical Microscopy on 3 slides made with AISI 316L steel powder, can also be affected corrosively through electrochemical impedance spectroscopy (EIE) analyzes and power polarization curves. (CPP) made in a pot / galvanized. Among the results observed in Optical Microscopy, such as the quantities of samples with well coalesced microstructures, such as the number of pores increased with the temperature rise, possibly due to the degrading effect, at high temperatures, of the uncontrolled atmosphere in the sintering process. In the second moment, in the results of the EIE and CPP analyzes, how the samples sintered at lower temperatures cause corrosion resistance, while the higher temperatures are lower, possibly because it is more porous than others, and lower matrix coalescence. When compared to a sample of the same material used for casting, such as 3 much smaller corrosion resistant samples, or that was already expected since powder metallurgy has effects such as high porosity, which is not usually present in molten materials, since they are less dense.

Keywords: Austenitic Stainless Steel; Corrosion; Powder Metallurgy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O desenvolvimento de uma quantidade de pó para sua equivalente quantidade densificada.	17
Figura 2 – Etapas do processo de metalurgia do pó.	18
Figura 3 - Processo de compactação.....	19
Figura 4 - Representação esquemática das fases de sinterização.	20
Figura 5 - Composições químicas e principais aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316.	23
Figura 6 - Propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos 316L	24
Figura 7 - Microestrutura do aço inoxidável 316L (a) na forma sinterizado e (b) obtido através de fundição.	25
Figura 8 - Corrosão generalizada e localizada.....	25
Figura 9 - Diagrama de Nyquist.	27
Figura 10 - Curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica dos aços AISI 316L (cor vermelha) e 304 (cor preta).	28
Figura 11 – Representação esquemática de potenciostato para verificação das curvas de polarização.....	29
Figura 12 - Esquema do diagrama de Tafel, para a determinação da corrente de corrosão e potencial de corrosão, com as inclinações anódicas e catódicas.	30
Figura 13 - Curvas de polarização potenciodinâmicas dos aços 316L (cor vermelha) e 304 (cor preta).	31
Figura 14 - Pó do aço inoxidável AISI 316L cedido.....	32
Figura 15 - Matriz cilíndrica utilizada na compactação à esquerda e sua vista em corte com dimensões em milímetros à direita.	34
Figura 16 -Exemplo de uma amostra na forma de compactado verde	34
Figura 17 -Exemplo de amostra com fenda.....	35
Figura 18 - Amostras embutidas com fio condutor.	36
Figura 19 - Eletrodos para análises eletroquímicas	37
Figura 20 - Micrografias das amostras de aço 316L, sinterizado, com aumento em 200x: (A) A1, (B) A2 e (C) A3.	40
Figura 21 - Curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica das amostras A1, A2 e A3.	41

Figura 22 - Curva de polarização da amostra A1.	42
Figura 23 - Curva de polarização da amostra A2.	43
Figura 24 - Curva de polarização da amostra A3	44
Figura 25 - Curvas de polarização sobrepostas das amostras A1, A2 e A3.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens presentes no processo de fabricação de Metalurgia do pó	18
Tabela 2 - Composição química do aço inoxidável austenítico 316L.	23
Tabela 3 - Especificações do aço inox 316L fornecidas pelo fabricante.....	33
Tabela 4 - Valores de Temperatura e Pressão das amostras fabricadas.	35
Tabela 5 - Elementos e suas respectivas quantidades na solução de água do mar artificial segundo a norma ASTM D1141.....	37
Tabela 6 - Composição química do aço 316L pelo ensaio de Fluorescência de Raio-X	39
Tabela 7 - Valores de R_p das amostras na análise de Impedância.	41
Tabela 8 - Valores de potencial de corrosão e de resistência a polarização das amostras.	45

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Cr	Cromo
Ni	Níquel
NaCl	Cloreto de Sódio
Fe	Ferro
C	Carbono
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
Mo	Molibdênio
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
CPP	Curvas de Polarização Potenciodinâmicas
Tf	Temperatura de fusão
ET	Eletrodo de Trabalho
ER	Eletrodo de Referência
CE	Contra Eletrodo
Inox	Inoxidável
J	Densidade de corrente
Ecorr	Potencial de corrosão
E	Potencial elétrico
OCP	<i>Open Circuit Potential</i>
KCl	Cloreto de potássio
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Na ⁺	Íon de sódio
K ⁺	Íon de potássio
Cl ⁻	Íon de cloro
Z'	Impedância real
Z''	Impedância imaginária
R _p	Resistência a polarização
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

Cr_{23}C_6	Carboneto de cromo
HCO_3^-	Íon de bicarbonato
MgCl_2	Cloreto de magnésio
CaCl_2	Cloreto de cálcio
Fe	Ferro
Ag	Prata
AgCl	Cloreto de prata
DRX	Difração de Raios X
XRF	Fluorescência de Raios X

SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 METALURGIA DO PÓ	17
3.1.1 Compactação	19
3.1.2 Sinterização	20
3.2 AÇO INOXIDÁVEL	21
3.2.1 Aço inoxidável austenítico	22
3.2.2 Aço inoxidável 316L	23
3.3 CORROSÃO	25
3.4 MEIO SALINO	26
3.4.1 Corrosão do aço em meio salino	26
3.5 TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)	27
3.6 CURVA DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA (CPP)	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 MATERIAL	32
4.1.1 Aço inoxidável austenítico AISI 316L	32
4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	33
4.2.1 Pesagem do pó	33
4.2.2 Compactação	33
4.2.3 Sinterização	35
4.2.4 Preparação das amostras para ensaios eletroquímicos	35
4.2 ENSAIOS DE ELETROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA E DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	36
4.3 MICROSCOPIA ÓPTICA	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL	39
5.2 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ÓPTICA	39
5.3 ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)	40

5.4 CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICAS (CPP)	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo espontâneo de deterioração de materiais, que está relacionado tanto a materiais metálicos como não-metálicos, ocasionado por uma ação eletroquímica entre o material e o meio corrosivo (GENTIL, 2007).

O combate à corrosão sempre foi um grande desafio principalmente para a indústria metalúrgica, uma vez que a deterioração deste processo acarreta problemas associados ao custo de manutenção e substituição de equipamentos, perdas completas de produtos, comprometendo a durabilidade e desempenho dos mesmos, como também pode ocasionar impactos ambientais relacionados à vazamentos em tubulação e tanques, além de riscos de acidentes e explosões. Em meio a isso, a utilização de ligas metálicas resistentes a corrosão vem se tornando cada vez mais viável, com o objetivo de erradicar ou minimizar ao máximo os prejuízos causados pelo processo.

O aço inoxidável austenítico AISI 316L se destaca no combate à corrosão por apresentar excelentes propriedades mecânicas como: ótima ductilidade e tenacidade, alta taxa de encruamento, grande zona plástica e principalmente uma elevada resistência à corrosão (GENNARI; MACHADO, 1999).

A metalurgia do pó vem sendo uma boa alternativa para a fabricação de peças tanto metálicas como não-metálicas, uma vez que apresenta um aproveitamento da matéria-prima de 95% além de ser um processo que não polui e que não requer grande energia na fabricação, o que reduz bastante o custo total de produção. Além dessas vantagens, com a metalurgia do pó é possível a fabricação de grandes lotes de peças com formas complexas, apresentam ótimas tolerâncias dimensionais e um bom acabamento superficial (GERMAN, 1998; IERVOLINO, 2009).

Baseado nisso, o objetivo principal do trabalho se dá na caracterização da corrosão do aço inoxidável austenítico AISI 316L, fabricado pelo processo de metalurgia do pó em diferentes temperaturas, submetido a solução de água do mar artificial; através de análises de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Curvas de Polarização Potenciodinâmica (CPP).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Fazer uma análise do comportamento corrosivo do aço inoxidável AISI 316L, sinterizado à 900°C, 1000°C e 1100°C, submetido a solução de água do mar artificial.

2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Com o intuito de atingir o objetivo geral do trabalho foram traçados alguns objetivos específicos:

- Fabricar os corpos de prova, compactados a uma pressão de 700MPa e sinterizados a temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C;
- Analisar por Microscopia Óptica, as microestruturas das amostras;
- Avaliar a resistência a corrosão das amostras de aço AISI 316L sinterizadas, por meio de ensaios de Impedância Eletroquímica e Polarização Potenciodinâmica, imersos em uma solução de água do mar artificial.
- Fazer um comparativo da resistência a corrosão das amostras sinterizadas com resultados de uma amostra fabricada por fundição do mesmo material.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 METALURGIA DO PÓ

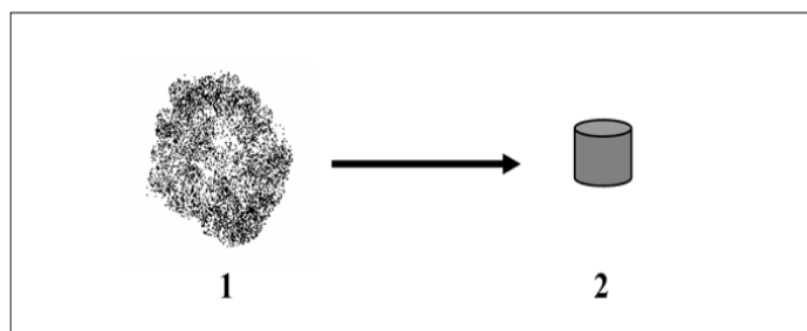
A metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, não metálicas e cerâmicas, que vem se expandindo cada vez mais. E que se difere dos demais processos convencionais pela inexistência de fase líquida ou existência apenas parcial da fase líquida no decorrer do processamento (GHADIRI *et al.*, 1991).

Segundo Lourenço (2014) esse processo teve início por volta de 1920, devido a necessidade de se trabalhar com metais de alto ponto de fusão como tungstênio ($T_f = 3400\text{ }^{\circ}\text{C}$) e molibdênio ($T_f = 2620\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uma vez que não existiam equipamentos de fundição para suportar temperaturas tão altas.

Esse processo de fabricação representa um âmbito da metalurgia que abrange a produção de partes e peças a partir de pós, podendo ocorrer por meio da compactação e sinterização. Consiste na prensagem do pó metálico no formato pretendido, acompanhado por aquecimento à elevada temperatura, abaixo do seu ponto de fusão (LUCIO, 2018).

Na Figura 1 é possível visualizar o desenvolvimento de uma quantidade de pó para sua equivalente quantidade densificada.

Figura 1 – O desenvolvimento de uma quantidade de pó para sua equivalente quantidade densificada.



Fonte: (DELFORGE *et al.*, 2007).

De acordo com a literatura de Park (2015), diversos fatores influenciam a resistência mecânica de peças formadas através da metalurgia do pó, dando ênfase as condições de processamentos, como: temperatura, tempo, maneira empregada na obtenção do pó, a pressão aplicada na produção dos compactos a verde e a atmosfera de sinterização.

Como em todo processo de fabricação, a Metalurgia do pó apresenta suas vantagens e desvantagens. Logo a seguir, na Tabela 1, foram listadas algumas destas.

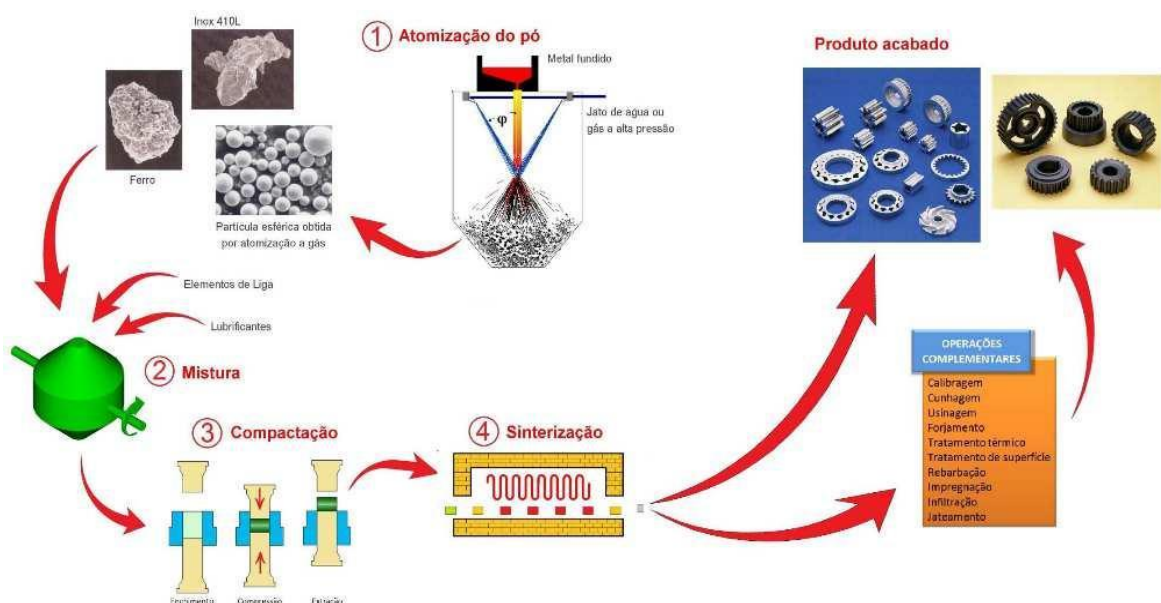
Tabela 1 - Vantagens e desvantagens presentes no processo de fabricação de Metalurgia do pó

VANTAGENS	Confecção de peças com geometria complexas; Melhor acabamento superficial; Menor desperdício de matéria prima; Produção de ligas com alto ponto de fusão.
DESVANTAGENS	Como o processo exige a compactação de pós, ainda não é possível criar peças de grande porte; Alto custo para produção de baixa escala.

Fonte: Autoria própria.

Existem dois métodos básicos nos quais ocorrem a metalurgia do pó, são eles: convencional e moldagem de pós metálicos por injeção (SOUZA, 2009). Conforme Schwanke (2000), o que difere um método do outro é a magnitude de pressão na etapa de compactação, na convencional é menor se comparada a moldagem de pós metálicos por injeção. O trabalho em questão centralizou-se e utilizou a metalurgia do pó convencional, e suas respectivas etapas são ilustradas na Figura 2.

Figura 2 – Etapas do processo de metalurgia do pó.



Fonte: (UNIEMP, 2014).

Pode ser observado na Figura 2 as etapas presentes no processo de fabricação de Metalurgia do pó que são as seguintes:

- Atomização do pó, obtenção dos pós por processos específicos;

- Mistura dos pós com a finalidade de garantir homogeneidade a peça;
- Compactação, ou seja, compressão da mistura e em seguida a extração;
- Sinterização da peça;
- Operações complementares, dependendo do caso pode passa por uma calibragem (melhorar as tolerâncias) e tratamento térmicos (MARTINS, 2010).

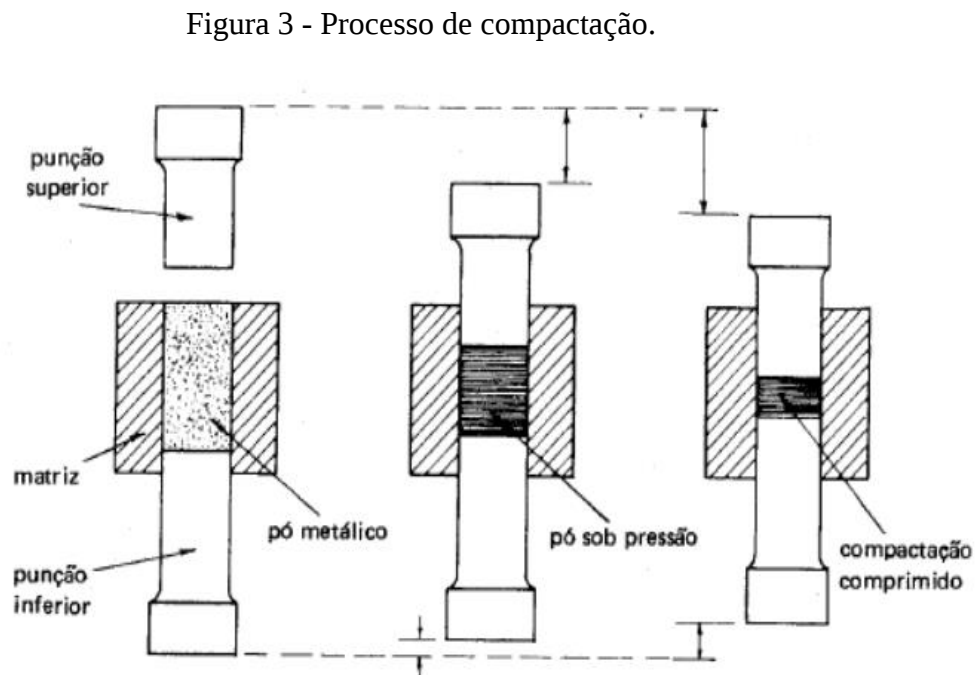
Posteriormente veremos de forma detalhada a parte de compactação e sinterização da peça.

3.1.1 Compactação

Esta fase é primordial para a próxima etapa, a sinterização, visto que irá determinar a qualidade e homogeneidade estrutural do produto acabado. A compactação, baseia-se em colocar a mistura dos pós em uma matriz, frequentemente de aço enrijecido, com a forma da peça a ser produzida, submetendo a uma alta pressão de compressão (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Conforme Oliveira (2008), essa etapa de compactação cria um rearranjo e deformações das partículas, formando assim ligações intergranulares.

A Figura 3 exemplifica a atividade de compactação.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986).

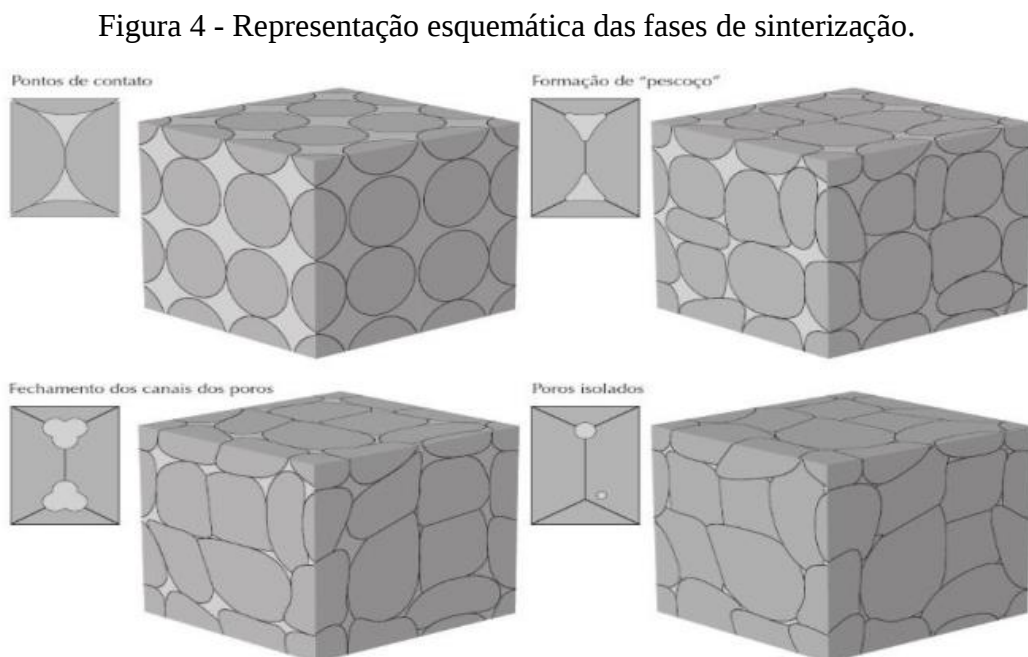
Levando em consideração que se a peça apresentar geometrias de modo que os punções não consigam efetuar devidamente a sua compressão de forma uniforme, ela deve ser realizada com o auxílio de punções de dupla ação, a fim de que todo o volume possível do material venha ser projetado, sem que haja menor densidade nos pontos de menor compressão, permitindo que todo o volume seja correspondido pelos grãos (CHIAVERINI, 1986).

3.1.2 Sinterização

Baseado na literatura de German (1997), a totalidade estrutural de uma peça alcançada por metalurgia do pó é proveniente da sinterização, no qual por aquecimento em temperaturas abaixo do ponto de fusão as junções das partículas são feitas de forma coerente, em uma massa sólida. Poros são eliminados ao passo que as partículas se juntam durante a sinterização a alta temperatura, esta temperatura frequentemente equivale a $2/3$ da temperatura de fusão do material.

A resistência mecânica é adquirida na sinterização, pela difusão atômica. As partículas, próximas umas das outras, e submetidas a alta temperatura do processo, proporcionam uma ligação metalúrgica entre si. (RAJU; YOON, 2016).

Uma representação esquemática das fases de sinterização pode ser visualizada na Figura 4.



Fonte: (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Levando em consideração as fases (estados da matéria) envolvidas, sobressaem dois tipos de sinterização: em fase líquida e em fase sólida.

De acordo com Oliveira (2008), a sinterização em fase sólida acontece em uma temperatura na qual nenhum dos elementos do sistema consegue alcançar seu ponto de fusão. Esta é executada com o transporte de material (difusão atômica, fluxo viscoso, transporte de vapor, dentre outros).

Conforme Gomes (1995), no segundo caso, se produz uma fase líquida responsável por dissolver um percentual de partículas do compacto. Surgindo assim um caminho de difusão semelhante ao contorno de grão na sinterização sólida, acarretando um ligeiro adensamento inicial e logo após ocorre solução de partículas sólidas no líquido e precipitação na parte do pescoço.

3.2 AÇO INOXIDÁVEL

Baseado na literatura do Callister (2007), os aços inoxidáveis são principalmente ligas de ferro-cromo ou ferro-cromo-níquel, formadas por teores de cromo superior a 11% em porcentagem de peso.

Em decorrência da presença do cromo na composição dos aços inoxidáveis, esses materiais apresentam uma elevada resistência a corrosão, visto que o cromo quando entra em contato com o oxigênio cria uma película protetora na superfície do aço, designada de camada passiva, que apresenta uma alta aderência, estabilidade e impermeabilidade, promovendo assim a proteção aos ataques corrosivos (DAVIS,2000).

Segundo Carbó (2008) e Davis (1994), esses aços são classificados, baseado com a *American Iron and Steel Institute* (AISI), em três grandes grupos: a série 400, a série 300 e a série 200. A série 400, faz alusão aos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos que apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), são magnéticos e alguns endurecíveis por tratamento térmico. As séries 300 e 200 constituem os aços inoxidáveis austeníticos, esses materiais apresentam estrutura cúbica de face centrada (CFC), são paramagnéticos e não endurecíveis por tratamento térmico.

Devido a fase predominante na microestrutura dos aços inoxidáveis, estes dividem-se em grandes classes, as quais são denominadas de: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex, superduplex e endurecidos por precipitação. Sendo que cada classe dessa apresenta suas particularidades específicas, todavia, de forma geral, possui algumas características em

comum, como boa ductibilidade, boa resistência a altas e baixas temperaturas e bom aspecto superficial (CAMPOS, 2009).

Dentre os tipos de classes citados, os dos aços inoxidáveis austeníticos, que faz parte do grupo das ligas de Ferro-Cromo-Níquel, possui o maior número de ligas e de utilização, passando a ser assim os mais conhecidos (LABIAPARI, 2015; ÖZEL *et al.*, 2016).

Como a finalidade desta pesquisa está centrada para o aço inoxidável de matriz austenítica, apenas este será tratado de forma detalhada.

3.2.1 Aço inoxidável austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos se destacam, quando comparado as demais classes, por apresentarem um bom comportamento relacionado a resistência a corrosão. Na sua composição, a quantidade de cromo é de 16 -18% em peso e a de níquel 12 -15% em peso, o que garante ao aço inox respectivamente, o aumento da resistência a corrosão e a estabilidade da fase austenítica (ORÉFICE *et al.*, 2006).

Dentre as classes de aços inoxidáveis, os austeníticos são os que formam uma família maior com relação a quantidade de ligas e aplicações. Algumas das características desses aços são: uma composição resumida em Fe-Cr-Ni com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), na temperatura ambiente; possuem excelentes condições de estampabilidade e soldabilidade; não podem ser endurecidos por tratamentos térmicos e apresentam baixa resistência a corrosão sob tensão (ANTUNES, 2010).

Segundo Sedriks (1996), os tipos de aços inoxidáveis austeníticos 302 e 304 são mais amplamente utilizados, uma vez que podem ser aplicados em elevadas temperaturas assim como à temperatura ambiente. O tipo 316 apresenta a mesma base que o 304, com aproximadamente 2,5 % Mo, e possui uma maior resistência à corrosão por pite.

A Figura 5 representa de forma detalhada a composição química e as principais aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316.

Figura 5 - Composições químicas e principais aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316.

AISI	Cr	Ni	C(máx)	Mn(máx)	Mo	Si(máx)	Aplicações Típicas
304	18-20	8-10,5	0,08	2,0	0,03	1,0	Tanques, equipamentos para refino de óleo, equipamentos para processamento de alimentos e produtos químicos, vasos criogênicos.
316	16-18	10-14	0,08	2,0	2,0-3,0	1,0	Maior resistência a corrosão que a liga 304 e elevada resistência à fluência. Utilizado como solução em casos onde o 304 sofre corrosão por pite.

Fonte: (PADILHA; GUEDES, 1994).

Como o objetivo deste trabalho é centrado no aço inox 316L, esse será tratado de forma detalhada.

3.2.2 Aço inoxidável 316L

O aço inoxidável 316L se difere do aço inoxidável austenítico 316 devido a quantidade do elemento carbono presente na composição química do aço; para o 316, por exemplo, a quantidade máxima é de 0,08% em massa. O aumento no teor de C ajuda na ocorrência de sensitização do material, quando submetidos a temperatura de 420°C e 850°C. E esse fenômeno implica na formação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6), que ocasiona nas regiões adjacentes o empobrecimento do Cr deixando suscetíveis a corrosão intergranular, devido a precipitação nos contornos do grão da austenita. No 316L o teor de carbono diminui reduzindo assim os efeitos provocados no 316 (PADILHA; GUEDES, 1994; SOUZA, 1989; CARBÓ, 2008).

Na Tabela 2, é possível visualizar a composição química do aço inoxidável austenítico 316L.

Tabela 2 - Composição química do aço inoxidável austenítico 316L.

Elementos (%)		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
316L	Min.	0	0	0	16,00	10,00	2,00
	Máx.	0,03	1,00	2,00	18,00	14,00	3,00

Fonte: Autoria própria.

Dentre as primordiais características deste aço, serão elencadas algumas: elevada taxa de encruamento, elevada resistência à corrosão, grande zona plástica, excelente ductilidade e tenacidade e boas propriedades criogênicas (GENNARI; MACHADO, 1999; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Em decorrência do alto grau de encruamento do 316L e baixa condutividade térmica, este é considerado um material de difícil usinagem (MARQUES *et al.*, 2014).

Na Figura 6, observa-se algumas das propriedades dos aços inoxidáveis austenítico 316L.

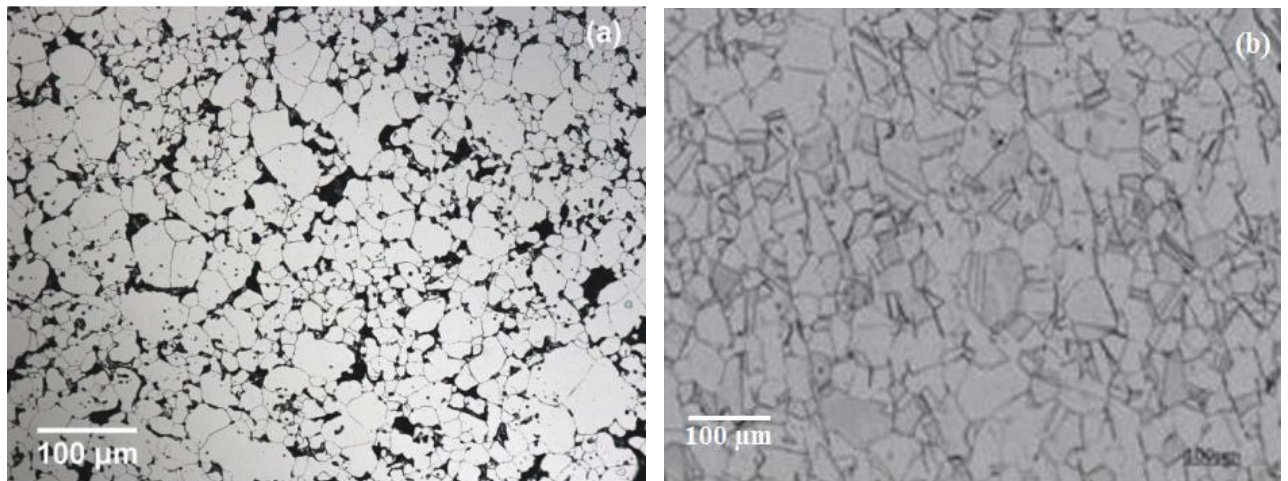
Figura 6 - Propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos 316L

Propriedade	Valor Aproximado
Estrutura cristalina	Austenítica (CFC)
Densidade Fundido	7,9 – 8,0 g/cm ³
Densificação sinterizado a (1000°C e 1100°C)	68,7% – 84,5%
Ponto de Fusão	1500°C
Dureza Vickers (recozido)	155 HV
Microdureza Vickers (recozido)	215 – 225 HV
Módulo de Elasticidade	190 – 200 GPa

Fonte: (ZIETALA *et al.*, 2016)

É necessário ressaltar que o aço inoxidável 316L, não tem nenhuma fase secundária, além da fase austenítica (LUCIO, 2018). Na Figura 7, é possível analisar a microestrutura do aço inoxidável 316L tanto no estado sinterizado como fabricado por fundição em uma escala de 100 µm.

Figura 7 - Microestrutura do aço inoxidável 316L (a) na forma sinterizado e (b) obtido através de fundição.



Fonte: (PERUZZO, 2018; LIMA *et al.*, 2010).

3.3 CORROSÃO

Entende-se que a corrosão é um processo de deterioração de um material, frequentemente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente relacionado ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2007).

Ainda baseado na literatura de Gentil (2007), a deterioração ocasionada pela interação físico-química do material e o seu meio, irá apresentar alterações indesejáveis como o desgaste, sendo assim considerada inadequada para o uso.

Segundo Rocha (2013), a corrosão pode acontecer de diversas formatos e sua classificação ocorre através da aparência do metal corroído. Sendo que as formas mais comuns de corrosão que afetam o aço carbono são: a corrosão galvânica, a corrosão uniforme, a corrosão por pites e a corrosão por frestas.

De uma forma mais ampla, o material pode ser submetido a diferentes tipos de corrosão, generalizada e localizada, ocasionado por mecanismos diversos (PEREZ, 2004).

Na Figura 8 é possível visualizar essa divisão de corrosão, em generaliza e localizada.

Figura 8 - Corrosão generalizada e localizada.

Corrosão Generalizada	Corrosão Localizada
Corrosão Atmosférica	Corrosão por Fresta
Corrosão em Altas temperaturas	Corrosão Filiforme
Corrosão Biológica	Corrosão Intergranular
Corrosão seletiva	Corrosão por Pite

Fonte: (PEREZ, 2004; ROBERGE, 2000).

A principal diferença da corrosão generalizada para a corrosão localizada é que a primeira surge em toda a superfície exposta do metal, já a segunda se manifesta em regiões específicas do material exposto. Sendo esta última considerada mais difícil de controlar que a corrosão generalizada, uma vez que é mais difícil de identificar (PEREZ, 2004).

3.4 MEIO SALINO

Com base na obra de Gentil (2007), os tipos e formas de corrosão podem ser apresentados pela forma de ataque como também pelas diferentes causas e mecanismos.

De acordo com o intuito do trabalho será levado em consideração para um estudo mais aprofundado o meio corrosivo, em especial o meio salino.

3.4.1 Corrosão do aço em meio salino

Os sais são compostos químicos provenientes de uma reação de neutralização, ou seja, reações que tem como reagentes um ácido e uma base e como produtos um sal e uma água. Estes compostos podem surgir também por reações de “metal mais ácido” ou “óxido ácido mais óxido básico”. Se fundidos ou dissolvidos em água, conduzem eletricidade, uma vez que se dissociam nos seus íons constituintes, começando a funcionar como eletrólitos (BROWN, 2012).

Em solução aquosa, os eletrólitos exercem o papel de íons. Sendo estes a menor porção de um elemento químico que conserva suas propriedades, e apresentam carga elétrica positiva e carga elétrica negativa. A carga elétrica positiva é denominada de cátion, como é o caso do sódio (Na^+) e o potássio (K^+); já a carga elétrica negativa é denominada de ânion, como é o caso do cloro (Cl^-) ou o bicarbonato (HCO_3^-) (SOUZA E ELIAS, 2006).

Baseado nas características dos sais, ao se comportarem como eletrólitos, irão receber os elétrons facilmente. Isso quer dizer que o processo corrosivo é largamente favorecido na presença de um sal no meio ao qual o metal esteja inserido, fazendo dos sais dissociados nas soluções salinas eletrólitos melhores do que a água pura, havendo assim o acelero do processo corrosivo (FRUTUOSO, 2017).

A prática padrão utilizada no preparo de soluções de natureza salina, meios salinos sintéticos, é com base na norma ASTM D1141.

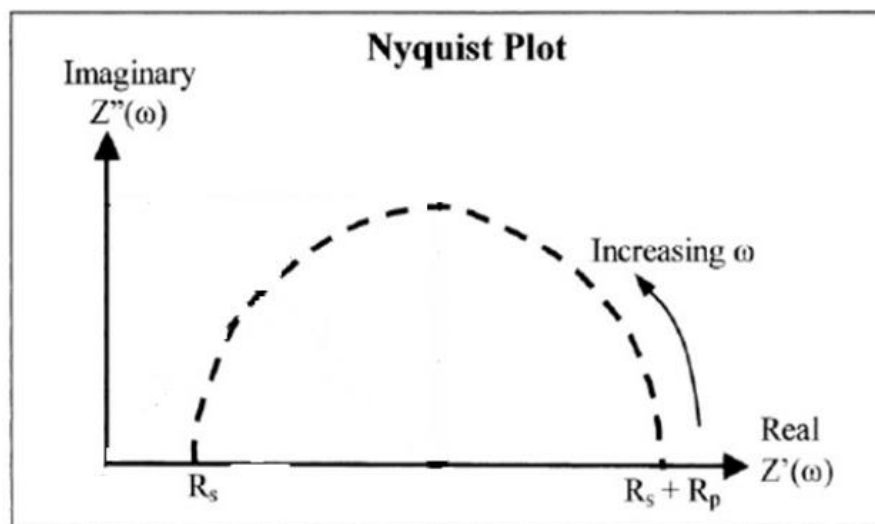
3.5 TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)

De acordo com a literatura de Gomes (2013), as informações do processo de corrosão podem ser provenientes pela técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Com a finalidade de se ter o conhecimento do processo num total, são aplicados potenciais nas faixas de frequência de aproximadamente 10^{-3} e 10^4 Hz. A superfície do eletrodo não é destruída, visto que a amplitude de onda de potencial é pequena.

A técnica em questão, possibilita uma compreensão de forma detalhada das características elétricas da interface eletrodo/solução, através da execução de uma pequena perturbação de tensão alternada no sistema eletroquímico e decorrente circulação da corrente pelo sistema, sendo assim a impedância calculada (CARVALHO *et al.*, 2006; MADDALA *et al.*, 2010).

A impedância pode ser representada em coordenadas cartesianas ou polares, apresentando um componente real (Z') e uma componente imaginária (Z''), e isso deve-se ao fato da mesma ser considerada um número complexo (MELO, 2009). Uma representação disso é o diagrama de Nyquist (Figura 9), que fornece os parâmetros da parte real Z' (resistência) e da parte imaginária Z'' (capacitância e indutância).

Figura 9 - Diagrama de Nyquist.

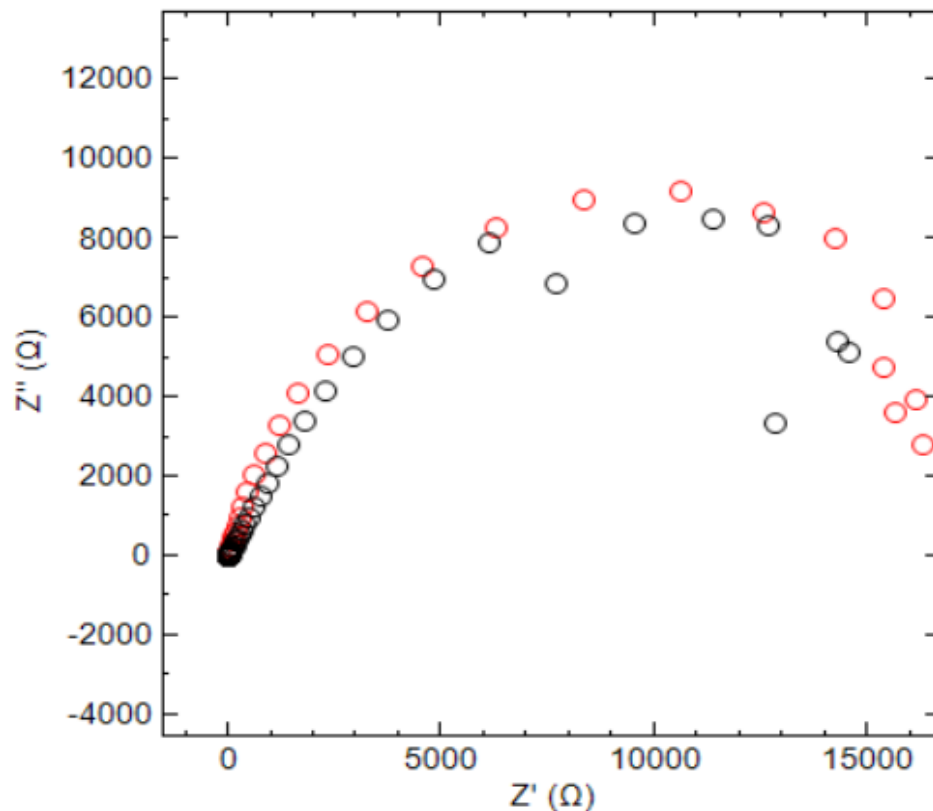


Fonte: (ESTEVES, 2013).

De acordo com Esteves (2013), quanto maior for o valor de R_p , menor será a corrosão do material, e maior resistência de um filme na interface garantindo assim a este, um melhor efeito protetor.

Impedâncias de amostras de aço inoxidável AISI 304 e 316L na forma de diagrama de Nyquist podem ser vistas na Figura 10.

Figura 10 - Curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica dos aços AISI 316L (cor vermelha) e 304 (cor preta).



Fonte: (FRUTUOSO, 2017).

3.6 CURVA DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA (CPP)

Com a finalidade de averiguar a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis vem sendo normalmente empregado ensaios eletroquímicos, o qual apresenta um curto tempo de experimentação (GOMES, 2016).

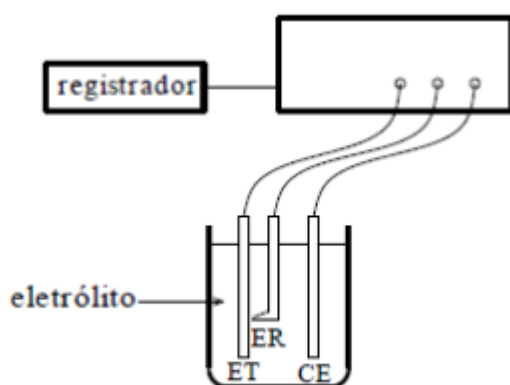
Ainda segundo GOMES (2016), estas técnicas são aplicadas com o intuito de ajudar o meio produtivo na obtenção ligeira de taxas de corrosão dos metais em meios específicos e para analisar a eficiência de inibidores de corrosão.

Instrumento que assegura a medição do comportamento eletroquímico de um metal, é o potenciostato (GENTIL, 2007). Este equipamento é a fonte externa empregada para serventia de tensão, além de possibilitar a medição da corrente de polarização e ainda o registro em função do potencial, impõe ao material o potencial almejado com relação ao

eletrodo de referência. Vale ressaltar que a tensão usada pelo potenciostato a um corpo de prova metálico mergulhado em um eletrolítico, pode ou não ser constante. No ensaio é fundamental a utilização de três eletrodos submersos em um eletrólito na montagem de uma célula eletroquímica de corrosão (GOMES, 2016; WOLYNEC, 2003).

Se faz presente na Figura 11 a visualização da montagem dos elementos de um potenciostato para verificação das curvas de polarização. Contendo o eletrodo de trabalho (ET), o eletrodo de referência (ER) e o contra eletrodo (CE) imerso em um eletrólito, e com o potenciostato que tem a finalidade de impor o potencial desejado ao eletrodo de trabalho.

Figura 11 – Representação esquemática de potenciostato para verificação das curvas de polarização.

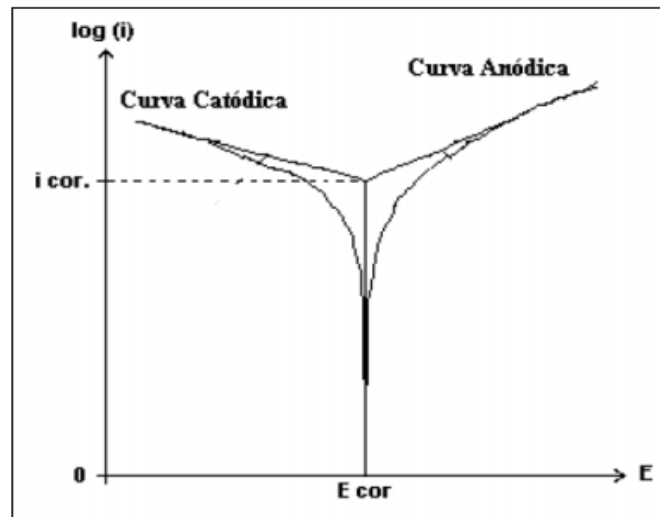


Fonte: (WOLYNEC, 2003).

O comportamento eletroquímico do material pode ser analisado com base na verificação de curvas de polarização que avaliam seu comportamento em meio aquoso, e o potenciostato permite gerar esta curva, tendo assim os valores do potencial aplicado (E) em função da densidade de corrente (J) registrados (SEDRIKS, 1996).

Na Figura 12, observa-se valores das correntes de corrosão, potencial de corrosão e resistência de polarização por meio do esquema da curva de polarização. Esta curva de polarização presente no esquema assegura a análise da resistência a corrosão através das inclinações anódicas e catódicas de Tafel.

Figura 12 - Esquema do diagrama de Tafel, para a determinação da corrente de corrosão e potencial de corrosão, com as inclinações anódicas e catódicas.



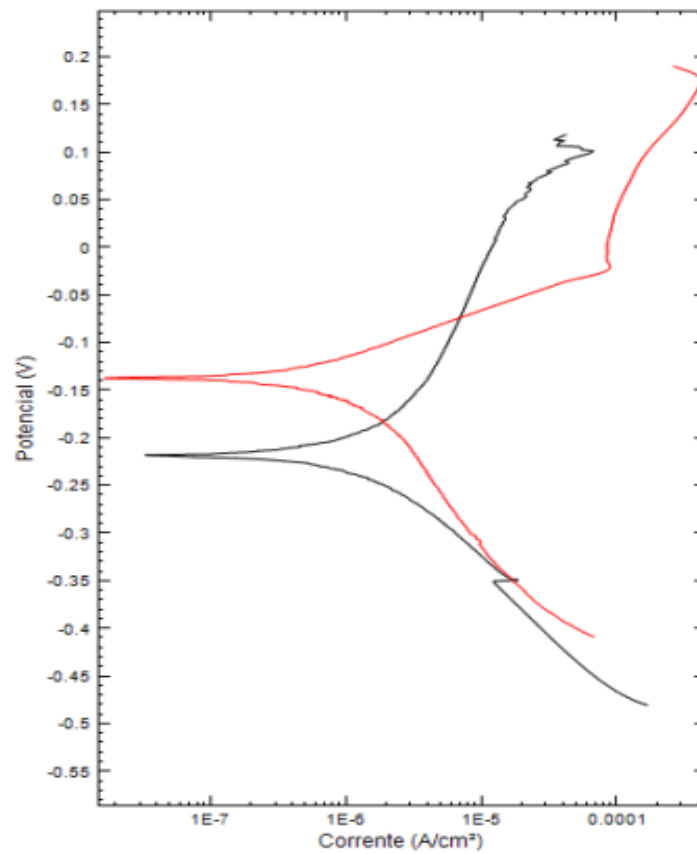
Fonte: (WOLYNEC, 2003).

Alguns escritores apontam o potencial de corrosão (E_{cor}) como aquele em que as reações catódicas e anódicas se equivalem, e o valor da densidade de corrente (J) é aproximadamente zero (SEDRIKS, 1996; CHARLES, 2009).

Vale salientar que um aumento do potencial aplicado implica em um aumento da densidade de corrente até determinado potencial no qual a direção da curva se inverte (CHARLES, 2009).

Na Figura 13, pode-se observar curvas de polarização potenciodinâmicas de amostras de aços inoxidáveis AISI 316L (na cor vermelha) e 304 (na cor preta) obtidos pelo processo de fundição.

Figura 13 - Curvas de polarização potenciodinâmicas dos aços 316L (cor vermelha) e 304 (cor preta).



Fonte: (FRUTUOSO, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão mostrados os procedimentos de confecção e preparação das amostras, bem como os métodos e técnicas dos ensaios realizados. Vale salientar que todas as amostras foram feitas com duplicatas e repetidos todos os procedimentos, afim de se ter resultados com uma maior confiabilidade.

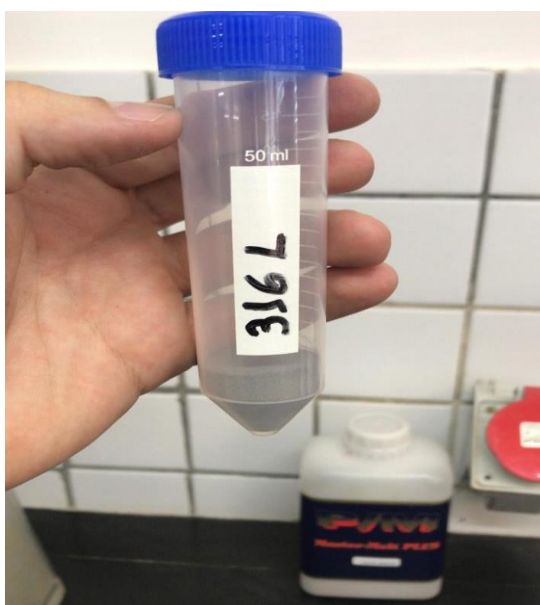
A realização do ensaio de Difração de Raios X (DRX) não foi possível por indisponibilidade de máquinas.

4.1 MATERIAL

4.1.1 Aço inoxidável austenítico AISI 316L

O material utilizado nesta pesquisa trata-se do Aço inoxidável austenítico AISI 316L na forma de pó. O mesmo foi obtido pelo processo de atomização a gás inerte realizado pela Pós Metálicos Especiais LTDA e cedido pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). É possível observar na Figura 14 o pó como recebido para a realização do trabalho.

Figura 14 - Pó do aço inoxidável AISI 316L cedido



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados do fabricante (Pós Metálicos Especiais LTDA), o pó do aço inox 316L possui a composição química ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações do aço inox 316L fornecidas pelo fabricante

Composição Química (% massa)	Cr – 17,0 Ni – 13,6 Si – 2,0 Mo – 3,37 Fe – balanço
Densidade Aparente (g/cm³)	2,7
Granulometria (micron)	Cr – 250 Ni – 420 Si – 125 Mo – 44 Fe – 105

Fonte: Autoria Própria

Para se confirmar os dados da composição química do material fornecido pelo fabricante, foi realizado um ensaio de Fluorescência de Raio-X utilizando um espectrômetro de emissão ótica da marca Thermo Cientific modelo Niton XL2 na empresa J Patrício Metais localizada em Mossoró-RN.

4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

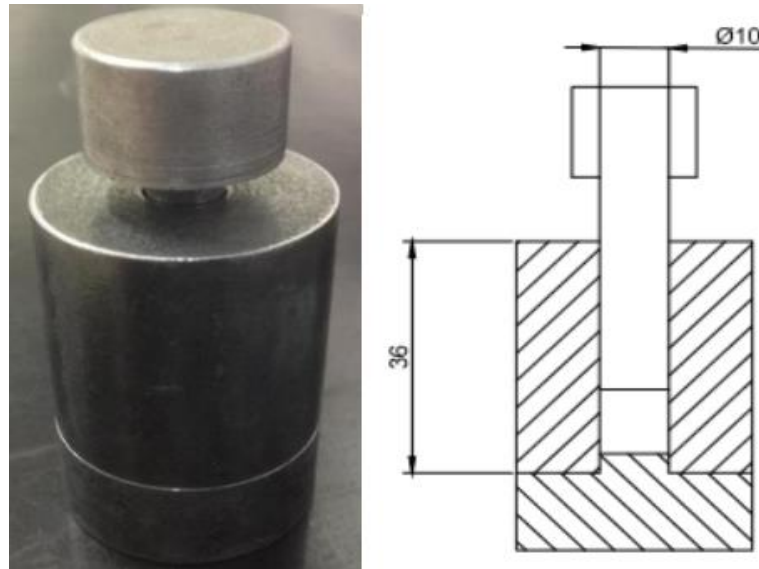
4.2.1 Pesagem do pó

Inicialmente foi feita a pesagem do pó utilizando uma balança de precisão da marca Bioscale modelo FA2204. O pó foi pesado e separado em 3 amostras (com duplicata) contendo 2g de massa cada uma para ser realizada a etapa de compactação.

4.2.2 Compactação

Após a pesagem do pó e separação das amostras, as mesmas foram encaminhadas para a etapa de compactação. Para isso, utilizou-se uma matriz cilíndrica de Aço SAE 4340, com dimensões mostradas na Figura 15, e uma prensa manual hidráulica de bancada da marca Macron com capacidade de até 10 toneladas.

Figura 15 - Matriz cilíndrica utilizada na compactação à esquerda e sua vista em corte com dimensões em milímetros à direita.



Fonte: Autoria própria.

Adotou-se uma pressão de compactação fixa de 700MPa para as 3 amostras, equivalente à aproximadamente 5,6 toneladas na escala da prensa em relação a área do compactado. Foi utilizado um lubrificante feito com uma solução de estearato de zinco e acetona com a finalidade de facilitar a remoção do compactado verde da matriz. Na Figura 16, é possível visualizar um exemplo de amostra após a compactação.

Figura 16 -Exemplo de uma amostra na forma de compactado verde



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Sinterização

Logo após a compactação, as amostras foram levadas a um forno tipo MUFLA da marca GP, para realização da sinterização. O processo foi realizado nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C durante 2 horas, resultando em uma amostra para cada temperatura. O resfriamento de todas as amostras foi feito ao ar parado.

Na Tabela 4 são expostas as condições de fabricação das três amostras de aço inoxidável 316L após o processo de sinterização.

Tabela 4 - Valores de Temperatura e Pressão das amostras fabricadas.

Amostra	Temperatura de sinterização	Pressão de Compactação
A1	900°C	700MPa
A2	1000°C	
A3	1100°C	

Fonte: Autoria Própria.

4.2.4 Preparação das amostras para ensaios eletroquímicos

Posterior ao processo de sinterização, as três amostras foram preparadas para formarem os eletrodos de trabalho. Os eletrodos foram formados a partir das amostras conectadas a fios condutores rígidos de cobre, por ser um ótimo condutor de corrente elétrica, com diâmetro de aproximadamente 1,3mm. Para o acoplamento dos fios às amostras, foram feitas fendas rasas, utilizando um micro retífica portátil da marca Dremel modelo 4000, como pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 -Exemplo de amostra com fenda.

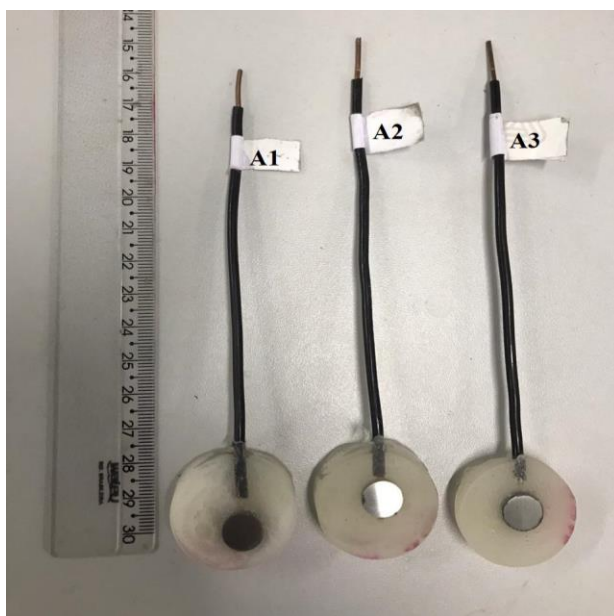


Fonte: Autoria própria.

Após o acoplamento dos fios, os mesmos foram fixados às amostras através de um ferro de solda para componentes eletrônicos da marca Instrutherm e modelo ES-910-220, tendo o estanho como metal de adição.

O isolamento das amostras e das extremidades dos fios conectados a elas, foi realizado através do processo de embutimento, utilizando uma resina acrílica e catalizador para aceleração da cura; deixando apenas as superfícies inferiores das amostras fora do isolamento, apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Amostras embutidas com fio condutor.



Fonte: Autoria própria.

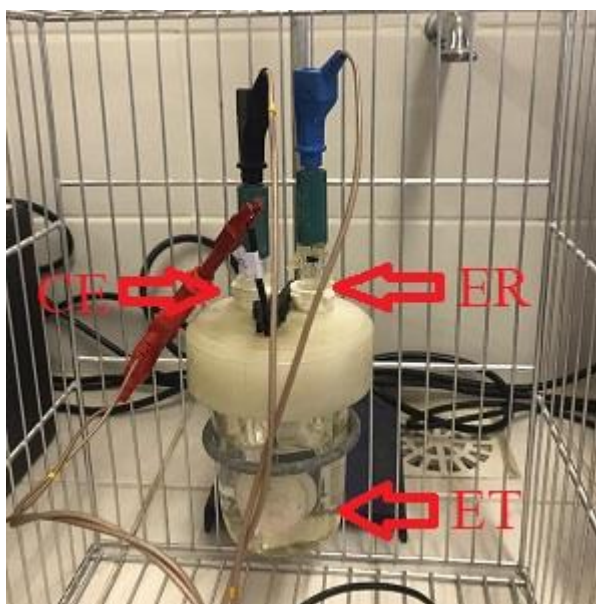
Após a realização do embutimento, as amostras foram lixadas manualmente utilizando lixas com as seguintes granulometrias: 180, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200, respectivamente, seguido de polimento manual utilizando uma pasta de alumina 0,3 μm , com o objetivo de melhorar e preparar as suas superfícies para os ensaios de Eletroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e de Curvas de Polarização Potenciodinâmicas (CPP).

4.2 ENSAIOS DE ELETROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA E DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Os ensaios deste tópico ocorreram no Laboratório de Química da UFERSA - Campus Central e foram feitos em um potenciostato/galvanostato da marca AUTOLAB e modelo PG

STATE 204, como também foi utilizado o software NOVA na versão 1.11 para a aquisição dos dados. Ambos os ensaios foram realizados com os eletrodos (de referência, contra eletrodo e eletrodo de trabalho) imersos em uma solução de água do mar artificial a temperatura ambiente como pode ser visualizado na Figura 19; sendo o eletrodo de referência (ER) constituído de Ag/AgCl, o contra eletrodo (CE) feito de platina e o eletrodo de trabalho (ET) as próprias amostras de Aço inox 316L.

Figura 19 - Eletrodos para análises eletroquímicas



Fonte: Autoria própria.

A solução de água do mar artificial fundamentou-se na norma ASTM D1141 que define o percentual de cada elemento que a constitui. Os elementos presentes são basicamente cloretos, que normalmente são encontrados na água do mar, diluídos em água destilada. A Tabela 5 possui esses cloretos e suas quantidades de acordo com a norma.

Tabela 5 - Elementos e suas respectivas quantidades na solução de água do mar artificial segundo a norma ASTM D1141.

Elementos	Quantidade (g/l)
NaCl	24,53
MgCl ₂	5,2
CaCl ₂	1,16
KCl	0,695

Fonte: Autoria própria.

O estudo por polarização linear potenciodinâmica foi realizado no intervalo de - 300 mV e 300 mV do potencial de circuito aberto (OCP). E o método de Tafel foi empregado para obter os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) e resistência a polarização (R_p).

4.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

Após a exposição das amostras ao meio corrosivo realizada nos ensaios eletroquímicos, houve novamente a necessidade de lixamento e polimento das superfícies destas para a realização da microscopia óptica. A mesma foi realizada em um microscópio óptico da marca Olympus e modelo GX-51, e as fotografias das microestruturas com o auxílio de uma câmera digital SC30 acoplada bem como do software AnalySIS GETIT, em aumento de 200x.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

A composição química do material, obtida através do ensaio de Fluorescência de Raio-X, pode ser observada na Tabela 6, como também as respectivas quantidades dos elementos em porcentagem de massa.

Tabela 6 - Composição química do aço 316L pelo ensaio de Fluorescência de Raio-X

Elemento	Quantidade (% massa)
Fe	65,97
Cr	16,87
Ni	14,61
Mo	2,03

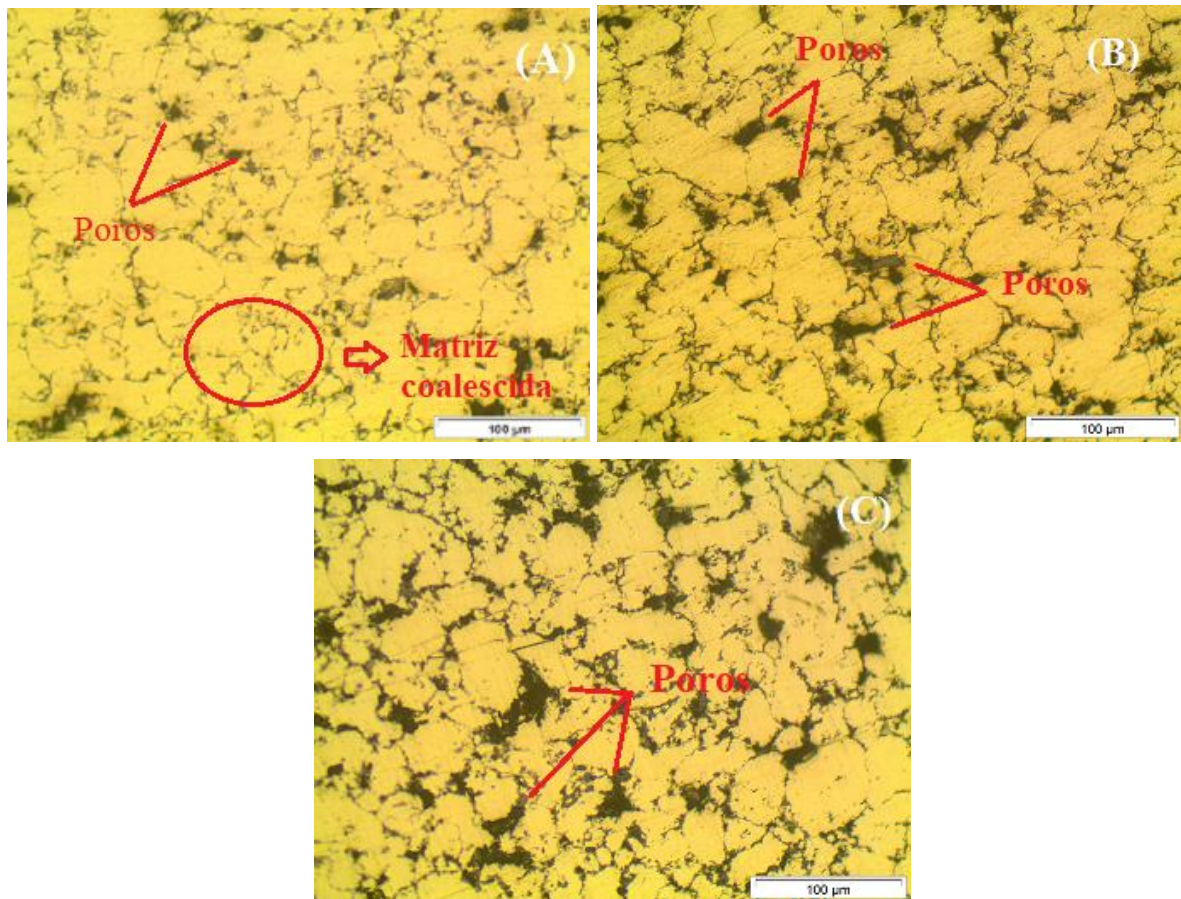
Fonte: Autoria própria.

Através dos elementos e suas respectivas quantidades na composição, o material trata-se de um aço inoxidável 316L, confirmando o que o fabricante já havia informado.

5.2 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ÓPTICA

As fotografias microestruturais das amostras do aço inoxidável 316L, nas diferentes temperaturas de sinterização, foram todas tiradas em um aumento de 200x e é possível visualizá-las na Figura 20.

Figura 20 - Micrografias das amostras de aço 316L, sinterizado, com aumento em 200x: (A) A1, (B) A2 e (C) A3.



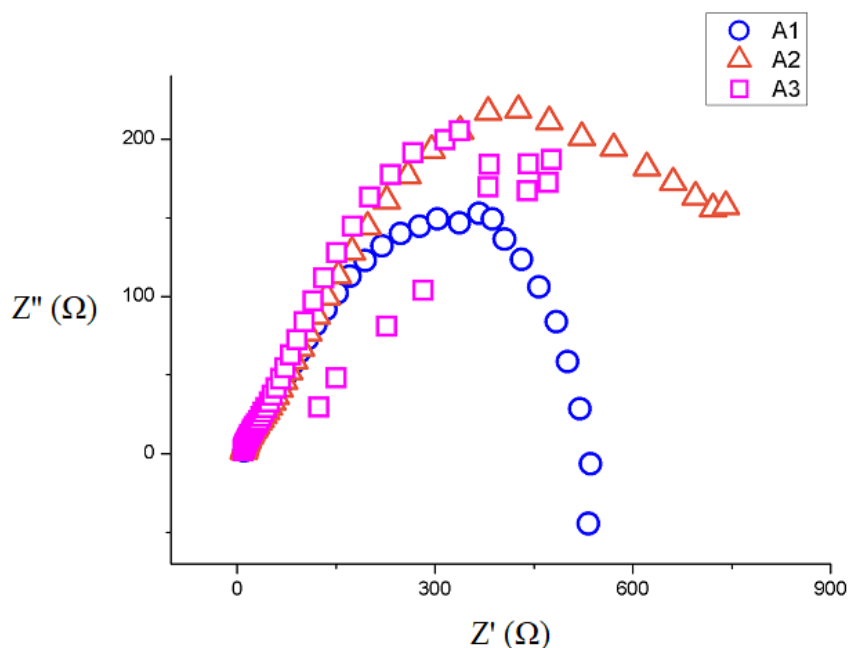
Fonte: Autoria própria.

As fotografias das amostras, para este aumento, apresentam aparentemente poucas diferenças, os grãos possuem formas e tamanhos semelhantes, e são menos porosos nas regiões que houve uma melhor coalescência das partículas. Pela análise das micrografias, o aumento da porosidade nas amostras se dá com o aumento da temperatura. Possivelmente, este aumento ocorre devido a aplicação de elevadas temperaturas aliado ao não controle da atmosfera no momento da sinterização, degradando assim sua microestrutura.

5.3 ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)

Neste tópico serão analisadas as curvas de espectroscopia de impedância das amostras de aço inoxidável 316L sinterizadas, assim como as suas respectivas resistências a polarização (R_p). Na Figura 21 é possível visualizar as curvas de impedância das amostras A1, A2 e A3 representadas com cores e formatos diferentes de acordo com a orientação da legenda.

Figura 21 - Curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica das amostras A1, A2 e A3.



Fonte: Autoria própria.

A impedância da amostra A2 obteve um valor maior que as demais e, através disso, apresentou uma resistência a polarização também maior, equivalente a $R_p = 894,76 \, \Omega$. Uma vez que, quanto maior for o valor do R_p , menor será a corrosão do material (ESTEVES, 2013). A Tabela 7 possui os valores de R_p das amostras analisadas.

Tabela 7 - Valores de R_p das amostras na análise de Impedância.

Amostras	$R_p (\Omega)$
A1	528,84
A2	894,76
A3	464,46

Fonte: Autoria própria.

Por conseguinte, a amostra A3 obteve menor resistência a polarização e, consequentemente, menor resistência a corrosão. Como esta possui uma densidade de poros maior do que as demais amostras, os grãos estão menos coalescidos, o que possivelmente implica em uma menor resistência a corrosão.

Se comparadas com a curva de impedância de uma amostra de aço inoxidável 316L obtida por fundição (curva em vermelho na Figura 10), as curvas das amostras do trabalho em

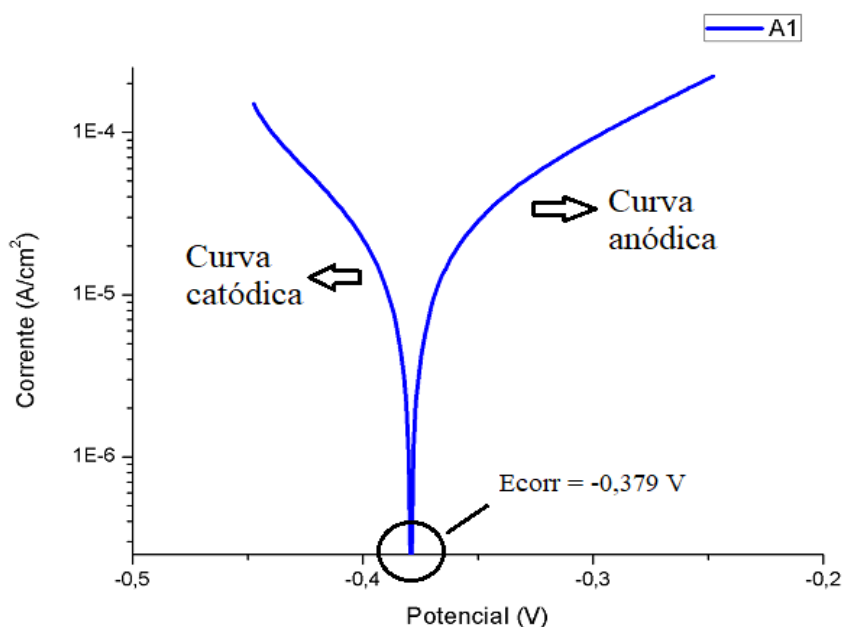
questão apresentam impedâncias, resistências a polarização e a corrosão bastante menores. Isso pode ser justificado porque o processo de fundição resulta em um material mais denso, praticamente livres de poros e demais características de materiais fabricados por metalurgia do pó.

5.4 CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICAS (CPP)

Nesta seção serão analisados e comparados os resultados obtidos dos ensaios de polarização das amostras A1, A2 e A3. Através das curvas de polarização catódicas e anódicas formadas na eletrólise, foi possível extrair dados do potencial de corrosão (E_{corr}) e a resistência à polarização (R_p) do material obtidos pelo método de extrapolação das tangentes de Tafel.

Na Figura 22 observa-se o comportamento da curva de polarização da amostra A1 nas suas regiões catódicas e anódicas.

Figura 22 - Curva de polarização da amostra A1.



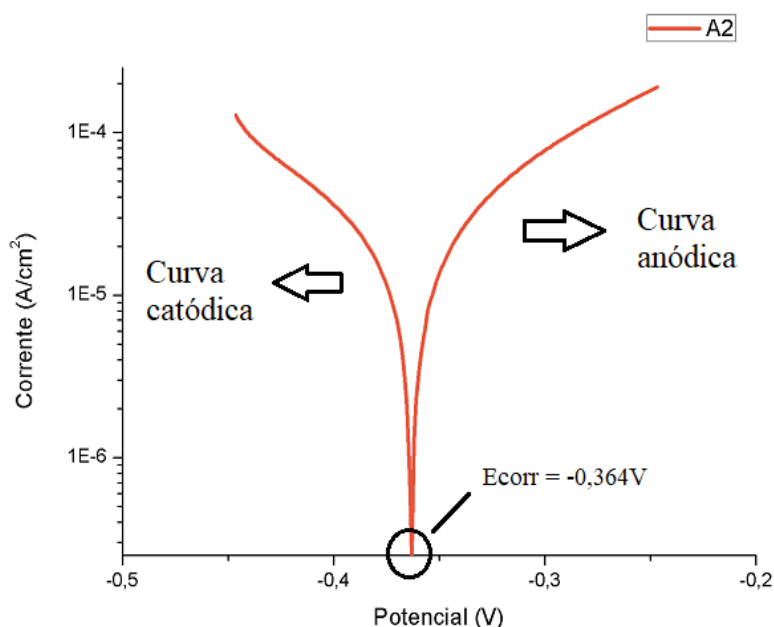
Fonte: Autoria própria.

A curva observada na Figura 22 é formada pela variação da densidade de corrente (J) versus o potencial (E). De acordo com os dados gerados no software NOVA versão 1.11, a região catódica teve início por volta de uma densidade de 0,00015 A/cm² e um potencial de -

0,4474 V. Com a queda da densidade de corrente, até um valor de aproximadamente 0, resulta em um potencial de corrosão (E_{corr}) de -0,379 V. Através do método de extrapolação das tangentes de Tafel traçadas nas curvas catódica e anódica, foi possível obter um valor de uma R_p de 1534,3 Ω .

Na Figura 23 nota-se o comportamento da curva de polarização da amostra A2 nas suas regiões catódicas e anódicas.

Figura 23 - Curva de polarização da amostra A2.

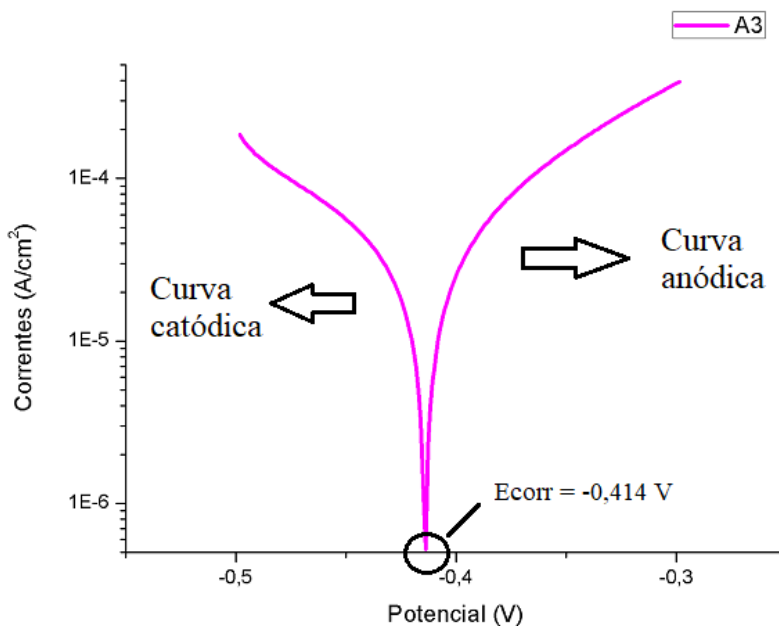


Fonte: Autoria própria.

A curva representada na Figura 23 é formada pela variação da densidade de corrente (J) versus o potencial (E). Conforme os dados gerados, a região catódica iniciou-se por volta de uma densidade de 0,000128 A/cm² e um potencial de -0,4463 V. Com a queda da densidade de corrente, até um valor de aproximadamente 0, resulta em um potencial de corrosão (E_{corr}) de -0,364 V. Por meio do método de extrapolação das tangentes de Tafel traçadas nas curvas catódica e anódica, foi possível obter um valor de uma R_p de 1013,1 Ω .

Na Figura 24 verifica-se o comportamento da curva de polarização da amostra A3 nas suas regiões catódicas e anódicas.

Figura 24 - Curva de polarização da amostra A3

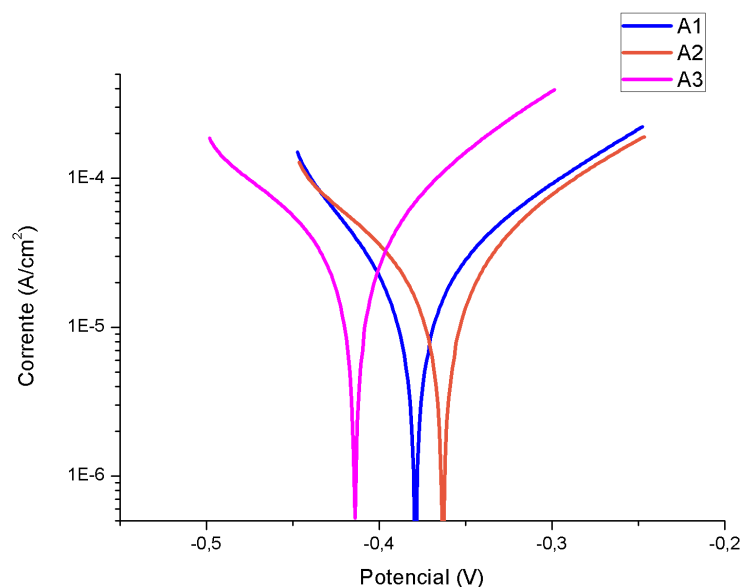


Fonte: Autoria própria.

A curva observada na Figura 24 é composta pela variação da densidade de corrente (J) versus o potencial (E). Segundo os dados gerados, a região catódica teve início por volta de uma densidade de $0,0002 \text{ A/cm}^2$ e um potencial de $-0,4982 \text{ V}$. Com a queda da densidade de corrente, até um valor de aproximadamente 0, resulta em um potencial de corrosão (E_{corr}) de $-0,414 \text{ V}$. Por meio do método de extrapolação das tangentes de Tafel traçadas nas curvas catódica e anódica, foi possível obter um valor de uma R_p de $612,6 \Omega$.

Para efeito comparativo, as curvas de polarização das amostras A1, A2 e A3 foram sobrepostas e representadas na Figura 25.

Figura 25 - Curvas de polarização sobrepostas das amostras A1, A2 e A3.



Fonte: Autoria própria.

Com a sobreposição das curvas da Figura 25, nota-se que a amostra A2 possui um potencial de corrosão, em módulo, menor do que as amostras A1 e A3, respectivamente. Porém, quanto a resistência a polarização, a amostra A1 foi a que obteve o maior valor, como pode ser melhor observado na Tabela 8, o que caracteriza uma maior resistência a corrosão. A amostra A3 obteve o maior potencial de corrosão, em módulo, e uma menor resistência a polarização, implicando em uma menor resistência a corrosão. Como observado na microscopia óptica, o aumento considerável de poros dessa amostra, ocorrido possivelmente por causa do efeito degradante da atmosfera (não controlada) em elevadas temperaturas, e como consequência, a diminuição da densidade do material, foram fatores determinantes para uma menor resistência a corrosão. Outro fator observado foi a não tendência à formação de uma região de passivação, que acontece quando a curva apresenta uma pequena variação de corrente para uma grande variação de potencial (MELO, 2009).

Tabela 8 - Valores de potencial de corrosão e de resistência a polarização das amostras.

Amostra	E_{corr} (mV)	R_p (Ω)
A1	-379	1534,3
A2	-364	1013,1
A3	-414	612,6

Fonte: Autoria própria.

Se comparadas com a curva de polarização de uma amostra de aço inoxidável 316L fabricado por fundição (em cor vermelha), como observada na Figura 13, as amostras do trabalho em questão apresentem um potencial de corrosão muito maior (em módulo), como também uma menor resistência a polarização, o que implica em uma menor resistência à corrosão no processo de metalurgia do pó para o aço 316L em relação aos fabricados por fundição.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a microscopia óptica, verificou-se que as amostras A1, A2 e A3 apresentaram microestruturas típicas de aços inoxidáveis AISI 316L fabricados por metalurgia do pó, como também visualizou-se de forma bem clara o aumento da porosidade de acordo com o aumento da temperatura de sinterização. A amostra A1, obtida com temperatura de 900°C, se mostrou com uma microestrutura de matriz mais coalescida e com menos poros do que as demais; enquanto a amostra A3, sinterizada a 1100°C, apresentou uma porosidade bem maior, possivelmente causada pelo efeito degradante da atmosfera, quando esta não é controlada.

Nas análises de eletroscopia de impedância eletroquímica e curvas de polarização potenciodinâmicas, observou-se que as amostras A1 e A2 apresentaram melhores resistências a polarização (R_p) e menores potenciais de corrosão (E_{corr}), em módulo, resultando em uma maior resistência a corrosão. A amostra A3 ofereceu, em ambas análises, uma menor resistência a polarização (R_p) como também maior potencial de corrosão, em módulo, possivelmente causados pelo grande número de poros, defeitos e matriz com menor coalescimento aparente. Então, de maneira conclusiva, a resistência a corrosão do aço inoxidável 316L nesse estudo foi afetada com a variação da temperatura de sinterização, sendo a amostra com maior temperatura a de menor valor.

Quando comparadas a uma amostra de aço 316L fabricada por fundição apresentaram valores de potenciais de corrosão (em módulo) bem maiores, como também resistência a polarização muito inferiores, o que também pode ser concluído que o processo de metalurgia do pó, por ter defeitos como alta porosidade, não oferece uma boa resistência a corrosão quando comparados com as resistências de amostras fabricadas pelo processo de fundição. Uma possível solução para reduzir essa diferença, seria a utilização de uma atmosfera inerte ou um controle da mesma, diminuindo o efeito degradante e consequentemente os defeitos e porosidades, aumentando a qualidade final do material produzido.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, P. D. **Influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em meios contendo cloreto de magnésio**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Materiais Para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- BROWN, L. S.; HOLME, T. A. **Química Geral Aplicada à Engenharia**. 1 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. John Wiley & Sons, 2007.
- CAMPOS, M.; **Investigação por Espectroscopia Mössbauer das fases formadas e sua influência da resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico 316L nitretado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil, 2009.
- CARBÓ, H. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Arcelor Mittal, 2008. [Online]. Disponível em: <<http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/12/inonx-apost-tec.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- CARVALHO, L. A. *et al.* **Espectroscopia de impedância eletroquímica aplicada ao estudo das reações heterogêneas em ânodos dimensionalmente estáveis**. *Quim. Nova*, v. 29, n. 4, p. 796-804, 2006.
- CHARLES, J. **Corrosion Resistance Properties**. In ALVAREZ-ARMAS, I. ; DEGLLAIX - MOREUIL, S. *Duplex Stainless Steel*. London: ISTE-Wiley, 2009. cap.2, p.47-99.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DAVIS, J. R. **Alloy digest sourcebook: stainless steels**. ASM international, 2000.
- DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steel**. Ohio: ASTM International, 1994.
- DELFORGE, D. Y. M. *et al.* **Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?** *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 1, n. 60, p.95-100, mar. 2007.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, L.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4.ed. São Paulo: Art. Liber, 2006. 247p.
- ESTEVES L. **Resistência à corrosão de embalagens de alumínio em contato com bebidas carbonatadas**. Belo Horizonte: UFMG; 2013.
- FRUTUOSO, Francisca Geidilany Saraiva de Oliveira. **Análise de corrosão dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 316L em solução de água do mar artificial**. 2017. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

GENNARI J.R., W. MACHADO, A. R. **Melhorias na Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis**, *Máquinas e Metais*, p. 84-98. Setembro, 1999.

GENTIL, Vicente. **Corrosão** – 5ª edição – Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GERMAN, R. M.; BOSE, A. **Injection molding of metals and ceramics**. *Metal Powder Industries Federation*, 1997. Princeton, NJ.

GERMAN, R. M., **Powder Metallurgy of Iron and Steel**. New York: Wiley-Interscience, 1998.

GHADIRI M., FARHADPOUR, F.A., CLIFT R., SEVILLE, J.P.K. **Particle characterization size and morphology**, *The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview*. London, p.56-75, 1991.

GOMES, E. A. **Análise comparativa da resistência à corrosão de aços carbono em ensaios de campo e testes eletroquímicos**. 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

GOMES, M. V. 2015. **Avaliação eletroquímica de resistência à corrosão uniforme do aço ABNT 1020 recoberto com níquel fósforo**. 2016. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Graduação em Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

GOMES, U. U. **Tecnologia dos Pós – Fundamentos e Aplicações**. Natal. UFRN Editora Universitária. (1995).

IERVOLINO, F. **A Metalurgia do Pó – alternativa econômica com menor impacto ambiental**, 1st ed. São Paulo: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de. OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2013.

LABIAPARI, W. S. **Abrasão-Corrosão em Aços Inoxidáveis Ferríticos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

LIMA, Luciana Iglésias Lourenço *et al.* **Caracterização microestrutural de soldas dissimilares dos aços ASTM A-508 e AISI 316L**. 2. ed. São Paulo: Soldagem & Inspeção, 2010. 15 v.

LOURENÇO, R.F.R (2014), **Produção e caracterização do biocompósito metal/cerâmica, inox 316L e Hidroxiapatita utilizando moagem de alta energia**. Itajubá - MG, 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Mestrado profissional) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2014.

LUCIO, T. A. V. **Produção do Aço Inox 316L pela rota de metalurgia do pó utilizando polímero como agente porogênico**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

MADDALA, J. *et al.* **Indetification of reaction mechanism for anodic dissolution of metals using Electrochemical Impedance Spectroscopy.** *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v.638, p. 138-188, 2010.

MARQUES, F. M.; UGIONI, F. M.; CAVALER, L. C.; ROCHA, A. S.; CURI, E. I. **Análise da usinabilidade dos Aços Inoxidáveis AISI 304 E AISI 420 durante o processo de torneamento externo cilíndrico.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

MARTINS, V. **Estudo das Propriedades dos compósitos WC-6Co, WC-10Co, WC-20Co, WC-6Co-6Ni, WC-6Co-12Ni obtidos por metalurgia do pó convencional para aplicação em anéis de selos mecânicos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2010.

MELO, Régis Lopes. **Eletrodeposição, caracterização e estudos de corrosão de camadas de Ni-Mo-P.** 2009. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

OLIVEIRA, L. A. **Estudo da sinterização do Aço Inox 316L reforçado com 3% Carbetto de Tântalo - TaC.** 2008. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ORÉFICE, R. L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S.; **Biomateriais: fundamentos e aplicações.** Cultura Médica: Rio de Janeiro, 2006.

ÖZEL, T; BÁRTOLO, P. J.; CERETTI, E.; GAY, J. C.; RODRIGUEZ, C. A.; DA SILVA, J. V. L. **Biomedical Devices: Design, Prototyping, and Manufacturing.** John Wiley & Sons, 2016.

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

PARK, J.; LEE, S.; KANG, S.; JEON, J.; LEE, S. H.; KIM, H. K.; CHOI, H. **Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels.** *Powder Technology*, v. 284, p. 459–466, 2015.

PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion science.** Kluwer Academic Publishers, 2004, Boston. 2008, p. 1 – 25.

PERUZZO, Marcele. **Efeito da adição de boro na microestrutura, dureza e resistência à oxidação e ao desgaste do Aço Inoxidável Austenítico 316L sinterizado.** 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

RAJU, K.; YOON, D. H. **Sintering additives for SiC based on the reactivity: A review.** *Ceramics International*, v. 42, p. 17947–17962, 2016.

ROBERGE, P.R. **Handbook of Corrosion Engineering.** McGraw-Hill, 2000. p 1 – 12.

ROCHA, J. C. **Obtenção de inibidores de corrosão a partir de extratos de produtos naturais**. 2013. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SCHWANKE, C. M., **Obtenção de Titânio Particulado pelo Processo Hidretação/Dehidretação**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Porto Alegre - RS, Escola em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 120p, 2000.

SEDRIKS, A. J. *Corrosion of stainless steels*. 2. ed. New York; Chichester; Brisbane: JohnWiley, 1996. p. 1-53.

SOUZA, A. R. B., **Desenvolvimento de uma Prótese para Substituição de Disco da Coluna Vertebral Lombossacra Através da Metalurgia do Pó**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Porto Alegre-RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 107p, 2009.

SOUZA, S. A. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1989.

SOUZA, M. H. L.; ELIAS, D. O. **Fundamentos da circulação Extracorpórea**. 2. ed. Centro editorial alfa rio, 2006. 809 p.

UNIEMP. **Relatório de Trabalho Programa Apóstolos da Inovação**. Grupo Iracema Setor Eletromecânico. Fortaleza – CE. 2014.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas de corrosão**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 162 p.

ZIĘTALA, M, *et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. Materials Science & Engineering A*, v. 677, p. 1–10, 2016.