

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Leonardo Marques Mendes**

**Lucas Marques Anchite**

**Márcio Nério de Miranda**

**Thiago Rodrigues da Silva**

**ESTUDO DE CORROSÃO EM MEIO SALINO DOS AÇOS SAE 1020,  
SAE 4340 E AISI 304**

**VOLTA REDONDA**

**2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DE CORROSÃO EM MEIO SALINO DOS AÇOS SAE 1020,  
SAE 4340 E AISI 304**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia  
Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção  
do título de bacharel em Engenheiros Mecânicos.

Alunos:

Leonardo Marques Mendes

Lucas Marques Anchite

Márcio Nério de Miranda

Thiago Rodrigues da Silva

Orientador:

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Monique Osório Talarico da  
Conceição

**VOLTA REDONDA**

**2017**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Leonardo Marques Mendes**

**Lucas Marques Anchite**

**Márcio Nério de Miranda**

**Thiago Rodrigues da Silva**

### **ESTUDO DE CORROSÃO EM MEIO SALINO DOS AÇOS SAE 1020, SAE 4340 E AISI 304**

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos esta, bem como todas as nossas demais conquistas primeiramente a Deus, por nos fortalecer e nos conceder a sabedoria e graça em nossas vidas. Em segundo lugar as nossas famílias, amigos e professores por nos conceder base e incentivar a perseverar em nos estudos, seremos eternamente gratos por toda a ajuda que tivemos para chegar até este momento, sabemos agora que o impossível se torna possível quando unirmos forças e nos dedicamos a superar os desafios da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que nos fortaleceu e capacitou ao longo da nossa caminhada.

A todo corpo docente do UniFOA, que com brilhantismo soube transmitir seus conhecimentos e suas orientações.

A nossa orientadora, Monique Osório Talarico da Conceição, pelo importante suporte, dedicação e incentivo a este projeto.

Aos nossos pais pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E por fim, a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a nossa formação, muito obrigado a todos!

## RESUMO

Atualmente a corrosão em aços é um fenômeno muito estudado por indústrias de diferentes ramos do mercado, a fim de reduzir perda em sua produção, para aumentar seus lucros. Portanto, esse presente estudo, apresenta uma análise de corrosão a partir de ensaios de polarização nos aços dos tipos SAE 1020, AISI 304 e SAE 4340. A princípio esses materiais foram preparados e analisados quanto a sua microestrutura e dureza. Em seguida foi realizado um estudo da corrosão desses aços em solução salina (3,5% de NaCl) por meio do ensaio de polarização. As curvas de polarização foram obtidas a partir do potencial de circuito aberto, dando início a uma varredura de potencial de degraus de 0,03 V (Volts) com velocidade de varredura de 0,001 V/s (Volts por segundo) até o potencial de 1 V.

Entre as amostras analisadas o aço AISI 304 apresentou o maior valor para o potencial de corrosão e menores valores de densidade de corrente, a partir da curva de polarização este aço apresentou uma região de passivação e a transpassividade. Os aços SAE 4340 e SAE 1020 apresentaram corrosão ativa, não tendo nenhuma passividade ou transpassividade, ambos aços apresentaram valores próximos de potencial e densidade de corrente.

**Palavras-chave:** Corrosão em aços, Curvas de polarização, Aço SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304.

## ABSTRACT

Currently corrosion in steels is a phenomenon greatly studied by industries of different branches of the market, in order to reduce loss in their production and to increase their profits. Therefore, this present study, presents a corrosion analysis from polarization tests on SAE 1020, AISI 304 and SAE 4340 steels.

At the outset, these materials were prepared and analyzed as to their microstructure and hardness. Then a corrosion study was conducted of these kinds of steels in saline solution (3,5% NaCl) was carried out by the polarization test.

The polarization curves were obtained from the open potential circuit, starting of a potential scan of step from 0.03 V (Volts) with a scanning speed of 0,001 V/s (Volts per second) until the 1 V potential.

Among the samples analyzed the AISI 304 steel presented the highest value for the potential of corrosion and lower current density, from the polarization curve this steel presented a passive region and transpassivity. SAE 4340 and SAE 1020 steels presented active corrosion, having no passivity or transpassivity, both steels presented values very similar of potential and current density.

**Key words:** Corrosion in steels, Polarization curves, Steel SAE 1020, SAE 4340 and AISI 304.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Composição química dos aços .....	17
2.2	Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços.....	20
2.3	Normas para a classificação dos aços .....	24
2.4	Tipos de aço .....	25
2.5	Ações para fins especiais .....	31
2.6	Aços estudados .....	34
2.7	Aços resistentes à corrosão .....	35
2.8	Aços inoxidáveis.....	36
2.9	Ligas não ferrosas resistentes à corrosão .....	42
2.10	Impacto da corrosão nas aplicações dos materiais.....	43
2.11	Corrosão.....	44
2.12	Mecanismos Básicos da Corrosão .....	46
2.13	Tendência à corrosão .....	50
2.14	Corrosão galvânica .....	50
2.15	Corrosão eletrolítica.....	52
2.16	Formas de corrosão .....	55
2.17	Métodos para combate à corrosão.....	62
2.18	Ensaio de polarização .....	63
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	72
3.1	Materiais .....	72
3.2	Metodologia.....	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	79
4.1	Caracterização microestrutural .....	79

4.2	Microdureza Vickers.....	82
4.3	Ensaio de polarização .....	83
4.4	Amostras depois que foram submetidas ao ensaio de polarização .....	86
4.5	Comparativo entre as curvas da região anódica do ensaio de polarização. ....	88
5	CONCLUSÃO .....	89
6	SUGESTÕES FUTURAS .....	90
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Micrografia ferrita com ampliação de 90x. ....	20
Figura 2 - Micrografia Perlita (Ferrita + Cementita) com ampliação de 470x.....	21
Figura 3 - Micrografia perlita de um aço médio carbono recozido, as áreas claras representam a ferrita e as escuras, a perlita.....	22
Figura 4 - Matriz austenitica com ampliação de 325x.....	23
Figura 5 - Micrografia aço SAE 1020 com ampliação de 40x. ....	35
Figura 6 - Passividade dos aços cromos expostos por 10 anos em atmosfera industrial.....	37
Figura 7 - Influência do cromo na oxidação sob elevadas temperaturas.....	37
Figura 8 - Influência do carbono na corrosão de um aço inoxidável (8%Cr-8%Ni).....	38
Figura 9 - Perfurações em tubo de aço-carbono ocasionadas por correntes de fuga.....	53
Figura 10 - Refino de cobre em solução de sulfato de cobre. ....	53
Figura 11 - Representação de uma corrosão uniforme, a cor marrom representa a corrosão uniforme e a cor prata representa o material metálico.....	55
Figura 12 - Representação de uma corrosão alveolar.....	55
Figura 13 - Representação de uma corrosão por placas. ....	56
Figura 14 - Trecho de chapa com corrosão em placas. ....	56
Figura 15 - Representação de uma corrosão puntiforme.....	57
Figura 16 - Tubo de aço inoxidável AISI 304 com corrosão por pite. ....	57
Figura 17 - Representação de uma corrosão intergranular. ....	58
Figura 18 - Corrosão intragranular em aço inoxidável, submetido à ação de cloreto e temperatura (micrografia).....	58
Figura 19 - Trincas transgranulares verificadas no tubo de aço inoxidável.....	59
Figura 20 - Representação de uma corrosão por esfoliação em liga de alumínio. ....	59
Figura 21 - Representação de uma corrosão em torno de um cordão de solda. ....	60
Figura 22 - Corrosão em torno de cordão de solda com formação de pites e/ou alvéol.....	60
Figura 23 - Representação de uma corrosão filiforme. ....	61
Figura 24 - Representação de uma corrosão pelo hidrogênio predominando na região de falha de laminação.....	61
Figura 25 - Polarização anódica e catódica. ....	63
Figura 26 - Curvas de polarização anódica e catódica. ....	64
Figura 27 - Curvas de polarização anódica e catódica com valores absolutos.....	65

Figura 28 - Curva de polarização típica obtida por meio da técnica potenciocinética ou potenciodinâmica para a determinação do potencial de pite $E_p$ .....	66
Figura 29 - Curva representativa da polarização potenciodinâmica do aço o aço AISI 304 na temperatura de 25 °C em solução 3,5% NaCl (ASTM G61, 1993).....	67
Figura 30 - Arranjo experimental para compreender o potencial de corrosão (ET=eletrodo de trabalho e ER= eletrodo de referência).....	68
Figura 31 - Arranjo de um eletrodo calomelano em um capilar de Luggin .....	69
Figura 32 - Série galvânica de diversos metais em água. ....	70
Figura 33 - Série galvânica de diversos metais em água de forma qualitativa.....	71
Figura 34 – Fluxograma representativo da metodologia utilizada .....	73
Figura 35 - Microscópio OLYMPUS CX21 .....	74
Figura 36 - MEV, Marca HITACHI modelo TM3000.....	75
Figura 37 - MHV-2000, fabricante TIME e modelo DHV-1000 .....	76
Figura 38 - Célula eletroquímica utilizada na realização no ensaio potenciodinâmico. ....	77
Figura 39 - Equipamento Autolab, modelo PGSTAT302N. ....	78
Figura 40 - Metalografia das amostras captadas pelo microscópio óptico em resolução de 400x para as imagens (a), (b) e (c). Imagens (r), (s) e (t) possuem outras referências.....	80
Figura 41 - Metalografia das amostras captadas pelo MEV em ampliação de 3000X.....	81
Figura 42 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra SAE 1020. ....	83
Figura 43 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra SAE 4340 .....	84
Figura 44 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra AISI 304. ....	85
Figura 45 - Fotos das amostras após serem submetidas ao ensaio de polarização.....	86
Figura 46 - Imagens das amostras após sem serem submetidas ao ensaio de polarização, com ampliação de 400x, obtidas por microscópio óptico no laboratório do UniFOA.....	87
Figura 47 - Curvas de polarização por controle potenciodinâmico, curvas anódica.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços carbonos usuais. ....	18
Tabela 2 - Adição de elemento de liga no aço e as respectivas funções. ....	19
Tabela 3 - Grupos de aços quanto ao teor de carbono:.....	26
Tabela 4 - Faixa de Composição dos principais elementos para Aços-carbono para fundição: .....	26
Tabela 5 - Valores de composição de elementos de liga em Aços-liga para fundição: .....	27
Tabela 6 - Composição de elementos de liga presentes em aços estruturais:.....	28
Tabela 7 - Distinção dos produtos planos e suas respectivas dimensões: .....	28
Tabela 8 - Composição química em aços carbonos para chapas: .....	29
Tabela 9 - Resistencia mecânica dos aços para tubos: .....	30
Tabela 10 - Classificação dos aços para arames ou fios quanto a composição química, estado e aplicações: .....	31
Tabela 11 - Conceitos e funções, eletroquímica.....	45
Tabela 12 - Grupo que são classificados os mecanismos do processo de corrosão .....	47
Tabela 13 - Mecanismos e os seus respectivos processos corrosivos .....	48
Tabela 14 - Métodos para combate à corrosão .....	62
Tabela 15 - Composição química (% massa) das ligas em estudo. ....	72
Tabela 16 - Valor de dureza a ser considerado para cada amostra:.....	82

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AISI - American Iron and Steel Institute  
ASTM - American Society For Testing And Materials  
AL- Alongamento  
CCC - Cubica de Corpo Centrado  
CFC - Cubica de Face Centrada  
ECS - Eletrodo de Calomelano Saturado  
HB - Brinell Hardness  
HSLA - High-Strength Low-Alloy Steel  
HV - Vickers Hardness  
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura  
MPa - Megapascal  
MO - Microscópio Óptico  
SAE - Society for Automotive Engineers  
UniFOA -Centro Universitário de Volta Redonda

# 1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da industrialização torna-se cada vez mais precioso garantir a qualidade do produto final, para evitar perda de produção e conseqüentemente lucrar mais. Um fenômeno que vem preocupando os engenheiros do ramo siderúrgico é a corrosão dos aços, e para que isso seja evitado, ensaios são realizados para informar as condições do material.

Historicamente o fenômeno da corrosão sempre foi associado aos materiais metálicos, definido como a deterioração da superfície de um material, sendo este metálico ou não. A corrosão pode transcorrer pela ação química, física ou eletroquímica influenciada ou não por esforços mecânicos. Modificações estruturais, variações químicas e desgastes prematuros representam alguns dos danos sofridos pelo material sujeitado a esse fenômeno físico-químico, possuindo ligação direta com o meio operacional, tornando assim, o material impróprio para uso.

A corrosão só irá acontecer se tiver passagem de corrente. Portanto, existem fatores que podem retardar este processo, um exemplo disso é a chamada polarização catódica, que limita de modo direto a corrente, e com isso demarcara a velocidade da corrosão. As chamadas áreas relativas do anodo e do catodo influenciam também porque são por estas áreas que a mesma corrente passará. Portanto, se a área do cátodo for reduzida, a densidade de corrente no cátodo será aumentada, em relação a área anódica. O cátodo ficará polarizado precipitadamente, levando à interrupção da corrosão.

No entanto, as pesquisas estão sendo financiadas pelos órgãos responsáveis e interessados nesse assunto, para intensivar o estudo do comportamento de ligas que possuem resistência à corrosão, tendo como exemplo o aço inoxidável martensítico, duplex, super duplex, super martensítico e aço inoxidável austenítico com grande teor de manganês. Os materiais citados demonstram boa combinação entre resistência mecânica e resistência à corrosão, em meio marinho, onde são aplicados em grande quantidade em plataformas "offshore", utilizadas por indústrias petrolíferas.

A respeito de polarização e sobretensão, é correto dizer que no momento onde um eletrodo metálico está em equilíbrio, conseqüentemente a reação eletroquímica responsável pela origem da dupla camada elétrica, irá proceder em dois sentidos (oxidação e redução), isto se dará numa dada velocidade conhecida como  $i_0$ , densidade de corrente (troca). Daí então é

definido um potencial para o equilíbrio, logo se houver alteração nesse potencial, considera-se que houve polarização do eletrodo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Composição química dos aços

Um grande erro é considerar que um aço é associado somente ao carbono, para avaliar suas propriedades mecânicas e assim sua aplicabilidade. Existem inúmeros outros elementos de ligas que podem ser adicionados na composição química, para fornecerem ao material características interessantes em suas propriedades mecânicas. Contudo, não podemos desconsiderar o carbono, pois ele determina a dureza do aço, levando em consideração dois estados (recozido e normalizado), na ausência do próprio carbono alguns materiais não conseguem o endurecimento desejado. Logo, a temperabilidade do aço está ligada ao seu teor de carbono (GENTIL, 2011).

Quando se fala no processo de manufatura dos aços, a matéria prima utilizada para dar origem ao ferro gusa e aço, implica na presença, todavia, de alguns elementos como manganês, fósforo, silício, e enxofre, porém serão sempre caracterizados. Fazendo a adição de outros elementos como exemplo o cobre, níquel, alumínio e molibdênio, conseguiremos obter resultados desejados, como é visto em inúmeras aplicações, onde é desejável como exemplo o aumento de resistência à corrosão e\ou oxidação, alterações das fases quando equilibradas (CCC e CFC), alterações na cinética de transformações de fases, endurecimento e precipitação do aço (GENTIL, 2011).

Elementos de liga são acrescentados em teores diferentes, dependendo da aplicação, em busca de características individuais, como dureza a quente, resistência a altas temperaturas e inoxidabilidade. Atualmente já é acrescentado dois ou mais elementos simultaneamente, em diferentes teores, isso porque estes elementos incrementam a resistência da ferrita e formam outros carbonetos, sem contar o  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cementita) (COLPAERT, 2008).

A composição química e a estrutura são os tópicos mais importantes quando se deseja fazer um estudo detalhado das propriedades dos aços-carbonos, considerando o carbono como o elemento predominante na composição, podendo ainda ser somados outros elementos com o intuito de aprimorar a propriedade mecânica do aço. Já a estrutura leva em consideração, quando tratamos este assunto, os tratamentos térmicos e mecânicos junto com a composição química (COLPAERT, 2008).

Para isso, a organização se dá de forma que a composição química determina se o aço é hipereutetóide, hipoeutetóide ou eutetóide em conformidade com seu teor de carbono. Portanto, o tratamento mecânico se dá de acordo como o material se deforma, ou seja, se é a quente ou frio, definindo assim a magnitude do encruamento. E por fim o tratamento térmico se dá por duas variáveis, que são eles a temperatura e tempo de aquecimento junto com a velocidade de resfriamento (GENTIL, 2011).

Existem inúmeras características individuais de tal material para outro material, isso se dá pelas várias formas de tratamentos submetidos a eles. As propriedades mecânicas dos aços carbonos usuais, analisando a intercorrência dos valores dependendo das diferenças nos tratamentos térmicos, como mostrado na tabela 1 (GENTIL, 2011).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços carbonos usuais.

<b>Tipo AISI/condição</b>	<b>Resist. à tração (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Along. Em 2” %</b>	<b>Dureza Brinell</b>	<b>Resist. ao choque (kgf.m)</b>
1010, laminado	28 – 45,5	25 – 50	110 - 140	---
1020, laminado	42 - 49	35 – 40	125 - 150	8,3 - 11
1030, temperado e revenido	52,5 - 84	17 – 35	180 - 490	---
1050, temperado e revenido	66,5 - 105	10 – 30	190 - 320	2,2 – 6,9
1080, temperado e revenido	81,2 - 133	10 – 25	220 - 390	1,4 – 1,6
1095, temperado e revenido	84 - 133	10 – 26	230 - 400	0,69 – 0,83

Fonte: GENTIL, 2011.

Um acréscimo ou substituição de qualquer elemento de liga pode alterar a composição do aço, a tabela 2 tem o objetivo de esclarecer o assunto, identificando os mais usuais elementos de liga e suas respectivas funções, para deixar claro o potencial característico dos mesmos.

Tabela 2 - Adição de elemento de liga no aço e as respectivas funções.

<b>Elemento de liga</b>	<b>Principais funções</b>
ALUMÍNIO	Aumenta a resistência mecânica
BORO	Aumenta a capacidade de endurecimento mantendo a ductilidade
CÁLCIO	Controla a forma da inclusão em aços HSLA, aumentando a resistência
CARBONO	Estabelece a tenacidade e dureza de acordo com seu teor
CHUMBO	Melhora a usinabilidade em temperaturas semelhantes com a de fusão do elemento
COBALTO	Aumenta a resistência contra o amolecimento em elevadas temperaturas
COBRE	Eleva a resistência contra a corrosão atmosférica entre teores 0,20 - 0,50%
CROMO	Fornece resistência à temperatura elevada e resistência à oxidação
ENXOFRE	Diminui soldabilidade e melhora a usinabilidade
FÓSFORO	Reduz tenacidade e ductilidade e melhora a resistência à corrosão
MANGANÊS	Melhora a usinabilidade
MOLIBDÊNIO	Aumenta a resistência à corrosão do aço
NIÓBIO	Produz tamanho de grão fino
NÍQUEL	Aumenta a tenacidade em aços do tipo ferríticos-perlíticos
SILÍCIO	Melhora a resistência dos aços temperados e revenidos.
TITÂNIO	Abaixa a dureza da martensita, pois retira o carbono
TUGSTÊNIO	Diminui o amolecimento durante a têmpera e forma carbonetos resistentes à abrasão
VANÁDIO	Aumenta o endurecimento do material

Fonte: Catálogo técnico da TESTMAT

## 2.2 Constituintes estruturais de equilíbrio dos aços

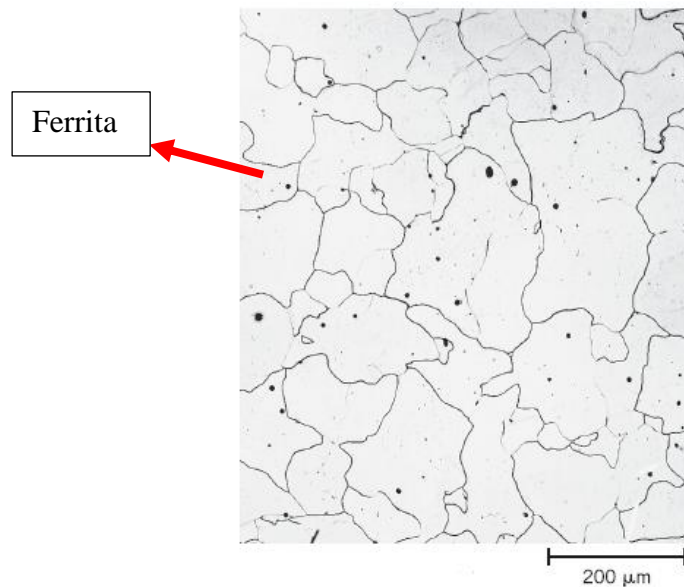
### 2.2.1 Ferrita

Presente nos aços, a ferrita é um constituinte formado por meio de uma solução sólida de adição de carbono em ferro alfa. Por possuir baixa dureza, esse microconstituente está associado a baixa resistência a tração ( $28 \text{ daN/mm}^2$ ) porém elevada resistência ao alongamento (podendo chegar a 35%) e ao choque (CALLISTER, 2016).

A ferrita pode ser apresentada nos aços de maneira mista com a cementita, formando parte da perlita. Além disso, sua solubilidade máxima gira em torno de 0,008% em temperatura ambiente e 0,0218% em torno de  $727^\circ\text{C}$ . Aços considerados pobres em carbono, possuem sua estrutura formada principalmente por grãos de ferrita (CALLISTER, 2016).

A figura 1 mostra a micrografia óptica do aço SAE 1005 com matriz ferrítica.

Figura 1 - Micrografia ferrita com ampliação de 90x.



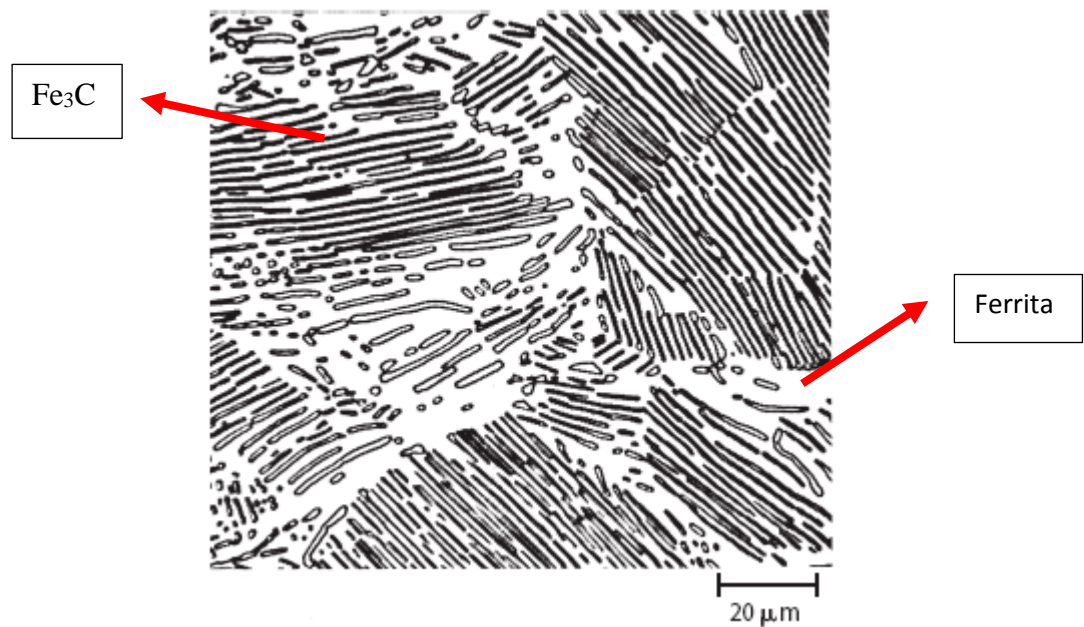
Fonte :CALLISTER, 2016.

### 2.2.2 Cementita

A cementita é formada pela composição química  $\text{Fe}_3\text{C}$  (carboneto de ferro). É possível observar a formação de cementita em aços de teor mais elevado de carbono. É uma fase muito dura, apresenta dureza estipulada em torno de 840 HV, sendo muito frágil e também resistente ao cisalhamento (CALLISTER,2016).

A figura 2 mostra a representação metalográfica da cementita.

Figura 2 - Micrografia Perlita (Ferrita + Cementita) com ampliação de 470x.



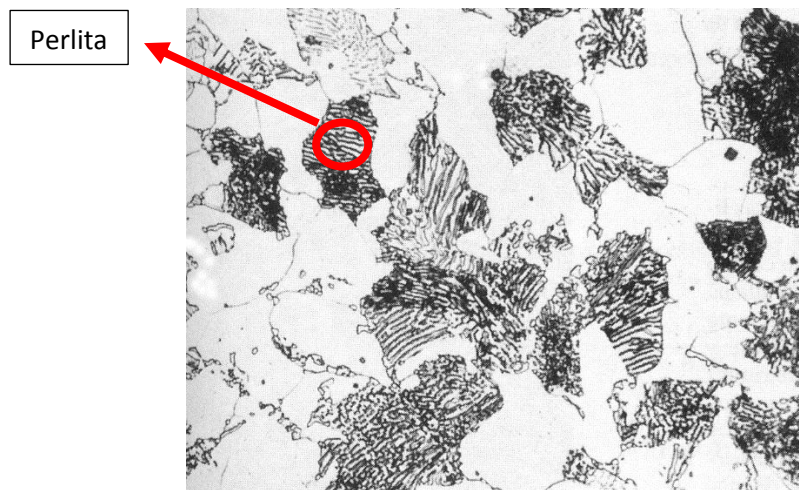
Fonte: CALLISTER, 2016.

### 2.2.3 Perlita

O constituinte perlita é gerado através da reação eutetóide nos aços, definido como uma mistura entre as fases ferrita e cementita resultante da decomposição da austenita. Estruturas lamelares desse tipo contribuem de forma positiva para a resistência mecânica (HONEYCOMBE, 1981).

A estrutura deste constituinte, apresenta-se em forma reticular, globular e laminar como mostrado na figura 3.

Figura 3 - Micrografia perlita de um aço médio carbono recozido, as áreas claras representam a ferrita e as escuras, a perlita



Fonte: CALLISTER, 2016.

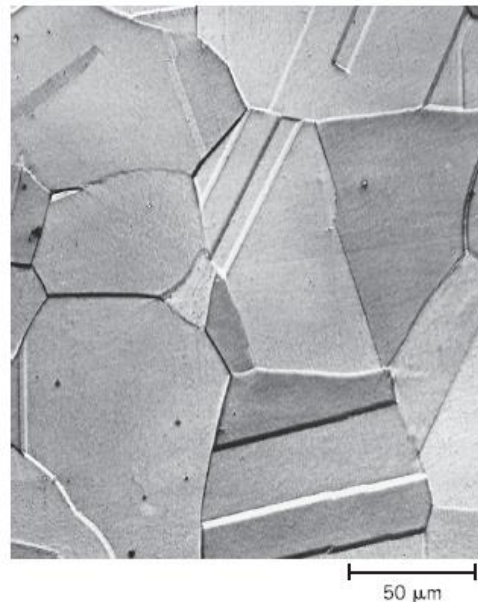
A perlita possui uma maior resistência que a ferrita por ser mais dura, porém possui maior maleabilidade que a cementita. Para sua visualização microscópica, é necessária uma ampliação acima de 200x para que as lamelas possam ser vistas com clareza.

## 2.2.4 Austenita

A austenita é uma fase sólida não magnética composta de ferro. Pode ser identificada estável em temperatura ambiente por meio dos aços auteníticos. O carbono consegue atingir uma solubilidade máxima de 2.14% na austenita em 1147°C, considerada bem maior do que o valor máximo atingido pela ferrita. Além disso, possui características como grande resistência ao desgaste, é deformável, magnética. Além disso, a austenita é considerada o constituinte mais denso dos aços (CALLISTER, 2016).

A figura 4 mostra a microestrutura austenítica.

Figura 4 - Matriz austenitica com ampliação de 325x.



Fonte: CALLISTER, 2016.

### 2.3 Normas para a classificação dos aços

Existem inúmeros tipos de aços e eles precisam ser organizados, para isso passou a existir sistemas de classificações, que ao passar do tempo e com a necessidade são devidamente atualizados. Podemos classificar os aços segundo três grupos, que são a composição, processo de acabamento e forma do produto acabado.

Estes grupos podem ainda ser subdivididos, como acontece no exemplo do aço carbono, pois existem o de baixo, médio e alto teor de carbono, mas fato é que geralmente são classificados segundo os elementos de liga preponderantes. Àquelas que são mais usuais e que foram base para a implementação do sistema em vigor no Brasil, são as que levam em consideração a composição química dos aços, conhecida como "American Iron and Steel Institute - AISI" e a "Society of Automotive Engineers - SAE".

No sistema AISI-SAE YYXX ou YYXXX, temos que (YY) representa o tipo de aço e o termo (XX) representa o teor de carbono, como é visto por exemplo na amostra SAE 1020 analisada neste presente trabalho, o numeral 10 remete a aço carbono comum e o numeral 20 ao teor de 0,20% de carbono, ou seja aço carbono com 0,20% de carbono.

Segundo a norma 6006 da Associação brasileira de normas técnicas (ABNT), somente são considerados aços carbonos quando o teor de silício for menor que 0,6% e o de manganês for menor que 1,65%. Deve-se salientar que o maior teor de alumínio deve ser 0,1% e o menor valor para o teor de boro deverá ser 0,0005%, e por fim os teores de chumbo e cobre não devem ultrapassar 0,35% e 0,30%, respectivamente.

Seguindo com a ABNT, os aços-liga podem ser conhecidos como àqueles que detêm outros elementos de liga, para com isso conseguirem somar características especiais como usinabilidade, soldabilidade, tenacidade e etc. Porém a soma dos elementos de liga nunca poderá ultrapassar 6% da composição.

## 2.4 Tipos de aço

Emprega-se o aço, em diversos ramos do mercado industrial, o mesmo é aplicado em larga escala nas indústrias automobilísticas, indústrias de construção civil, petrolíferas dentre outras. Por possuir diferentes finalidades, variam-se as características dos aços, essas por sua vez, devem atender os requisitos do produto e ao processo de fabricação em que o aço será submetido. Quanto as suas finalidades têm-se os seguintes tipos de aço: para fundição, chapas, estruturas, arames, tubos, fios, molas, usinagem fácil, cementação e fins especiais (CHIAVERINI, 1995).

### I. Aços para fundição

Os aços para fundição possuem aplicação em processos de fundição de peças, para máquinas operatrizes, na indústria automobilística, indústria agrícola, indústria petrolífera dentre muitos outros seguimentos. Tais aços exigem homogeneidade em sua composição, ou seja, granulação fina, regular com ausência de tensões internas. Regular o teor de carbono intervém de forma direta na adequação das propriedades mecânicas, que diversificam de acordo com a aplicação do aço, envolvendo-se também uma eventual adição de elemento de liga e um adequado tratamento térmico. Se obtém homogeneidade numa peça, através de um projeto adequado tanto da peça quanto aos dos moldes, dos modelos e técnica direcionada para a fundição. Quanto ao controle da granulação, é feito uso do tratamento posterior de normalização ou recozimento. Caso haja grande dificuldade na eliminação das tensões internas, um tratamento térmico de alívio de tensões deverá ser realizado a fim de equilibrar tais tensões. (CHIAVERINI, 1995).

A tabela 3 apresenta os grupos de classificação dos aços.

Tabela 3 - Grupos de aços quanto ao teor de carbono:

<b>Aços</b>	<b>%</b>
Aços de baixo carbono	0,20 de Carbono
Aços de médio carbono	0,20 a 0,50 de Carbono
Aços de alto carbono	Acima de 0,50 de Carbono
Aços-liga de baixo teor em liga	Máximo 8 de elementos de liga
Aços-liga de alto teor em liga	Mínimo 8 de elementos de liga

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

## II. Aços carbono para fundição

Esses aços, são compostos principalmente por carbono, manganês, silício. Dependendo da finalidade do mesmo, elementos como fósforo e enxofre são incluídos a uma composição limite de 0,05% e 0,06% respectivamente. Para maiores valores para o limite de resistência a tração, limite de escoamento e limite de resistência a dureza deve haver um aumento no teor de carbono na composição. A melhora da resistência mecânica e temperabilidade pode ser realizada adicionando manganês em quantidades proporcionais de 0,50% e 0,60%. A tabela 4 informa o teor solicitado dos elementos principais para o tipo aço discutido acima (CHIAVERINI, 1995).

Tabela 4 - Faixa de Composição dos principais elementos para Aços-carbono para fundição:

<b>Elemento</b>	<b>Faixa de composição (%)</b>
Carbono	0,09 a 0,90
Manganês	0,50 a 1,00
Silício	0,20 a 0,75

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

### III. Aços liga para fundição

Considera-se como diferencial desse tipo de aço, a capacidade de suportar maiores pressões de contato, temperaturas mais elevadas, maiores esforços de tração, resistência ao desgaste e maior temperabilidade. Podem totalizar limites de resistência a tração de até 150kgf/mm<sup>2</sup>. Tendo o principal aço liga sendo o manganês. Na tabela 5 mostra a faixa limite de composição dos elementos de liga para esses aços (CHIAVERINI, 1995).

Tabela 5 - Valores de composição de elementos de liga em Aços-liga para fundição:

<b>Elemento</b>	<b>Faixa de composição (%)</b>
Manganês	1,0 a 3,0
Níquel	0,50 a 3,50
Cromo	0,50 a 3,50
Vanádio	0,10 a 0,20
Molibdênio	Até 0,60

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

### IV. Aços estruturais

O aço estrutural tem seu emprego principal em construção civil. Têm-se também sua aplicação em equipamentos de transporte como veículos em geral, equipamento naval e rodoviário, etc. Requisitos como baixo custo, resistência mecânica, soldabilidade e deformabilidade são fundamentais se tratando desse tipo de aço. Consideram-se como principais tipos de aço para aplicações em estruturas: os aços carbono e os aços de alta resistência com baixo teor de liga (CHIAVERINI, 1995).

Utilizado na forma laminado, o aço-carbono é encontrado em barras, cantoneiras, tiras, vigas em “T”, em “I”, em “U”, em “L” dentre outros. Tem-se um médio teor de carbono quando se trata desse tipo de aço diversificando em 0,15% a 0,40% de carbono em sua composição. Conferindo baixo custo, boa ductilidade, boa soldabilidade e satisfaz a resistência mecânica.

A fim de aumentar a resistência mecânica encruamos o material e para aumentar resistência a corrosão é introduzido cobre em taxas por volta 0,25%. Quanto aos aços de elevada

resistência, e “alta resistência mecânica e baixo teor em liga”, são introduzidos diversos elementos de liga ao mesmo tempo em reduzidas proporções, com taxa de carbono no máximo em 0,25%. A tabela 6 mostra a proporção desses elementos de liga na aplicação nesses tipos de aço (CHIAVERINI, 1995).

Tabela 6 - Composição de elementos de liga presentes em aços estruturais:

<b>Elementos</b>	<b>Faixa de composição (%)</b>
Carbono	Até 0,25
Silício	Até 0,90
Manganês	Até 1,75
Cobre	Até 1,30
Cromo	Até 1,25
Níquel	Até 2,00
Molibdênio	Até 0,25
Zircônio	Até 0,15

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

Todos esses elementos de liga são aplicados com a finalidade de melhorar as propriedades dos aços de várias formas. Dentre essas melhoras, as principais podem ser relacionadas ao aumento da resistência mecânica quando utilizado manganês, melhor resistência a corrosão com o níquel, maior resistência mecânica através de teores baixos de cromo e resistência à corrosão atmosférica com adição de cobre.

## V. Aços para chapas

Tem-se para chapas as seguintes exigências: elevada ductilidade, soldabilidade adequada, superfície sem defeitos e baixo custo. A fim de distinguir produtos laminados planos de aço tem-se a ABNT, P-TB-20. A tabela 7 representa a distinção desses produtos:

Tabela 7 - Distinção dos produtos planos e suas respectivas dimensões:

<b>Produto</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>
Folha	Inferior a 0,30	Qualquer
Tira	De 0,30 a 5,00	Inferior a 300
Chapa Fina	De 0,30 a 5,00	Igual ou superior a 300
Barra Chata	Superior a 5,00	Inferior a 300
Chapa Grossa	Superior a 5,00	Igual ou superior a 300

Fonte: ABNT, P-TB-20.

A tabela 8 mostra a composição química de acordo com as especificações dos aços carbono para chapas, estabelecendo as seguintes faixas:

Tabela 8 - Composição química em aços carbonos para chapas:

<b>Elemento</b>	<b>Faixa de composição (%)</b>
Carbono	0,05 a 0,55
Manganês	0,15 a 1,50
Silício	0,30 a 0,50
Fósforo e Enxofre	Até 0,05%

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

É importante considerar-se que para tiras e chapas são preparadas a partir de bobinas de aço relaminadas a frio, até a espessura desejada e a maioria das vezes são recozidas em caixa. Nas tiras, a utilização é realizada na condição de encruado. Logo, as propriedades de resistência demonstrarão elevados valores, prejudicando a ductilidade. Os valores dessa resistência possuem dependência direta com estágio do encruamento (CHIAVERINI, 1995)..

Quando se fabrica chapas, podem ocorrer defeitos superficiais, esses são considerados como: "linhas de Luder" ou "linhas de distensão" tal qual é o aparecimento de tiras alongadas onde a causalidade dessa falha é quando a laminação sobre o material supera o valor da carga do limite de escoamento da chapa. O defeito dito "casca de laranja" é quando a superfície tem seu estado final sendo grosseira, e rugosa, tendo sua causalidade por conta da microestrutura do material, onde o mesmo tendo uma granulação grosseira associada a um processo de estampagem geram o defeito no produto. (CHIAVERINI, 1995).

## VI. Aços para tubos

Tubos são produzidos a partir de tarugos cheios e perfurados, como no processo Mannesmann onde esse gera tubos inteiriços ou sem costura. Existem também tubos oriundos de chapas grossas ou finas a quente, essas são dobradas na largura e seus extremos soldados, o produto desse processo são tubos com solda ou com costura. Os aços para tubos usualmente são estirados a frio para ter como resultado: diâmetros pequenos, paredes mais finas, melhor

acabamento superficial, obter tolerâncias dimensionais mais estreitas, formas circulares distintas e melhorar propriedades de resistência à tração (CHIAVERINI, 1995).

A tabela 9 mostra a resistência mecânica de acordo com o estado do aço para tubo.

Tabela 9 - Resistencia mecânica dos aços para tubos:

<b>Aço (estado)</b>	<b>Resistencia à tração (kgf/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
Trefilado duro	45 a 65	6 a 4
Recozido	32 a 50	28 a 18

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

Quanto a composição química tem-se que tais aços são de baixo carbono com limite de 0,30% de carbono e manganês até 1,50%. Para aplicações a temperaturas mais elevadas, emprega-se cromo com composição na faixa de 0,50% a 10,00% elevando a resistência à corrosão e à oxidação do material. Quando adicionado molibdênio na faixa de 0,45% a 1,10% as propriedades de fluência do material são melhoradas.

## VII. Aços para arames e fios

Existem diversas utilidades para os aços para arames e fios, esses aços tratam-se de aço-carbono sem elementos de liga ou com uso deles em baixo teor. Arame e fio não se distinguem, são definidos como resultado de trefilação feito a frio. Como produto temos:

Seção transversal uniforme, circular, quadrada, ovalada, meio-circular e hexagonal.

É importante resaltar que a aplicação de fios de aço carbono, garante melhor qualidade para esses tipos de aço, pois as propriedades mecânicas desses apresenta valores melhorados quando contraposto a outros tipos de aço (CHIAVERINI, 1995).

Podemos agrupar esses aços em dois:

a) Não patenteados: aplicados em eletrodos de solda utilizados no revestimento de peças em que essas necessitam apresentar resistência ao desgaste ou em peças que serão tratadas termicamente, como por exemplo arruelas de pressão e modelos de molas em que após conformadas, são temperadas e revenidas.

b) Patenteados: aquece-se o fio a uma temperatura superior a das linhas em que representam a temperatura crítica superior para aços hipoeutetóides, em seguida resfriado

rapidamente ao ar ou preferivelmente em banho chumbo ou de sal. Devido a sua alta tenacidade, podem ser deformados ou conformados.

A tabela 10 apresentada uma classificação dos aços para arames ou fios, em função da composição química e das aplicações.

Tabela 10 - Classificação dos aços para arames ou fios quanto a composição química, estado e aplicações:

<b>Tipo de aço</b>	<b>Teor de carbono (%)</b>	<b>Estado</b>	<b>Aplicações mais importantes</b>
Baixo C	0,08 a 0,20	Sem tratamento térmico no estado encruado, recozido ou normalizado	Eletrodos de soldagem, pregos, pinos, etc. Arames lisos ou farpados, arames para telas, etc.
Médio C	0,20 a 0,50	Recozido, Patentado e trefilado	Parafusos Cabos, molas de pequena responsabilidade etc.
Alto C	0,6 a 1,00	Sem tratamento térmico. Trefilado e patentado	Eletrodos de soldagem, arruelas de pressão, fio, cabos para serviço pesado, tirantes e aplicações semelhante, molas etc.

Fonte: CHIAVERINI, 1995.

## 2.5 Ações para fins especiais

### I. Aços resistentes ao desgaste

Nesses tipos de aço, a resistência ao desgaste depende diretamente do acabamento da superfície metálica. Exige-se amostras de aço sem rugosidade acentuada, dessa forma, reduzindo assim a obtenção de depressões ou projeções oriundas do movimento típico do desgaste metálico que pode levar ao arrancamento inicial de partículas das amostras de aço. O fator dureza é o mais importante, deve ser o mais elevado possível. E se tratando da tenacidade

e da resistência mecânica: quanto maior forem essas, mais difícil será o arrancamento de partículas metálicas (CHIAVERINI, 1995).

O Aço que possui maior resistência ao desgaste se chama "Hadfield", do tipo "manganês austenítico" e possui elevado teor de carbono, variando de 1,00% a 1,40% e elevado teor de manganês, de 10% a 14%. A fim de melhorar resistência ao desgaste abrasivo deve-se adicionar cromo na faixa de 1,5% a 2,0%, níquel em até 3,0% e cobre com limite de 5,0%. O Tratamento térmico para esses tipos de aço consiste em austenitização, seguido de resfriamento muito rápido em água. Obtém a retenção da estrutura austenítica e então o aço fica caracterizado estruturalmente por exibir uma matriz austenítica mole com carboneto duros. Já a dureza desses materiais é considerada baixa, porém não existe problema pois corre um notável encruamento, com formação simultânea de alguma martensita, levando a dureza Brinell a valores entre 500HB e 600HB. As aplicações desses tipos de aços, são geralmente em engrenagem com alta resistência ao desgaste, mandíbulas de britadores, caçambas de dragas, moinhos de bolas, bombas para trabalho em pedras e rochas, sapatas, engrenagens, pinhões e correntes transportadoras (CHIAVERINI, 1995).

## II. Aços carbono-cromo

O tipo de aço carbono-cromo é utilizado principalmente em roletes e esferas para mancais. Temperados em óleo, podem alcançar durezas em torno 65 a 67 Rockwell C. Sua composição química pertence as normas SAE 50100, SAE 51100 e SAE 52100, estabelecida em 0,40% a 0,60%, 0,90% a 1,15% e 1,30% a 1,60% respectivamente. Essas normas estão relacionadas também ao diâmetro das esferas, onde cada uma apresenta um respectivo valor máximo de diâmetro (CHIAVERINI, 1995).

## III. Aços ultra-resistentes

A aplicação desses aços geralmente se dá em componentes aeronáuticos, mísseis e aplicações semelhantes. Em projetos que necessitem de limites de resistência à tração acima de 200 kgf/mm<sup>2</sup>, é importante ter em mente que o aumento de resistência mecânica é alcançado por meio do aumento do teor de carbono, maior proporção de perlita na estrutura e pela

introdução de elementos de liga que desenvolvam uma solução sólida com a ferrita, endurecendo-a. Esses elementos de liga são, entre outros, o níquel, o manganês, o vanádio, o molibdênio, o boro e o cobre (CHIAVERINI, 1995).

O Refino do grão da ferrita e adições de alumínio, nitrogênio e nióbio: melhorar a resistência mecânica. Nos aços ultra-resistentes o teor de carbono é relativamente baixo.

Temos as seguintes categorias para esses aços (CHIAVERINI, 1995):

- ✓ Primeiro Grupo com carbono relativamente baixo, contém cromo e molibdênio e com adições crescentes de vanádio e molibdênio. A Resistência à tração nesses aços submetidos a têmpera e ao revenimento varia de 154 a 168 kgf/mm<sup>2</sup>;
- ✓ Grupo com silício elevado de 1,0% até 2,0%: teor de carbono e cromo crescentes. Nesse grupo, há uma variação entre 168 e 182 kgf/mm<sup>2</sup> para o limite de resistência à tração;
- ✓ Grupo de médio carbono com a composição de carbono a 0,40%: contém cromo, níquel e molibdênio; com adição de vanádio e silício, sendo revenido conveniente. O limite de resistência à tração está situado entre 182 e 210 kgf/mm<sup>2</sup>.

Outro tipo de aço ultra resistente: "maraging" que trabalha com uma resistência à tração próxima de 280 kgf/mm<sup>2</sup>.

Quanto a composição de tais aços temos (CHIAVERINI, 1995):

- ✓ Baixo carbono com teor limite de 0,03%;
- ✓ Baixo manganês, silício, fósforo e enxofre;
- ✓ Podem ter 0,10% para manganês e silício;
- ✓ 0,01% para fósforo e enxofre;
- ✓ Alto teor de níquel variando entre 17,00 e 26,00%;
- ✓ Titânio entre 0,5 e 1,6%;
- ✓ Alumínio entre 0,15 e 1,00%, podendo ainda conter cobalto entre 7 e 1,25% e nióbio entre 0,30 e 0,50%.

O Tratamento térmico é o próprio nome, "maraging" tal qual o processo se caracteriza por "endurecimento por precipitação". Resultado ao fim do processo é uma estrutura do tipo martensítica. Se tratando da resistência mecânica, quando são reaquecidos, maior será o endurecimento por precipitação (CHIAVERINI, 1995).

#### IV. Aços grafíticos

Os aços grafíticos demonstram uma boa usinabilidade, sendo utilizados para conformação a frio. São aplicados em buchas, carnes, calibres, etc. O alto teor de carbono promove a formação de carbono livre, em forma de grafita, cujas partículas são representadas por descontinuidades, que tornam a usinabilidade do material excelente e podem ser temperados em ar, água ou óleo (CHIAVERINI, 1995).

#### V. Aços criogênicos

A utilização dos aços criogênicos é realizada a temperatura abaixo que a do ambiente entre menos 40° C a menos 50° C. Aços-carbono de baixo teor de carbono são aceitáveis para tal aplicação. As temperaturas medidas em equipamentos para transporte e conservação de gases liquefeitos para hidrogênio líquido, considera-se o fenômeno de "temperatura de transição", pois podem chegar a menos 250° C. É importante manter o carbono em teor baixo e complementar o teor de níquel. O qual influencia diretamente no emprego desse tipo de aço em temperaturas mais baixas (CHIAVERINI, 1995).

## 2.6 Aços estudados

### 2.6.1 Aço SAE 4340

São aços muito usuais no âmbito industrial, de elevadíssima resistência mecânica capazes de resistirem a altos níveis de solicitação de esforços. Possuem destaque no meio da aeronáutica pela grande combinação entre resistência e tenacidade. Geralmente mostram elevados limites de escoamento (depende da microestrutura) e somado a isso possuem excelente usinabilidade, forjabilidade e grande capacidade de serem tratados termicamente (SOUZA, 1998).

São tratados termicamente geralmente a temperaturas entre 830 a 850°C com resfriamento realizado em óleo. Quando é desejável alta resistência (valores maiores que 1350 MPa) é realizado uma normalização a 900°C. Pode-se fazer também a carbonitreção a plasma (descarga incandescente), com o objetivo de adicionar carbono e nitrogênio na superfície do

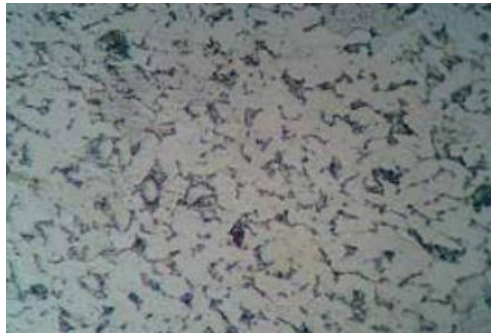
aço, produzindo uma camada com alta dureza e resistência ao desgaste. Esta é uma maneira de ampliar a aplicabilidade do material no mercado (PODGORINIK & VIZINTIN, 2001).

### 2.6.2 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 pertence aos chamados aços com baixo teor de carbono, que são aqueles que possuem geralmente a porcentagem de carbono abaixo de 2,5 (0,2% especificamente para o aço SAE 1020) e não conseguem ter uma boa resposta quando submetidos a tratamentos térmicos a fim de formar a estrutura martensítica. Se tratando de constituintes da microestrutura, o aço 1020 possui predominância de ferrita e perlita, que resultam em baixa resistência e baixa dureza, porém alta ductilidade e tenacidade. Geralmente, aços com baixo carbono atuam com valor de limite de escoamento de 275 MPa, ductilidade de 25% AL e limite de resistência a tração por volta de 415 MPa até 550 MPa (CALLISTER, 2016).

A figura 5 mostra a micrografia de um aço SAE 1020 com ampliação de 40x, onde as partes claras indicam o constituinte ferrita e os pontos escuros indicam o constituinte perlita.

Figura 5 - Micrografia aço SAE 1020 com ampliação de 40x.



Fonte: RODRIGUES, 2014.

### 2.7 Aços resistentes à corrosão

Quando cromo é adicionado nos aços, a resistência do material contra a corrosão e oxidação é diretamente melhorada em um teor superior a 10-12% Cr. Sendo assim comumente são chamados de aços inoxidáveis. Essa é uma característica muito importante porque credencia o material a várias aplicações (SILVA & MEI, 2010).

É comum haver perda de produção (peça) por consequência da corrosão e também oxidação dos metais a temperaturas superiores a ambiente, isso vem preocupando os engenheiros que estão incansavelmente procurando formas de desenvolverem métodos de proteção, assim como aperfeiçoarem ou criarem ligas que apresentem grande resistência à corrosão.

Entende-se como corrosão uma ação eletroquímica, onde sua rapidez e amplitude de ataque advêm do meio vizinho e das próprias características do material em questão (SILVA & MEI, 2010).

Há vários meios que são aplicados para a proteção do metal contra este fenômeno, pode-se dizer é atribuído ao material uma passividade natural, propriedade que permite a permanência de características em meio adjacente, esses aços são chamados de inoxidáveis.

Isso acontece de maneira natural criando uma película exterior de óxido, com alta resistência à ação corrosiva do meio. A resistência ao calor é a capacidade dos materiais de resistirem a elevadas temperaturas em diferentes condições de serviço, quimicamente ou mecanicamente, e isso é relacionado com a resistência a oxidação sob elevadas temperaturas (GENTIL, 2011).

Em suma, temos que a capacidade do material de resistir às severas condições de trabalho, implica que ele resista simultaneamente ao fenômeno da fluência, logo, são considerados resistentes a fluência. Então aos materiais que resistem às altas temperaturas, são associadas três características básicas, que são elas a resistência à oxidação, fluência e corrosão.

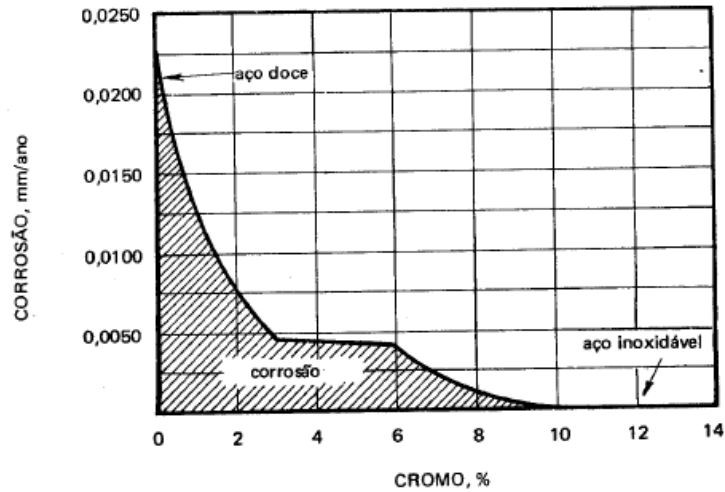
## **2.8 Aços inoxidáveis**

O aço inoxidável tem a especialidade de alta capacidade de resistir à corrosão atmosférica, apesar de não ter ligação à capacidade de resistir à ação de outros meios gasosos ou líquidos simultaneamente. Cromo, alumínio, cobre, silício, molibdênio e níquel são elementos metálicos que quando ligados aos aços e dão a ele a passividade necessária para sua aplicação (GENTIL, 2011).

De todos estes, o cromo é o elemento pilar, àquele que tem maior eficiência, quando utilizado em teores superiores a 10%.

A figura 6 deixa claro que a medida com que se aumenta a quantidade de cromo no aço, conseqüentemente a resistência à corrosão é melhorada.

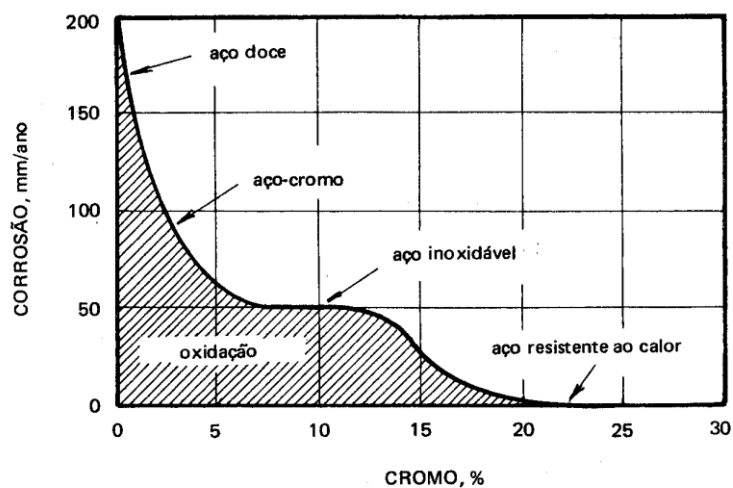
Figura 6 - Passividade dos aços cromos expostos por 10 anos em atmosfera industrial



Fonte: GENTIL, 2011.

Ocorre o mesmo fenômeno sob altas temperaturas, porém é interessante aumentar também o teor de cromo, com o propósito de aumentar a resistência ao calor, como mostrado na figura 7 (GENTIL, 2011).

Figura 7 - Influência do cromo na oxidação sob elevadas temperaturas



Fonte: GENTIL, 2011.

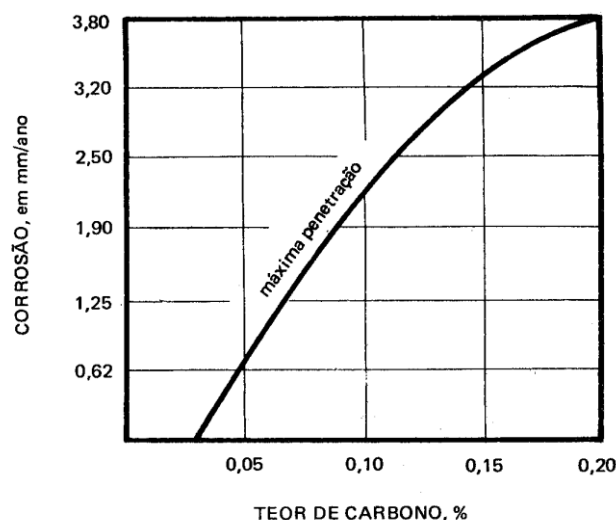
Ou seja, a partir de 10% o cromo já atua efetivamente para os casos de resistência à corrosão, e para aumentar a resistência ao calor o teor deve ser superior a 20%. Considerando a passividade dos aços, são fatores determinantes para a composição química, as condições do meio vizinho (oxidação), vulnerabilidade à corrosão localizada (pitting) e intergranular (COLPAERT, 2008).

O níquel junto ao cromo pode ajudar contra o fenômeno da oxidação, que em teores acima de 6 a 7%, aumenta a resistência a oxidação dos aços e melhoram suas propriedades mecânicas (COLPAERT, 2008).

Existem dois tipos de corrosão que são elas a intergranular e a localizada, esta última é mais prejudicial, pois se origina da ação do cloro, o que pode ser feito para evitar isto é adicionar molibdênio na liga. A corrosão intergranular pode se originar quando forem aquecidos os aços para trabalhos a quente, entre 400 a 800°C, entende-se que este fenômeno seja devido a precipitação nos contornos dos grãos. Há duas maneiras de combater esse tipo de corrosão que são o reaquecimento do aço e a diminuição do teor de carbono (COLPAERT, 2008).

Reaquecimento se dá na mesma faixa de temperatura, algo em torno de 400 a 800°C causando uma redissolução dos carbonetos que se formaram nos contornos de grãos anteriormente, na redução do teor de carbono evita-se a redução do teor de cromo no material. A figura 8 apresenta a maneira como, o carbono influencia na corrosão de um aço, no exemplo será o aço inoxidável tipo 18-8 (18% Cr - 8% Ni) (COLPAERT, 2008).

Figura 8 - Influência do carbono na corrosão de um aço inoxidável (8%Cr-8%Ni)



Fonte: GENTIL, 2011.

## I. Composição dos aços inoxidáveis

A divisão desse tipo de aço pode ser feita através da microestrutura mostrada em meios onde a temperatura é aproximadamente ambiente, sendo atribuída a eles uma classe, que são elas:

- ✓ Martensíticos;
- ✓ Ferríticos;
- ✓ Austeníticos;
- ✓ Ferríticos-Austeníticos (dúplex);

Devemos salientar que os ferríticos e austeníticos podem ser endurecidos por têmpera e são conhecidos como aços inoxidáveis essencialmente ao cromo em teores elevados. Já os aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos, comumente chamados de aços duplex, apresentam microestruturas com partes aproximadas iguais na composição de ferrita e austenita, se mostrando variáveis por terem inúmeras aplicações (COLPAERT, 2008).

## II. Aços inoxidáveis martensíticos

São em sua essência ligas Fe-Cr-Ni, com teores de níquel. O teor de carbono geralmente é baixo e muda de tipo para tipo, mas isso não intervém na temperabilidade, por consequência do cromo (GENTIL, 2011).

Estes são assemelhados aos aços para têmpera e revenimento, com uma observação, que é em relação ao teor de cromo aplicado. A temperatura de austenitização desse tipo em questão, se mantém em torno de 925-1070°C, para que se dissolvam os carbonetos garantindo a uniformidade (GENTIL, 2011).

Alguns aços temperados em água, ar ou óleo e revenidos em temperaturas que estão associadas as suas propriedades mecânicas para ocorrerem. Quando for preciso acrescentar uma melhor usinabilidade ao aço, pode-se introduzir enxofre ou selênio em quantidades pequenas, algo em torno de 0,07%. Podem ser chamados de tipo cutelaria, e sua aplicação é bastante vista no dia a dia, como exemplo os instrumentos cirúrgicos, molas e mancais anti fricção (GENTIL, 2011).

### III. Aços inoxidáveis ferríticos

Nesse tipo é mantido o baixo teor de carbono, aproximadamente na faixa de 0,08% até 0,12%, podendo chegar a 0,35% em casos especiais, onde existem quantidades mais altas de cromo. O teor de Cr varia de 11,5% para valor mínimo 27% para o valor máximo, o que vai determinar nesse caso, será o teor de carbono incluso, de modo que quanto maior for o teor de carbono maior será também o teor de cromo (GENTIL, 2011).

É comum a adição de enxofre ou selênio, com o pressuposto de deixá-los apropriados para a fabricação de parafusos, porcas e objetos parecidos. O tipo mais comum e fácil é o 430, pois sua conformação não é complexa, sendo composto por 0,12% de carbono e algo em torno de 14 a 18% de cromo. Esse tipo de aço possui grande aplicabilidade na indústria química, restaurantes e cozinhas industriais (GENTIL, 2011).

Se tratando de resistência a corrosão, deve-se pensar logo no tipo 446, pois contém teor máximo em 0,35% de carbono, e um intervalo entre 23 a 27% de cromo, com isso ainda é possível manter boa resistência a oxidação até temperaturas de 1150°C. Contudo, a resistência mecânica desse aço é comumente baixa, o tipo 446 pode atingir nesse quesito um valor de 56 kgf/mm<sup>2</sup> (GENTIL, 2011).

### IV. Aços inoxidáveis austeníticos

São os mais usuais dos inoxidáveis, como características principais pode-se dizer que são dotados de excelente resistência à corrosão, alta tenacidade e soldabilidade, o que edificam sua grande importância. O aço AISI 304 utilizado para estudo neste trabalho, é um exemplo de aço inoxidável austenítico. (COLPAERT, 2008).

Comumente, o carbono é mantido em torno de 0,08%, podendo em casos especiais atingir valores de 0,25%, desde que sejam aumentados simultaneamente os teores de cromo (22, 24 a 26%) e de níquel (12, 15 ou 22%) (COLPAERT, 2008).

A resistência a corrosão e oxidação pode ser beneficiada através da adição do elemento níquel, de modo que possam ser aplicados em temperaturas diferentes do ambiente.

São entendidos como aços não-magnéticos e não endurecíveis por tratamento térmico, por conta da sua estrutura austenítica. Contudo, quando são submetidos a deformação mecânica a frio, transformam-se em ferrita supersaturada. O aço 18-8 (18% cromo e 8% níquel) é o tipo mais conhecido, podendo atingir um limite de resistência à tração em torno de 230 kgf/mm<sup>2</sup>, após estiramento a frio. Nessa condição se o aço for reaquecido, irá readquirir a estrutura austenítica padrão (COLPAERT, 2008).

Ainda assim, esse tipo de aço é utilizado em operações de soldagem, e pela qualidade mecânica inclusa em sua composição. Por conta disso, o aço é demasiadamente utilizado em elementos arquitetônicos, pois contemplam características como alta resistência à oxidação e corrosão (GENTIL, 2011).

É visto a aplicação do aço inoxidável austenítico na indústria de alimentos, farmacêutica, produtos químicos e de equipamentos de ordem hospitalar.

#### V. Aços ferrítico-austeníticos

Boa resistência mecânica, boa tenacidade, grande resistência à corrosão em diferentes meios são características desse tipo de aço inoxidável. Como nome já diz, ele tem particularidades dessas fases (ferrita e austenita) em sua microestrutura, tudo isso em porções semelhantes de cada fase (COLPAERT, 2008).

Aumentando os teores de cromo e molibdênio em comparação com os aços austeníticos, se obtém o dúplex, juntamente com a elevação de nitrogênio presente. Como foi visto na composição dos aços, esses elementos aperfeiçoam a resistência à corrosão, e o nitrogênio ajuda elevar a resistência mecânica (COLPAERT, 2008).

Um ponto importante a ser levantado, se refere a precipitação de carbonetos logo após a solubilização, isso deve ser evitado, de maneira que não comprometa o material, alterando assim sua eficácia em resistir à corrosão. Ou seja, não pode de maneira alguma haver a precipitação de fases intermitentes, e isso é um grande obstáculo (COLPAERT, 2008).

Para auxiliar esse desenvolvimento de processos de solda, é possível e aconselhável adotar metodologia de testes conjugados a norma ASTM A923, que garantem a ausência dessas fases indesejáveis (COLPAERT, 2008).

## 2.9 Ligas não ferrosas resistentes à corrosão

Quando se fala em resistência a corrosão considerando ligas não ferrosas, se pensa rapidamente no níquel, um metal que é usualmente utilizado como uma espécie de revestimento protetor. E é sobre as ligas de níquel o foco nesse tópico, sem esquecer que as atmosferas sulfurosas podem corroer a superfície do níquel (COLPAERT, 2008).

O ácido sulfúrico e suas conseqüências não afetam (em teores menores de 80%) as ligas, sendo possível ser resistido, porém o ácido fosfórico puro pode ser um fator preocupante, porque corroem o material se estiver composto por impurezas oxidantes. O níquel como visto, é bastante utilizado em aplicações sujeitas a elevadas temperaturas, por formar uma película superficial (GENTIL, 2011).

Exemplos de ligas que possuem resistência à corrosão:

✓ Liga níquel-cobre:

Essa possibilita maior resistência à corrosão em comparação ao níquel puro (quando condições redutoras) e cobre (quando em condições oxidantes). O metal Monel, o qual é possível encontrar 67% Ni e 30% Cu, é um exemplo. (COLPAERT, 2008).

✓ Liga níquel-molibdênio:

Hastelloy é o exemplo mais prático dessa liga, tiveram seu desenvolvimento com a premissa de resistir à corrosão, em especial, do ácido clorídrico. Dois tipos mais usuais são, o tipo Hastelloy B, que contém 65% Ni, 30% Mo e 5%Fe, e o tipo Hastelloy C que contém teores como 58% Ni, 16% Mo, 16% Cr, 4% W e 5% Fe, entregando ótima resistência à ação de oxidantes (COLPAERT, 2008).

✓ Liga níquel-cromo-molibdênio-cobre:

São categoricamente divididas em quatro tipos, sendo eles, Ílio B, Ílio G, Ílio R, e Ílio 98, contém de acordo com cada um deles, os intervalos na composição aqui descritos como, 21 -28 % Cr, 5 - 8 % Mo, 3 - 6,5 % Cu, sendo o restante níquel. É visto sua aplicação em mancais, impulsores e em outros componentes de uma bomba, ou seja, são aplicados onde há necessidade de elevada dureza em meio corrosivo (COLPAERT, 2008).

## **2.10 Impacto da corrosão nas aplicações dos materiais**

Geralmente os metais são achados na natureza sob a forma de compostos, com exceção determinados metais nobres, proporcionando a ocorrência de sulfetos metálicos e óxidos. Os metais tendem a reagir de maneira espontânea com alguns elementos do meio ambiente em que são expostos, estando estes no estado líquido ou gasoso (GENTIL, 2011).

A corrosão, em alguns aspectos, é considerada pela metalurgia como o inverso do processo metalúrgico, tendo como princípio que a oxidação deteriora o material, terá então como resultando do processo de corrosão, um produto final próximo ou semelhante ao minério originalmente extraído na natureza (NUNES & LOBO, 2012).

Por ser um processo espontâneo, a corrosão afeta constantemente os materiais metálicos, mudando as suas propriedades (alterando valores), causando assim uma insatisfação em relação ao desempenho do material quando sujeitado a suas devidas aplicações. Com isso, a corrosão tem uma grande importância nos dias atuais, sendo necessário um olhar mais técnico para esse fenômeno (NUNES & LOBO, 2012).

## 2.11 Corrosão

### 2.11.1 Importância do estudo da corrosão

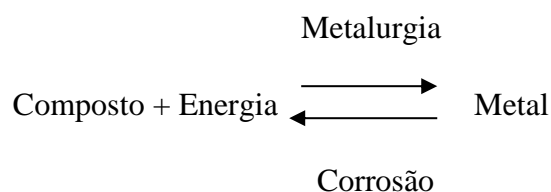
Diversas atividades são afetadas frequentemente por problemas relacionados a corrosão, como indústrias petrolíferas, os portos, a construção civil, a linha ferroviária, sistemas de comunicação, hospitais entre outros. Esses problemas resultam em perdas econômicas que atingem as atividades, sendo essas perdas classificadas em diretas e indiretas (GENTIL, 2011).

Perdas diretas são obtidas através da soma dos custos de substituição das peças ou equipamentos afetados pela corrosão e custos de manutenção de processos de proteção (envolvendo pinturas, proteções catódicas e recobrimentos). Por outro lado, as perdas indiretas envolvem custos mais elevados e nem sempre podem ser quantificados, dentre eles podemos citar as interrupções devido aos acidentes, perda de produto (soluções) através de tubulações corroídas, perda de eficiência do equipamento ou do elemento, contaminação de produtos (GENTIL, 2011).

A história revela que a corrosão já foi a causa de diversos acidentes, portanto é de suma importância o estudo e conhecimento sobre o assunto, tomando sempre cuidado com o material que será utilizado em determinadas atividades.

### 2.11.2 Considerações energéticas

Ao falar de metais, deve ser levado em consideração a quantidade de energia que é gasta na hora de sua obtenção, sendo essa energia cedida por meio de processos metalúrgicos. A esquematização abaixo representa o funcionamento do processo (NUNES & LOBO, 2012):



Como resultado, os metais em suas formas refinadas possuem um nível energético superior ao do composto de origem (exceto para metais nobres que são encontrados em forma metálica na natureza). Termodinamicamente, essa é a razão na qual se baseia a espontaneidade

das reações de corrosão que tendem a transformar os metais novamente em seus compostos de origem, assim esse processo é considerado inverso da metalurgia (TOLENTINO, 2015).

A adição de uma parcela extra de energia, representada por revestimentos protetores, inibidores de corrosão, proteção catódica ou proteção anódica, mantêm os metais protegidos contra a corrosão (TOLENTINO, 2015).

Diante disso, é de grande importância a prevenção e combate a corrosão, já que nos dias atuais a energia é cada vez mais difícil de ser obtida.

### 2.11.3 Oxidação-Redução e a corrosão

Geralmente a corrosão ocorre de maneira natural, tendo como característica na maioria dos casos o ataque na superfície do material.

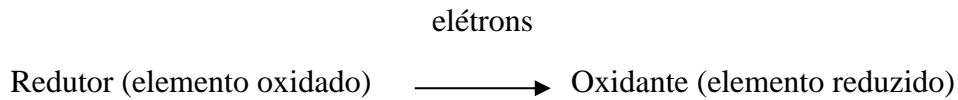
Tendo em vista que a eletroquímica explica como a corrosão acontece, são apresentados na tabela 11 alguns conceitos para facilitar o entendimento desse fenômeno (DUTRA & NUNES, 2011).

Tabela 11 - Conceitos e funções, eletroquímica

<b>Conceito</b>	<b>Função</b>
Oxidação	Ganho de oxigênio através de uma substância. Perda elétrons por uma espécie química.
Redução	Retira oxigênio de uma substância. Ganho de elétrons através de uma espécie química.
Agente Oxidante	Substância ou íon que possui o elemento oxidante.
Agente Redutor	Substância ou o íon que possui o elemento redutor.
Elemento oxidado	Ocorre a saída dos elétrons, agindo como redutor.
Elemento reduzido	Ocorre a saída de elétrons, agindo como oxidante.

Fonte: DUTRA & NUNES, 2011.

Com isso, tem-se que o fluxo de elétrons na corrosão é:



Dessa forma o material sofre oxidação, e por consequência apresentará indícios de corrosão.

Para melhor esclarecimento sobre a reação oxi-redução, conceitos importantes devem ser levados em consideração:

- ✓ Anodo, é um eletrodo que há oxidação (logo a corrosão), sendo também o emissor da corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, que penetra no eletrólito.
- ✓ Catodo, é o inverso do anodo, desta forma será o eletrodo onde a corrente elétrica emigra do eletrólito, tendo em vista que no anodo acontece a oxidação, o catodo sofrerá ações de redução, devido ao recebimento de elétrons (cargas negativas).
- ✓ Já o eletrólito é o condutor, que contem íons, responsável de transportar a corrente elétrica, no sentido do anodo para o catodo.

## 2.12 Mecanismos Básicos da Corrosão

Previamente é necessário a ciência de algumas variáveis para que posteriormente possa ser entendido os mecanismos básicos da corrosão.

Das variáveis, três são destacadas. Primeiro, o material metálico, levando em consideração o contato com outros metais, composição química, tratamentos térmicos e mecânicos e sua forma, além de parte unidas. O meio corrosivo também faz parte das variáveis de grande influência nos mecanismos de corrosão, tendo a temperatura, pH, pressão, impurezas e composição química como principais influenciadores. Condições operacionais como solicitações mecânicas, imersão no meio e operações contínuas ou intermitentes fecham os grupos que representam as variáveis fundamentais para estudo dos mecanismos básicos (GENTIL, 2011).

Alguns autores apresentam o fenômeno da corrosão em função do meio, da temperatura ou do estado físico que se encontra o metal. Dessa forma é montado quatro grupos, a tabela 12 representa a participação de cada grupo no processo corrosivo (WOLYNEC, 2002).

Tabela 12 - Grupo que são classificados os mecanismos do processo de corrosão

<b>Mecanismos</b>	<b>Parcela %</b>
Corrosão em meios aquosos	90
Oxidação e corrosão quente	8
Corrosão em meios orgânicos	1,8
Corrosão por metais líquidos	0,2

Fonte: WOLYNEC, 2002

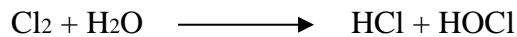
Dois estudos dos aços AISI 304 foram feitos por Vicente Gentil, sendo o primeiro sob ação corrosiva do cloro e o segundo sob o oxigênio, sendo ambos os casos tratados na presença e na ausência de água (GENTIL, 2011).

I. Na ausência de água

- ✓ O cloro seco não reage com o aço inoxidável AISI 304.
- ✓ O oxigênio ataca o aço inoxidável formando assim uma película de proteção (óxido de cromo Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.)

II. Na presença de água

- ✓ O cloro não reage rapidamente com aço inoxidável, pois forma-se o ácido clorídrico, HCl, devido a reação:



- ✓ Em contato com o oxigênio, o aço inoxidável irá formar uma película protetora de óxido de cromo, ficando de maneira passiva.

Comparando o experimento com a teoria sobre o assunto é possível conhecer a resistência a corrosão do material e em qual meio esse fenômeno acontece.

Serão citados na tabela 13 três mecanismos e os seus respectivos processos corrosivos, esses mecanismos tem ligação direta com o material e o meio corrosivo.

Tabela 13 - Mecanismos e os seus respectivos processos corrosivos

<b>Mecanismos para processos corrosivos</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Mecanismo Eletroquímico</b></p> <p>São as reações químicas que envolvem uma transferência de carga ou elétrons através de uma solução (eletrólito).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Corrosão em sais fundidos</li> <li>✓ Corrosão atmosférica</li> <li>✓ Corrosão em água ou soluções aquosas</li> <li>✓ Corrosão no solo</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Mecanismo Químico</b></p> <p>Quando existir reações químicas entre o material com o meio corrosivo, tendo como característica a não produção de corrente elétrica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Corrosão de material metálico</li> <li>✓ Em temperaturas elevadas</li> <li>✓ Por gases ou vapores</li> <li>✓ Em ausência de umidade (chamada de corrosão seca)</li> <li>✓ Corrosão de materiais não metálicos</li> <li>✓ Corrosão em solventes orgânicos isentos de água</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Mecanismo Físico</b></p> <p>É uma dissolução física com formação de liga ou penetração do metal líquido nos contornos de grão do metal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Corrosão de metais ou ligas por metais no estado líquido, ocorrendo a dissolução ou fratura do material deteriorado.</li> </ul>

Fonte: GENTIL, 2011.

### 2.12.1 Mecanismo eletroquímico

O mecanismo eletroquímico consiste basicamente em três etapas, que serviram de base para os ensaios desenvolvidos e apontados nesse estudo (GENTIL, 2011).

- a) Processo anódico: passagem dos íons para uma determinada solução.
- b) Transferência dos elétrons e íons, ocorrendo a transferência de uma região anódica para uma região catódica, por causa de um circuito metálico ligando ambos materiais, nessa etapa acontece também uma difusão de ânions e cátions na solução.
- c) Processo catódico, nessa etapa o catodo recebe os elétrons através dos íons ou moléculas pertencentes na solução.

A corrosão pode ter variações em sua intensidade influenciada por fatores como o pH e o oxigênio. De acordo com o valor de pH, a corrosão pode ter maior ímpeto a medida que o valor de pH diminui. Em relação a influência do oxigênio, pode haver aceleração do processo eletroquímico e agir como protetor do material devido a formação de óxido protetor, reduzindo a velocidade da corrosão ou passivando o material. (GENTIL, 2011)

#### I. Heterogeneidades responsáveis por corrosão eletroquímica

As heterogeneidades dos materiais são responsáveis pela eletroquímica, sendo estes especificados de acordo com interferências ligadas ao material metálico e/ou meio corrosivo no qual está submetido.

De acordo com o material metálico, diversos fatores são levados em consideração. Tratando de forma objetiva, os contornos de grãos funcionam geralmente como uma região anódica em relação ao grão, já o grão por sua vez se torna uma região catódica tornando esse fenômeno uma atividade eletroquímica. Em relação a orientação dos grãos, as direções diferentes de grãos na microestrutura tendem a apresentar potenciais diferentes podem ocasionar corrosão. Já a diferença de tamanho dos grãos, gera uma diferença de potencial de grãos de tamanho menor para grãos maiores. Além desses fatores, tratamentos térmicos e metalúrgicos, polimento da superfície metálica, diferença de forma e deformação podem gerar diferenças de potenciais. Por fim, a presença de escoriações, abrasões e bordas de superfícies metálicas são fatores que auxiliam na destruição da película protetora e na formação de regiões anódicas (GENTIL, 2011).

Por outro lado, heterogeneidades podem surgir a partir do meio corrosivo. A variação de temperatura numa mesma superfície metálica pode provocar correntes de corrosão, a iluminação diferencial sobre uma mesma superfície também gerar potenciais diferentes. Regiões em contato com líquidos com agitações diferentes, aeração variadas e concentrações de soluções de eletrólitos ocasionam correntes de corrosão, concentração iônica e formação de pilha de aeração diferencial respectivamente (GENTIL, 2011).

### 2.13 Tendência à corrosão

Para acontecer a corrosão é necessário que o potencial de equilíbrio da reação catódica tenha um valor maior do que o potencial de equilíbrio da reação anódica (WOLYNEC, 2002). Dessa forma:

- ✓  $E_X$  se trata do potencial de equilíbrio da reação catódica.
- ✓  $E_{Me}$  se trata do potencial de equilíbrio da reação anódica.

Tem a tendência de ocorrer a corrosão, se  $E_X > E_{Me}$ .

A corrosão eletroquímica é associada a uma pilha galvânica, sendo essa, chamada de pilha de corrosão. Para verificar se um material tem tendência a sofrer oxidação se utiliza a seguinte equação:

$$\varepsilon = E_X - E_{Me}$$

Com o valor de tendência à corrosão, pode-se utilizar para verificar a possibilidade termodinâmica de ocorrência de corrosão (WOLYNEC, 2002).

- ✓ Se  $\varepsilon \leq 0$  não ocorre corrosão.
- ✓ Se  $\varepsilon > 0$  poderá ocorrer corrosão

### 2.14 Corrosão galvânica

Para melhor entendimento da corrosão Galvânica pode-se considerar a seguinte situação, dois materiais metálicos que possui uma diferença no potencial elétrico, entram em contato. O contanto dos materiais ocorrem na presença de um eletrólito, que por sua vez é responsável pela transferência de elétrons do material “A” para o material “B”. Ocorrendo assim a corrosão Galvânica.

Esse tipo de corrosão tem a tendência de apresentar uma corrosão mais próxima das áreas de contato, localizada no acoplamento dos metais. O material que será o anodo terá como consequência do processo, profundas perfurações (DUTRA & NUNES, 2011).

Deve-se levar em consideração a relação da área anódica com a área catódica (GENTIL, 2011).

Caso a relação da área anódica com a área catódica for um valor bem acima de 1, nesse caso seria uma área anódica maior que a área catódica, teríamos como resultado, uma corrosão pouco prejudicial.

Caso a relação da área anódica com a área catódica for bem menor do que o valor de 1, teria então uma área catódica bem maior que a área anódica, como resultado, uma corrosão mais severa sobre o material.


Desse modo, é possível concluir que: quanto maior for a área do catodo e menor for a área do anodo, a corrosão terá uma propagação maior em cima do material.

O processo pode a vir ter inversão da polaridade devido à (GENTIL, 2011):

- I. Agentes complexantes, que são substâncias que podem inverter os papéis dos materiais no processo de corrosão.

Exemplo:

Início

Material "A" anodo	Presença de agente complexantes	Material "A" catodo
Material "B" catodo		Material "B" anodo

O material "B" tem um aumento no potencial elétrico, dessa forma vira o anodo, por consequência sofre a corrosão.

- II. Formação de películas, a casos de acontecer a formação de uma película na superfície do material, desta forma tornando o material passivo. Geralmente ocorre em meio oxidante. O material em que se forma uma película passa virar catodo, não sofrendo a corrosão.
- III. E por último temos o fator da temperatura, que devido ao aumento da temperatura do eletrólito e tendo determinadas substancias em sua composição, podem reverter a polaridade.

Tubulações de aço galvanizado tendo deslocamento de água quente em seu interior, pode ter reversão da polaridade. Isso acontece devido aos altos teores de carbonatos e nitratos presentes na água (GENTIL, 2011).

A proteção contra corrosão galvânica pode ser feita de diversas formas a fim de evitar ou diminuir os efeitos da corrosão galvânica. Tais métodos podem ser citados como o uso de inibidores, isolamento elétrico dos materiais com diferentes potenciais, aplicação de pintura de anodo e catodo para proteção, estabelecer condições de relação de área anódica/área catódica sendo maior do que um e utilização de materiais de nobrezas próximas (valor do potencial o mais próximo possível) (GENTIL, 2011).

### **2.15 Corrosão eletrolítica**

A corrosão Eletrolítica acontece devido a influência dos fatores externos, ao contrário da Corrosão Galvânica. Tem-se nesse processo de corrosão a entrada de uma determinada corrente, ocasionada por potencial elétrico externo, ou seja, uma fonte de corrente vinda de fora da estrutura metálica (NUNES & LOBO, 2012).

Tubulações enterradas podem ter correntes elétricas, chamadas de corrente de fuga que flui pelo solo e pela água chegando até a tubulação. No caso esse fenômeno resulta em grandes perdas de material e equipamento. O recebimento de uma corrente alta em uma estrutura metálica, poderá provocar uma aceleração no processo de corrosão, pois em estado natural as correntes envolvidas na estrutura metálica seria um valor bem abaixo da corrente recebida (GENTIL, 2011).

Correntes de fuga que poderão produzir maiores danos ao material, são as correntes contínuas e alternadas, no caso das correntes alternadas seria as correntes com baixa frequência. A origem da corrente de fuga se dá pela deficiência no isolamento de algum circuito, este se encontra com a um potencial diferente do meio (GENTIL, 2011).

O processo ocorre devido a grande diferença que existe na resistência do solo ou da água com a resistência dos metais, sendo a resistência dos metais um valor bem a baixo quando comparados com a resistência do solo e da água. Desta forma as estruturas metálicas enterradas ou imersas, formam um circuito, e nesse circuito acontece a passagem das correntes de fuga (GENTIL, 2011).

As principais fontes geradoras destas correntes de fuga são sistemas de acionamento elétrico dos trens, bondes ou metrô, além de equipamentos de solda elétrica e sistemas de proteção catódica. Na figura 9 é mostrado uma perfuração devido a corrente de fuga.

Figura 9 - Perfurações em tubo de aço-carbono ocasionadas por correntes de fuga.

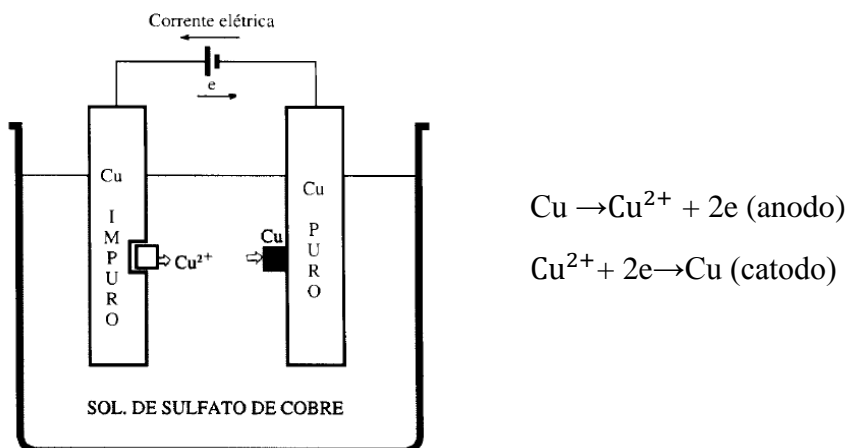


Fonte: GENTIL, 2011.

Pela definição, quando a superfície externa de um determinado material é forçada a funcionar como anodo ativo de uma célula ou pilha eletrolítica, tem-se a chamada corrosão eletrolítica (TOLENTINO, 2015).

No processo de refino do cobre conforme figura 10, o cobre puro faz papel de catodo e a solução de sulfato de cobre funciona como eletrólito. O processo baseia nas seguintes reações (GENTIL, 2011).

Figura 10 - Refino de cobre em solução de sulfato de cobre.

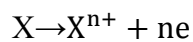


Fonte: GENTIL, 2011.

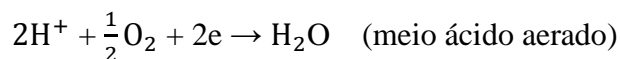
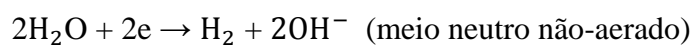
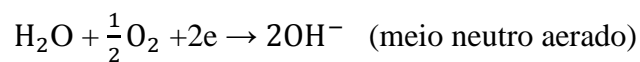
Com o andamento do processo verifica-se que o anodo vai sendo corroído, dessa forma perde massa, enquanto no catodo ocorre aumento de massa, isto é, vai-se depositando cobre puro.

Para os materiais metálicos sujeito a corrosão eletrolítica pode-se admitir as seguintes reações:

- I. Na região onde a corrente elétrica abandona o material e entra no eletrólito, tem-se a chamada área anódica, e a reação para qualquer um metal é:



- II. Na região onde a corrente elétrica convencional abandona o eletrólito e entra no material, tem-se a chamada área catódica, podendo correr uma das seguintes reações:



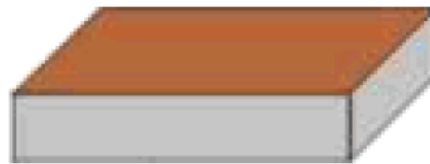
## 2.16 Formas de corrosão

A corrosão é um dos modos de “destruição” do material, se dando a partir de sua superfície, temos então uma classificação em relação as formas, ou seja, a geometria que ocorre a corrosão.

### I. Corrosão uniforme

Uniforme, quando a corrosão acontece ao longo da superfície, e acontece uma perda de forma uniforme da espessura. Na figura 11 será mostrado esse tipo de corrosão (DUTRA & NUNES, 2011).

Figura 11 - Representação de uma corrosão uniforme, a cor marrom representa a corrosão uniforme e a cor prata representa o material metálico.

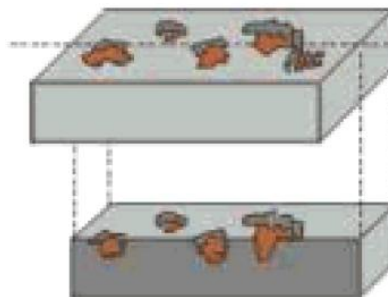


Fonte: GENTIL, 2011.

### II. Corrosão alveolar

A corrosão alveolar, tem como aspectos principais a aparição de sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, ter o fundo com o formato redondo e a profundidade tender a ser menor que o diâmetro. A figura 12 mostra uma representação de forma de corrosão (DUTRA & NUNES, 2011).

Figura 12 - Representação de uma corrosão alveolar.

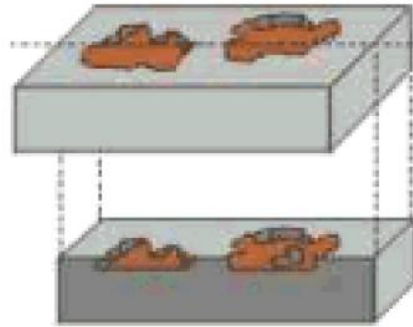


Fonte: GENTIL, 2011.

### III. Corrosão por placa

A corrosão por placas, pode se localizar em regiões aleatórias da superfície metálica, conforme é mostrado nas figuras 13 e 14, sendo caracterizada por não preencher toda a superfície (DUTRA & NUNES, 2011).

Figura 13 - Representação de uma corrosão por placas.



Fonte: GENTIL, 2011.

Figura 14 - Trecho de chapa com corrosão em placas.

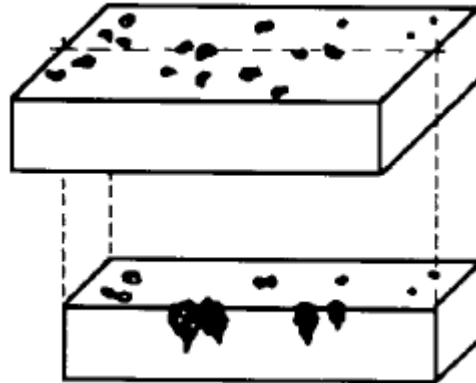


Fonte: GENTIL, 2011.

#### IV. Corrosão puntiforme

A corrosão puntiforme ou por pite, tem característica de se apresentar em pequenas áreas da superfície do material, conforme é mostrado nas figuras 15 e 16 (DUTRA & NUNES, 2011).

Figura 15 - Representação de uma corrosão puntiforme.



Fonte: GENTIL, 2011.

Figura 16 - Tubo de aço inoxidável AISI 304 com corrosão por pite.



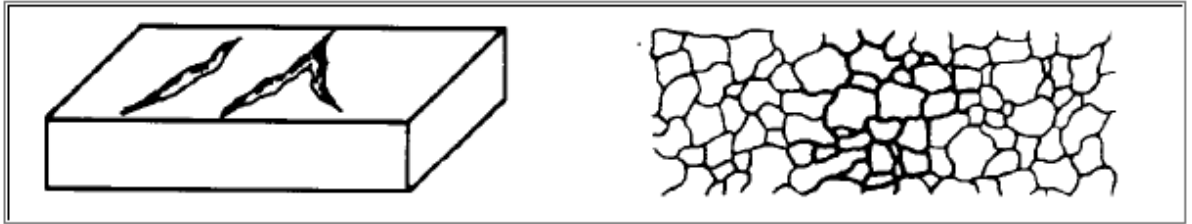
Fonte: GENTIL, 2011.

Esse tipo de forma de corrosão é devido a um ataque altamente localizado de metais, que se apresentam passivados. Entre esses metais se encontram os aços inoxidáveis, as ligas de alumínio e as ligas de níquel. (WOLYNEC, 2002).

## V. Corrosão intergranular

A figura 17 representa a corrosão intergranular ou intercristalina acontece entre os grãos da rede cristalina de um material metálico, logo acaba perdendo propriedades mecânicas do material (TOLENTINO, 2015).

Figura 17 - Representação de uma corrosão intergranular.

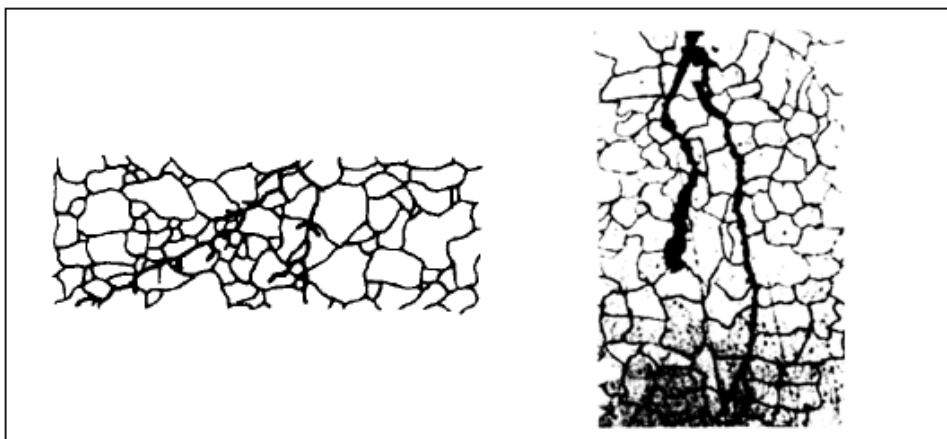


Fonte: GENTIL, 2011.

## VI. Corrosão intragranular ou transgranular

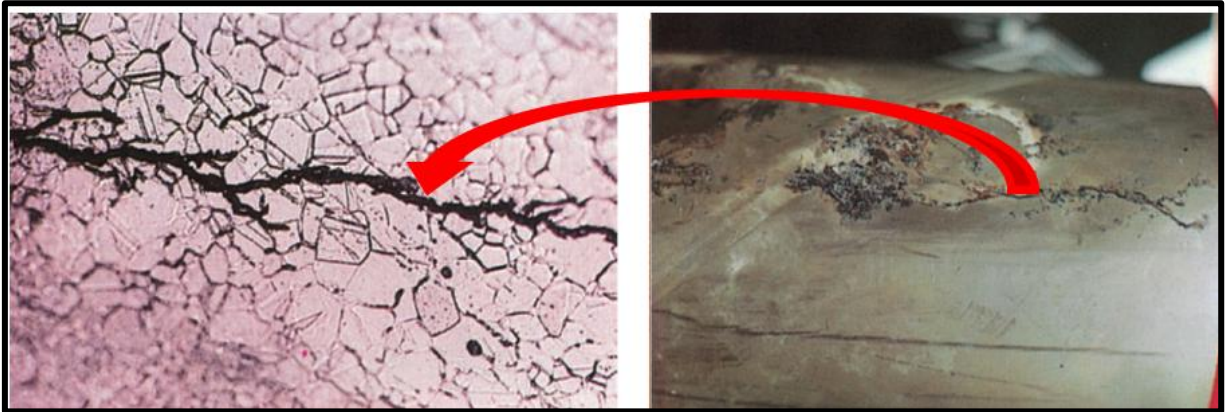
A corrosão intragranular, transgranular ou transcristalina é representada nas figuras 18 e 19, nesse tipo de corrosão temos que a sua propagação se dá nos grãos da rede cristalina do material metálico, dessa forma o material perderá a suas propriedades mecânicas e poderá fraturar (Tolentino, 2015).

Figura 18 - Corrosão intragranular em aço inoxidável, submetido à ação de cloreto e temperatura (micrografia).



Fonte: GENTIL, 2011.

Figura 19 - Trincas transgranulares verificadas no tubo de aço inoxidável.

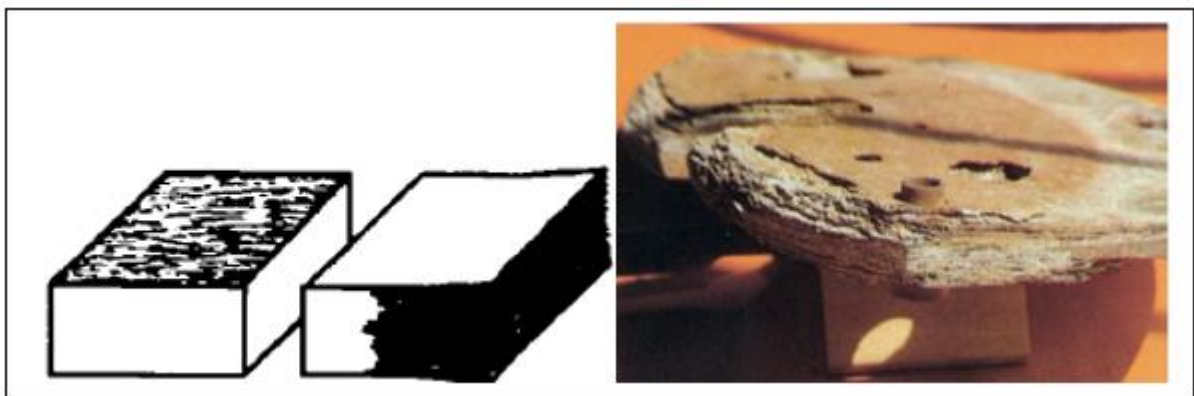


Fonte: GENTIL, 2011.

## VII. Corrosão por esfoliação

Esfoliação se trata da corrosão que acontece de forma paralela à superfície metálica. A corrosão tem início sobre a superfície do material, logo em seguida se espalha abaixo dela. Tende a ocorrer em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, com isso tem a condição para que haja inclusões ou segregações no material. Essa forma de corrosão é representada na figura 20 (TOLENTINO, 2015).

Figura 20 - Representação de uma corrosão por esfoliação em liga de alumínio.

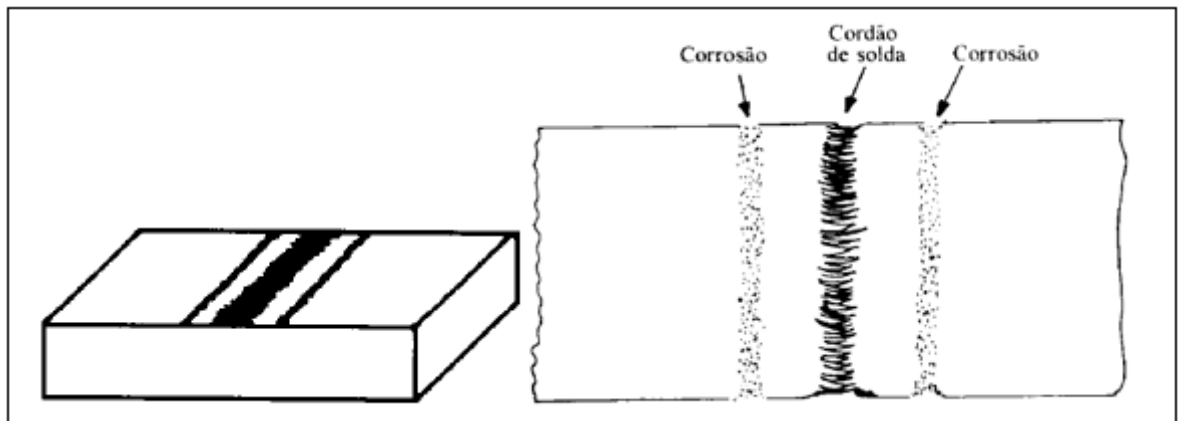


Fonte: GENTIL, 2011.

### VIII. Corrosão em torno do cordão de solda

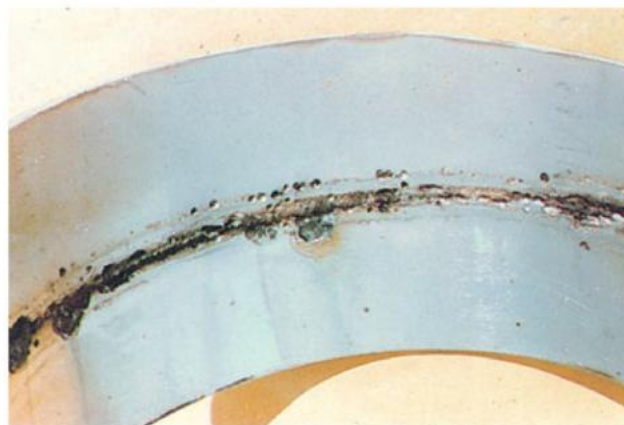
A corrosão que acontece ao redor do cordão de solda, podendo ocorrer em vários materiais, como por exemplo os aços inoxidáveis não-estabilizados ou com o teor de carbono superior a 0,03%, e ela tende a se proceder de forma intergranularmente, é representada nas figuras 21 e 22 (GENTIL, 2011).

Figura 21 - Representação de uma corrosão em torno de um cordão de solda.



Fonte: GENTIL, 2011.

Figura 22 - Corrosão em torno de cordão de solda com formação de pites e/ou alvéol.

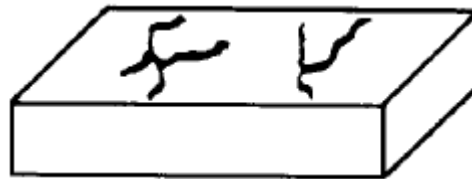


Fonte: GENTIL, 2011.

### IX. Corrosão filiforme

Filiforme é a corrosão que possui a forma de finos filamentos, porém não são profundas, tendem a acontecer em diferentes direções como é mostrado na figura 23, podendo ocorrer em superfícies metálicas revestidas (TOLENTINO, 2015).

Figura 23 - Representação de uma corrosão filiforme.

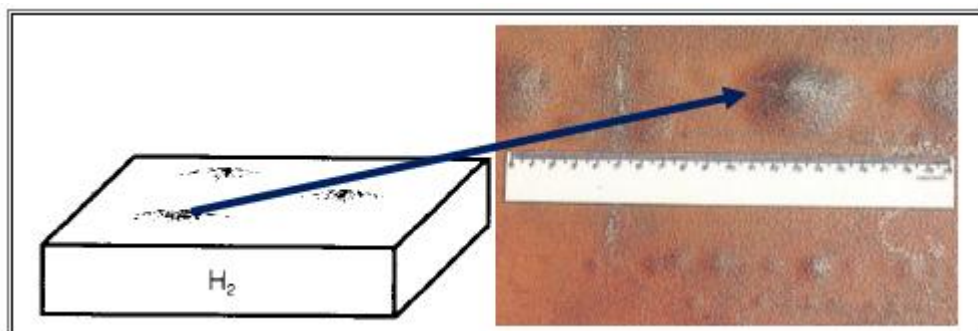


Fonte: GENTIL, 2011.

### X. Corrosão por empolamento pelo hidrogênio

Empolamento pelo hidrogênio é a última forma de corrosão que será abordada aqui, sendo representada na figura 24. O hidrogênio atômico entra no material metálico, em seguida o hidrogênio penetra em regiões que apresentam descontinuidade, desta forma ele exerce uma pressão, dando origem à formação de bolhas (TOLENTINO, 2015).

Figura 24 - Representação de uma corrosão pelo hidrogênio predominando na região de falha de laminação.



Fonte: GENTIL, 2011.

## 2.17 Métodos para combate à corrosão

A tabela 14, irá expor alguns métodos práticos para diminuir a taxa de corrosão em materiais metálicos. O método contido nela será aplicado ou não para três meios distintos, são eles: em ambiente atmosférico, ambiente submerso em água e em ambiente subterrâneo. É valido pensar também que a escolha do método de combate à corrosão terá influência direta do fator econômico, dependendo do valor do processo a utilização do método fica inviável financeiramente (GENTIL, 2011).

Tabela 14 - Métodos para combate à corrosão

<b>Alguns métodos práticos para diminuir a taxa de corrosão</b>	<b>Atmosfera</b>	<b>Submersa em água</b>	<b>Subterrânea</b>
<b>Métodos baseados na modificação do processo</b>			
Projeto da estrutura	■	■	■
Condições da superfície	■	■	■
Pela aplicação de proteção catódica		■	■
<b>Métodos baseados na modificação do meio corrosivo</b>			
Deaeração da água ou solução neutra		■	
Purificação ou diminuição da umidade do ar	■		
Adição de inibidores de corrosão, etc.	■	■	■
<b>Métodos baseados na modificação do metal</b>			
Aumento da pureza	■	■	■
Adição de elementos / liga	■	■	■
Tratamento térmico	■	■	■
<b>Métodos baseados nos revestimentos protetores</b>			
Revestimentos com produtos da reação de tratamento químico ou eletroquímico da superfície metálica	■	■	
Revestimentos orgânicos (tintas, resinas ou polímeros, etc.)	■	■	■
Revestimento inorgânico (esmaltes, cimentos)	■	■	■
Revestimento metálicos	■	■	■
Protetores temporários	■		

Fonte: GENTIL, 2011.

## 2.18 Ensaio de polarização

A respeito de polarização e sobretensão, é correto dizer que no momento onde um eletrodo metálico está em equilíbrio, conseqüentemente toda a reação eletroquímica que responde pela origem da dupla camada elétrica, irá proceder em dois sentidos (oxidação e redução), isto se dará numa dada velocidade conhecida como  $i_0$ , densidade de corrente (troca). Daí então é definido um potencial para o equilíbrio ( $E_e$ ) mostrado na figura 25, logo se houver alteração nesse potencial, considera-se que houve polarização do eletrodo (WOLYNEC, 2002).

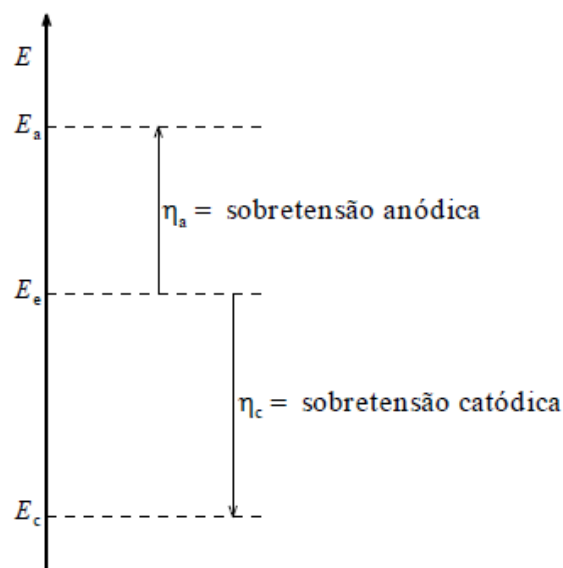
Portanto, chamamos de sobretensão o prolongamento da polarização, sendo medida baseada nos valores de  $E_e$ , onde será conhecida por  $\eta$ .

$$\eta = E - E_e$$

Onde o potencial final da polarização será chamado  $E$ , podendo variar entre dois tipos de polarização, que são elas:

- ✓ Anódica ( $\eta > 0$ )
- ✓ Catódica ( $\eta < 0$ )

Figura 25 - Polarização anódica e catódica.



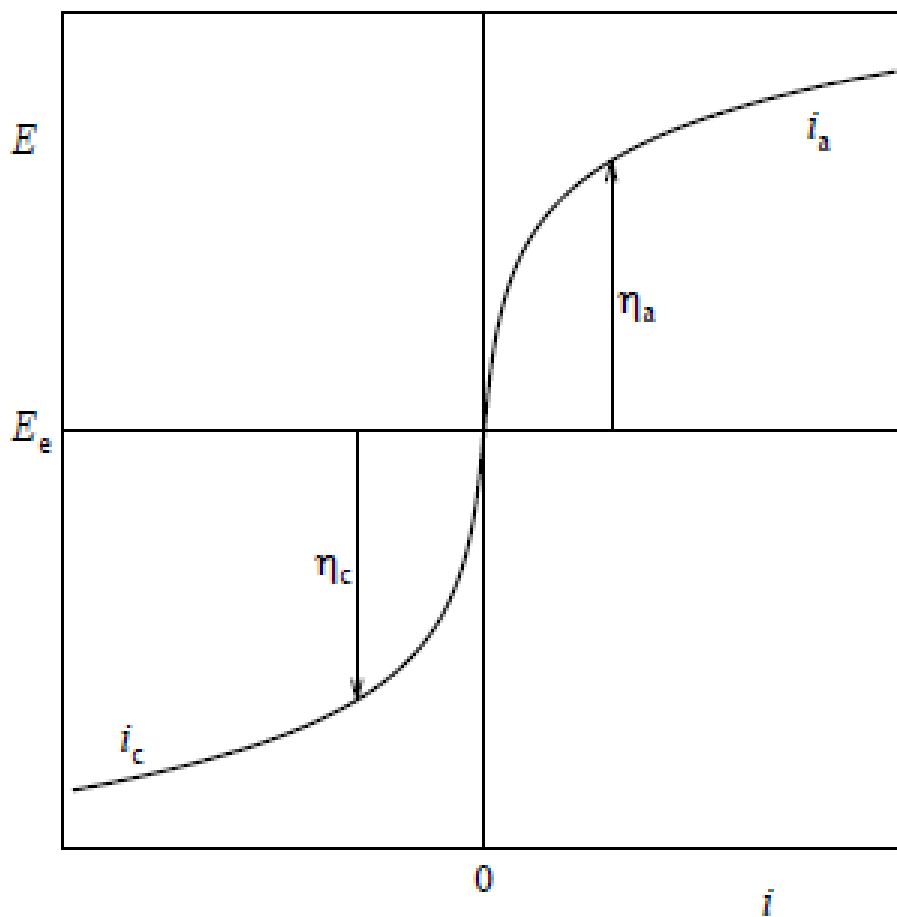
Fonte: WOLYNEC, 2002.

### 2.18.1 Curvas de polarização

Quando é desejável visualizar a perspectiva de como a polarização influencia sobre a densidade de corrente, recorre-se a uma representação gráfica do  $E$  (potencial do eletrodo) versus  $i$  (densidade de corrente) (WOLYNEC, 2002).

As curvas resultantes são denominadas curva de polarização como pode ser visualizado na figura 26.

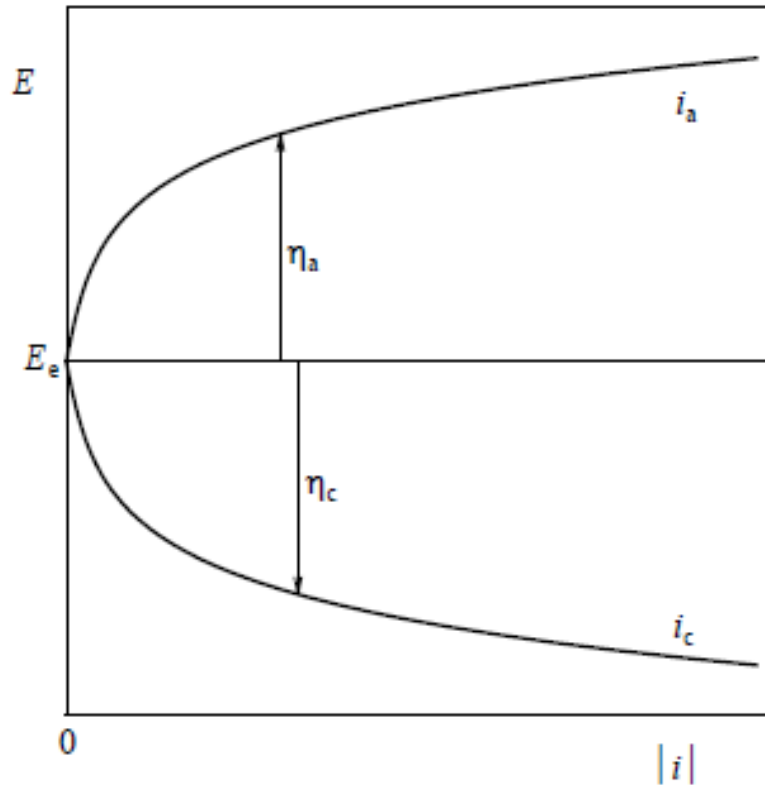
Figura 26 - Curvas de polarização anódica e catódica.



Fonte: WOLYNEC, 2002.

Em inúmeras literaturas podem ser encontradas as densidades de corrente ( $i_a$  e  $i_c$ ) representadas em valores absolutos  $E$ , mostrado na figura 27.

Figura 27 - Curvas de polarização anódica e catódica com valores absolutos.

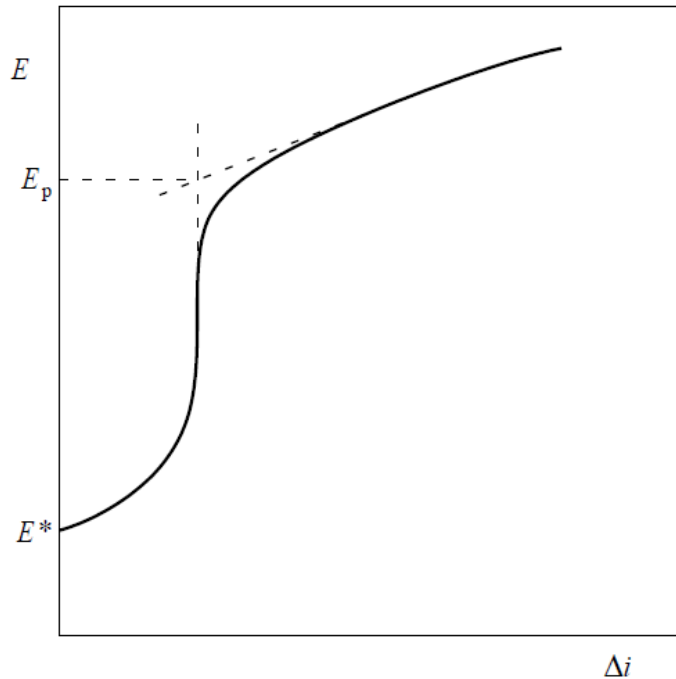


Fonte: WOLYNEC, 2002.

### 2.18.2 Curva de polarização por corrosão por pite

Esse tipo de forma de corrosão é devido a um ataque altamente localizado de metais, que se apresentam passivados. Entre esses metais se encontram os aços inoxidáveis, as ligas de alumínio e as ligas de níquel. O pite ocorre a partir ou superior do potencial de pite ( $E_p$ ) como é mostrado na figura 28, que se trata de um valor de parâmetro obtido em ensaio (WOLYNEC, 2002).

Figura 28 - Curva de polarização típica obtida por meio da técnica potenciocinética ou potenciodinâmica para a determinação do potencial de pite  $E_p$ .



Fonte: WOLYENC, 2012.

O valor do potencial de pite pode considerado como sendo a intersecção da reta definida pela curva antes do aumento brusco da densidade de corrente com a reta definida pela curva após esse aumento, com está sendo mostrado na figura 28 (WOLYNEC, 2002).

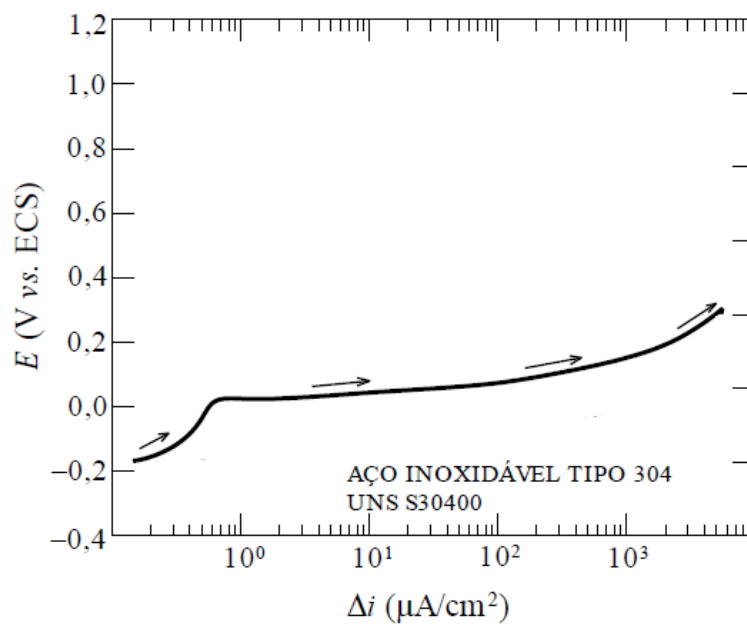
Existem algumas técnicas para encontrar o potencial de pite através de ensaio de polarização eletroquímico, iremos citar duas delas nesse documento, são elas:

- ✓ Técnica potenciocinética ou potenciodinâmica.
- ✓ Técnica potenciostática.

### I. Técnica potenciocinética ou potenciodinâmica.

O gráfico da figura 29 mostra a técnica potenciocinética ou potenciodinâmica em solução aquosa contendo 3,5% a 4% de NaCl, se observa com valores da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> houve pouco aumento de potencial. Quando se alcança o potencial de pite, ocorre um elevado aumento no valor da densidade de corrente (WOLYNEC, 2002).

Figura 29 - Curva representativa da polarização potenciodinâmica do aço o aço AISI 304 na temperatura de 25 °C em solução 3,5% NaCl (ASTM G61, 1993).



Fonte: WOLYNEC, 2002.

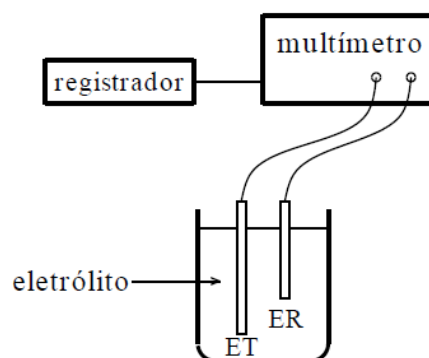
Na figura 29 aço 304 sofre corrosão por pite, apresentando um potencial de pite com valor de +0,15 V(ECS) e um potencial de corrosão no valor de -0,19 V(ECS).

### 2.18.3 Potencial de corrosão

Todo material metálico, que se não resiste à corrosão sob solução com baixa resistividade elétrica, atribui um potencial de corrosão singular, encontra-se de maneira clara esse potencial na interseção das curvas (anódica e catódica) de polarização, ou em alguns casos, pela interseção da soma das curvas.

Seu uso se dá por ser uma referência eletroquímica facilmente encontrada experimentalmente, na verdade, como isso é característico de material para material, consegue-se rapidamente correlacioná-lo com um elemento base, no caso o eletrodo de referência, como é mostrado na figura 30. Onde são arranjados sob a solução o eletrodo de trabalho (ET) e o eletrodo de referência (ER), ambos conectados a um multímetro (WOLYNEC, 2002).

Figura 30 - Arranjo experimental para compreender o potencial de corrosão (ET=eletrodo de trabalho e ER= eletrodo de referência).



Fonte: WOLYNEC, 2002.

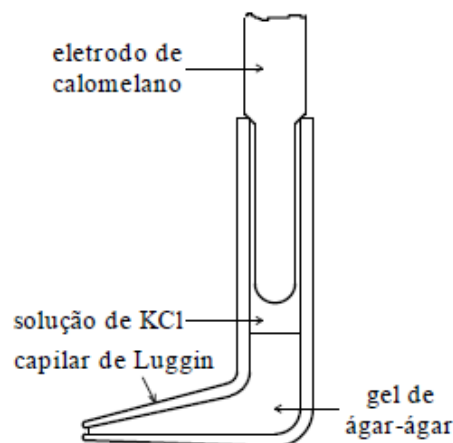
O multímetro tem a função de medir o potencial de corrosão, pode ser ligado a um registrador quando for desejável uma análise no decorrer do tempo de experimento. Quando há uma boa passividade, ou seja, nos casos onde a corrosão tende a zero. Pode-se considerar o potencial medido nesse arranjo como o potencial de equilíbrio do metal.

Está relacionado com a nobreza do material, quanto mais nobre maior será a passividade, conseqüentemente mais resistentes à corrosão. Um exemplo pode ser o cobre e a prata, quando colocados sob soluções desaeradas. E quando se fala em eletrodo de referência

comumente aplicados em ensaios desse gênero, os mais relevantes são os de calomelano, prata (cloreto de prata) e cobre (sulfato de cobre).

Àquele que tem enorme utilização em ensaios realizados em laboratórios, apesar de exigir na maioria das vezes o uso de uma ponte salina é o eletrodo de calomelano. Em relação a ponte salina usada nesse ensaio, é quase sempre utilizado o tipo conhecido como capilar de Luggin, que pode ser originado com um vidro de diâmetro que possibilite a entrada do eletrodo. Essa disposição é composta com uma suspensão de água-ágar em água, até originar um gel. Assim, é criada uma barreira entre a solução de trabalho (solução KCl) e a solução onde se encontra o eletrodo de trabalho, como mostrado na figura 31 (WOLYNEC, 2002).

Figura 31 - Arranjo de um eletrodo calomelano em um capilar de Luggin



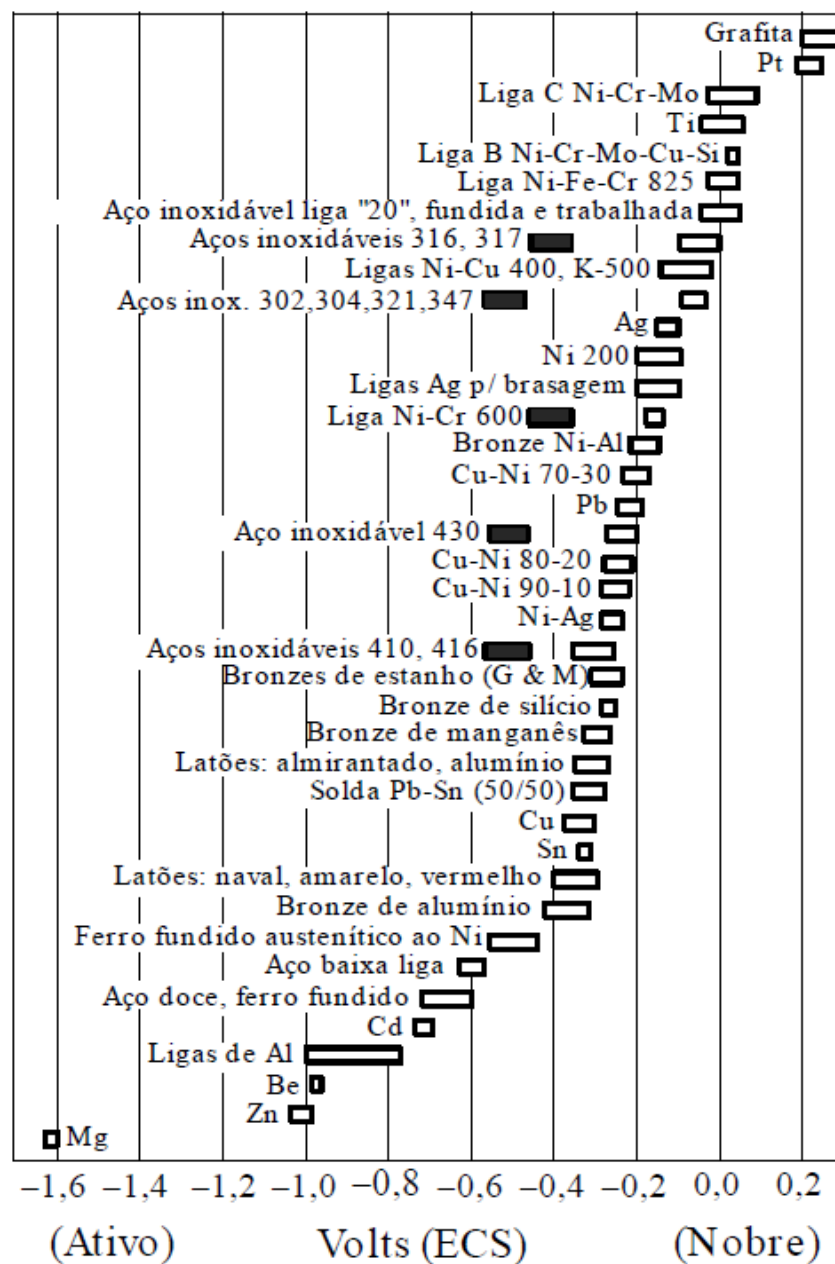
Fonte: WOLYNEC, 2002.

O eletrodo de prata (cloreto de prata) se faz necessário quando é necessário um eletrodo de pequenas dimensões, pois este tem a capacidade de se mostrar na forma de um fino fio. E o de cobre (sulfato de cobre), é aplicado quando se quer medir o potencial de eletrodo de estruturas enterradas, mantendo sempre alguma umidade na tampa porosa, e está em contato com o solo durante a medição (WOLYNEC, 2002).

### 2.18.4 Série galvânica

A figura 32 exibe uma série galvânica de diversos metais em água do mar. Com auxílio desse gráfico é possível determinar a diferença de potencial existente em dois diferentes materiais. Dessa forma, quando maior o valor da diferença de potencial, maior a possibilidade de ocorrer a corrosão galvânica (WOLYNEC, 2002).

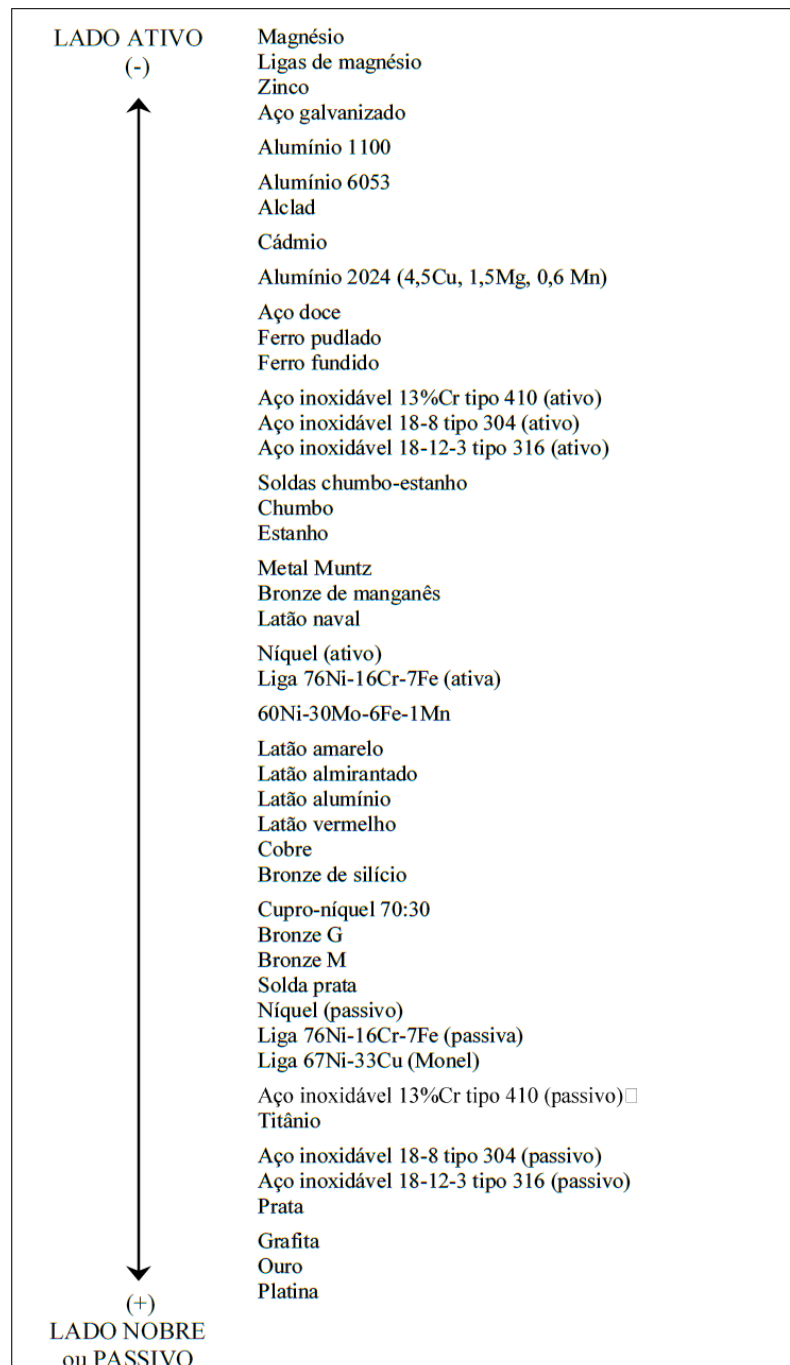
Figura 32 - Série galvânica de diversos metais em água.



Fonte: (ASTM G 82, 1993)

No par galvânico, o material com potencial de corrosão mais ativo acostuma sofrer um ganho na sua taxa de corrosão, já o potencial de corrosão mais nobre acostuma acontecer de maneira inversa. A figura 33 mostra um gráfico de caráter qualitativo, através dela se consegue saber qual dos dois elementos do par galvânico terá sua taxa de corrosão ampliada e qual terá sua taxa de corrosão reduzida ou mesmo eliminada, como é o caso da proteção catódica (WOLYNEC, 2002).

Figura 33 - Série galvânica de diversos metais em água de forma qualitativa.



Fonte: (ASTM G 82, 1993)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para o presente trabalho foram selecionados três tipos de aços SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304.

A tabela 15 mostra os valores de referência de acordo com as normas SAE J-403, SAE J-404 e SAE J-405 para as amostras estudadas:

Tabela 15 - Composição química (% massa) das ligas em estudo.

<b>Material</b>	<b>C</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>N</b>
SAE 1020	0,18 0,23	-	-	0,30 0,60	-	0,030 (Máx)	0,050 (Máx)	-	-
SAE 4340	0,38 0,43	1,65 2,00	0,20 0,30	0,60 0,80	0,15 0,35	0,030 (Máx)	0,040 (Máx)	0,70 0,90	-
AISI 304	0,08 (Máx)	8,00 10,50	-	2,00 (Máx)	0,75 (Máx)	0,045 (Máx)	0,030 (Máx)	18,00 20,00	0,10 (Máx)

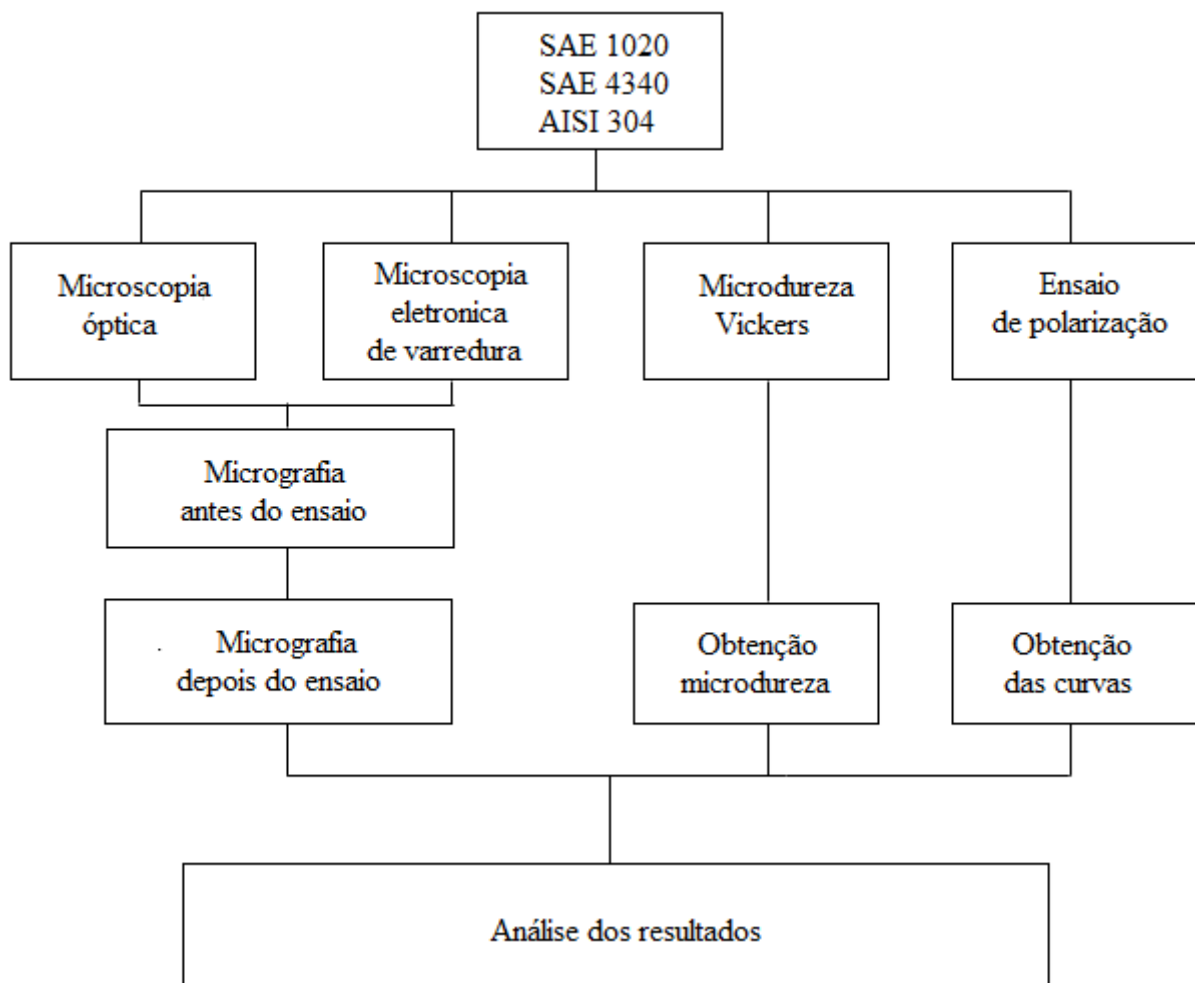
Fonte: GERDAU, 2003.

### 3.2 Metodologia

Para análise das amostras foram realizadas as técnicas de microscopia óptica, eletrônica de varredura, microdureza vickers e ensaio de polarização. A figura 34 representa a sequência de experimentos realizados neste trabalho.

#### ✓ Fluxograma da metodologia

Figura 34 – Fluxograma representativo da metodologia utilizada



Fonte: Fluxograma elaborado pelos autores desse trabalho.

### 3.2.1 Microscopia Óptica (MO)

As análises por microscopia óptica tiveram como objetivo investigar a microestrutura das amostras antes e depois dos ensaios de polarização. Para obtenção das imagens as amostras foram preparadas metalograficamente. A preparação metalográfica consistiu nas etapas de lixamento, utilizando lixas de carvão de silício (SiC) de 200, 320, 400, 600, 1000 e 1200 mesh. Logo em seguida foi realizado o polimento manual com solução de alumina de 3  $\mu\text{m}$  utilizando um pano de mesma granulometria. Após o polimento as amostras foram lavadas em água corrente, imersas em álcool e secas com ar quente.

A última etapa de preparação das amostras consistiu no ataque químico das amostras. Para o aço AISI 304 foi utilizada uma solução de água régia (8 ml ácido nítrico concentrado, 12 ml ácido clorídrico concentrado e 1000 ml álcool etílico). Já nas amostras dos aços SAE 1020 e SAE 4340 foi utilizado a solução Nital a 3% (97 ml álcool etílico, 3 ml ácido nítrico concentrado) para o ataque químico. O tempo de imersão na solução de ácida de cada amostra foi de aproximadamente 7 s, em seguida lavou-se as amostras em água corrente e secou-se com ar quente. Após os procedimentos citados, foram capturadas as imagens através do microscópio OLYMPUS CX21 que fica no laboratório do UniFOA (figura 35).

Figura 35 - Microscópio OLYMPUS CX21



Fonte: Imagens obtidas pelos autores desse trabalho.

### 3.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) tiveram como objetivo investigar a microestrutura das amostras antes dos ensaios de polarização. Para obtenção das imagens as amostras foram preparadas metalograficamente. A preparação metalográfica prosseguiu exatamente nos mesmos procedimentos e padrões realizados nos passos realizados na preparação da amostra para microscopia óptica. Após os procedimentos, as imagens foram capturadas através do microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI modelo TM3000 (figura 36). O equipamento se localiza no laboratório do UniFOA.

Figura 36 - MEV, Marca HITACHI modelo TM3000



Fonte: Imagem obtida pelos autores desse trabalho.

### 3.2.3 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado no laboratório do UniFOA. Para cada amostra foram capturadas cinco medidas, variando os pontos de penetração ao longo do material. Foram descartados os dois valores mais distintos obtidos em cada amostra, sendo feito em seguida uma média aritmética com os três valores restantes. Vale lembrar que a superfície do material se encontrava polida, antes de ter sido realizado o ensaio de polarização.

No ensaio microdureza foram aplicadas nas amostras uma carga de 3N (0,305 kgf) com um tempo de penetração de 15s.

O equipamento utilizado foi o MHV-2000, fabricante TIME e modelo DHV-1000, conforme é mostrado na figura 37.

Figura 37 - MHV-2000, fabricante TIME e modelo DHV-1000



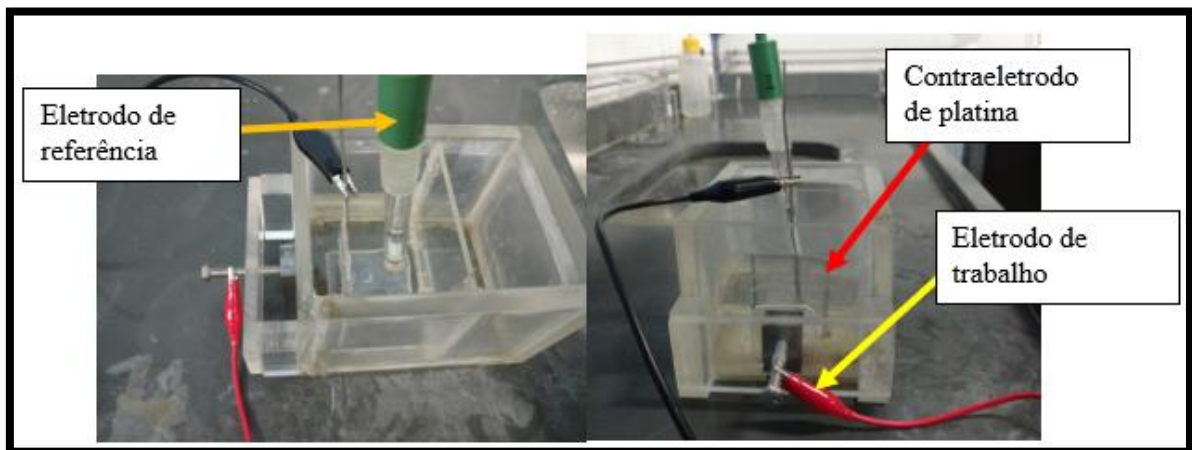
Fonte: Imagens obtidas pelos autores desse trabalho.

### 3.2.4 Ensaio de polarização

Visando compreender melhor o comportamento dos aços SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304 à corrosão à temperatura ambiente, as amostras passaram por preparação metalográfica, além de um novo polimento, limpas com álcool e secas ao ar quente.

Para realização do ensaio, foi utilizado uma solução com 3,5% de NaCl, concebida a partir de graus químicos analíticos e água destilada, que serviu de eletrólito, além de uma célula convencional contendo três eletrodos: uma grade de platina usada como contraeletrodo, Ag/AgCl saturado como eletrodo de referência e a amostra como eletrodo de trabalho como está sendo mostrado na figura 38.

Figura 38 - Célula eletroquímica utilizada na realização no ensaio potenciodinâmico.



Fonte: Imagem obtida pelos autores de trabalho.

As curvas de polarização foram obtidas por controle potenciodinâmico através do equipamento Autolab, modelo PGSTAT302N (figura 39), juntamente com o software NOVA, no Laboratório de Ensaio de Materiais do UniFOA. As curvas de polarização anódica foram obtidas a partir do potencial de circuito aberto (OCP) iniciando-se uma varredura de potencial em degraus de 0,03 V com velocidade de varredura de 0,001 V/s até o potencial de 1V partindo do OCP. Para cada amostra realizou-se duas curvas a fim de obter um padrão.

Figura 39 - Equipamento Autolab, modelo PGSTAT302N.



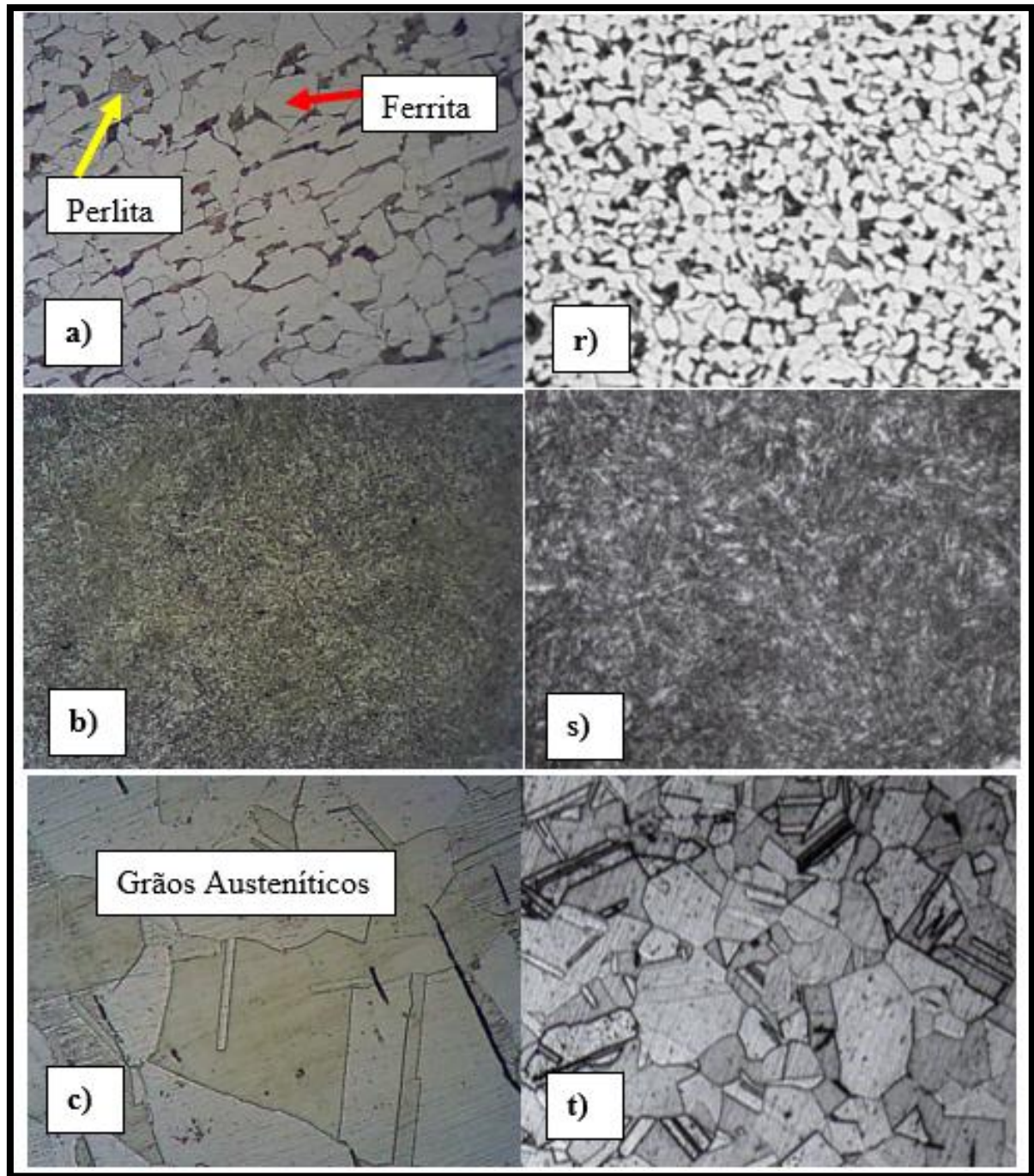
Fonte: Imagem obtida pelos autores de trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização microestrutural

Na figura 40 estão as imagens microestrutural das amostras captadas pelo microscópio óptico, as imagens (a), (b) e (c) são respectivamente referentes aos materiais SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304. A amostra do material SAE 1020 apresentou em sua microestrutura (a) ferrita e perlita (cementita + ferrita). Na amostra SAE 4340 o material apresentou em sua microestrutura (b) características de que sofreu o tratamento térmico de recozimento. A amostra do material AISI 304 apresentou em sua microestrutura (c) grãos austeníticos. Segundo Carmo Pellicari de Lima a imagem (r) representa o aço SAE 1020 atacado com nital 3% com aumento de 125x (LIMA, 2005). Colpaert mostra nas imagens (s) e (t) respectivamente os aços SAE 4340 e AISI 304, para o aço AISI 304 é mostrado os grãos austeníticos (COLPAERT, 2008).

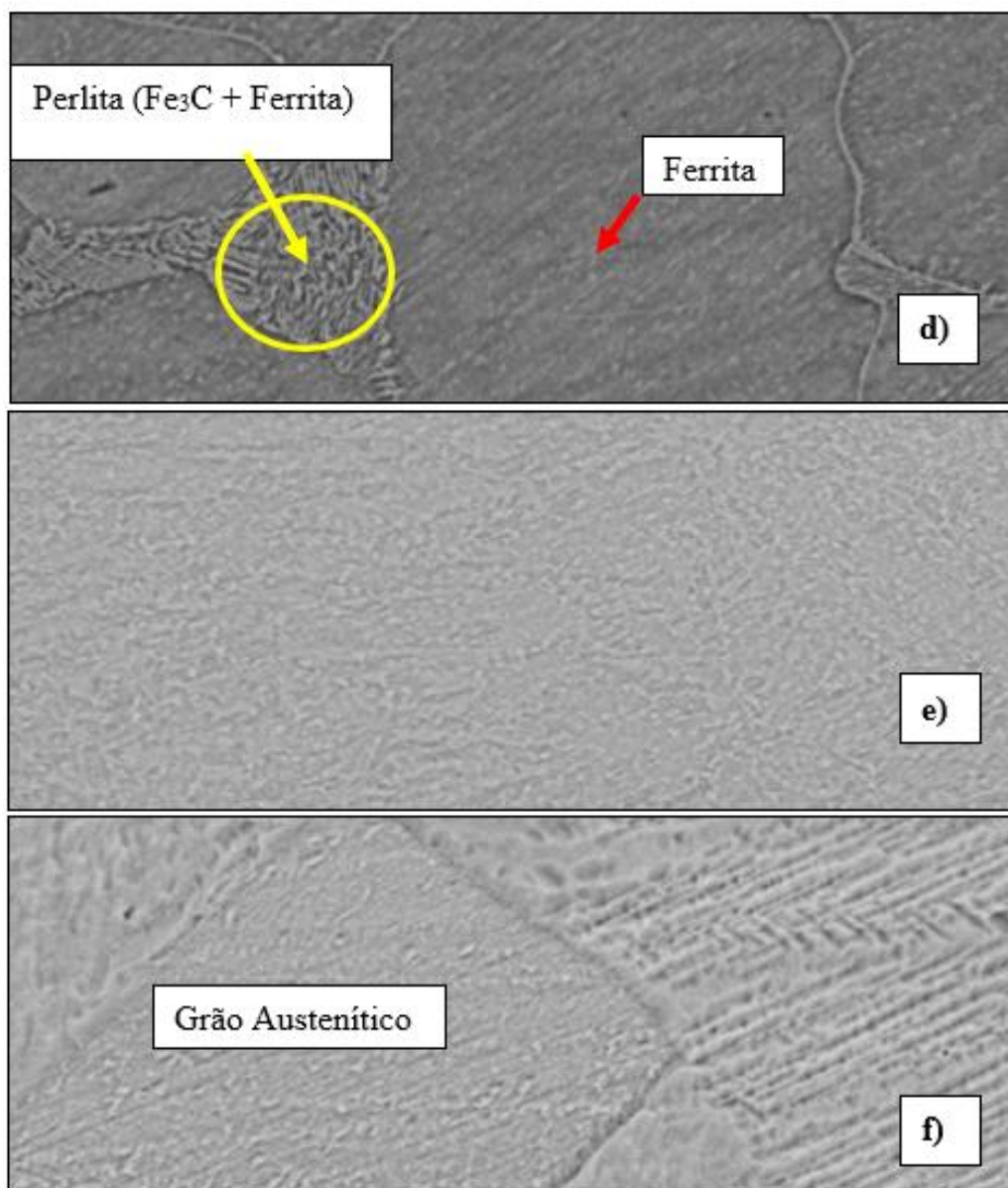
Figura 40 - Metalografia das amostras captadas pelo microscópio óptico em resolução de 400x para as imagens (a), (b) e (c). Imagens (r), (s) e (t) possuem outras referências.



Fonte: Imagens obtidas pelos autores de trabalho, laboratório de materiais, UniFOA 2017.

A figura 41 representa mais imagens microestrutural das amostras, captadas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), as imagens (d), (e) e (f) são respectivamente referentes aos materiais SAE 1020 e SAE 4340 e AISI 304. A amostra do material SAE 1020 (d) consegue visualizar com maiores detalhes da perlita, conseguindo destacar a ferrita (parte clara) da cementita (parte mais escura). Na amostra 4340 (e) consegue ter mais detalhes sobre a geometria dos grãos. E por fim a amostra 304 (f) se observa os grãos austeníticos.

Figura 41 - Metalografia das amostras captadas pelo MEV em ampliação de 3000X.



Fonte: Imagens obtidas pelos autores de trabalho, laboratório de materiais, UniFOA 2017.

## 4.2 Microdureza Vickers

A partir do ensaio de microdureza vickers foi analisado a dureza superficial dos aços escolhidos para o presente trabalho. A tabela 16 mostra os valores obtidos para todas as amostras. Observa-se que o aço SAE 4340 apresentou o maior valor de dureza sendo sua média igual a 263,4 HV. Em um trabalho apresentado por Freitas (FREITAS, 2016) foi obtido o valor de 257 HV para dureza do aço SAE 4340 após tratamento de recozimento por 3h, este valor está bem próximo ao obtido no trabalho presente para o mesmo aço. Sendo um indicativo que o aço estudado apresentava uma estrutura recozida que é confirmada com a análise microestrutural (FREITAS, 2016). No estudo de Guedes Júnior e Ana Sobral o valor de dureza para o material AISI 304 se encontra em 182,8 HV (SILVIA & SOBRAL, 2002). Para o aço SAE 1020 o catálogo da SPACTRU indica um valor de 131 HB para aço normalizado (SPACTRU, 2010), o valor obtido para a amostra SAE 1020 é de 148,1 HV por volta de 141 HB.

Tabela 16 - Valor de dureza a ser considerado para cada amostra:

<b>Amostra</b>	<b>Durezas obtidas (HV)</b>	<b>Média aritmética (HV)</b>	<b>Desvio Padrão (HV)</b>	<b>Valor Considerado (HV)</b>
SAE 1020	146,2	148,1	1,5	148,1 $\pm$ 1,5
	149,9			
	148,3			
SAE 4340	261,5	263,4	1,5	263,4 $\pm$ 1,5
	263,7			
	265,1			
AISI 304	184,4	183,0	1,6	183,0 $\pm$ 1,6
	183,9			
	180,7			

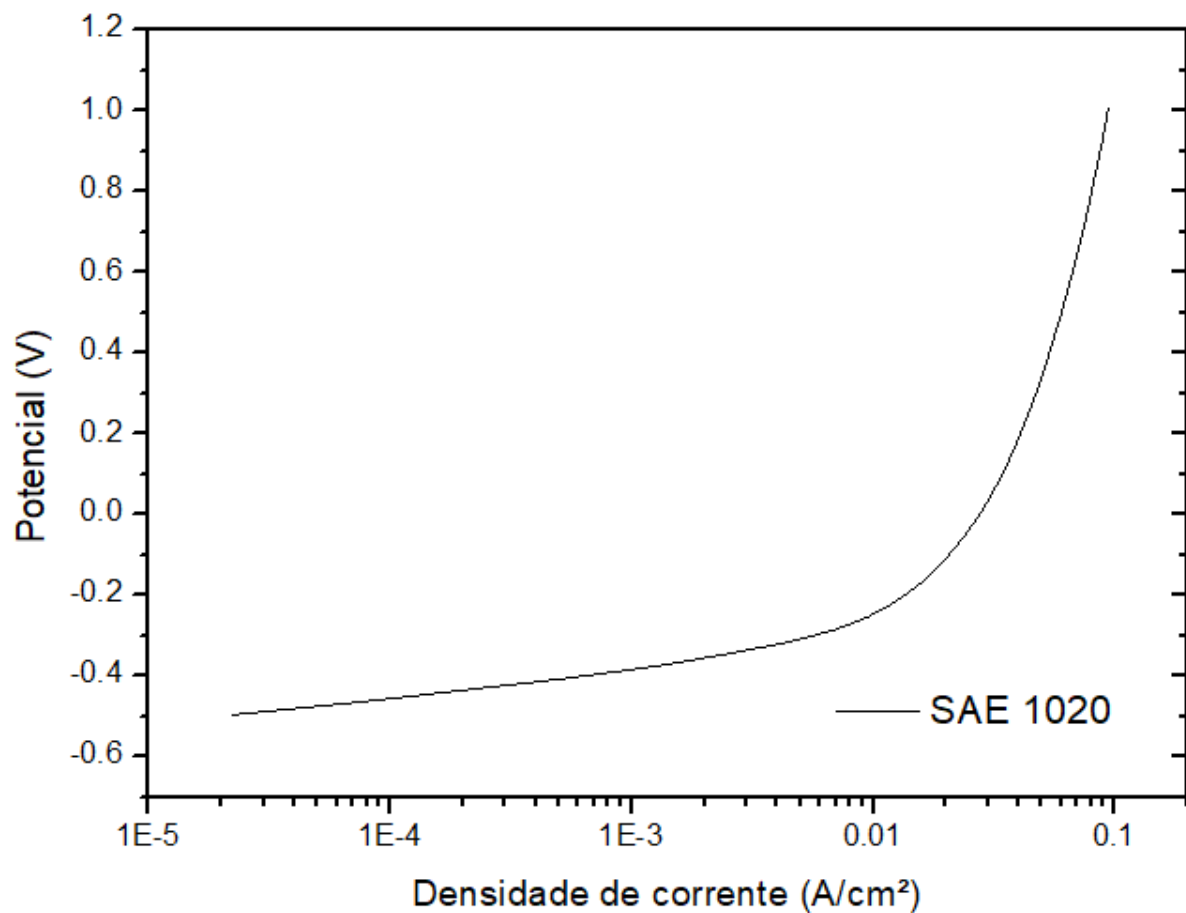
Fonte: Tabela obtida pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

### 4.3 Ensaio de polarização

#### 4.3.1 SAE 1020

A amostra do aço SAE 1020 teve o valor do potencial de corrosão de -0.49 V como mostra a figura 42, a curva exibida mostra que o material teve uma corrosão ativa, não apresentando nessa amostra uma linha de passividade do material logo em seguida.

Figura 42 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra SAE 1020.

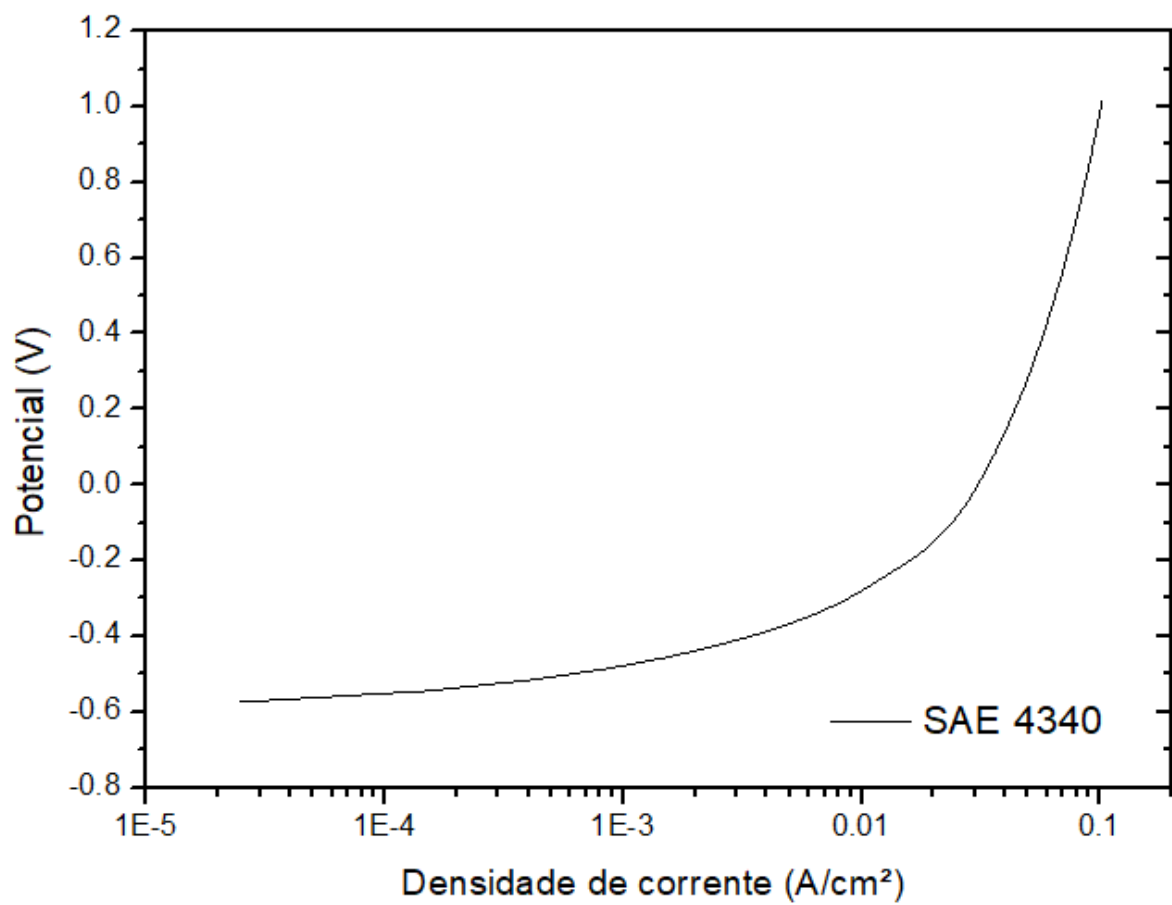


Fonte: Gráfico obtido pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

### 4.3.2 SAE 4340

A amostra do aço SAE 4340 teve o valor do potencial de corrosão de -0.57 V como mostra a figura 43, assim como na amostra do aço SAE 1020 a curva exibida mostra que o material teve uma corrosão ativa, não apresentando nessa amostra uma linha de passividade do material logo em seguida.

Figura 43 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra SAE 4340

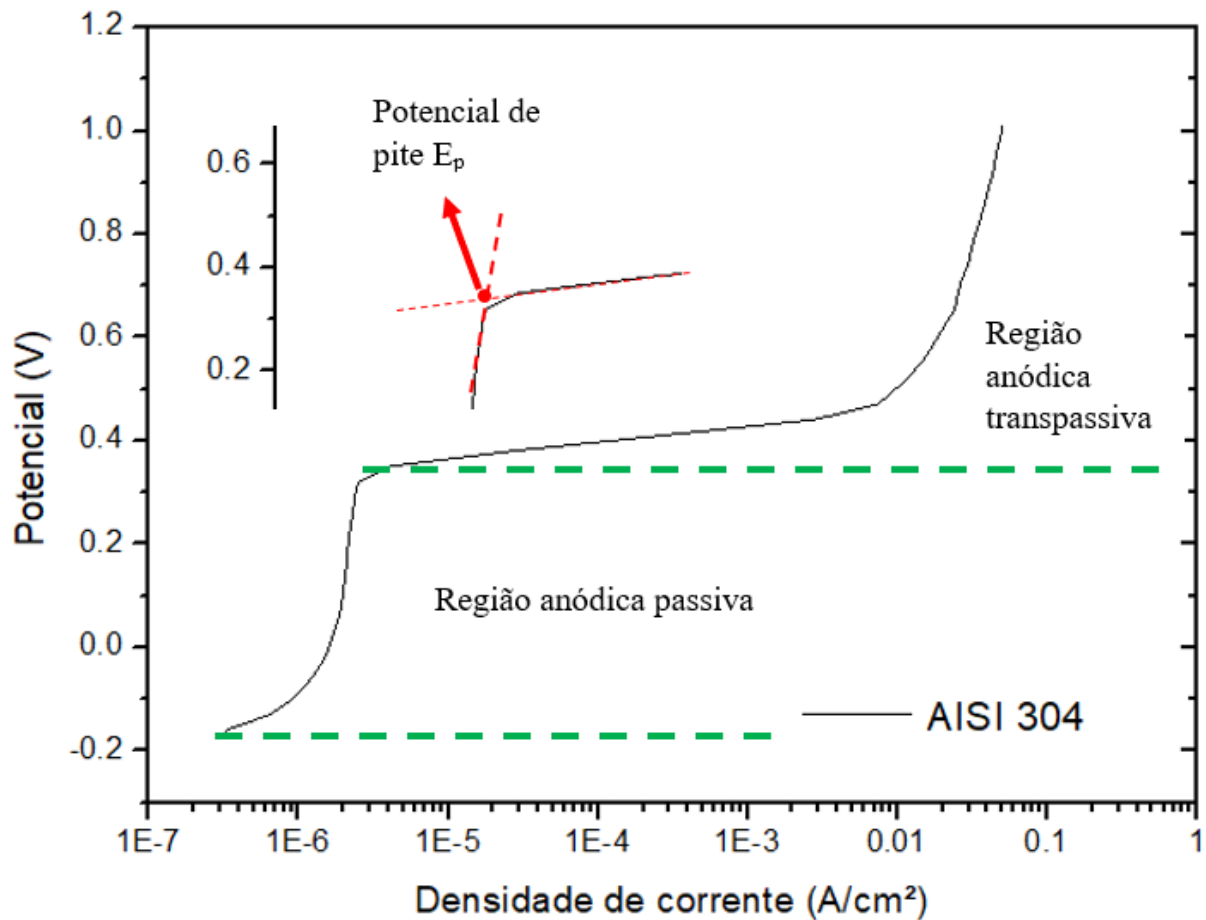


Fonte: Gráfico obtido pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

### 4.3.3 AISI 304

A partir da curva de polarização do aço AISI 304 observa-se que a região anódica passiva fica entre  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  de densidade de corrente ( $A/cm^2$ ). De acordo com Wolyneec (WOLYNEC, 2012) o potencial de pite é obtido a partir do ponto de transição da curva da região anódica passiva para a região anódica transpassiva. A partir do potencial de pite teve um aumento brusco da densidade de corrente causando um aumento da corrosão por pite no material. Para o aço AISI 304 o valor do potencial de corrosão foi de  $-0,16$  V e o valor do potencial de pite foi de aproximadamente  $0,38$  V, como mostra a figura 44.

Figura 44 - Curva de polarização, técnica potenciodinâmica, curvas anódica, amostra AISI 304.



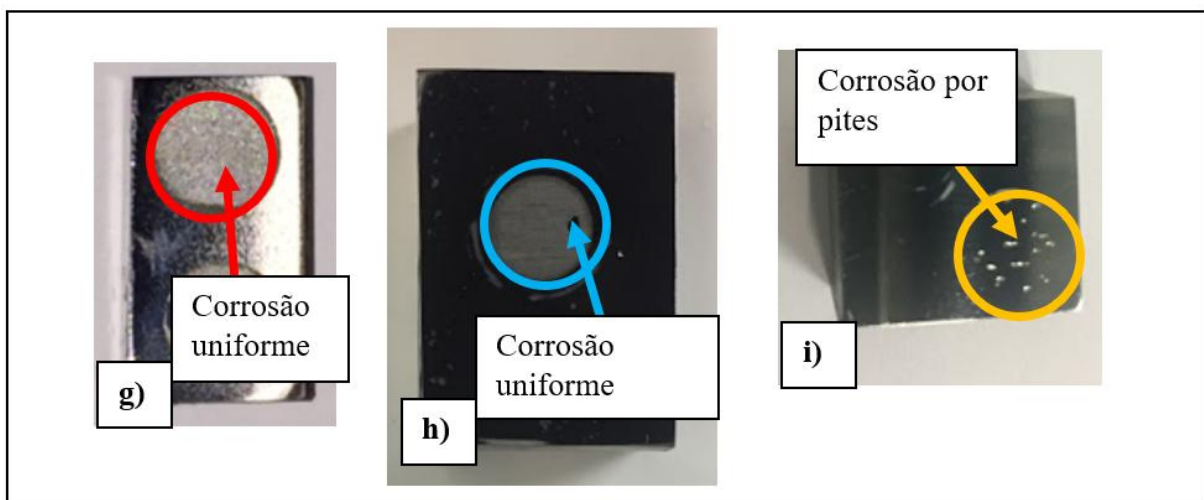
Fonte: Gráfico obtido pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

Através da figura 29, Wolyneec diz que o aço 304 sofre corrosão por pite, apresentando um potencial de pite de +0,15 V(ECS) e um potencial de corrosão de -0,19 V(ECS). O ensaio aconteceu em solução 3,5% NaCl porém em parâmetros diferentes do estudo apresentado na figura 44 (WOLYNEEC, 2012).

#### 4.4 Amostras depois que foram submetidas ao ensaio de polarização

As amostras após serem submetidas ao ensaio de polarização apresentaram mudanças superficiais. Os materiais que se encontravam polidos (antes do ensaio) corroeram como está sendo mostrado na figura 45, a imagens (g), (h) e (i) são respectivamente as amostras dos materiais SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304. A imagem (g) e (h) apresentaram corrosão uniforme em toda superfície que esteve em contato com o eletrólito. A imagem (i) apresentou corrosão na forma de pites na área que estava em contato com eletrólito.

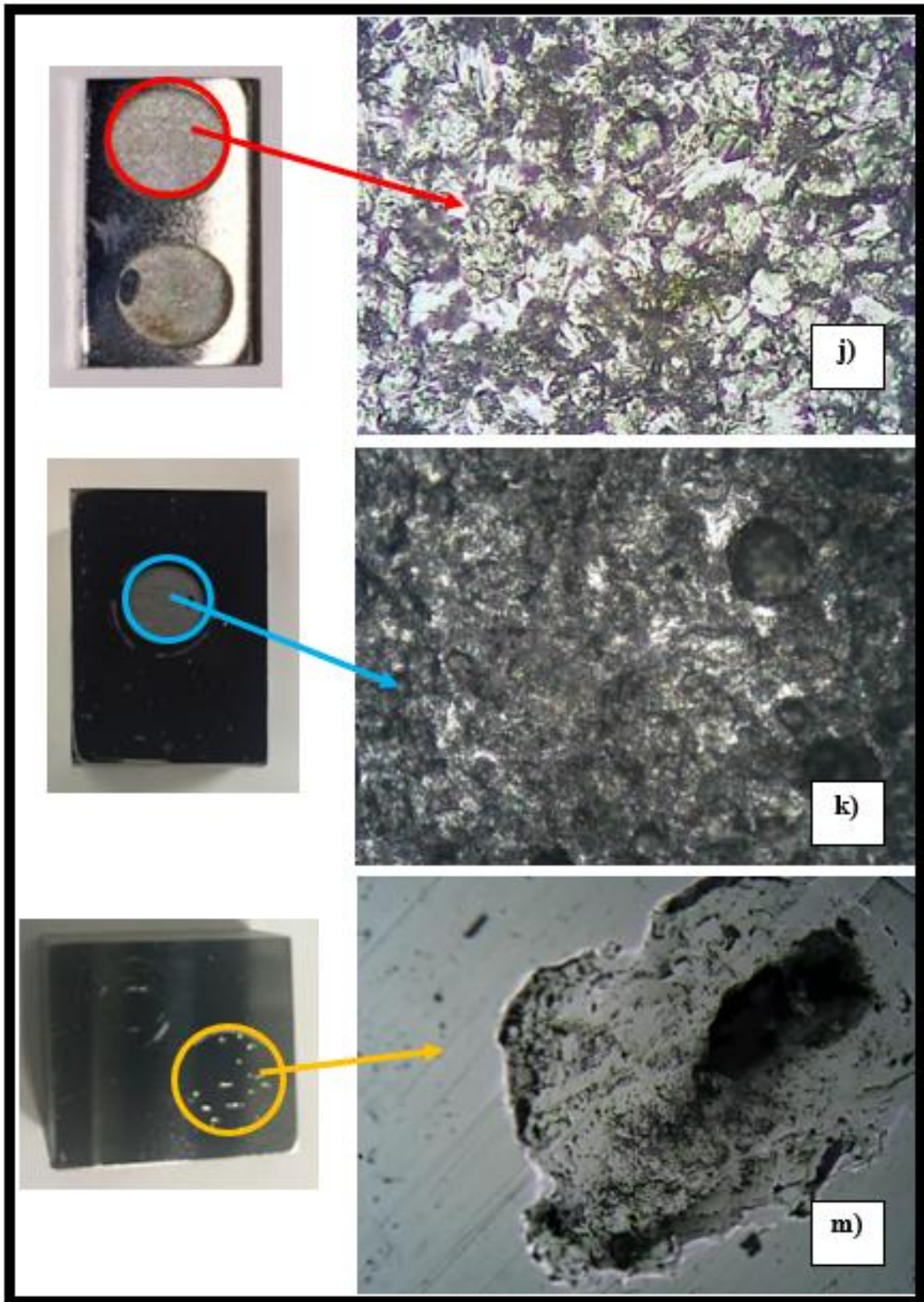
Figura 45 - Fotos das amostras após serem submetidas ao ensaio de polarização.



Fonte: Imagens obtidas pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

A figura 46 mostra imagens (j), (k) e (m) que representam respectivamente os materiais SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304 após serem submetidas ao ensaio de polarização. Apesar das amostras dos materiais SAE 1020 e SAE 4340 apresentarem corrosão uniforme, a degradação da amostra SAE 4340 se apresentou mais severa como é mostrado na imagem (k). A corrosão da amostra do material 304 (m) mostra uma corrosão localizada sob a forma de pite.

Figura 46 - Imagens das amostras após sem serem submetidas ao ensaio de polarização, com ampliação de 400x, obtidas por microscópio óptico no laboratório do UniFOA.

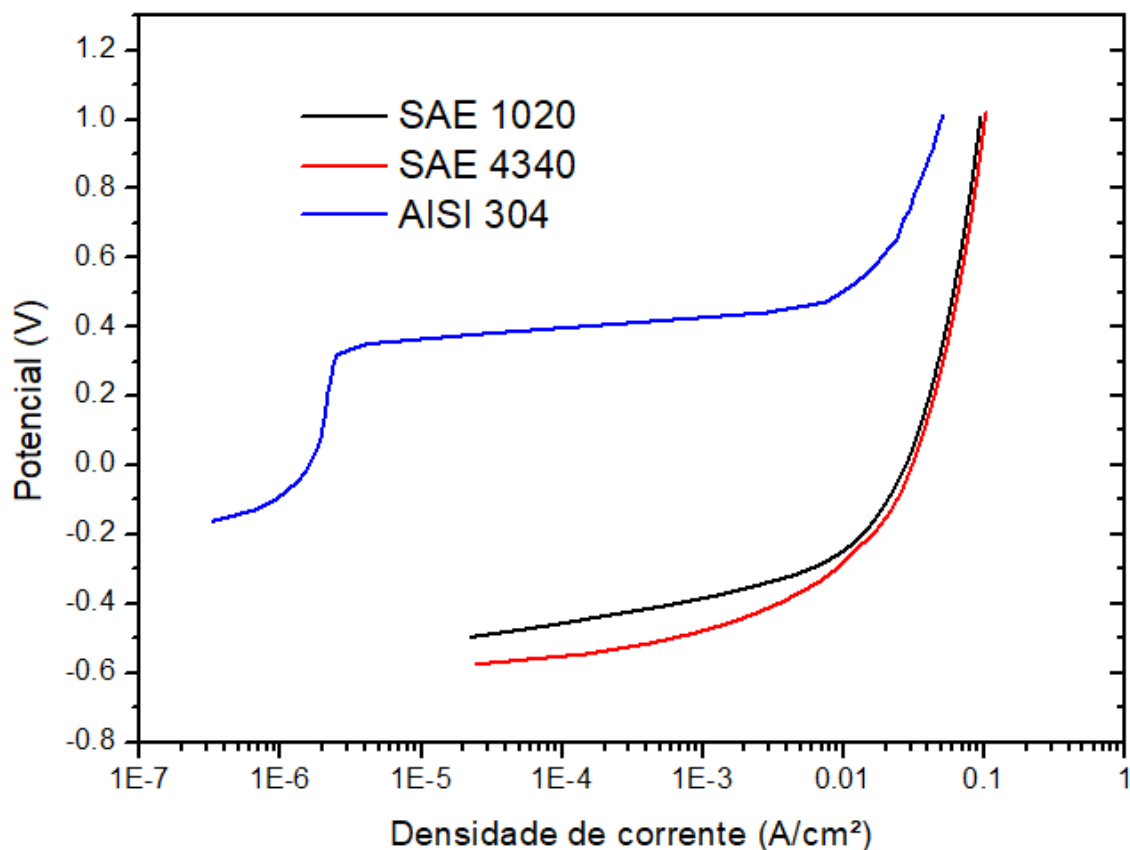


Fonte: Imagens obtidas pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

#### 4.5 Comparativo entre as curvas da região anódica do ensaio de polarização.

A figura 47 mostra as curvas de polarização das três amostras (SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304) juntas. É possível observar que as amostras de material SAE 1020 e SAE 4340 apresentaram uma variação da densidade de corrente alta para os primeiros valores de potencial, ou seja, quando comparados a amostra do aço AISI 304 esses materiais tiveram em pouca variação de potencial um aumento brusco da densidade de corrente. Além disso, observa-se que a amostra SAE 1020 apresentou um potencial maior em toda região de corrosão ativa quando comparada a amostra SAE 4340. Esta diferença está de acordo com a figura 46, que mostra as imagens (j) e (k) obtidas dessas amostras após o ensaio de polarização, onde observa-se que a amostra SAE 4340 apresentou uma maior deterioração em relação a amostra SAE 1020.

Figura 47 - Curvas de polarização por controle potenciodinâmico, curvas anódica.



Fonte: Gráficos obtido pelos autores desse trabalho, UniFOA 2017.

## 5 CONCLUSÃO

Através da análise das curvas foi possível compreender que o aço que apresentou o maior potencial de corrosão e valores menores de densidade de corrente foi o aço AISI 304, como já era esperado por possuir maior nobreza dentre as amostras averiguadas.

Os aços SAE 1020 e SAE 4340 tiveram potencial de corrosão de -0,49 V e -0,57 V respectivamente. Enquanto o aço AISI 304 teve seu valor de potencial de corrosão de -0,16 V.

O aço AISI 304 apresentou corrosão em forma de pites e sendo o único por apresentar potencial de pite (0,38 V). Foi detectado uma característica desse material, de apresentar região passiva e transpassiva e ter a passividade entre os valores de  $10^{-6}$  e  $10^{-5}$  de densidade de corrente ( $A/cm^2$ ).

Os aços SAE 1020 e SAE 4340 sofreram uma corrosão uniforme. Em comparativo entre esses dois materiais, o aço 4340 apresentou maior corrosão. Os valores de potencial do aço 4340 sempre se mantiveram abaixo dos valores de potencial do aço 1020 durante o período analisado.

## 6 SUGESTÕES FUTURAS

- ✓ Realizar o ensaio de polarização cíclica nos aços SAE 1020, SAE 4340 e AISI 304 utilizando uma concentração maior de NaCl.
- ✓ Realizar o ensaio de polarização para obtenção da região catódica da curva para os mesmos materiais, utilizando uma solução semelhante de 3,5% de NaCl.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/SAE J403:2001 – Composição Química dos Aços-carbono Comuns

ABNT/SAE J404:2000 – Composição Química dos Aços-carbono Ligados

ASM HANDBOOK, **Vol. 09 Metallography and Microstructures**, ASM International The Materials Information Company, 2004.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**, 9ª Edição. LTC, 2016.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia Mecânica. Materiais de Construção Mecânica - Volume 3**. Pearson, 1995.

COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4ª Edição. Edgard Blucher, 2008.

DUTRA, A.; NUNES, L., **Proteção catódica – Técnica de combate à corrosão**. 5ª Edição. Interciência, 2011.

EAD Eng<sup>a</sup> Materiais, **Catálogo técnico TESTMAT**

FREITAS, B. M., **Comparativo da microestrutura e da microdureza no aço 4340 a diferentes tempos de recozimento**, CONTECC, 2016.

GARCIA, A. **Ensaio de Materiais**. 2ª Edição. LTC, 2012.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6ª Edição. LTC, 2011.

GERDAU, Manual de Aços edição atualizada, 2003.

J. A. A. Guedes Júnior, H. S. Silva e Ana V. C. Sobral, **Estudo das propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis 304 e 434**. UFRN, 2002.

KESTEMNBACH, H.; BOTA FILHO, W. J. **Microscopia eletrônica de transição e varredura**. Associação Brasileira de Metais, 1994.

LIMA, C. R. P., **Introdução à metalografia dos aços carbono**, UNICAMP, 2005.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos Materiais - Uma introdução**. E-papers Serviços Editoriais, 2002.

MOREIRA, C., **Revista de Ciência Elementar**, 2013.

NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**. v.11, 901-909, 1987.

NUNES, L.P. e LOBO, A.C.O., **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**, Interciência, 2012.

RODRIGUES, L. M.; SANTOS, C. H. R.; VELOSO, R. R.; LEMOS, M. V.; SANTOS, C.; CABRAL, R. F. **Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060**. Edição Especial. Cadernos UniFOA, 2014.

SAE J405: Chemical Compositions of SAE Wrought Stainless Steels

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear**, 2001.

SILVA, A. L., MEI, P. R., **Aços e Ligas Especiais**. 3ª Edição. Edgard Blucher, 2010.

SOUZA, R. C., **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com carbeto de tungstênio pelo sistema HVOF/HP**, 1998.

SPECTRU, **Aços para construção mecânica**. Disponível em:

<<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/Nova%20pasta2/ACOCM.pdf>>

**TOLENTINO, N. M. C., Processos Químicos Industriais - Matérias-Primas, Técnicas de Produção e Métodos de Controle de Corrosão. Érica, 2015.**

**WOLYNEC, S. Técnicas eletroquímicas em corrosão. 1ª Edição. EDUSP, 2003.**