

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANILO LUIZ SEGATO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ENCRUAMENTO EM AÇO
AISI 1020 NO POTENCIAL DE REPOUSO E TAXA DE CORROSÃO
EM ÁCIDO CLORÍDRICO 0,1 MOLAR E ÁCIDO NÍTRICO 0,1 MOLAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2013

DANILO LUIZ SEGATO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ENCRUAMENTO EM AÇO
AISI 1020 NO POTENCIAL DE REPOUSO E TAXA DE CORROSÃO
EM ÁCIDO CLORÍDRICO 0,1 MOLAR E ÁCIDO NÍTRICO 0,1 MOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Regis Junior

Co-orientadora: Prof^a. Sandra Mara Kaminski
Tramontin

PONTA GROSSA

2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa



Coordenação de Engenharia Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ENCRUAMENTO EM AÇO AISI 1020 NO
POTENCIAL DE REPOUSO E TAXA DE CORROSÃO EM ÁCIDO CLORÍDRICO 0,1
MOLAR E ÁCIDO NÍTRICO 0,1 MOLAR**

por

DANILO LUIZ SEGATO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr.Oscar Régis Junior

Orientador

Prof. Dr.Ivanir Luiz de Oliveira

Membro Titular

Prof. Dr.Denilson José Marcolino de Aguiar

Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Responsável pelos Trabalhos
de Conclusão de Curso

Prof. Dr. ThiagoAntoniniAlves
Coordenador do Curso de
Engenharia Mecânica

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

*“Se tiver o hábito de fazer as coisas com
alegria, raramente encontrará situações
difíceis.”*

Robert Baden-Powell

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Oscar Régis Junior, que me proporcionou o caminho a trilhar durante toda esta pesquisa, desde a seu projeto e concepção até o seu término, com calma e paciência me instruindo e aconselhando para concluir mais esta etapa.

Agradeço a professora Sandra Mara Kaminsk pela co-orientação no trabalho, orientando na parte laboratorial de ensaios e amostras, e pela atenção e ajuda na correção e aprofundamento na área de materiais.

Agradeço ao Professor Dr. Alfredo José Zara, pelo acompanhamento e instrução para elaboração dos ensaios eletroquímicos na UEPG, e conhecimentos que vieram a somar no trabalho.

Agradeço ao apoio na parte laboratorial da UEPG e UTFPR-PG.

Agradeço aos meus pais Eder Francisco Segato e Elizabeth Schrann Segato, pela educação, apoio e amor que me proporcionaram ao longo de toda a vida.

Agradeço a meu irmão Daniel Francisco Segato por me mostrar e influenciar na escolha do fascinante mundo da Engenharia Mecânica.

Agradeço aos meus amigos e familiares que entenderam a minha ausência durante o projeto e mesmo assim continuaram a me apoiar.

Agradeço aos amigos de universidade, que juntamente com muito estudo e discussões vieram a ajudar a moldar meu conhecimento.

Agradeço a Deus por ter me dado a sabedoria e a perseverança para não desistir perante os desafios.

RESUMO

Segato, Danilo L. **Análise da influência do grau de encruamento em aço AISI 1020 no potencial de repouso e taxa de corrosão em ácido clorídrico 0,1 molar e ácido nítrico 0,1 molar.** 2013. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2013.

O presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, e na Universidade Estadual de Ponta Grossa, campus Uvaranas, sendo este de caráter experimental. O setor metalúrgico e mecânico tem como um grande problema econômico e de riscos de segurança a corrosão de materiais, onde preferencialmente se apresenta em aços. Desde sua concepção até o uso em fabricação de peças, o aço passa por processos térmicos e mecânicos que alteram sua microestrutura e influenciam em seu desempenho, confiabilidade e segurança futura. Relacionando estas duas situações comuns na área mecânica, o trabalho propôs o estudo do aço AISI 1020 encruado a partir do ensaio de tração, com valores de alongamento de 0, 10, 15, 20, 25% de seu comportamento inicial. Essas amostras serão caracterizadas micrograficamente e através de ensaios eletroquímicos em ácido clorídrico e ácido nítrico analisadas a influência do encruamento no potencial de repouso e taxas de corrosão deste material. Esta pesquisa vem ajudar a prever o comportamento do aço em um certo tipo de condição de fabricação e utilização, de modo a ajudar no controle, prevenção e projeto específico de peças, para evitar corrosão e prolongar a vida útil de um material

Palavras-chave: Corrosão eletroquímica, potencial de repouso, taxa de corrosão, aço AISI 1020, encruamento.

ABSTRACT

Segato, Danilo L. **Analysis of resting potential and corrosion rate in a chemical media for a AISI 1020 steel subjected to hardening process.**2013. 55p.

Conclusion Course Paper (Mechanical Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa. 2013.

This graduation thesis was developed in the laboratories of the Federal Technological University of Paraná, Ponta Grossa campus, and State University of Ponta Grossa, Uvaranas campus, this research is about experimental basis. The mechanic and metalurgic sector has as its risks and biggest economic problem the corrosion, which is mainly found on steel. From the making to turning it into parts, the steel goes through termic and mechanic processes that changes its microstructure who directly influences the steel's future safety, behaviour and trust. Relating this two situations commonly found in mechanics, the work proposed the study on 1020 AISI steel coldworked on traction test, with elongations of 0, 10, 15, 20 and 25% from its first size. These tests will be micrographically characterized and through eletrochemical tests on acids analysed the influency of coldwork on the rest potencial and corrosiveness rate to this material. This research is willing to prevent the steel's behaviour in a certain tipe of facturing conditions and use, helping to control specific project of parts avoiding corrosion and extending the material's useful life estimation.

Keywords: Electrochemical Corrosion, resting potential, corrosion rate, AISI 1020 steel, hardening process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Corpo de prova padrão, utilizado no ensaio de tração	18
Figura 2: Gráfico Tensão-Deformação	18
Figura 3: Representação de uma amostra de metal embutida preparada	21
Figura 4: Micrografia de aço AISI1020 em corte transversal. (500x, Nital)	21
Figura 5: Representação de uma Pilha de Corrosão Eletroquímica.....	24
Figura 6: Curvas de Polarização Anódica (i_a) e Catódica (i_c)	29
Figura 7: Taxas de Corrosão de um Metal Passivável	30
Figura 8: Fluxograma ordem e execução da pesquisa.....	33
Figura 9: Representação das amostras para micrografia.....	35
Figura 10: Potenciostato PGSTAT30	36
Figura 11: Termostato TC-501	36
Figura 12: Eletrodo de Referência de Calomelano Saturado	37
Figura 13: Contra Eletrodo de Platina	37
Figura 14: Eletrodo de Trabalho.....	37
Figura 15: Célula Eletrolítica utilizada no ensaio eletroquímico	38
Figura 16: Micrografias do Aço AISI1020 com alongamentos em 0,10, 15, 20, 25% do comprimento inicial (Nital)	40
Figura 17: Gráfico do potencial de repouso em função do tempo em solução de HCl	41
Figura 18: Gráfico do potencial de repouso em função do tempo em solução de ácido nítrico (HNO_3)	42
Figura 19: Representação gráfica do ensaio de micropolarização no ácido clorídrico (HCl).....	43
Figura 20: Representação gráfica do ensaio de micropolarização em solução de ácido nítrico (HNO_3)	44
Figura 21: Representação gráfica do ensaio de macropolarização em ácido clorídrico (HCl).....	45
Figura 22: Representação gráfica do ensaio de macropolarização em solução de ácido nítrico	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Química do Aço AISI 1020	16
Tabela 2: Potenciais de eletrodos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio	26
Tabela 3: Valores de Potencial de Repouso em relação ao tempo na solução de ácido clorídrico	41
Tabela 4: Valores de Potencial de Repouso em relação ao tempo na solução de ácido nítrico	42
Tabela 5: Valores de E_{corr} , R_p , β_a , β_c , i_{corr} , I_{corr} e Tx_{corr} em solução de ácido clorídrico	46
Tabela 6: Valores de E_{corr} , R_p , β_a , β_c , i_{corr} , I_{corr} e Tx_{corr} em solução de ácido nítrico ...	46

LISTA DE SIGLAS

- AISI – *American Iron and Steel Institute*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- DDP – Diferença de Potencial
- HCl – Ácido Clorídrico
- HNO₃ – Ácido Nítrico
- ABRACO – Associação Brasileira de Corrosão
- DCE – Dupla Camada Elétrica
- P.A. – Peso atômico
- ECS – Eletrodo de calomelano saturado
- CT – Contra eletrodo
- ET – Eletrodo de trabalho
- ER – Eletrodo de referência

LISTA DE SÍMBOLOS

i_{corr} – Corrente de corrosão

I_{corr} – Corrente de corrosão por cm^2

β_a – Coeficiente de Tafel anódico

β_c – Coeficiente de Tafel catódico

Tx_{corr} – Taxa de corrosão ou taxa de penetração

F – Constante de Faraday

R_p – Resistencia a polarização

A – Área do eletrodo de trabalho em contato com o eletrólito

n – Números de elétrons transferidos

d – Densidade do material do eletrodo de trabalho

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 AÇO AISI 1020.....	16
2.2 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO DO AÇO.....	17
2.2.1 Recozimento	17
2.2.2 Ensaio de Tração	17
2.2.3 Encruamento	19
2.2.4 Caracterização por Micrografia	20
2.3 AMBIENTES CORROSIVOS	22
2.4 CORROSÃO	23
2.4.1 Corrosão Eletroquímica.....	23
2.4.2 Velocidade de Corrosão.....	24
2.4.3 Eletrodo e Potencial de Eletrodo	25
2.4.5 Potencial de Repouso	28
2.4.6 Polarização	28
2.4.7 Passivação.....	29
2.4.8 Taxa de Corrosão.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4 METODOLOGIA	34
4.1 CONFECÇÃO E ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
4.2 CARACTERIZAÇÃO POR MICROGRAFIA	35
4.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS	36
5 RESULTADOS E ANÁLISES	40
5.1 MICROGRAFIAS.....	40
5.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS	41

6	CONCLUSÕES	47
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

O projeto de um componente ou uma máquina necessita do conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais a serem utilizados. Com o objetivo de investigar e obter informações das propriedades mecânicas e seu comportamento sob possíveis condições de esforços submetidos aos materiais a serem trabalhados, ensaios são realizados a partir de métodos normatizados.

No caso de um dos materiais mais utilizados na indústria mecânica, o aço, o ensaio permite a obtenção de informações rotineiras, tornando acessível o desenvolvimento de novos materiais, processos e também novos tratamentos.

Os aços compõem o grupo dos materiais metálicos mais utilizados na indústria, em aplicações que abrangem uma gama enorme, como a indústria automobilística (bielas, polias, caixa de câmbio), eletrodoméstica (buchas, batedeiras, ventiladores), e muitas outras. Um dos seus grandes diferenciais diante de outros materiais metálicos deve-se, às suas propriedades mecânicas sem qualquer elemento de liga, ser suficiente para atender a maioria das aplicações práticas.

Apesar da diversidade de materiais com suas propriedades e características presentes na indústria, há um problema que assola os metais metálicos, a corrosão. Prejuízos causados pela corrosão oscilam em torno de 3 a 4% do PIB de um país. Ao se tratar de corrosão de aço, estima-se que seja destruído cerca de 25% de toda a produção mundial de aço por um ano, equivalente de 5 a 7 toneladas por segundo (GEMELLI, 2001).

O conceito de corrosão tem sido definido como uma forma de degradação dos metais, como a reação do metal com elementos do seu meio, tendo uma mudança gradual em um ou vários compostos químicos, sendo geralmente óxidos ou sais. Ao ocorrer isto, o metal tem reduzido algumas de suas qualidades essenciais, como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e o produto gerado é relativamente baixo em comparação a estas propriedades (RAMANATHAM, 2002).

Para compreender e melhor evitar esse sério fenômeno que afeta a vida útil de matérias e máquinas em todos os tipos de condições climáticas e regiões, existe uma diversidade de estudos e ensaios padronizados com o intuito de simular condições severas de aplicações dos metais. Esses ensaios surgiram com o objetivo de prever o comportamento dos materiais em certas condições, sendo de extrema

utilidade prevenir e projetar formas de retardar e reduzir a corrosão, de modo tal a prolongar em um material ou máquina seu tempo de vida útil.

O trabalho objetiva detectar e analisar a influência do Aço AISI 1020 encruados a partir de ensaio de tração, em relação ao potencial de repouso e taxa de corrosão em dois meios ácidos, ácido clorídrico (HCl) e o ácido nítrico (HNO₃).

1.1 OBJETIVO

Os materiais acabados sofrem durante sua fabricação deformações inerentes aos seus processos. Estas deformações alteram as características metalúrgicas do material, ocasionando com que a vida útil deste material sofra mudanças.

Este estudo pretende relacionar o quanto o encruamento influencia na variação do potencial de repouso e taxa de corrosão do aço AISI 1020 em meio ácido, de modo a comparar informações referente a suas influências na vida útil do material.

Esta pesquisa tem como objetivo geral determinar o potencial de repouso e a taxa de corrosão, em meio corrosivo de ácido clorídrico e ácido nítrico, de peças de aço AISI 1020 submetidas a um processo de encruamento por tração.

O trabalho propõe a submissão de corpos de prova ao ensaio de tração, sendo cinco corpos, com os seguintes graus de alongamento: 0 (sem tracionamento) , 10, 15, 20 e 25% em relação ao comprimento inicial, submetendo cada corpo de prova no ensaio eletroquímico para análise do potencial de repouso e determinação da taxa de corrosão, nos meios corrosivos de ácido clorídrico e ácido nítrico e posterior comparação e análise dos resultados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AÇO AISI 1020

Aço comum ou também conhecido como aço carbono, consiste de uma liga de ferro carbono, geralmente contendo de 0,008 a 2% de carbono, além de alguns elementos resultantes do processo de fabricação como o Manganês (0,3 a 0,6%), silício (0,1 a 0,3%), fósforo (até 0,04%), enxofre (até 0,05%) e ferro (CALLISTER, 2002).

Esses elementos resultantes do processo são normalmente especificados da seguinte forma e tem os seguintes efeitos:

- Carbono (C): Responsável pela dureza do material em recozimento e normalização e pela sua temperabilidade. Ocorre o endurecimento do ferro pela têmpera pelo motivo da formação da martensita.
- Silício (Si): Neste caso de concentração é um elemento desoxidante, neutralizando a ação de óxido de carbono.
- Manganês (Mn): Elemento desoxidante e dessulfurante, e ao se combinar com o enxofre, forma sulfeto de manganês, eliminando a fragilidade a quente que pode ocorrer.
- Fósforo (P): Junto com o enxofre é considerado elemento nocivo, fragilizando a frio, diminuindo a resistência ao choque à temperatura ambiente do material.
- Enxofre (S): Reduz a tenacidade do aço, às vezes causando desintegração devido a formação de fissuras no caso de forjamento ou laminação.

No caso da composição química do aço em estudo, o Aço AISI 1020, se tem a tabela a seguir:

Tabela 1: Composição Química do Aço AISI 1020
Fonte: Adaptada Gentil (1996)

AÇO	C%	Mn%	Si%	P (max)	S (max)
1020	0,18 a 0,25	0,3 a 0,6	0,1 a 0,3	0,04	0,05

Segundo Callister (2002), o material em estudo é considerado um aço de baixo teor de carbono, tendo como característica microestrutural os microconstituintes ferrita e perlita, apresentando relativamente baixa dureza e resistência mecânica, possuindo boa ductilidade e tenacidade. Suas principais características mecânicas são sua fácil usinabilidade, alta tenacidade, baixa dureza e de ampla aplicação na indústria mecânica em geral como peças comuns devido seu baixo custo.

2.2 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO DO AÇO

2.2.1 Recozimento

Recozimento consiste em um tratamento térmico onde um material é exposto a uma temperatura elevada por um período de tempo avançado, sendo seguidamente resfriado por um longo espaço de tempo. Se objetiva com o recozimento do metal, o alívio de tensões, aumento da maciez, ductilidade e tenacidade, e a produção de uma microestrutura específica.

O processo de recozimento passa por três estágios, onde o primeiro se refere ao aquecimento do metal até a temperatura desejada, o segundo consiste a manutenção da temperatura, e o último estágio é o resfriamento do material até a temperatura ambiente. Um parâmetro importante neste procedimento é o tempo. O tempo de recozimento necessita ser longo para permitir quaisquer reações de transformações, e evitar tensões internas que podem levar ao empenamento ou até um trincamento (CALLISTER, 2002).

2.2.2 Ensaio de Tração

Segundo Filho (1958), o ensaio de tração consiste na submissão de um corpo de prova na direção axial a um esforço de tração até a sua ruptura ou alongamento desejado.

O ensaio de tração consiste em prender um corpo de prova (figura 1) pelas suas extremidades, e aplicar uma carga, medindo continuamente e simultaneamente a carga instantânea aplicada e os alongamentos resultantes, sendo o alongamento

medido a partir de um extensômetro. A norma onde consiste este ensaio é a ASTM E8M-04 (CALLISTER, 2002).

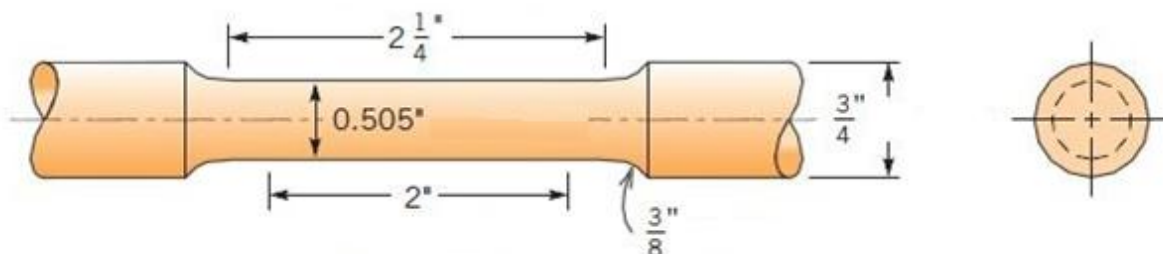


Figura 1: Corpo de prova padrão, utilizado no ensaio de tração
Fonte: Adaptado Callister (2002)

O ensaio de tração do aço tem como resultado, um tipo de diagrama, sendo dividido de modo didático em regime elástico e regime plástico, sendo mais conhecido como gráfico tensão-deformação (figura 2). No gráfico a seguir há 4 pontos e regiões, onde no ponto 1, se tem o limite de resistência; no ponto 2 é onde ocorre a tensão de escoamento; no ponto 3 se tem a tensão de ruptura do material; na região 4 é a região de encruamento; e na região 5, é a região de estrição do material.

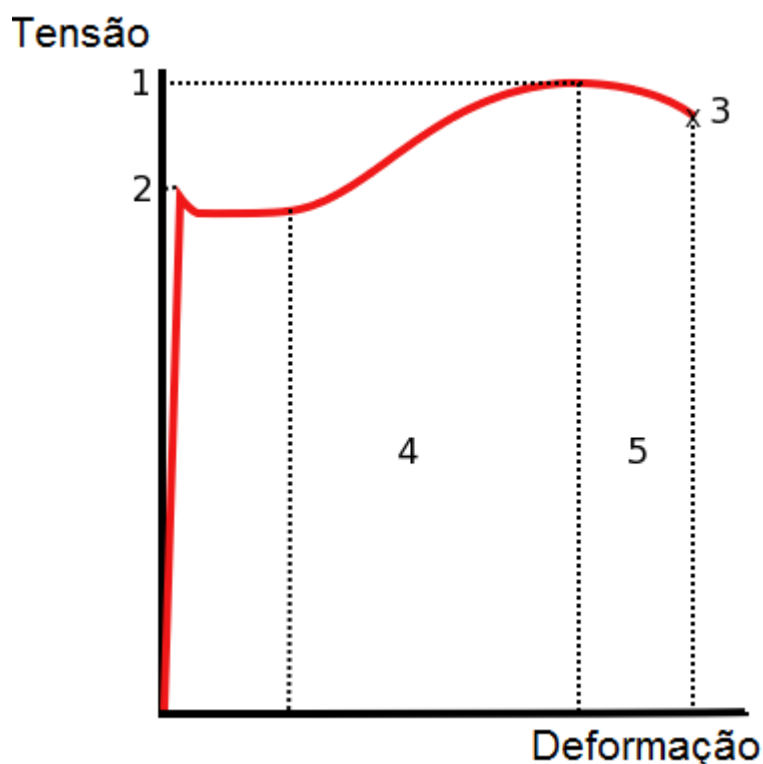


Figura 2: Gráfico Tensão-Deformação
Fonte: Adaptado Mello (2008)

O regime elástico, onde tem como atuante a deformação elástica, é caracterizada por não ser permanente, significando que ao ser liberada a carga de aplicação, a peça retornará a sua forma original. Em outras palavras, durante esse regime a tensão e a deformação são proporcionais, caracterizando uma reta no gráfico tensão-deformação (MELLO, 2008).

O regime plástico é o regime onde essa pesquisa irá estudar no aço, se fazendo deste modo importante e extremamente relevante para o prosseguimento deste trabalho. Ocorrerá deformação plástica quando a tensão não for mais proporcional à deformação, ocorrendo uma deformação permanente no material (MELLO, 2008).

Segundo Callister (2002), a deformação plástica devido às discordâncias “corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações, com novos átomos vizinhos, uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se move em relação uns aos outros”.

2.2.3 Encruamento

Materiais metálicos ao serem deformados a frio apresentam o fenômeno do encruamento. Este fenômeno é definido como o aumento da resistência mecânica devido à deformação, decorrente de modificações sub e microestruturais. Encruamento também é chamado de trabalho a frio pelo motivo de a temperatura em que ocorre a deformação é extremamente menor que à temperatura absoluta de fusão o metal (MELLO, 2008).

A deformação plástica em metais se deve pelo deslizamento das discordâncias em planos de escorregamento. Com o acréscimo da quantidade de discordâncias dificulta-se o seu movimento, explicando o endurecimento causado pelo encruamento (CALLISTER,2002).

Segundo Mello (2008) “a maioria da energia gasta na deformação de um metal por trabalho a frio é convertida em calor.” Uma pequena porcentagem desta energia gasta é acumulada em sua estrutura na forma de defeitos cristalinos, ocasionando aumento da energia interna do metal.

Levando em consideração as propriedades mecânicas, dureza, limite de escoamento e de resistência tem um aumento considerável com deformação aplicada. Porém, parâmetros de ductilidade, como alongamento e redução da área, e a tenacidade tem uma queda acentuada devido ao aumento da deformação aplicada.

Decorrente do trabalho a frio, ocorre mudanças em propriedades físicas do metal. É gerada uma pequena redução na densidade, um decréscimo considerável da condutividade elétrica e um pequeno acréscimo do coeficiente de expansão térmica. O encruamento acumula energia interna no material, elevando a reatividade química do metal, havendo a redução de sua resistência à corrosão (MELLO, 2008).

2.2.4 Caracterização por Micrografia

Segundo Colpaert (2008), a micrografia consiste em estudar produtos metalúrgicos, com um microscópio, para observar fases presentes e identificar o tamanho de grão do material (granulação), a natureza, a forma, quantidade e distribuição de diversos constituintes. Este processo permite a visibilidade microscópica do material, evidenciando os diversos grãos formados pelos seus processos de fabricação.

Para Colpaert (2008) as técnicas de um ensaio micrográfico consistem em:

- Escolha da seção da peça a ser estudada;
- Lixamento e polimento para obtenção de uma superfície plana e polida;
- Ataque com reagente químico na superfície preparada;
- Análise no microscópio e caracterização da amostra.



Figura 3: Representação de uma amostra de metal embutida preparada
Fonte: Autoria própria

Na figura 3 representa-se a amostra pronta para a sua análise metalográfica, destacando sua superfície polida para uma melhor visualização no microscópio e eliminação de falhas recorrentes do processo de preparação da amostra.



Figura 4: Micrografia de aço AISI1020 em corte transversal. (500x, Nital)
Fonte: Autoria própria

Na figura 4 temos a micrografia de um material cortado na seção transversal. Na análise conseguimos notar e caracterizar a diferença das formas de grãos do material, neste caso notando a presença de perlita e ferrita na amostra.

A importância deste processo se deve ao fato das propriedades mecânicas do metal não serem recorrente devido apenas a sua composição química, mas também a sua micrografia. Isso traz a tona que um mesmo tipo de aço pode possuir várias características, podendo se tornar mole, duro, elástico, tenaz, entre outros, dado a partir de tratamentos térmicos e trabalhos mecânicos realizados (COLPAERT, 2008).

Nesta pesquisa tem-se como um dos objetivos a análise da diferença entre os grãos de cada grau de deformação aplicado nos corpos de prova, e suas influências na taxa de corrosão no material em dois meios ácidos diferentes.

2.3 AMBIENTES CORROSIVOS

Ambientes corrosivos são ambientes onde os materiais são mais propícios a sofrerem oxidação devido a compostos inclusos. Os lugares mais recorrentes para este fenômeno compreendem a atmosfera, soluções aquosas, solos, ácidos, bases, solventes inorgânicos, sais fundidos, metais líquidos, e também o corpo humano. Devido à sua maior exposição, os ambientes atmosféricos e marinhos são os maiores responsáveis por deterioração de materiais devido à corrosão. A umidade presente nos ambientes contém oxigênio dissolvido, que atua como um dos principais agentes corrosivos, mas outros compostos como enxofre ou cloretos podem contribuir na oxidação de materiais (CALLISTER, 2002).

Nesta pesquisa tem-se como proposta a análise das amostras em dois meios corrosivos ácidos, sendo eles o de ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO₃), sendo eles comentados a seguir.

Segundo Shriver & Atkins (2006) o ácido clorídrico, HCl, é um ácido inorgânico forte, sendo obtido a partir do aquecimento a altas temperaturas do gás hidrogênio juntamente com o gás cloro, formando o HCl na forma gasosa. No meio industrial e laboratorial, tem-se uma gama de utilidades para o ácido clorídrico sendo utilizado nos processos de remoção de material oxidado (decapagem), acidificação de poços de petróleo, produção de cloretos metálicos, entre outras utilizações.

O ácido nítrico, HNO₃, forte oxidante e produto corrosivo, tem uma ampla utilização na indústria, sendo aplicado em combustível para foguetes, síntese de explosivos orgânicos, fertilizantes, sedas artificiais, fibras sintéticas, entre outras aplicações que o tornam um dos ácidos mais fabricados e consumidos no mundo. As

reações químicas desencadeadas pelo ácido nítrico o caracterizam como agente oxidante e de nitração (SHRIVER & ATKINS, 2006).

2.4 CORROSÃO

A corrosão se trata como um ataque ao material, devido ao meio em que se encontra. Este ataque deteriora, geralmente os metais, a partir de reações químicas, mudando gradualmente o metal em um ou vários compostos químicos, sendo óxidos ou sais. Ao ocorrer este fenômeno, o metal perde suas características essenciais, como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade, tornando este material inútil para uso (GENTIL, 1996).

O caso mencionado neste trabalho será a corrosão eletroquímica, onde tem seu início na superfície do material.

2.4.1 Corrosão Eletroquímica

De acordo com Régis Júnior (2011) grande parte de processos corrosivos são de ordem eletroquímica. O que faz característico é que ele só é verificado em presença de um eletrólito. Representando assim, uma situação onde duas ou mais reações eletroquímicas diferentes ocorrem de modo simultâneo e espontâneo, sendo ao menos uma reação de natureza anódica e outra catódica. Estes fenômenos demonstram o funcionamento de uma pilha de corrosão (figura 5), sendo o sistema dois eletrodos em contatos com um fio condutor e imersos em um eletrólito.

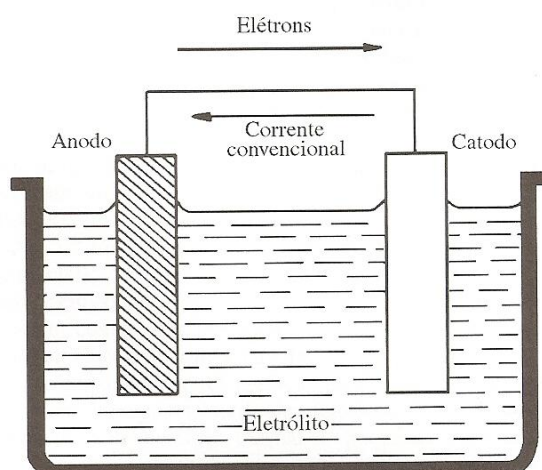


Figura 5: Representação de uma Pilha de Corrosão Eletroquímica
Fonte: Gentil (1996)

Cada componente tem sua função específica Gemelli (2001):

- **Ânodo:** Eletrodo onde ocorre oxidação. A corrente elétrica no formato de íons metálicos sai do ânodo e entra na solução.
- **Cátodo:** Eletrodo onde ocorre a redução. A corrente elétrica deixa o eletrólito ou é consumida na superfície do eletrodo através da reação de redução.
- **Eletrólito:** Condutor iônico em contato simultâneo com as mesmas áreas por onde fluem os íons resultantes de ambas as reações.
- **Condutor ou circuito metálico:** Ligação metálica de baixa resistividade onde une ambas as áreas e através dele fluem os elétrons que surgiram da reação anódica.

2.4.2 Velocidade de Corrosão

Ao notar que o eletrólito tem como composto basicamente oxigênio e sais dissolvidos em soluções onde o pH pode variar significativamente, podemos prever como e o que a mudança de cada fator influenciará na velocidade da oxidação de um material. A seguir alguns fatores que podem influenciar na velocidade de um processo de corrosão segundo Mello (2008):

- **Oxigênio dissolvido:** quanto maior o acréscimo da taxa de oxigênio dissolvido, aumentará a velocidade de corrosão.

- Concentração de sais dissolvidos: com o aumento da concentração de sais, ocorre o aumento da velocidade de corrosão, devido a ação despolarizante e o aumento da condutividade. Com a diminuição da concentração retarda-se a velocidade de corrosão devido a precipitação de produtos de corrosão e a ação inibidora.
- pH da solução: geralmente a velocidade de corrosão aumentará com a diminuição do pH tornando-o mais ácido.
- Temperatura: o acréscimo da temperatura acelera as reações químicas, e também podendo ocorrer a diminuição da resistividade do eletrólito, tendo como consequência o aumento da velocidade de corrosão.

Para o conhecimento da velocidade de corrosão do material, utiliza-se métodos para medir a corrente de corrosão, sendo este valor relacionado com a perda de massa através da Lei de Faraday:

$$m = e.i.t$$

onde,

- m = massa desgastada (grama);
- e = equivalente eletroquímico do metal;
- i = corrente de corrosão (ampere);
- t = tempo de exposição ao meio corrosivo (segundo).

Analisando a fórmula apresentada destaca-se que a corrente de corrosão é dependente de dois fatores: diferença de potencial das pilhas e a resistência de contato dos eletrodos das pilhas (Mello, 2008).

2.4.3 Eletrodo e Potencial de Eletrodo

Ao observar uma situação de equilíbrio na submersão de um metal em uma solução aquosa, formando uma dupla camada elétrica (DCE), onde há o arranjo de partículas carregadas ou dipolos orientados existentes em qualquer interface material ou meio aquoso, definimos eletrodo. De modo mais sucinto, chama-se de eletrodo, o metal que forma dupla camada elétrica (GENTIL, 1996).

Nas pilhas eletroquímicas, depara-se com uma importante grandeza, denominada “potencial de eletrodo” ou apenas “potencial”. De modo geral, potencial de eletrodo é a diferença de potencial elétrico que ocorre entre o metal e a solução,

podendo ser positiva, negativa ou nula. Este valor depende do metal das espécies presentes no eletrólito e outras variáveis (GENTIL, 2003).

Segundo Ponte (2008), “a diferença de potencial é explicada pela presença de cargas elétricas de um sinal, no eletrólito, e cargas de sinal oposto, no metal”. Esta diferença varia a partir de muitos fatores, um ligado ao metal, outros relacionados com o eletrólito, como o tipo do eletrólito, concentração, temperatura, grau de aeração e grau de agitação.

Ao sofrer oxidação, e conseqüentemente corrosão, os metais apresentam distintas tendências à oxidação. Para uma possível previsão e prevenção de problemas de corrosão, necessita-se da consulta em uma tabela que indique a ordem preferencial de oxidação dos metais.

A tabela 2, também é conhecida como tabela dos potenciais de eletrodo ou série eletroquímica. Ela mostra os potenciais padrões de redução para uma diversa quantidade de metais, tabelados com relação ao eletrodo de referência (padrão de hidrogênio).

Tabela 2: Potenciais de eletrodos em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio
Fonte: Gentil (2003)

Eletrodo	Reação de Eletrodo	Eº(V)
Li	$\text{Li}^+ + \text{e}^-$	-3,045
K	$\text{K}^+ + \text{e}^-$	-2,925
Ca	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,87
Mg	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,37
Pu	$\text{Pu}^{3+} + 3\text{e}^-$	-2,07
Th	$\text{Th}^{4+} + 4\text{e}^-$	-1,09
Be	$\text{Be}^{2+} + \text{e}^-$	-1,85
Zi	$\text{Zi}^{4+} + 4\text{e}^-$	-1,53
Mn	$\text{Mn}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,18
Nb	$\text{Nb}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,1
Zr	$\text{Zr}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
Cr	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,74
Fe	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,44
Cd	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,403
In	$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,342
Ni	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,25
Mo	$\text{Mo}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,2
Cu	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	0,337
Ag	$\text{Ag}^+ + \text{e}^-$	0,799
Pd	$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^-$	0,987
Au	$\text{Au}^{3+} + \text{e}^-$	1,5

2.4.4 Eletrodo de Referência

A obtenção da medida direta de uma diferença de potencial entre certo metal e uma solução definida, é inviável na prática. Deste modo se faz necessário a utilização de um instrumento destinado a auxiliar a determinação ou quantificação do potencial de eletrodo, este instrumento é conceituado como eletrodo de referência. A partir disto, é possível definir o potencial de eletrodo, como sendo o potencial de um sistema, medido em relação a um determinado eletrodo de referência. O eletrodo de referência manterá o potencial constante, para realizar a medição do potencial de outra meia-pilha (MELLO, 2008).

Há diversos eletrodos de referência utilizados em ensaios e na obtenção de potenciais, a seguir será explanado sobre alguns dos mais comuns eletrodos segundo Mello (2008):

- Eletrodo Padrão de Hidrogênio: Consiste de um eletrodo de platina imerso em uma solução de íons de hidrogênio, onde o hidrogênio gasoso borbulha a 1 atm. A sua difícil construção e utilização tornam os outros eletrodos de referência preferidos na prática. O potencial de equilíbrio medido com outros eletrodos de referência, se requerido, é facilmente convertido para a escala de hidrogênio.
- Eletrodo de Calomelano Saturado (ECS): consiste em mercúrio, coberto por uma pasta de cloreto mercurioso (Hg_2Cl_2), imerso em um eletrólito que contem íons de cloreto de potássio(KCl). O potencial de redução deste eletrodo com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é +0,2415 V.
- Eletrodo de Prata- Cloreto de Prata(ECP): é elaborado revestindo um fio de platina com prata, onde é mantido diluído e imerso para formar cloreto de prata sobre a sua superfície. Seu potencial de redução em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é +0,222 V.
- Eletrodo de Cobre- Sulfato de Cobre(ESC): consiste em uma haste de cobre imersa em uma solução saturada de sulfato de cobre. Possui potencial de redução de +0,316 V. A sua precisão é considerada inferior comparado aos outros eletrodos de referência. Este eletrodo tem sua maior aplicação em medidas de campo, levando em consideração que estes meios são mais grosseiros.

2.4.5 Potencial de Repouso

A verificação de potencial de repouso também conhecido, como potencial de repouso em circuito aberto de um metal específico (eletrodo de trabalho) ao longo do tempo é usada para se determinar o tempo necessário até que o metal atinja um estado estacionário em um eletrólito (RÉGIS JÚNIOR, 2011). O monitoramento do potencial em relação ao tempo permite saber o comportamento geral à corrosão dos eletrodos de trabalho.

Após a exposição do metal ao eletrólito, segundo Régis Júnior (2011), “ocorre uma variação desse potencial ao longo de um determinado tempo, intervalo este necessário para que o metal possa transformar o filme óxido, normalmente formado sobre a sua superfície, na dupla camada elétrica (DCE)”. Um processo de acomodação eletroquímica, a partir da DCE e o eletrólito, geram a mudança de potencial.

A determinação do potencial de repouso de um material é realizado através do monitoramento da diferença do potencial com um arranjo simples de dois eletrodos, no qual um deles é o material em estudo, também chamado de eletrodo de trabalho (ET) e o outro o eletrodo de referência (ER).

2.4.6 Polarização

Polarização consiste na modificação do potencial de um eletrodo a partir de variações de concentração, sobrevoltagem de gás ou variação de resistência ôhmica. Segundo Régis Júnior (2011) a interface de um metal imerso em uma dada solução pode ser caracterizada a partir de uma relação corrente-potencial (curva $E \times i$). As curvas apresentam o valor da corrente resultante de variações do potencial aplicado em certo material em estudo.

A análise de polarização de um eletrodo é utilizada para a análise de potenciais de proteção e para o estudo de películas depositadas em superfícies de diversos tipos de metais (RÉGIS JÚNIOR, 2011). Na Figura 6, se tem uma representação onde são mostradas curvas de polarização anódica e catódica em um diagrama monologarítmico, além do potencial de equilíbrio e da densidade de corrente de troca.

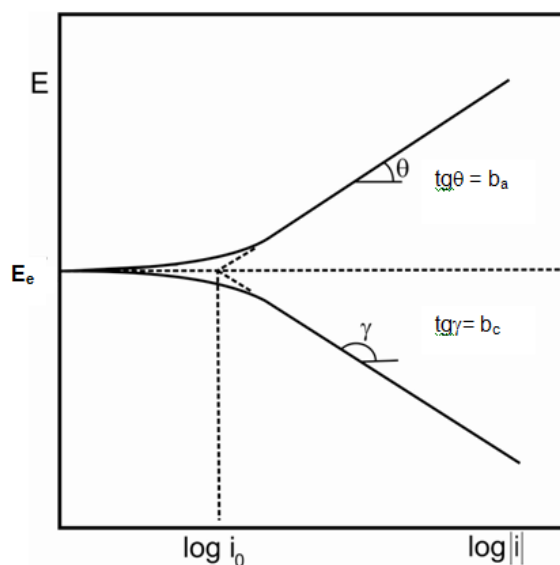


Figura 6: Curvas de Polarização Anódica (i_a) e Catódica (i_c)
Fonte: Régis Júnior (2011)

2.4.7 Passivação

Segundo Gemelli (2001) a passivação de um material metálico tem como característica a formação de uma fina camada protetora de óxido delgado e rigidamente aderente na superfície do metal, protegendo o metal do avanço da corrosão.

Conforme Mello (2008) a figura 7, apresenta a curva de um metal que passou pelo processo de passivação. Conforme a ilustração, na região ativa, se tem um comportamento linear da curva. Aumentando o potencial, a densidade de corrente diminuirá para um valor que permanecerá independente da variação do potencial, caracterizando a região passiva. E por fim, para altos valores de potencial, a densidade de corrente aumentará caracterizando a região chamada de transpassiva, podendo surgir corrosão em regiões localizadas.

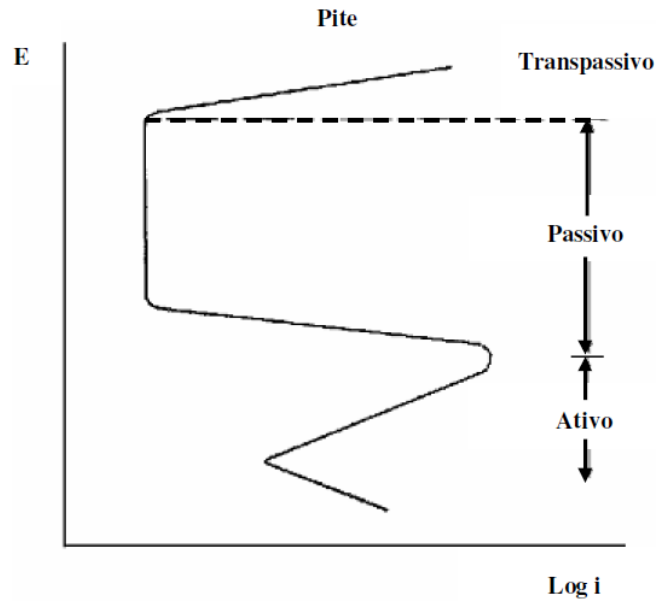


Figura 7: Taxas de Corrosão de um Metal Passivável
Fonte: Ponte (2008)

2.4.8 Taxa de Corrosão

A taxa de corrosão confere a perda de espessura por unidade de tempo em consequência de ação química. Neste trabalho foi utilizada a técnica de resistência à polarização para determinação da taxa de corrosão. A seguir será explicada a técnica e algumas variáveis para seu conhecimento.

Para a técnica de resistência a polarização linear varia-se o potencial na ordem de $\pm 10\text{mV}$ (micropolarização) a partir do potencial de repouso do metal. Deste modo obtém a resistência a polarização dada por:

$$\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = R_p$$

Sendo

- ΔE = Variação do Potencial;
- Δi_{app} = Variação da corrente aplicada.

Para obtenção dos coeficientes de Tafel, aplica-se uma variação de potencial em torno de $\pm 150\text{mV}$ (macropolarização) do potencial de repouso do material.

A corrente de corrosão corresponde à seguinte equação (Régis Junior, 2007)

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3 \times R_p \times (\beta_a + \beta_c)}$$

Sendo os coeficientes de Tafel:

- β_a = Reação Anódica;
- β_c = Reação Catódica..

A seguir se tem a taxa de corrosão, que é definida em milímetros por ano:

(Tx_{corr}).

$$Tx_{corr} = \frac{P.A. \times i_{corr} \times t}{n \times F \times A \times d}$$

onde,

- Tx_{corr} = Taxa de Corrosão (mm/ano);
- $P.A.$ = peso atômico do material (g/mol);
- i_{corr} = corrente de corrosão (A);
- t = tempo (segundos em um ano);
- n = número de elétrons transferidos na reação do Ferro: 2;
- F = constante de Faraday (96487 C/mol);
- A = área da superfície do ET em contato com o eletrólito (cm²);
- d = densidade do material (g/cm³).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa que resultou no trabalho presente teve como orientação o Professor Dr. Oscar Régis Júnior, coorientação da Professora Sandra Mara Kaminsk e ajuda laboratorial do Professor Dr. Alfredo José Zara.

Para a realização da pesquisa se utilizou materiais e máquinas dos laboratórios de metrologia, tecnologia de materiais e usinagem da UTFPR, Campus Ponta Grossa, e os ensaios eletroquímicos realizados no laboratório de caracterização eletroquímica da Universidade Estadual Ponta Grossa, Campus Uvaranas. A seguir a listagem dos materiais e equipamentos diretamente ligados a realização do trabalho:

- Acido Clorídrico 0,1 Molar (HCl);
- Acido Nítrico 0,1 Molar (HNO₃);
- Aço AISI 1020;
- Lixadora e Politriz semi-automática Buehler;
- Forno Tipo Mufla Jung 0612;
- Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 10000;
- Microscópio Ótico Olympus BX60;
- Eletrodo de Referência de Calomelano Saturado;
- Contra eletrodo de Platina;
- Termostato Brookfield TC-501;
- Potenciostato Autolab PGSTAT 30.

A seguir o fluxograma referente à ordem e processos utilizados para a montagem da pesquisa, desde a obtenção das barras de Aço AISI 1020 até a obtenção dos resultados deste trabalho.

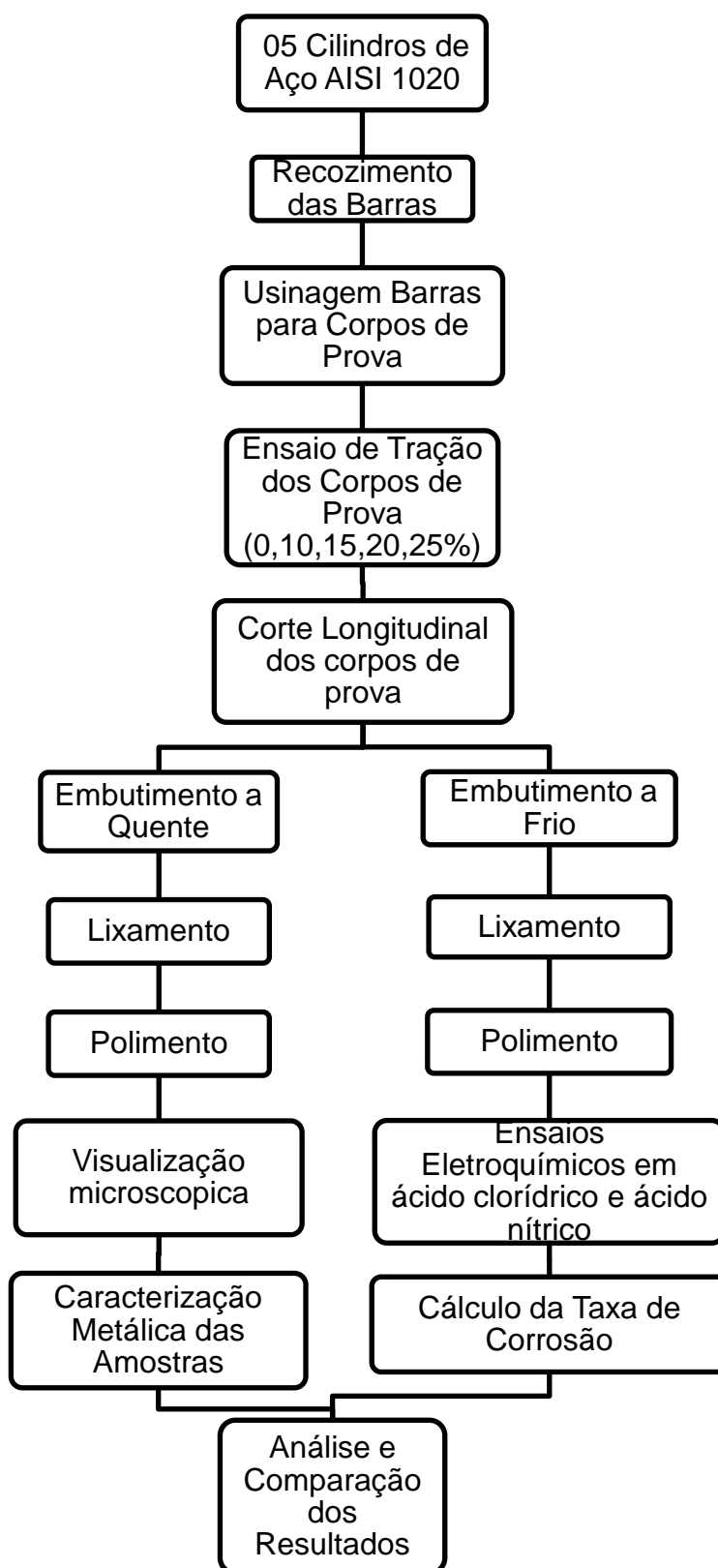


Figura 8: Fluxograma ordem e execução da pesquisa

Fonte: Autoria própria

4 METODOLOGIA

4.1 CONFECÇÃO E ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com a obtenção de barras comerciais de aço AISI 1020 e o corte em cilindros menores o primeiro passo para a execução da parte experimental foi o recozimento do material em estudo, com o objetivo de normalizar a estrutura do aço 1020, para que todos os corpos de prova partissem de uma mesma microestrutura. Este procedimento foi realizado submetendo os corpos de prova ainda em barras de formato cilíndrico em um forno do tipo mufla Jhung 0612 desligado, aquecendo-os a temperatura de 930C^o, durante 1 hora, deixando-os resfriar lentamente dentro do equipamento.

Em seguida os corpos de prova foram usinados para utilização no ensaio de tração, seguindo a norma ASTM E8M-04. Após a confecção dos corpos de prova eles foram submetidos ao ensaio de tração na máquina universal de ensaios EMIC DL 10000, com o objetivo de promover um alongamento controlado em taxas de deformação pré estabelecidas. Os quatro corpos de prova alongados foram respectivamente deformados em 10%, 15%, 20% e 25% de seus comprimentos iniciais, promovendo assim, um encruamento progressivo. No total foram 5 corpos de prova de aço AISI 1020, onde destes um não foi deformado por tração, pois foi utilizado como base dos dados na análise.

Para a elaboração das amostras para a análise micrográfica, os corpos de prova foram seccionados, obtendo amostras com dimensões de aproximadamente 30x20x10mm. Na sequência realizou-se a preparação e acabamento das amostras, com a máquina lixadora e politriz Buehler, utilizando lixas de carbetto de silício com granulometria de 220, 320, 400, 600, e 1200 mesh, respectivamente, e posteriormente, polimento com suspensão de alumina 0,3 micrômetros.

Para a elaboração das amostras para o ensaio eletroquímico, os corpos de prova foram cortados em formatos cilíndricos, onde serão os eletrodos de trabalho (ET). A área da base destes cilindros compreendem em 0,196 cm². Na área oposta do cilindro foi soldado à base de estanho um fio de cobre. Na sequência, os corpos cilíndricos foram embutidos em resina acrílica autopolimerizável. O polimento da

superfície do eletrodo de trabalho foi realizado em lixas de carvão de silício indo da granulação Mesh 200, sucessivamente até a lixa fina Mesh 1200.

4.2 CARACTERIZAÇÃO POR MICROGRAFIA

Para analisar a diferença microestrutural com o aumento do grau de encruamento, cada material (deformado e não deformado) teve uma amostra cortada no sentido axial e radial para a caracterização. Após o corte realizou-se o embutimento a quente, lixamento e polimento das amostras. Elas foram atacadas quimicamente com nital a 0,3 molar. Após a preparação as amostras e ataque químico, foram vistas e tiveram suas imagens salvas com auxílio do microscópio óptico, utilizando fator de aumento de acordo com a barra de escala para os sentidos transversais e longitudinais de todas elas.

Por motivo de maior clareza e informações, decidiu caracterizar as imagens longitudinais com fator de aumento segundo barra de escala.

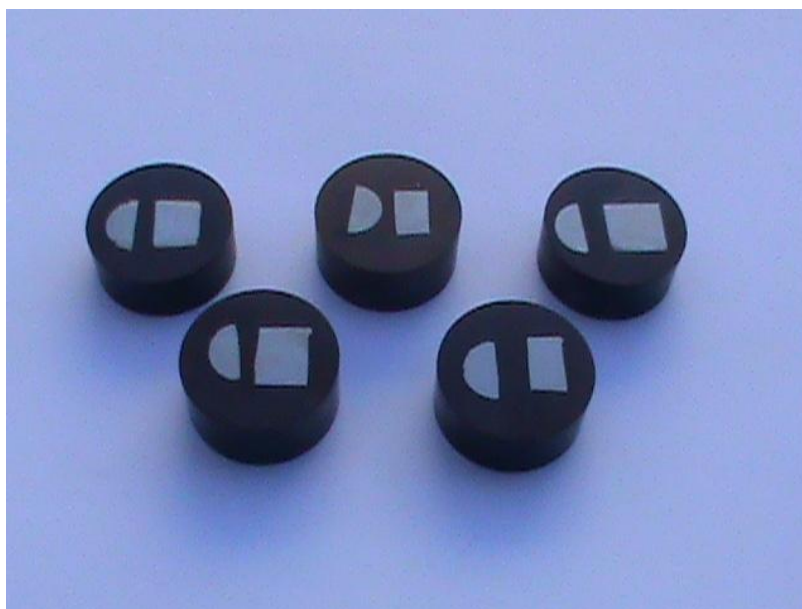


Figura 9: Representação das amostras para micrografia
Fonte: Autoria própria

4.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Os ensaios eletroquímicos foram realizados no laboratório de caracterização eletroquímica da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), no campus Uvaranas. Esta experimentação teve como norma regente a ASTM G59-97.

Os ensaios de medição do potencial de repouso e taxas de corrosão foram realizados em um Potenciostato PGSTAT 30 da Marca AUTOLAB (figura 10), e um termostato TC-501 Brookfield (figura 11), que através do fluxo de água na célula eletrolítica, padroniza a temperatura dos experimentos em 25°C.



Figura 10: Potenciostato PGSTAT30
Fonte: Autoria própria



Figura 11: Termostato TC-501
Fonte: Autoria própria

Para estes ensaios foi utilizada uma célula eletrolítica, composta de um eletrodo de referência (ER) de calomelano saturado (ECS), um contra eletrodo (CE) de platina e um eletrodo de trabalho (ET) previamente elaborado com o material a ser analisado, em solução de ácido clorídrico e ácido nítrico. A seguir imagens dos componentes da célula mencionados respectivamente.



Figura 12: Eletrodo de Referência de Calomelano Saturado
Fonte: Autoria própria



Figura 13: Contra Eletrodo de Platina
Fonte: Autoria própria



Figura 14: Eletrodo de Trabalho
Fonte: Autoria própria

Além dos equipamentos e acessórios previamente comentados também foi utilizado ácido nítrico e ácido sulfúrico em concentrações de 0,1 molar. Dados foram coletados nos ensaios eletroquímicos com o software do potenciostato o GPES da AUTOLAB. Cada metodologia descrita a seguir foi realizada 3 vezes em cada amostra nos dois ácidos.

Antes de iniciar os testes para obter os potenciais de corrosão (E_{corr}), esperou-se a solução atingir a temperatura padrão para o teste, de 25°C. Após isso, imergiu-se o eletrodo de referência, o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo no ácido utilizado como eletrólito. Com as ligações elétricas devidamente conectadas (Figura 15) nos eletrodos, iniciou-se a leitura e o acompanhamento do potencial de repouso em relação ao tempo. O período de acompanhamento foi de 55 minutos, onde o valor final obtido é considerado o valor do potencial de repouso (E_{rep}).

Em seguida a determinação do potencial de repouso, inicia-se a micropolarização cíclica, tendo o início da varredura de potenciais partindo do potencial de repouso no sentido anódico de 10mV mais positivo que o potencial de repouso, invertendo em direção catódica até 10mV mais negativo que o potencial de repouso e retornando ao potencial inicial, sendo utilizado uma velocidade de varredura de 1 mV/s. Com a micropolarização permite-se a determinação da resistência de polarização (R_p) das amostras ensaiadas.

Após essa etapa inicia-se a macropolarização partindo do potencial de 150mV mais anódico que o potencial de repouso em direção a 150mV mais catódico que o potencial, tudo a uma velocidade de 1mV/s. Este ensaio permite a determinação dos valores das constantes de tafel anódica (β_a) e a catódica (β_c).



Figura 15: Célula Eletrolítica utilizada no ensaio eletroquímico
Fonte: Autoria própria

Com a finalização dos ensaios eletroquímicos gráficos de potencial de repouso, resistência a polarização, micropolarização, macropolarização e tabelas de taxa de repouso foram elaboradas e comparadas de modo analisar a influência do grau de encruamento do aço AISI 1020 em meio de ácido clorídrico e nítrico.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 MICROGRAFIAS

Conforme item 4.1.1, as micrografias realizadas foram obtidas dos corpos de provas de aço AISI1020, sendo cortadas para análise no sentido longitudinal. As figuras 16, 17, 18, 19 e 20 obtidas a partir do microscópio ótico, mostram o comportamento do aço AISI 1020 perante o encruamento gradativo de cada amostra no ensaio de tração.

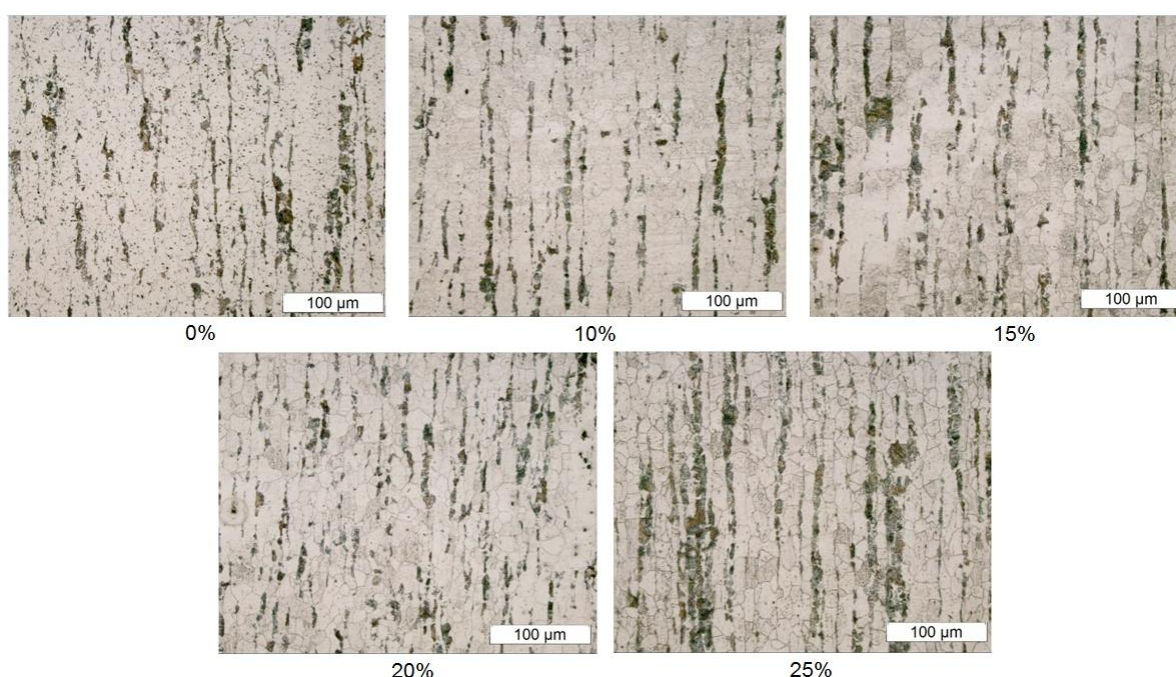


Figura 16: Micrografias do Aço AISI1020 com alongamentos em 0,10, 15, 20, 25% do comprimento inicial (Nital)
Fonte: Autoria própria

Nas figuras destaca-se uma das características do aço baixo carbono utilizado na pesquisa, a presença de perlita (grãos escuros) e ferrita (grãos claros). Devido ao aumento do grau de encruamento das amostras (0, 10, 15, 20, 25%) destaca-se um aumento gradativo da orientação dos grãos, que segundo o item 2.2.3, acumulará energia interna no material, de modo a elevar a reatividade química, ocasionando a redução da resistência à corrosão do metal.

5.2 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Conforme visto no item 4.1.3, as medidas dos ensaios eletroquímicos, foram realizados com 5 amostras referentes a 0, 10, 15, 20 e 25% de grau de alongamento referente a seu comprimento inicial. A seguir serão apresentado os gráficos e resultados e comentários referentes aos ensaios eletroquímicos realizados baseados na norma ASTM G59-97. Os valores dos gráficos obtidos foram coletados a partir do software do potenciostato da Autolab, GPES.

Para uma maior clareza e comparação para auxiliar na leitura do gráfico elaborou-se uma tabela com a progressão do potencial de repouso para tempo (t) coletado a 0, 5, 15, 30 e 55 minutos para cada amostra.

Tabela 3: Valores de Potencial de Repouso em relação ao tempo na solução de ácido clorídrico
Fonte: Autoria própria

Eletrólito	Amostras	Potenciais de Repouso (V)				
		E rep. t:0	E rep. t: 5	E rep. t: 15	E rep. t: 30	E rep. t: 55
Ácido Clorídrico	0%	-0,493	-0,480	-0,487	-0,491	-0,490
	10%	-0,494	-0,480	<u>-0,487</u>	-0,493	-0,492
	15%	-0,472	-0,491	-0,499	-0,498	-0,494
	20%	-0,467	-0,484	-0,490	-0,495	-0,498
	25%	-0,482	-0,513	-0,512	-0,509	-0,503

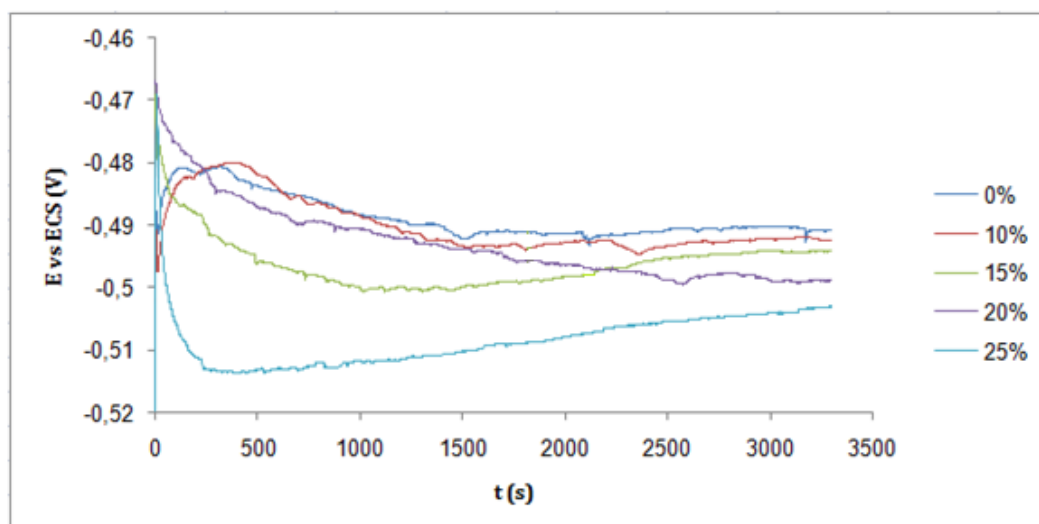


Figura 17: Gráfico do potencial de repouso em função do tempo em solução de HCl
Fonte: Autoria própria

Observa-se na tabela 3 e figura 17, referente ao ensaio de potencial de repouso em ácido clorídrico, que os valores das amostras referentes aos

alongamentos de 0 e 10% tem seus potenciais iniciais em torno de -0,493V, deslocando-se rapidamente para valores anódicos de -0,48V, para estabilizarem catodicamente na região de -0,490V e -0,492V, respectivamente. Nos primeiros cinco minutos temos um fenômeno que indica que o aço está se oxidando, formando um filme passivante na superfície, modificando a sua área exposta durante este período. Após isso observa-se a provável quebra da camada passivante e o potencial de repouso se desloca para a região catódica.

Referente as amostras de 15 e 20% contata-se seus potenciais iniciais em torno de -0,470V, deslocando-se catodicamente até a estabilização em torno de -0,494V e -0,498V. No ensaio do grau de encruamento de 25% destaca-se que houve um deslocamento rápido catodicamente até -0,513V para estabilizar no valor de -0,503V.

Tabela 4: Valores de Potencial de Repouso em relação ao tempo na solução de ácido nítrico
Fonte: Autoria própria

Eletrólito	Amostras	Potenciais de Repouso (V)				
		E rep. t:0	E rep. t: 5	E rep. t: 15	E rep. t: 30	E rep. t: 55
Ácido Nítrico	0%	-0,455	-0,448	-0,450	-0,453	-0,461
	10%	-0,432	-0,463	-0,466	-0,465	-0,461
	15%	-0,433	-0,466	-0,470	-0,469	-0,466
	20%	-0,433	-0,462	-0,471	-0,471	-0,468
	25%	-0,467	-0,471	-0,475	-0,476	-0,475

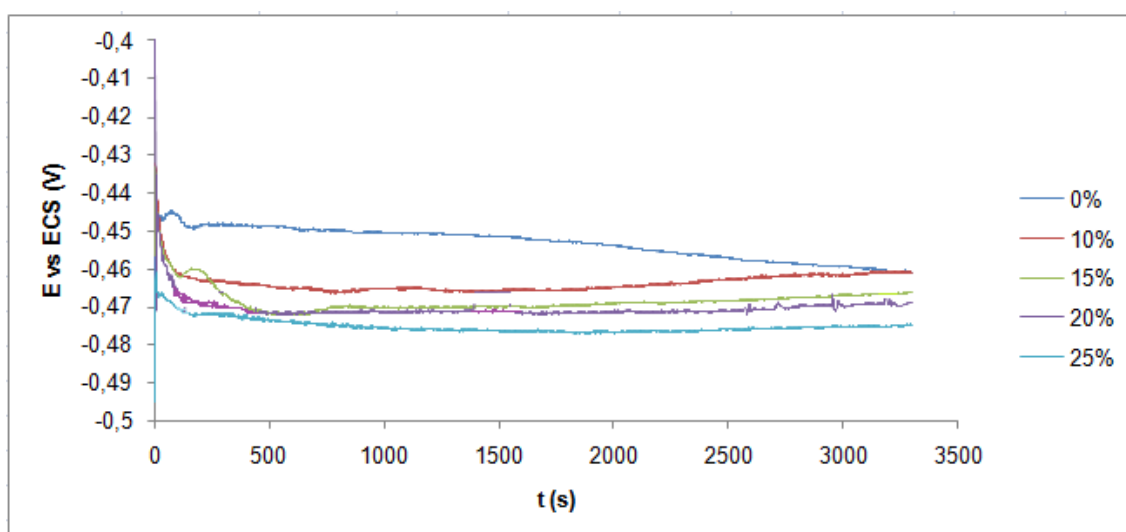


Figura 18: Gráfico do potencial de repouso em função do tempo em solução de ácido nítrico (HNO₃)
Fonte: Autoria própria

Observa-se na tabela 4 e figura 18, referente ao ensaio de potencial de repouso em ácido nítrico, que o valor da amostras referente a peça não encruada, de 0% de alongamento, iniciou com potencial em torno de -0,445V e estabilizando catodicamente de modo lento em -0,461V. As amostras das peças com 10, 15 e 20% de alongamento tiveram seu potencial inicial na faixa de -0,432V, deslocando rapidamente para valores catódicos de -0,461V, -0,466V e -0,468V respectivamente. A amostra da peça de 25% de alongamento, teve seu potencial inicial em -0,467V, deslocando-se para valor catódico de -0,475V.

Analisando o ensaio de potencial de repouso, nota-se que os comportamento variam em cada grau de encruamento, de modo a não influenciar nos valores finais de potencial, devido ao motivo de eles convergirem proporcionalmente, onde as amostras menos encruadas tem maiores potenciais de repouso, e as amostras mais encruadas tenderam a menores valores de potencial.

Após a determinação do potencial de repouso com o eletrodo ainda mantido na solução, inicia-se o ensaio de micropolarização, que nos fornece dados para elaboração de gráficos que relacionam a corrente de corrosão com a variação da voltagem. A análise deste gráfico nos fornece o valor de resistência a polarização R_p do material em análise.

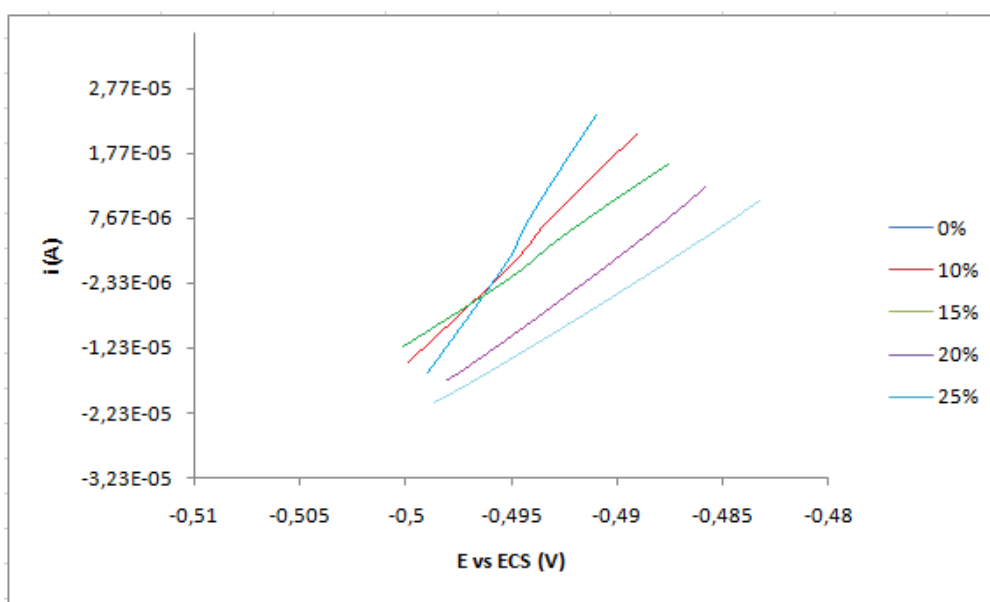


Figura 19: Representação gráfica do ensaio de micropolarização no ácido clorídrico (HCl)
Fonte: Autoria própria

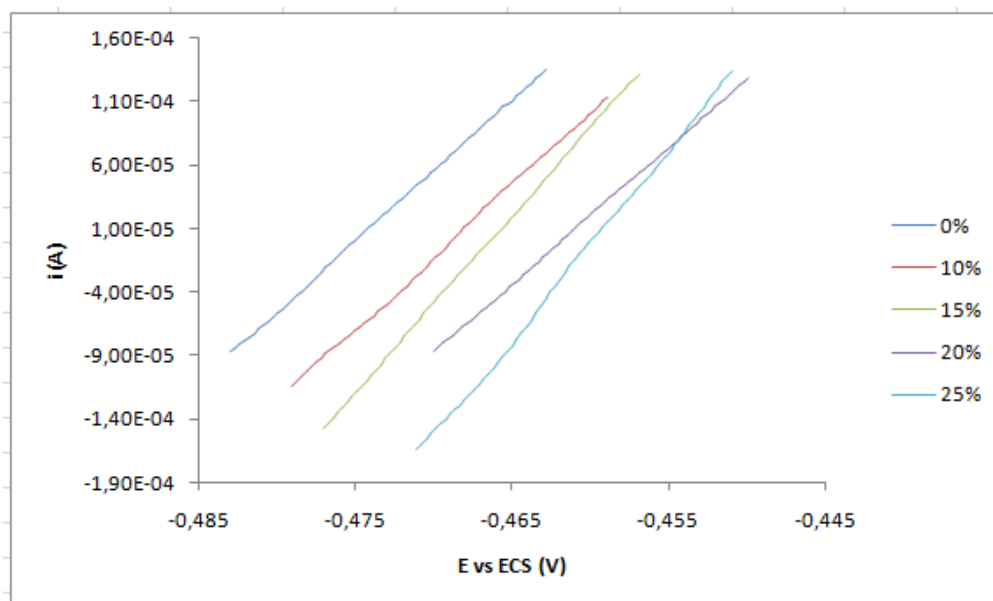


Figura 20: Representação gráfica do ensaio de micropolarização em solução de ácido nítrico (HNO₃)
Fonte: Autoria própria

A partir das figuras 19 e 20, referentes aos ensaios de micropolarização em ácido clorídrico e nítrico, respectivamente, observa-se comportamentos diferentes dos graus de encruamento do aço em relação aos valores de R_p . No ácido clorídrico os valores de R_p em relação ao aço AISI 1020 variam na faixa entre 124,9 Ω (a 25%) até 755,9 Ω (a 0%). No ácido nítrico a variação de R_p ocorre na faixa entre 64,06 Ω (a 25%) até 91,9 Ω (a 0%).

A partir deste dado podemos analisar previamente que para o ácido clorídrico que possui valores superiores de R_p possuirá menores valores de taxa de corrosão em comparação com o ácido nítrico.

Após a micropolarização, inicia-se o último ensaio eletroquímico para obtenção dos dados para o cálculo de taxa de corrosão, o processo de macropolarização, que nos fornecerá os valores da região anódica e catódica (β_a e β_c). Esse ensaio é realizado com o eletrodo de trabalho ainda imerso na solução.

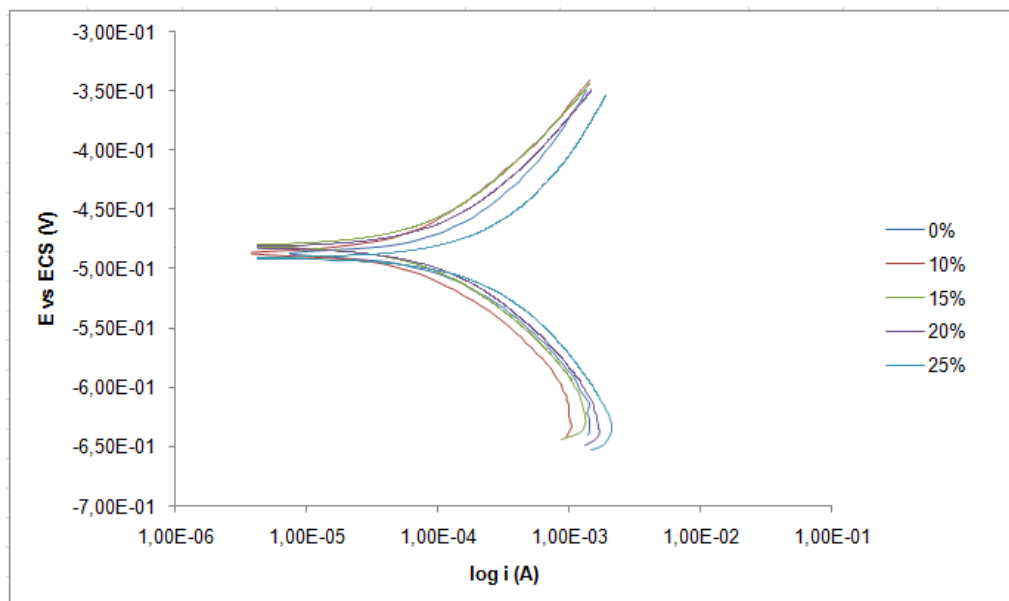


Figura 21: Representação gráfica do ensaio de macropolarização em ácido clorídrico (HCl)
Fonte: Autoria própria

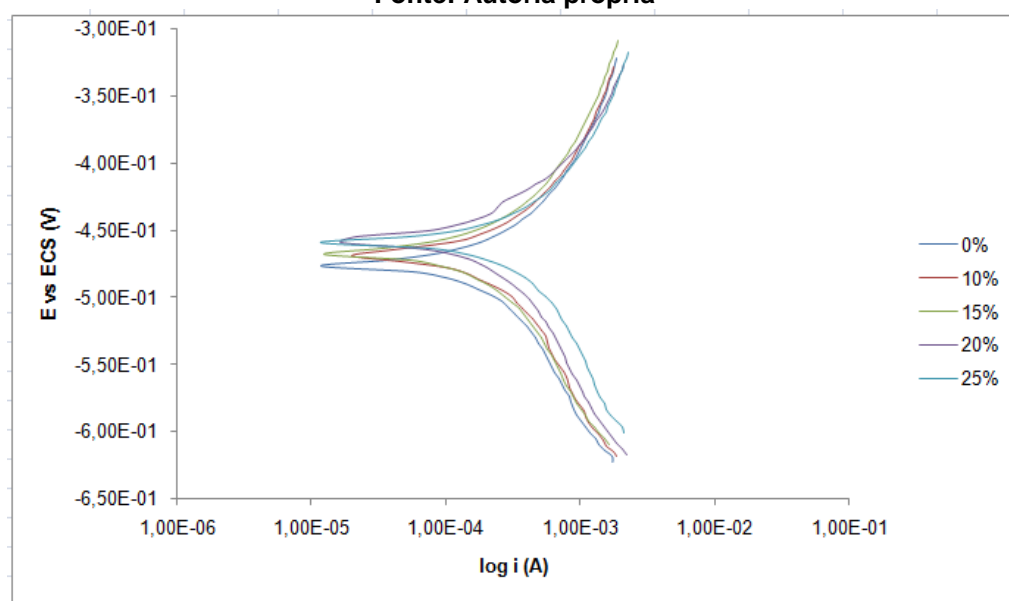


Figura 22: Representação gráfica do ensaio de macropolarização em solução de ácido nítrico (HNO₃)
Fonte: Autoria própria

Analisando as figuras 21 e 22, referentes aos ensaios de macropolarização em ácido clorídrico e ácido nítrico a macropolarização revelou uma tendência ao aumento que os valores das regiões anódicas em ambos os ácidos em relação ao grau de encruamento, de modo a influenciar no acréscimo da taxa de corrosão para os materiais com porcentagens maiores de alongamento.

Com o término dos ensaios eletroquímicos e obtenções dos dados necessários a partir da micropolarização (resistência a polarização) e

macropolarização (coeficientes de tafel), fez-se possível a montagem da tabela a seguir que explana sobre cada valor encontrado e a taxa de corrosão calculada para cada ácido e grau de encruamento do aço.

Tabela 5: Valores de E_{corr} , R_p , β_a , β_c , i_{corr} , I_{corr} e Tx_{corr} em solução de ácido clorídrico
Fonte: Autoria própria

Amostra	E_{corr} (V)	R_p (Ω)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	i_{corr} (A)	I_{corr} (A/cm ²)	Taxa de corrosão (mm/a)	Taxa de corrosão média (mm/a)
0 (0%)	-0,491	755,9	0,121	0,152	0,0000387	0,000197	2,29	6,74
1 (10%)	-0,492	546,2	0,103	0,12	0,0000441	0,000225	2,61	
2 (15%)	-0,494	293	0,115	0,108	0,0000825	0,000421	4,89	
4 (20%)	-0,499	153,8	0,114	0,105	0,000154	0,000787	9,14	
5 (25%)	-0,503	124,9	0,156	0,133	0,000251	0,000127	14,77	

Tabela 6: Valores de E_{corr} , R_p , β_a , β_c , i_{corr} , I_{corr} e Tx_{corr} em solução de ácido nítrico
Fonte: Autoria própria

Amostra	E_{corr} (V)	R_p (Ω)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	i_{corr} (A)	I_{corr} (A/cm ²)	Taxa de corrosão (mm/a)	Taxa de corrosão média (mm/a)
0 (0%)	-0,461	91,9	0,18	0,179	0,000424	0,00216	25,1181	30,86
1 (10%)	-0,461	83,9	0,166	0,194	0,000463	0,00236	27,4231	
2 (15%)	-0,466	93,7	0,177	0,184	0,000418	0,00247	28,7205	
4 (20%)	-0,469	73,4	0,155	0,189	0,000503	0,00257	29,841	
5 (25%)	-0,475	60,06	0,198	0,206	0,000729	0,00372	43,2354	

Analisando as tabela 5, que representa os parâmetros obtidos nos ensaios eletroquímicos para o ácido clorídrico (HCl), e valores consequentes de cálculos realizados para determinação denota-se o aumento da taxa de corrosão do aço AISI 1020 com o aumento do grau de encruamento das peças.

Analisando a tabela 6 que representa os valores obtidos nos ensaios eletroquímicos para o ácido nítrico (HNO₃), nota-se o aumento da taxa de corrosão do aço AISI 1020 com o aumento do grau de encruamento das peças.

6 CONCLUSÕES

Para o ácido clorídrico, o valor de potencial de repouso diminuiu seu valor com o aumento do grau de encruamento. Para este ácido os valores de taxa de corrosão também aumentaram com o acréscimo de alongamento, iniciando de 2,29mm/a a 0% de alongamento até 14,77mm/a para 25% de alongamento, gerando uma média de 6,74mm/a apresentada pelo material neste ácido.

Para o ácido nítrico, o valor de potencial de repouso diminuiu seu valor com o aumento do grau de encruamento. Para este ácido os valores de taxa de corrosão também aumentaram com o acréscimo de alongamento, iniciando de 25,11mm/a a 0% de alongamento até 43,23mm/a para 25% de alongamento, gerando uma média de 30,86mm/a apresentada pelo material neste ácido.

Comparando os ácidos para o mesmo material destaca-se o ácido nítrico mais forte do que o ácido clorídrico, devido ao fato da taxa de corrosão ser maior para o HNO_3 . O ácido nítrico comportou-se 4,57 vezes mais corrosivo que o ácido clorídrico nas condições de ensaios propostas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar o comportamento do material submetido a ensaios eletroquímicos com variações na temperatura e em diferentes meios corrosivos, e variando o material utilizado como eletrodo de trabalho.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G59: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.** 1997.

BRESCIANE FILHO, Ettore. **Propriedades e Ensaio Industriais dos Materiais.** São Paulo: DLP, 1958. 113p.

CALLISTER, William. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização.** Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

MELLO, Alexandre Galvão Brasileiro de. **Influência da deformação plástica na corrosão de aço carbono, aço inoxidável e cobre em sistemas de resfriamento.**

PONTE, Haroldo De A. **Fundamentos da Corrosão.** Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

RAMANATHAM, Lalgudi. **Corrosão e seu controle.** São Paulo: Hemus. 4.ed 2002.

2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

REGIS JUNIOR, Oscar. **Viabilidade dos revestimentos anticorrosivos com $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Cu}$, $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ni}$ e $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Al}$ aplicados por aspersão térmica para estruturas enterradas de Linhas de Transmissão.** 2011. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

REGIS JUNIOR, Oscar. **Estudo da Corrosão nos Aços ASTM A 285 Grau C e 516 Grau 60 utilizados na Construção de Digestores Descontínuos para a Obtenção de Celulose pelo Processo KRAFT.** 2004. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências Dos Materiais, Uepg, Ponta Grossa, 2004.

ROBERGE, Pierre R. **Corrosion Engineering: Principles and Practice.** McGraw Hill Professional, 2008.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W.; **Química Inorgânica**, 4. ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.