

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

AMILTON SPERONI SCHERER

**ESTUDO E ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DE UM AÇO ASTM
A 516 GRAU 60 E DAS SOLDAS DE REVESTIMENTOS COM
ELETRODO ARAME TUBULAR AWS E71T E LEDURIT 60, EM LICOR
BRANCO UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CELULOSE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2015

AMILTON SPERONI SCHERER

**ESTUDO E ANALISE DA TAXA DE CORROSÃO DE UM AÇO ASTM
A 516 GRAU 60 E DAS SOLDAS DE REVESTIMENTOS COM
ELETRODO ARAME TUBULAR AWS E71T E LEDURIT 60, EM LICOR
BRANCO UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CELULOSE**

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

PONTA GROSSA

2015



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO E ANÁLISE DA TAXA DE CORROSÃO DE UM AÇO ASTM A 516 GRAU 60 E DAS SOLDAS DE REVESTIMENTOS COM ELETRODO ARAME TUBULAR AWS E71T E LEDURIT 60, EM LICOR BRANCO UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CELULOSE

por

AMILTON SPERONI SCHERER

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 24 de setembro de 2015 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 Regis Junior

Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin

Membro Titular

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto

Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior

Coordenador do Curso

*"A ciência sem a religião é manca,
a religião sem a ciência
é cega".*
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Oscar Régis Junior, que me proporcionou todos os meios para seguir com minha pesquisa, desde o início, com muita calma e paciência, para que conseguisse concluir este trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Alfredo José Zara, pelo acompanhamento e instrução para elaboração dos ensaios eletroquímicos na UEPG, e com todo o conhecimento que foi de grande ajuda na concepção do trabalho.

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

Agradeço a minha mãe Lurdes Speroni Scherer, pelos grandes momentos de paciência comigo, pela educação, apoio e amor que me proporcionou durante toda a minha vida

Agradeço ao meu irmão Emerson Speroni Scherer e minha irmã Carla Speroni Scherer, que me instruíram durante todo o meu curso, proporcionando diversos caminhos que poderia seguir.

Agradeço a minha namorada Amanda Russafa da Rocha por ter paciência, e entender os momentos de ausência, e por ter me ajudado em muitos momentos de dúvida.

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 hoje se tornaram meus amigos do peito, que junto à muito estudo e discussões vieram a ajudar e moldar meu conhecimento.

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

RESUMO

Scherer, Amilton S. **Estudo e análise da taxa de corrosão de um aço ASTM A 516 grau 60 e das soldas de revestimentos com eletrodo arame tubular AWS E71T e LEDURIT 60, em licor branco utilizado na produção de celulose.** 2015. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2015.

O setor metalúrgico e mecânico utiliza grande quantidade de materiais metálicos, e como esses materiais são submetidos a vários meios, tem-se a necessidade de realizar vários testes padronizados, para prevenir acidentes, a corrosão de materiais e a parada da produção. Desde sua concepção até o uso em fabricação de componentes, 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, a pesquisa propõe o estudo de aço ASTM 516 grau 60, utilizado na construção de digestores em fabricas de papel e celulose, do eletrodo tubular AWS E71T utilizado na recuperação de paredes (espessura) do vaso do digestor e uma nova opção de material (LEDURIT 60) para esta recuperação. Este estudo de corrosão tem como eletrólito o "Licor Branco" utilizado na produção de papel e celulose. Obteve-se as taxas de corrosão destes materiais em função da variação da temperatura do eletrólito. Os resultados indicam que o material LEDURIT 60 apresentou melhores resultados em relação a taxa de corrosão. O projeto foi desenvolvido, em caráter experimental, nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, e na Universidade Estadual de Ponta Grossa, campus Uvaranas, fomentado pela preocupação com o risco que a corrosão pode causar devido ao perigo de acidentes.

Palavras-chave: Corrosão eletroquímica, potencial de repouso, taxa de corrosão, aço ASTM 516 grau 60, licor branco.

ABSTRACT

Scherer, Amilton S. **Analysis and study of the corrosion rate on ASTM A 516 grade 60 steel, welded with AWS E71T and LEDURIT 60 tubular electrode wire, in white liquor on pulp manufacturing.** 2015. 56p. Term Paper (Mechanical Engineering) - Federal Technological University of Parana. Ponta Grossa. 2015.

The metallurgical and mechanical industry use large amounts and types of metallic materials subjected to various means, becoming necessary to carry out several standardized tests, aiming to prevent accidents, the corrosion of materials and production stoppage. From its conception to final use in the manufacture of components, steel undergoes thermal and mechanical processes that alter its microstructure changing the steel's performance, reliability and future security. Relating these two common situations in the mechanical area, the paper suggests steel study ASTM A 516 grade 60, used in the construction of digesters in paper mills and pulp, the tubular electrode AWS E71T used in the recovery of walls (thickness) of the digester vessel and a new material option (LEDURIT 60) for this recovery. This study used as electrolyte the "White Liquor", which is used in the production of pulp and paper. This yields the material's corrosion rates as a function of the electrolyte's temperature variation. The results indicate that the 60 LEDURIT material showed better results on corrosion rates. Based on trials, the project took place in the laboratories of the Federal Technological University of Paraná, in Ponta Grossa, and Ponta Grossa State University, Uvaranas campus, fostered by concern over the risk and highly dangerous accidents corrosion can cause.

Keywords: Electrochemical Corrosion, Resting Potential, Corrosion Rate, ASTM A 516 Grade 60 Steel, White Liquor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA PILHA ELETROQUÍMICA.....	16
FIGURA 2 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO ANÓDICA (I_A) E CATÓDICA (I_C) NUM DIAGRAMA MONOLOGARÍTIMICO E_E = POTENCIAL DE EQUILÍBRIO, I_0 = DENSIDADE DE CORRENTE DE TROCA.	21
FIGURA 3 - TAXA DE CORROSÃO DE UM MATERIAL PASSIVÁVEL.....	22
FIGURA 4 - SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM PROTEÇÃO GASOSA	25
FIGURA 5 - AMOSTRA EMBUTIDA E PRONTA PRA O ENSAIO METALOGRAFICO	28
FIGURA 6 - MICROGRAFIA DE UM AÇO COM UM CORTE TRANSVERSAL	29
FIGURA 7 - POTENCIOSTATO PGSTAT 30.....	39
FIGURA 8 - TERMOSTATO TC-501 BROOKFIELD	40
FIGURA 9 - ELETRODO DE REFERÊNCIA DE CALOMELANO SATURADO	40
FIGURA 10 - ELETRODO DE TRABALHO.....	41
FIGURA 11 CONTRA ELETRODO.....	41
FIGURA 12 - CÉLULA ELETROQUÍMICA.....	42
FIGURA 13 - MICROGRAFIA AÇO ASTM A 516 GR 60	44
FIGURA 14 - MICROGRAFIA DEPOSIÇÃO ARAME TUBULAR ESAB TUBROD 71 ULTRA.	44
FIGURA 15 - MICROGRAFIA ARAME TUBULAR UTP AF LEDURIT 60 (VILELA'S)	45
FIGURA 16 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE REPOUSO DO AÇO ASTM A 516 GR 60 ...	46
FIGURA 17 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE REPOUSO DO ARAME TUBULAR TUBROD 71 ULTRA.....	47
FIGURA 18 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE REPOUSO DO LEDURIT 60.....	48
FIGURA 19 - VOLTAMETRIA CÍCLICA DO AÇO ASTM A 516 GR	49
FIGURA 20 - VOLTAMETRIA CÍCLICA REVESTIMENTO COM ELETRODO ARAME TUBULAR TUBROD 71 ULTRA	50
FIGURA 21 - VOLTAMETRIA CÍCLICA DO REVESTIMENTO COM ELETRODO ARAME TUBULAR UTP AF LEDURIT 60; A) 15°C E 35°C; B) 25°C E 45°C.....	50
FIGURA 22 - CURVA DE POLARIZAÇÃO DO AÇO ASTM A 516 GRAU 60, A 1MV/SEG, INTERVALO +/- 150 mV EM RELAÇÃO A E_{CORR} . NAS TEMPERATURAS 15,25,35,45°C	51
FIGURA 23 - CURVA DE POLARIZAÇÃO DO ARAME TUBULAR ESAB TUBORD 71 ULTRA, A 1MV/SEG, INTERVALO +/- 150 mV EM RELAÇÃO A E_{CORR}	52
FIGURA 24 - CURVA DE POLARIZAÇÃO DO ARAME TUBULAR UTP AF LEDURIT 60, A 1MV/SEG, INTERVALO +/- 150 mV EM RELAÇÃO A E_{CORR} . NAS TEMPERATURAS 15,25,35,45°C	52
FIGURA 25 - COMPARATIVO DAS TAXAS DE CORROSÃO	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 POTENCIAL DO ELETRODO PADRÃO, TENDO COMO REFERÊNCIA O ELETRODO DE HIDROGÊNIO	17
TABELA 2 - POTENCIAL DE ALGUNS ELETRODOS DE REFERÊNCIA, COM RELAÇÃO AO ELETRODO DE HIDROGÊNIO (25°C).....	19
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LICOR BRANCO	23
TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ASTM A 516 GRAU 60	24
TABELA 5 - PROPRIEDADES QUÍMICAS DO AÇO ASTM A 516 GRAU 60.....	24
TABELA 6 - PROPRIEDADES DO ELETRODO ARAME TUBULAR	26
TABELA 7 - ELETRODO ARAME TUBULAR UTP AF LEDURIT 60	26
TABELA 8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LICOR BRANCO	41
TABELA 9 - POTENCIAL DE REPOUSO DO AÇO ASTM A 516 GR 60.....	46
TABELA 10 - POTENCIAL DE REPOUSO DO ARAME TUBULAR TUBROD 71 ULTRA.....	47
TABELA 11 - POTENCIAL DE REPOUSO DO ARAME TUBULAR LEDURIT 60.....	48
TABELA 12 - VALORES DE E_{CORR} , B_A , B_C , R_P E TX_{CORR} DO AÇO ASTM A 516 GR 60 ...	53
TABELA 13 - VALORES DE E_{CORR} , B_A , B_C , R_P E TX_{CORR} DO ARAME TUBULAR ESAB TUBROD 71 ULTRA	53
TABELA 14 - VALORES DE E_{CORR} , B_A , B_C , R_P E TX_{CORR} DO ARAME TUBULAR UTP AF LEDURIT 60.....	54

LISTA DE SIGLAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

HCl - Ácido Clorídrico

Hg₂Cl₂ - Cloreto Mercuroso

KCl - Cloreto de Potássio

AgCl - Cloreto de Prata

DCE - Dupla Camada Elétrica

ET - Eletrodo de Trabalho

ER - Eletrodo de Referência

Mn - Manganês

Si - Silício

NaCl - Cloreto de Sódio

UTP AF LEDURIT 60 - Norma DIN 8555: MF 10-GF-60-GR

ESAB tubrod 71 Ultra - ASME SFA-5.20

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS	10
SUMÁRIO	11
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivos Específicos	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. CORROSÃO.....	15
2.1.1. Corrosão Eletroquímica.....	15
2.1.2. Potencial de um eletrodo.....	16
2.1.3. Eletrodo de referência	18
2.1.4. Potencial de Repouso	19
2.1.5. Polarização.....	20
2.1.6. Passivação.....	21
2.2. LICOR BRANCO	22
2.3. AÇO ASTM A 516 GRAU 60	23
2.4. REVESTIMENTO	24
2.5. ENSAIO METALOGRÁFICO	27
2.6. ENSAIO DE CORROSÃO.....	29
3. METODOLOGIA	38
3.1. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	38
3.2. ENSAIO METALOGRAFICO	38
4. RESULTADOS E ANÁLISES	44
4.1. MICROGRAFIAS.....	44
4.2. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS	45
5. CONCLUSÕES	55
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

A indústria utiliza grande quantidade de materiais metálicos, e como esses materiais são submetidos a vários meios, tem-se a necessidade de realizar vários testes padronizados, para prevenir acidentes e a parada da produção.

A corrosão afeta vários equipamentos e materiais metálicos. Estes sofrem tal processo pela ação do tempo ou do ambiente, como por exemplo em regiões costeiras, no qual a água do mar acentua a corrosão.

Grande parte das máquinas ou sistemas mecânicos que trabalham sob o efeito de algum meio corrosivo, devem ser seguidamente vistoriadas para que não ocorram acidentes devido a ruptura do material, o qual preferencialmente se apresenta em aços.

Essas manutenções preventivas tem o intuito de obter mais informações sobre a corrosão dos aços, para assim diminuir as manutenções corretivas e aumentar a eficiência das indústrias. Também vale salientar a importância de se programar essas manutenções, para que não ajam paralisações repentinas.

A indústria de produção do papel tem em uma de suas fases a obtenção da pasta de celulose, através do processo chamado de polpação, o qual consiste na separação das fibras de madeira com a utilização de energia química e/ou mecânica.

A região dos campos gerais tem uma empresa de produção de papel que utiliza o processo chamado de Kraft para a obtenção da pasta de celulose. Este processo utiliza digestores descontínuos de aço para o cozimento dos cavacos, que posteriormente são soldados visando o aumento de sua vida útil. Mas com o passar do tempo, a região soldada e a parede do digestor sofrem os efeitos da corrosão.

Gentil (1996) discorre que a corrosão localizada muitas vezes resulta em fraturas repentinas de partes críticas de aviões, trens, automóveis e pontes, causando desastres que podem envolver perda de vidas humanas.

Os digestores são construídos em aço ASTM 516 grau 60 e posteriormente suas paredes são recuperadas através de revestimentos a base de soldagem com eletrodo arame tubular, para que tenham uma maior vida útil. Essa recuperação serve tanto para recuperar a espessura do vaso de pressão como também revestir esta parede com um material resistente a corrosão. Essa junção de materiais e a preocupação com o risco que a corrosão pode causar devido ao perigo de acidentes, fomentou a pesquisa deste trabalho, que visa determinar a taxa de corrosão do aço ASTM A 516 grau 60 soldado com dois tipos de eletrodo arame tubular.

1.1.OBJETIVOS

Determinar qual a taxa de corrosão do Aço ASTM A 516 grau 60 e das soldas de revestimentos com Eletrodo Arame tubular OK ESAB (tubrod 71 - ULTRA) e eletrodo UTP AF LEDURIT 60, em meio corrosivo de "licor branco", através de técnicas eletroquímicas.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Analisar a metalografia do Aço ASTM A 516 grau 60: Realizar a análise metalografica para determinar a influência do processo de solda nos grãos do material, e o que isso possa ocasionar.
- Determinar a taxa de corrosão em função da variação de temperatura do Aço ASTM A 516 Grau 60 e das soldas de revestimentos com Eletrodo Arame tubular OK ESAB (tubrod 71 - ULTRA) e com UTP AF LEDURIT 60, em "Licor Branco".

1.2.JUSTIFICATIVA

O fenômeno da corrosão acontece em vários tipos de materiais em nossa vida cotidiana. Estudar e entender especificamente um desses fenômenos pode ajudar a evitar grandes perdas nas indústrias e inspirou a presente pesquisa.

Através do estudo dos materiais utilizados nesta pesquisa pretendemos comparar, através da taxa de corrosão, o aumento ou não da vida útil do material já utilizado, Eletrodo Arame tubular OK ESAB (tubrod 71 - ULTRA), na recuperação das paredes do digestor, com um possível novo material, UTP AF LEDURIT 60, a ser utilizado para este fim. Para isso utilizamos técnicas eletroquímicas que nos forneceram as taxas de corrosão dos respectivos materiais expostos ao "Licor Branco" em função do aumento gradual da temperatura deste licor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CORROSÃO

Corrosão é o ataque de um meio sobre o material metálico, geralmente o aço, e que causa a deterioração do mesmo. Esse ataque pode ser químico ou eletroquímico, contendo ou não esforços mecânicos. Essa deterioração causa mudanças indesejáveis na estrutura química do material, o que pode tornar o material inadequado para o uso (GENTIL, 1996).

Para Callister (2008), corrosão é definida como um ataque destrutivo e gradual do metal, em geral de natureza eletroquímica e começa na superfície. Segundo o mesmo, 5% da receita financeira de uma nação industrializada é gasta em manutenções relacionadas à corrosão.

Mello (2008) utilizando da escrita de Fontana (1987) explica que a corrosão pode ser dividida em corrosão seca (mecanismo químico) ou aquosa (mecanismo eletroquímico). A corrosão seca ocorre sem a presença de líquido, sendo vapores e gases os agentes desse tipo de corrosão. A corrosão aquosa ocorre na presença de um líquido, podendo este ser água ou não, sendo que por meio deste fenômeno que grande parte das corrosões ocorrem.

2.1.1. Corrosão Eletroquímica

De acordo com Régis Júnior (2011) os processos corrosivos em sua grande maioria, são de ordem eletroquímica. O que caracteriza esse processo é que ele só é verificado em presença de um eletrólito (meio corrosivo). Mostrando assim uma situação em que duas ou mais reações ocorrem simultânea e espontaneamente, sendo pelo menos uma de natureza anódica e outra de natureza catódica. Essas reações caracterizam o funcionamento de uma pilha de corrosão.

Para Gemelli (2001) um pilha eletroquímica é um sistema composto de dois eletrodos em contato com um fio condutor e imerso em um eletrólito (Condutor iônico), conforme demonstrado na figura 1.

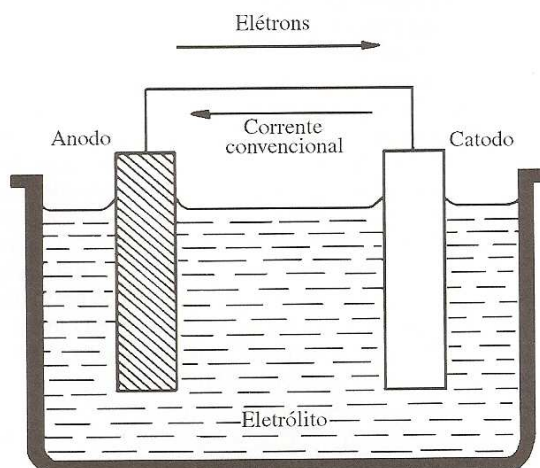


Figura 1 - Representação da pilha eletroquímica
Fonte: Gentil (1996)

Para Gentil (1996) a pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes:

- Anodo: Eletrodo em que ocorre oxidação e a corrente elétrica em forma de íons metálicos entram no eletrólito.
- Eletrólito: Condutor que contém íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo.
- Catodo: Eletrodo no qual ocorre a redução. A corrente elétrica sai do eletrólito.
- Circuito metálico: Ligação metálica entre o anodo e o catodo, tendo o fluxo de elétrons, no sentido anodo-catodo.

2.1.2. Potencial de um eletrodo

De acordo com Regis Junior (2011) a grandeza chamada de potencial de eletrodo é associada à origem das pilhas de corrosão. Todas as vezes que tivermos um metal em contato com um eletrólito ele acaba desenvolvendo uma diferença de potencial elétrico entre eles, podendo essa diferença ser positiva, negativa ou nula.

Esse "potencial do eletrodo" em pilhas eletroquímicas é determinado com a utilização de um voltímetro conectado no circuito externo da pilha. As pilhas apresentam uma diferença apenas no potencial elétrico. Com isso, é importante estabelecer uma referência, a qual todas as semipilhas serão comparadas. Assim será obtido o potencial de eletrodo padrão (CALLISTER, 2011).

O potencial padrão de alguns metais, tendo como referência o Hidrogênio, é demonstrado na tabela 1. Esses potenciais são também chamados de série eletroquímica.

Tabela 1 Potencial do eletrodo padrão, tendo como referência o eletrodo de Hidrogênio

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

Fonte: Gentil (1996)

2.1.3. Eletrodo de referência

A medição do potencial de um eletrodo padrão se torna quase inviável, e por isso é necessária a utilização de um instrumento que auxilie na medição do potencial do eletrodo, sendo este o eletrodo de referência.

Para realizar essa medição é construída uma pilha constituída de duas meias-pilhas, no qual de uma lado temos o material a estudar, e de outro o eletrodo de referência (GEMELLI, 2001).

Tem-se o eletrodo de referência de hidrogênio, mas também pode-se utilizar alguns outros. Afinal, para Wolyneec (2003), na prática o eletrodo de hidrogênio possui uma certa complexidade, e com isso são utilizados os eletrodos de referências, também chamados de secundários.

Esses eletrodos secundários podem ser, o eletrodo de calomelano, o eletrodo de prata-cloreto de prata e o eletrodo de cobre-sulfato de cobre.

Wolyneec (2003) aponta a formação desses eletrodos, como é descrito abaixo:

- Eletrodo de hidrogênio: constituído de uma barra de platina platinizada que possui a finalidade de absorver grande quantidade de hidrogênio, com isso agindo como um eletrodo de hidrogênio. O eletrodo é imerso em uma solução de 1M de íons hidrogênio (ou uma solução de 1M de HCl), no qual o hidrogênio gasoso é borbulhado a uma temperatura de 25 °C e pressão de 1 atm.
- Eletrodo de Calomelano: obtido através do contato do mercúrio com cloreto de mercurioso (Hg_2Cl_2) e em uma solução de cloreto de potássio (KCl).
- Eletrodo prata-cloreto de prata: constituído de um fio de prata revestido com prata, sendo convertido parcialmente em AgCl em solução de ácido clorídrico. Após essas etapas é imerso em solução de cloreto.
- Eletrodo cobre-sulfato de cobre: consiste basicamente em cobre metálico imerso em solução saturada de sulfato de cobre.

O eletrodo de calomelano é um dos mais utilizados em ensaios de laboratórios e possui um potencial em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio igual a +0,252 V a 25 °C. O eletrodo de prata-cloreto de prata possui um potencial de +0,2225 V a 25 °C. Já o eletrodo de cobre-sulfato de cobre possui um potencial em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio de +0,316 V a 25 °C.

Os potenciais dos eletrodos utilizados como referência, em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, são demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 - Potencial de alguns eletrodos de referência, com relação ao eletrodo de hidrogênio (25°C)

Eletrodo	Eletrólito	Reação de eletrodo	E (V)
De calomelano	KCl, saturado	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	0,241
	KCl, 1 M		0,280
	KCl, 0,1M		0,333
De sulfato mercurioso	K_2SO_4 , saturado	$\text{HgSO}_4 + 2e = 2\text{Hg} + 2\text{SO}_4^{2-}$	0,658
De óxido mercúrico	NaOH, 1 M	$\text{HgO} + \text{H}_2\text{O} + 2e = \text{Hg} + 2\text{OH}^-$	0,098
De cloreto de prata	KCl, saturado	$\text{AgCl} + e = \text{Ag}^+\text{Cl}^-$	0,195
De Sulfato de cobre	CuSO_4 , saturado	$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0,316

Fonte: Gemelli (2001)

2.1.4. Potencial de Repouso

A anotação e verificação do potencial de repouso ou potencial de corrosão em circuito aberto, como também é conhecido, de um determinado metal (eletrodo de trabalho), é realizado para que se possa determinar o tempo mínimo que o metal necessita para atingir um estado estacionário em um eletrólito (RÉGIS JUNIOR, 2011). Para o mesmo, esse indicativo pode ser utilizado para determinar o quanto um metal é afetado por um meio.

Assim que acontece a exposição do metal ao eletrólito, tem-se uma variação do potencial ao longo de um determinado tempo. Durante esta variação, o metal transforma o filme óxido e este é formado na sua superfície, na dupla camada elétrica (DCE). A acomodação eletroquímica entre o DCE e o eletrólito faz com que ocorra essa mudança de potencial.

Segundo Régis Junior (2011), a determinação do potencial de repouso é realizada através do monitoramento da diferença de potencial entre dois eletrodos, no qual um deles é o material de estudo, sendo chamado de eletrodo de trabalho (ET) e outro como o eletrodo de referência (ER).

2.1.5. Polarização

Para Dutra e Nunes (1999, p. 29), a polarização consiste na "variação de um potencial de um eletrodo causada pela variação da corrente elétrica".

Quando dois eletrodos são imersos em um eletrólito, estabelece-se um potencial entre eles, e assim que o circuito é fechado observa-se que a diferença de potencial diminui. O potencial do anodo se aproxima do catodo e do catodo se aproxima do anodo. Com isso tem-se o que é chamado de polarização dos eletrodos, sendo a polarização anódica (anodo) e a polarização catódica (catodo) (GENTIL, 1996).

De acordo com Régis Junior (2011) a interface de um metal imerso em uma dada solução pode ser caracterizada por uma relação corrente-potencial ou curvas de polarização (curva $E \times i$). Na curva, tem-se o valor da corrente de acordo com a variação do potencial para um material em estudo.

Segundo Régis Junior (2011, p. 37), "esta técnica é uma ferramenta muito utilizada para a análise de potenciais de proteção e no estudo de películas depositadas nas superfícies de diversos tipos de metais".

A Figura 2 mostra a representação da curva de polarização anódica e catódica num diagrama monologarítmico, considerando também o potencial de equilíbrio e densidade de corrente.

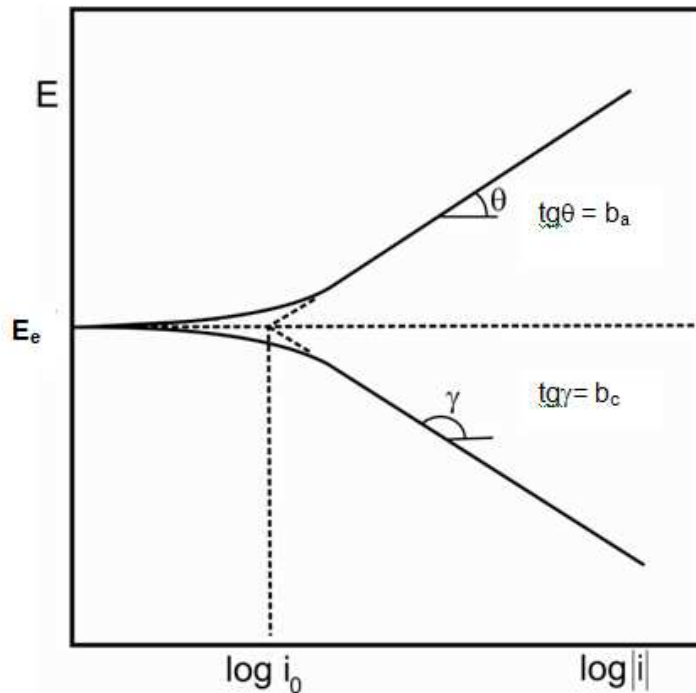


Figura 2 - Curvas de polarização anódica (i_a) e catódica (i_c) num diagrama monologarítmico E_e = potencial de equilíbrio, i_0 = densidade de corrente de troca. Fonte: Régis Junior (2011)

2.1.6. Passivação

Um metal tem um comportamento passivo, pois este é resultante da formação de um filme de óxido extremamente fino e com grande aderência na superfície do metal, servindo como uma barreira de proteção contra uma corrosão adicional (CALLISTER, 2008).

Mello (2008) descreve a curva na qual um metal sofre passivação. Nessa curva tem-se três regiões: ativa, passiva e transpassiva. Na região ativa tem-se um comportamento linear. Na região passiva ocorre um aumento do potencial e com isso a densidade de corrente diminui subitamente, até um valor muito baixo, ficando assim independente da variação do potencial. Com altos valores de potencial a densidade de corrente aumenta de maneira súbita, região essa denominada de transpassiva, onde podem ocorrer regiões com corrosão localizada. A curva é apresentada na figura 3 a seguir.

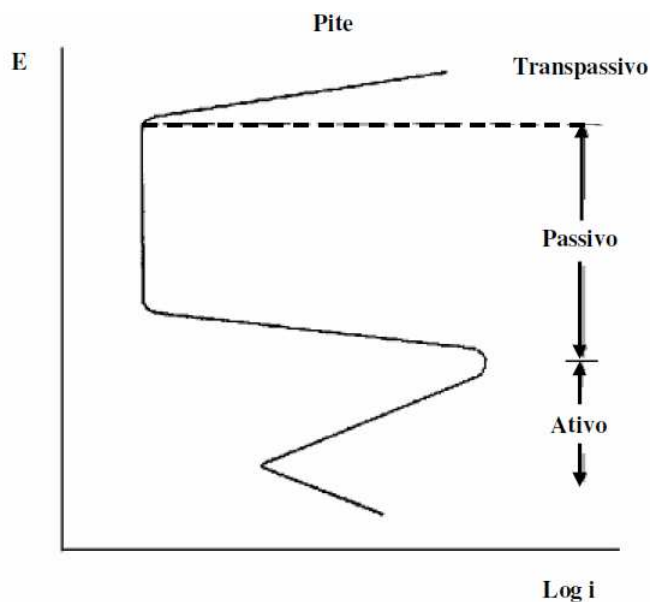


Figura 3 - Taxa de corrosão de um material passivável
Fonte: Mello (2008)

2.2. LICOR BRANCO

O licor branco também chamado de licor de cozimento alcalino, é o meio corrosivo estudado no presente trabalho. Para Régis Júnior (2004), o licor branco por possuir diferentes compostos de sódio e vários conceitos são utilizados para caracterizá-lo. Devido o Na_2S ionizar-se no licor de cozimento, aumentando assim a concentração de OH^- , não é possível mensurar a concentração dos químicos no licor de cozimento, em relação ao peso do hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, sendo que com isso é necessário expressar a concentração dos químicos em relação ao um material padrão equivalente (RÉGIS JUNIOR, 2004).

Nos Estados Unidos e no Brasil, o Na_2O é utilizado como químico padrão, sendo que todos os químicos que o licor possui, são expressos em termos da quantidade equivalente de Na_2O (RÉGIS JUNIOR, 2004). Na tabela 3 abaixo está listada a composição do licor branco e seus fatores de conversão química do licor.

Tabela 3 - Composição química do licor branco

Denominação Química	Fórmula Química	Massa Molar (g/mol)	Massa Molar equiv. de 62 partes para Na ₂ O	f* de peso para química de Na ₂ O equiv.	f* de química de Na ₂ O equiv para peso
	A	B	C	D= 62/C	F=C/62
Oxido de sódio	Na ₂ O	62.0	62.0	1.000	1.000
Hidróxido de sódio	NaOH	40.0	80.0	0.775	1.290
Sulfeto de sódio	Na ₂ S	78.0	78.0	0.795	1.258
Hidrossulfeto de sódio	NaHS	56.0	112.0	0.554	1.807
Carbonato de sódio	Na ₂ CO ₃	106.0	106.0	0.585	1.710
Sulfato de sódio	Na ₂ SO ₄	142.0	142.0	0.437	2.290
Tiosulfato de sódio	Na ₂ S ₂ O ₃	158.1	158.1	0.392	2.635
Sulfito de sódio	Na ₂ SO ₃	126.0	126.0	0.492	2.032

f* = fator de conversão

Fonte: Régis Junior (2004)

2.3. AÇO ASTM A 516 GRAU 60

O aço referenciado é utilizado na fabricação de digestores na indústria de papel, em caldeiras e vasos de pressão, pois possui algumas características melhoradas, como resistência mecânica, elevada soldabilidade e consideráveis níveis de ductilidade e tenacidade, devido ao seu baixo nível de carbono, quando comparado à outros aços. Aços com essas características são chamados de alta resistência e baixa liga (RÉGIS JUNIOR, 2004).

Esse aço contém como principais elementos de liga Mn e Si. Tais elementos quando dissolvidos em ferrita tem como consequência o aumento da dureza e da resistência mecânica, antes mesmo de ocorrer qualquer tratamento térmico (CARDOZO, 2003).

O aço ASTM A 516 grau 60 é considerado de médio carbono acalmado (baixas temperaturas), e é de extrema importância ter as propriedades mecânicas e químicas conhecidas. Na tabela 4 tem-se as propriedades mecânicas e a tabela 5 as propriedades químicas.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do AÇO ASTM A 516 grau 60

Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento mín.(MPa)	Alongamento a ruptura (%)
415-550	220	27

Fonte: Régis Junior (2004)

Tabela 5 - Propriedades químicas do AÇO ASTM A 516 grau 60

Elemento% (peso)	C máx	Fe min.	Mn	P máx	S max)	Si
Composição	0,23	98,08	0,85-1,2	0,035	0,035	0,15-0,4

Fonte: Régis Junior (2004)

2.4. REVESTIMENTO

O processo para a aplicação do revestimento sobre o metal consiste na soldagem por arco com arame tubular. É um processo que promove a deposição de metal através da formação de um arco elétrico entre o eletrodo arame tubular e a peça de trabalho (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O processo de soldagem com eletrodo arame tubular tem um gás como proteção, do arco e do cordão de solda, que passa no interior do eletrodo e pode ser auxiliada por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. O gás pode ter outras funções como estabilizar o arco ou adicionar elementos de liga entre outros (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A figura 4 detalha um esquema do processo.

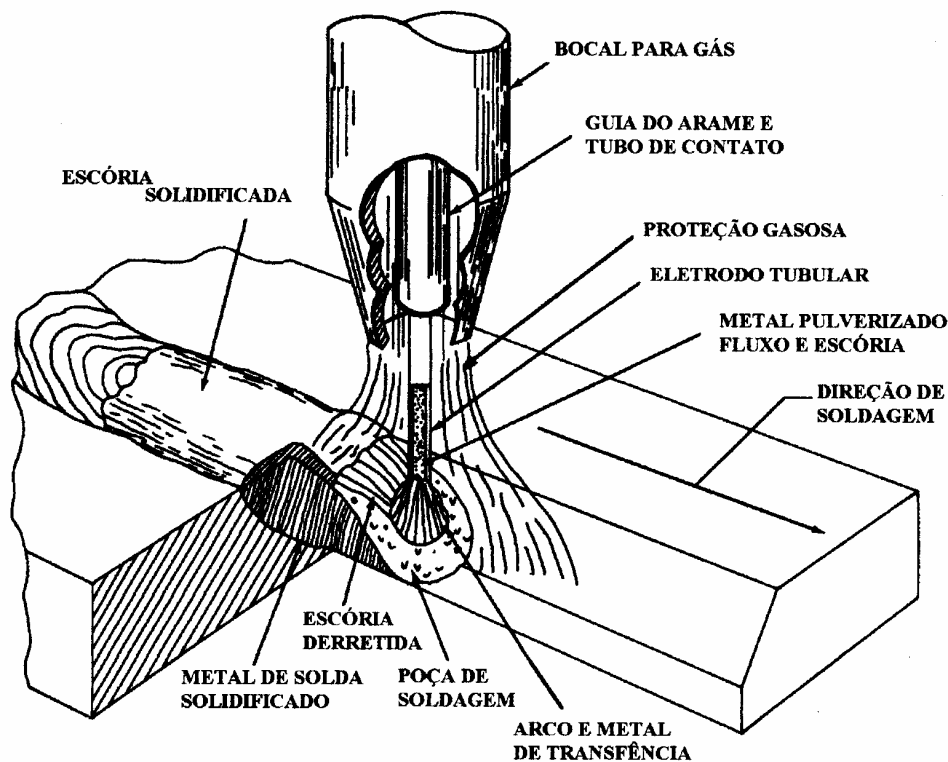


Figura 4 - Soldagem com arame tubular com proteção gasosa
 Fonte: Bracarense (2000)

Ao abordar sobre o processo de soldagem com eletrodo arame tubular, Bracarense (2000) aponta que o mesmo é utilizado para soldar aços de baixo carbono, baixa liga, inoxidáveis na construção de vasos de pressão, em tubulações utilizadas na indústria química, petrolífera e geração de energia.

Nesta pesquisa o eletrodo usado para fazer a deposição de material sobre o aço ASTM A 516 grau 60, será o arame tubular tubrod 71 ultra da marca ESAB e um eletrodo arame tubular UTP AF LEDURIT 60.

Para o fabricante ESAB (2014), o eletrodo Tubrod segue algumas especificações como: eletrodo arame tubular rutilico, para soldagem com um único passo ou para multipasse podendo ser soldado em todas as posições. Apresenta uma grande faixa de parâmetros operacionais, baixo índice de respingos e ótima remoção de escória, é destinado a soldar aços de baixo carbono e construção pesada em geral (ESAB, 2014).

A própria fabricante comenta que este tipo de soldagem, com eletrodos de baixo e médio carbono é utilizados em vários segmentos do mercado como: indústria naval, "caldeirarias", indústria automotiva e transporte pesado.

Os parâmetros para os eletrodos são demonstrados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Propriedades do Eletrodo Arame tubular

Eletrodo	Gás de proteção/tipo de corrente	Metal Depositado		Propriedades mecânicas	D (mm)	Corrente/tensão	Rendimento (%)	Deposição (kg/h)
		C	Mn					
Tubrod 71 ultra	100% CO ₂ CC+	C	0,04	L.R. 600MPa	1,20	150A, 28V	87	1,90
		Si	0,50	L.E. 580MPa		210A, 29V	87	2,85
		Mn	1,30			250A, 30V	88	3,85
						290A, 33V	88	4,85
						330A, 34V	90	5,75
	Ar + 20~25% CO ₂ CC+	C	0,055	L.R. 670MPa	1,60	190A, 27V	87	2,75
		Si	0,60	L.E. 630MPa		300A, 30V	87	4,60
		Mn	1,50			365A, 33V	88	5,60
						410A, 33V	89	6,35
						450A, 33V	90	7,30
			500A, 39V	90	9,11			

Fonte: Catálogo de produtos ESAB (2014)

Segundo o fabricante UTP, o eletrodo arame tubular UTP AF LEDURIT 60 possui alto teor de cromo, sendo usado para revestimentos duros de componentes sujeitos à altas taxas de abrasão, cominado com impactos moderados e compressão. A UTP comenta que este tipo de eletrodo é indicado para revestimentos de martelos de moinhos, transportador helicoidal de bagaço, dentes de escavadeiras, entre outros.

Tabela 7 - Eletrodo arame tubular UTP AF LEDURIT 60

Eletrodo	Dureza	Composição	Corrente	Rendimento	Eletrodo Tubular (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)
ATP AF LEDURIT 60	57 - 62 HC	C - 4,4%	CC	5 - 7 Kg/h	1,6	150 - 350	22 - 29
		Si - 0,3%	polaridade		2,0	200 - 400	24 - 30
		Mn - 0,3%	inversa (+)		2,4	250 - 450	24 - 30
		Cr - 27%			2,8	300 - 500	24 - 31

Fonte: Catalogo de produtos bohler Welding group (2015)

2.5. ENSAIO METALOGRÁFICO

Metalografia está destinada ao estudo da macroestrutura e da microestrutura de metais e ligas. Ela é de grande ajuda para determinar problemas a respeito da durabilidade dos metais, quando são submetidos a condições degradantes de serviço, mostrando a causa dos defeitos e ajudando no avanço tecnológico (CORDEIRO, 19??).

Em relação à macrografia, Oliveira (19??) relata que ela é a análise de uma peça ou amostra metálica, através de uma seção polida e geralmente atacada por um reativo apropriado. Ainda para o mesmo autor, micrografia consiste no estudo de produtos metálicos com o auxílio de microscópio, pois são necessários grandes aumentos visando determinar os constituintes e a textura dos metais.

Primeiramente deve-se determinar o local na peça que deseja-se fazer o ensaio, ou seja, a seção que vai ser feita. Este local vai de escolha do operador, levando em conta os dados a serem obtidos e forma da peça (OLIVEIRA, 19??).

A superfície escolhida deve ser plana e lixada, e então ela sofre ataque de um reagente químico adequado. Para obter uma superfície plana é realizado um corte com uma serra, maçarico ou torno. Em seguida são utilizadas algumas lixas, para melhorar a qualidade da superfície, e então é feito o ataque com um reagente químico.

No tocante à micrografia, Colpaert (2008) realça que ela é o estudo de produtos metalúrgicos, com o intuito de identificar fases presentes e seu tamanho de grão (granulação), quanto a sua forma, natureza, quantidade e distribuição de seus constituintes. Esse processo utiliza lentes com um grande aumento para a visibilidade microscópica do material, aumentos esses que podem chegar a 500x, mostrando assim diversos grão formados pelo processo de fabricação.

Colpaert (2008) demonstra que as técnicas micrográficas consistem em:

- Escolha da seção da peça, pelo operador, a qual deve ser estudada;
- Lixamento e polimento para uma superfície plana e polida;
- Ataque químico da superfície preparada;
- Análise no microscópio e sua caracterização.

A figura 5 apresenta uma peça embutida e pronta para o ensaio metalográfico através de visualização em microscópio. Ela mostra a superfície polida para eliminar falhas no processo de preparação da amostra.

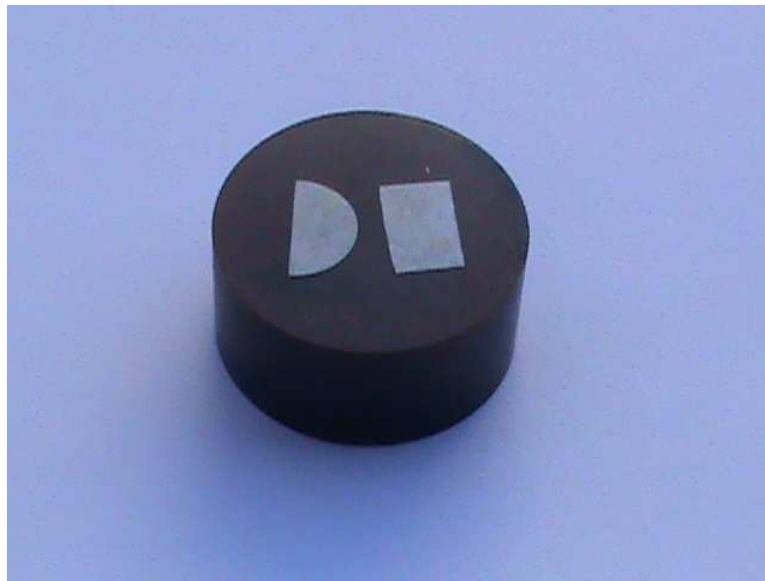


Figura 5 - Amostra embutida e pronta pra o ensaio metalográfico
Fonte: Segato (2013)

Na figura 6, Segato (2013) expõe a micrografia de um aço cortado na seção transversal, no qual foi caracterizado a diferença das formas dos grãos do material.

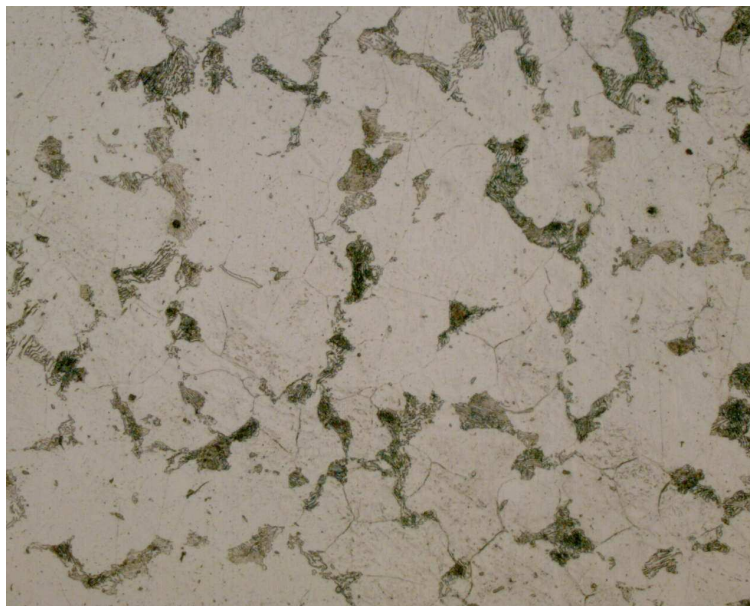


Figura 6 - Micrografia de um aço com um corte transversal
Fonte: Segato (2013)

Através da caracterização por micrografia do material pode-se demonstrar a diferença dos corpos de provas a serem ensaiados. Com isso, tem-se a diferença entre cada grão do material e seu devido grau de deformação. Em consonância com a pesquisa Colpaert (2008), percebe-se que o material pode ter várias características, podendo ser duro, mole, tenaz entre outros. As características podem variar devido à tratamentos térmicos e trabalhos mecânicos.

2.6. ENSAIO DE CORROSÃO

Segundo Régis Junior (2004), solução aquosa, ou eletrólito, consiste em uma variedade de espécies carregadas e descarregadas (cátions, ânions, dipolos da molécula de água, moléculas orgânicas, impurezas etc), as quais, sob condições de equilíbrio estão aleatoriamente orientadas, e não definem nenhuma direção preferencial quando houver ausência de um campo elétrico.

Entretanto, sobre a influência de uma diferença de potencial em função de seu potencial de equilíbrio, surgirá uma carga que será transportada através da solução pelos cátions e ânions que migram para o cátodo e para o anodo, sofrendo reações de redução e oxidação, respectivamente.

Esta condução de carga através de um eletrólito gera uma corrente elétrica no sistema, que está relacionada com a diferença de potencial que a ocasionou pela equação de Butler-Volmer:

$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{-\alpha n F}{RT} \eta\right) - \exp\left(\frac{(1-\alpha) n F}{RT} \eta\right) \right] \quad (2.6.1)$$

Onde :

- α é o coeficiente de transferência de carga
- η é o número total de elétrons envolvidos no processo de oxidação-redução.

Para Régis Junior (2004), quando um eletrodo está em equilíbrio com a solução, a taxa da reação catódica por unidade de área é igual a da reação anódica e não há uma transferência de carga; o potencial do eletrodo estará então em equilíbrio e é dito estar despolarizado:

$$i_a = i_c = i_0 \quad (2.6.2)$$

onde i_0 é a densidade de corrente de troca e,

$$\eta = E - E_{eq} \quad (2.6.3)$$

Assim, o sobrepotencial (η) é definido como a diferença do potencial do eletrodo e o seu valor de equilíbrio.

Para um processo catódico no qual o eletrodo é polarizado até um potencial E_c , teremos que:

$$i_c > i_a \quad (2.6.4)$$

onde i_c é a densidade de corrente catódica que resulta quando E_c é mais negativo que o potencial de equilíbrio E_{eq} , e por definição:

$$\eta_c = E_c - E_{eq} \quad (2.6.5)$$

E, desde que para uma reação catódica $E_c < E_{eq}$, então $\eta_c < 0$, isto é, é sempre negativo.

Similarmente, para um processo anódico, $i_a > i_c$, então:

$$\eta_a = E_a - E_{eq} \quad (2.6.6)$$

Desde que $E_a < E_{eq}$, teremos que $\eta_a > 0$, isto é, sempre positivo.

Se a reação estiver ocorrendo a uma taxa finita, o potencial do eletrodo será polarizado para potenciais E_p , e desde que $E_p = \eta_a + E_{eq}$ a equação 2.6.1, para um processo anódico será:

$$i_a = i_0 \exp\left[\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_a\right] \quad (2.6.7)$$

Similarmente para um processo catódico:

$$i_c = i_0 \exp\left[\frac{-\alpha nF}{RT} \eta_c\right] \quad (2.6.8)$$

sendo que em ambos os casos, quanto maior a magnitude de i_0 e η (levando-se em conta o sinal apropriado) maior será a taxa por unidade de área da reação.

A densidade de corrente total é a diferença entre as duas densidades de corrente parcial, e pode ser escrita como:

$$i = i_c - i_a \quad (2.6.9)$$

Substituindo as equações 2.6.7 e 2.6.8 na equação 2.6.9, tem-se:

$$i = i_0 \left[\exp\left[\frac{-\alpha nF}{RT} \eta_c\right] - \exp\left(\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_a\right) \right] \quad (2.6.10)$$

e, através desta equação podemos ver que quando $\eta=0$, $i=i_0$ e a taxa do processo anódico será igual à do processo catódico, isto é, a reação estará em equilíbrio.

Contudo, se η é positivo, o primeiro termo diminui, enquanto que o segundo termo aumenta, e para valores elevados de η ($\eta \gg 0$) a equação pode ser simplificada para:

$$i_a = i_0 \left[\exp \left[\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_a \right] \right] \quad (2.6.11)$$

Similarmente, para potenciais elevados e negativos, o primeiro termo se torna desprezível, e

$$i_c = i_0 \left[\exp \left[\frac{(-\alpha)nF}{RT} \eta_c \right] \right] \quad (2.6.12)$$

Fazendo-se o logaritmo das equações 2.6.11 e 2.6.12, tem-se para reação anódica:

$$\ln i_a = \ln i_0 + \frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_a \quad (2.6.13)$$

e, portanto

$$\eta_a = -\frac{RT}{(1-\alpha)nF} \ln i_0 + \frac{RT}{(1-\alpha)nF} \ln i_a \quad (2.6.14)$$

Similarmente, para o processo catódico, teremos:

$$\eta_c = \frac{RT}{\alpha nF} \ln i_0 - \frac{RT}{\alpha nF} \ln i_c \quad (2.6.15)$$

que foi obtida pela primeira vez por Tafel a partir de estudos experimentais da reação de evolução de hidrogênio sobre vários metais, e foi expresso na forma de uma equação de uma reta:

$$\eta = a + b \log i \quad (\text{equação de Tafel}) \quad (2.6.16)$$

Deve-se prestar atenção aos sinais das equações (2.6.14) e (2.6.15), em que teremos os coeficientes de Tafel para um processo catódico como sendo igual a:

$$a = \frac{2,3RT}{\alpha nF} \log i_0 = \frac{0,0591}{\alpha n} \log i_0 \quad (25^\circ\text{C}) \quad (2.6.17)$$

e

$$b = \frac{-2,3RT}{\alpha nF} = \frac{-0,0591}{\alpha n} \quad (25^\circ\text{C}) \quad (2.6.18)$$

e para um processo anódico:

$$a = \frac{2,3RT}{(1-\alpha)nF} \log i_0 = \frac{0,0591}{(1-\alpha)n} \log i_0 \quad (25^\circ\text{C}) \quad (2.6.19)$$

e

$$b = \frac{-2,3RT}{(1-\alpha)nF} = \frac{-0,0591}{(1-\alpha)n} \quad (25^\circ\text{C}) \quad (2.6.20)$$

Para sobrepotencias pequenos ($\eta \rightarrow 0$), a equação 2.6.10, pode ser simplificada usando a identidade:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots \quad e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \dots \quad (2.6.21)$$

e, utilizando apenas os dois primeiros termos da identidade, teremos:

$$i = i_0 \left[\left(1 - \frac{\alpha nF \eta}{RT} \right) - \left(1 + \frac{(1-\alpha)nF \eta}{RT} \right) \right] \quad (2.6.22)$$

que reduz para:

$$i = \frac{i_0 nF \eta}{RT} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{RTi}{nFi_0} \quad (2.6.23)$$

mostrando que η em função de i é linear com uma inclinação de $\frac{RT}{nFi_0} = R_{TC}$ para valores de sobrepotencial próximos de zero. A equação 2.6.23 é aplicável tanto para reações anódicas quanto para reações catódicas.

A inclinação da reta $\frac{RT}{nFi_0}$ e denominada de resistência de transferência de carga R_{TC} . Outros parâmetros importantes podem ser obtidos a partir das equações 2.6.11 e 2.6.12. Assim se desenvolvermos matematicamente a equação 2.6.12, referente a corrente catódica teremos:

$$i_c = i_0 \left[\exp \left[\frac{(-\alpha)nF}{RT} \eta_c \right] \right] \quad (2.6.24)$$

então :

$$\ln i_c = \ln i_0 - \frac{\alpha nF}{RT} \eta_c, \quad (2.6.25)$$

ou

$$2,3 \log i_c = 2,3 \log i_0 - \frac{\alpha nF}{RT} \eta_c \quad (2.6.26)$$

dividindo a equação 2.6.26 por 2,3 teremos:

$$\log i_c = \log i_0 - \frac{\alpha nF}{2,3RT} \eta_c \quad (2.6.27)$$

Representando $\log i_c$ em função de η_c teremos uma inclinação da reta com valor constante $-\frac{\alpha nF}{2,3RT}$, que é denominado de coeficiente de Tafel catódico (β_c).

De forma análoga para os processos anódicos, obtemos a inclinação, $\frac{(1-\alpha)nF}{2,3RT}$ denominada coeficiente de Tafel anódico (β_a).

Segundo Régis Junior (2004), existe uma relação linear entre potencial e a densidade de corrente catódica e anódica aplicada, desde que, os valores deste último sejam baixos. Contudo, o reconhecimento da importância destas observações é devido a Stern et al (1957), que empregaram o termo polarização linear para descrever a linearidade da curva η - i na região do potencial de corrosão (E_{corr}). A inclinação desta reta, $\Delta E - \Delta i$, é denominada de resistência a polarização, R_p .

Stern-Geary (1957), com base em análises detalhadas das curvas de polarização das reações catódicas e anódicas envolvidas na corrosão metálica, e assumindo que ambas reações são controladas pela transferência de carga e que a queda ôhmica iR envolvida na determinação do potencial é desprezível, derivou a seguinte expressão:

$$\frac{1}{R_p} = \left(\frac{\Delta i}{\Delta E} \right)_{E_{corr}} = 2,3 * \left(\frac{\beta_a + |\beta_c|}{\beta_a * \beta_c} \right) * i_{corr} \quad (2.6.28)$$

ou seja:

$$i_{corr} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2,3 * R_p * (\beta_a + |\beta_c|)} \quad (2.6.29)$$

onde R_p é a resistência a polarização determinada para potenciais próximo ao potencial de corrosão, e β_a e β_c são as constantes de Tafel. Esta equação mostra que a taxa de corrosão é inversamente proporcional a R_p (ou diretamente proporcional a inclinação recíproca da curva ($\Delta E - \Delta i$), e que a corrente de corrosão pode ser determinada desde que as constantes de Tafel sejam conhecidas.

Stern e co-autores, selecionando valores arbitrários de constante de Tafel, mostraram que a taxa de corrosão determinadas pela técnicas de resistência de polarização foram idênticas com as taxas de corrosão determinadas pelo método de perda de massa.

O fato de uma reação próxima ao eletrodo ocorrer em várias etapas é necessário para que se determine o mecanismo e a etapa determinante de velocidade da reação, para se fazer uma análise cinética desta reação. Para exemplificar, considere que a etapa de descarga dos íons é a etapa determinante da velocidade da reação, mais precisamente em relação a equação 2.6.15, para uma reação catódica, envolvendo um único elétron ($n=1$), podemos escrevê-la da seguinte forma:

$$\eta_a = + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0 - \frac{RT}{\alpha F} \ln i \quad (2.6.30)$$

e diferenciando esta equação:

$$\frac{d\eta}{d \log i} = -2,3 * \frac{RT}{\alpha F} \quad (2.6.31)$$

se α for considerado igual a 0,5

$$\frac{d\eta}{d \log i} = -2,3 * \frac{RT}{0,5F} \quad (2.6.32)$$

e considerando, $R=8,3143\text{J/mol.K}$; $T= 25^{\circ}\text{C}$ ou $T= 298\text{K}$ e $F= 96487 \text{ C/mol}$, teremos que:

$$\frac{d\eta}{d \log i} = \frac{-2,3 * 8,3141 * 298}{0,5 * 96487} = -0,118\text{V} \quad (2.6.33)$$

Assim a inclinação de Tafel igual a -118 mV/década pode ser o diagnóstico de um mecanismo de reação no qual a descarga do íon e a etapa determinante.

No ensaio para a determinação das taxas de corrosão, descrito anteriormente, os valores dos potenciais de corrosão (E_{corr}), resistência de polarização (R_p) e corrente de corrosão (I_{corr}) determinados, poderão ser feitas fazendo as seguintes considerações:

- A resistência a polarização, R_p , é calculada como o inverso da inclinação da curva I vs. E , próximo ao potencial de circuito aberto e este valor é retirado do teste de micropolarização;
- O potencial de corrosão, E_{corr} , é o potencial obtido após um intervalo de 55 minutos, ou seja, o potencial de circuito aberto do sistema após este intervalo;

A corrente de corrosão estimada I_{corr} , é baseada na relação de Stern – Geary (1957), que pode ser determinada pela equação abaixo:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2,3 * (\beta_a + \beta_c) * R_p} \quad (2.6.34)$$

β_a e β_c são os coeficientes de Tafel e quando não poderem ser calculados pelos dados experimentais, portanto o valor de 0,118 V/década para os dois coeficientes pode ser utilizado, resultando numa aproximação, descrita abaixo:

$$\text{Coef. de Stern - Geary (SGC)} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2,3 * (\beta_a + \beta_c)} = 0,0256 \quad (2.6.35)$$

desta forma, a I_{corr} será dada por:

$$I_{\text{corr}} = \frac{0,0256}{R_p} \quad (2.6.36)$$

A taxa de corrosão (cm.ano) é calculada a partir da equação:

$$\text{Tx. Corrosão} = \frac{I_{\text{corr}} \times \text{Peso Equivalente} \times t}{\text{Densidade} \times A \times F} \quad (2.6.37)$$

onde:

- I_{corr} = Corrente de Corrosão (A)
- Peso Equiv. = Massa Atômica / n° elétrons transferidos
- t = tempo em segundo referente a 1 ano.
- d = Densidade do material (g/cm³)
- A = Área do eletrodo (cm²)
- F = Constante de Faraday (96487 C/mol)

Quando os valores de β_a e β_c não poderem ser calculados pelos dados obtidos, da curva de macropolarização, é possível adotar os valores de $\frac{d\eta}{d\log i}$ para a temperatura de 25^o C, como sendo aproximadamente iguais aos dois coeficientes de Tafel (β_a e β_c). Desta maneira o valor de $\frac{d\eta}{d\log i}$ empregado será de 0,0256.

3. METODOLOGIA

3.1. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

O primeiro passo para a realização desta pesquisa foi a soldagem do metal referenciado com o revestimento proposto. O processo de soldagem utilizado foi o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*).

Inicialmente uma chapa do metal foi preparada para o procedimento. Ela foi limpa e dividida ao meio. Sendo que metade foi subdividida em três partes iguais. Essas subdivisões foram marcadas na chapa através de um riscador.

Para iniciar o procedimento de soldagem, a chapa foi pré aquecida até uma temperatura de aproximadamente 100°C conforme EPS. Logo após foram feitos cordões de solda, e estes foram intercalados em cada uma das três subdivisões, com aproximadamente 50 mm de largura e uma espessura mínima de 3 mm.

O eletrodo consumível arame tubular TUBROD 71 ULTRA da marca ESAB foi utilizado no processo de soldagem, com diâmetro de 1,2 mm, e o gás de proteção usado foi o dióxido de carbono (99,9%). Os parâmetros para o eletrodo UTP AF LEDURIT 60 são os mesmo descritos no item 2.4.

3.2. ENSAIO METALOGRAFICO

Foi realizado o ensaio de micrografia, conforme descrito no item 2.5, visando obter uma análise macroestrutural do metal base, da zona termicamente afetada e da região revestida. Nas amostras preparadas (cortadas, lixadas e polidas) foram realizadas caracterização dos corpos de prova, com o auxílio de um microscópio ótico.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas amostras, uma do metal base soldado com eletrodo arame tubular, e outra soldada com eletrodo inoxidável. As duas amostras foram lixadas e polidas, e em seguida sofreram um ataque químico, para que todas as regiões das amostras pudessem ser vistas em microscópio ótico.

3.5 ENSAIO DE CORROSÃO

O ensaio de corrosão pela técnica eletroquímica, ocorreu no laboratório de caracterização eletroquímica da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Para realizar o ensaio de medição do potencial de repouso e taxa de corrosão, foram utilizados os equipamentos Potenciostato PGSTAT 30 (figura 7) da marca AUTOLAB, e um termostato (figura 8) TC-501 Brookfield, que faz com que o fluxo de água passe pela célula eletroquímica padronizando a temperatura dos experimentos na temperatura desejada. O experimento teve como norma regente a ASTM G59-97. Todos os testes foram repetidos três vezes



Figura 7 - Potenciostato PGSTAT 30
Fonte: Autoria própria



Figura 8 - Termostato TC-501 Brookfield
Fonte: Autoria própria

Para viabilizar o ensaio, uma amostra dos materiais soldados e do metal base foram cortadas e submetidas à análise do potencial de repouso. Essa amostra foi imersa por um tempo de aproximadamente 55 minutos, no meio corrosivo. A célula eletroquímica para a realização do ensaio foi composta de: eletrodo de trabalho (ET) (Fig. 10), o eletrodo de referência (ER) (Fig. 9), além de um contra eletrodo (CE) (Fig. 11). Foi utilizado um eletrodo de referência de Calomelano Saturado (ECS) e o meio corrosivo foi o "licor branco".

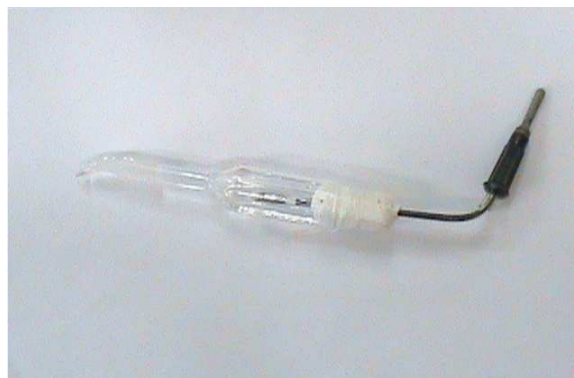


Figura 9 - Eletrodo de referência de Calomelano Saturado
Fonte: Autoria própria

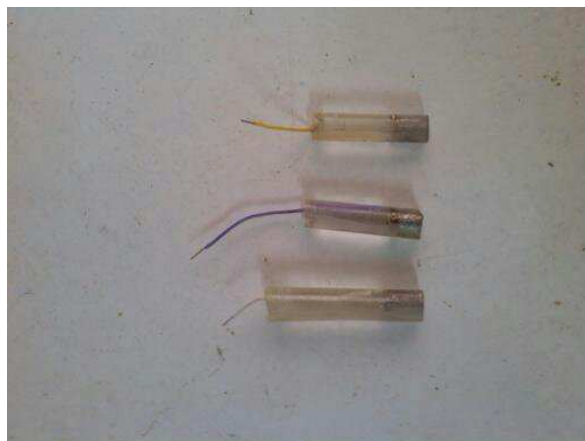


Figura 10 - Eletrodo de trabalho
Fonte: Autoria própria



Figura 11 Contra eletrodo
Fonte: Autoria própria

Para a realização dos testes na célula eletroquímica foi utilizado o “licor branco”. Na tabela 8 encontra-se a composição deste meio corrosivo.

Tabela 8 - Composição química do licor branco

Produtos Químicos	Composição	Dosagem
Carbonato de sódio	Na_2CO_3	16,8g / l
Álcali Total	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{S} + 1/2 \text{Na}_2\text{SO}_3$	138,4g / l
Álcali Efetivo	$\text{NaOH} + 1/2 \text{Na}_2\text{S}$	106,4(g/l)
Sulfidez	$100 \text{Na}_2\text{S} / \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	25 %

Fonte: Régis Junior, (2004)

Todos os procedimentos descritos a seguir foram realizados para as temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C e 45°C, para cada amostra. Para a coleta de dados ser feita, foi utilizado o software do potenciostato, o GPES da AUTOLAB.

Para iniciar os testes e obter o Potencial de corrosão (E_{corr}), fez-se necessário esperar a solução de licor branco atingir a temperatura padrão para o teste, de 25°C. Após a temperatura ser atingida, o eletrodo de trabalho, contra eletrodo, e eletrodo de referência foram introduzidos na célula eletroquímica (figura 12).

Em seguida foram conectadas todas as ligações elétricas nos eletrodos e foi dado início na leitura e acompanhamento do potencial do eletrodo. A leitura foi feita durante um período de 55 minutos, sendo que o valor final obtido é o valor do potencial de repouso (E_{rep}).



Figura 12 - Célula eletroquímica
Fonte: Autoria própria

Após a leitura do potencial de repouso, foi dado início à micropolarização cíclica. Nesta etapa foi feita a varredura dos potenciais de repouso no sentido anódico 10mV mais positivo que o potencial de repouso, invertendo na direção catódica até 10mV mais negativo que o potencial de repouso e assim voltou ao potencial inicial. Com a micropolarização é determinada a resistência de polarização (R_p) das amostras ensaiadas.

Por fim iniciou-se a etapa de macropolarização, que começou com uma potencia 150mV mais anódico que o potencial de repouso em direção a 150mV mais catódico que o potencial de repouso. Neste ensaio determinamos os valores das constantes de Tafel Anódica (β_a) e catódica (β_c).

Com todos os dados coletados, foram elaborados os gráficos e cálculos para se obter a taxa de corrosão dos materiais.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. MICROGRAFIAS

Conforme mencionado no item 3.2, as micrografias abaixo, são do aço ASTM a 516 Gr 60 (Fig. 13), solda com arame tubular ESAB Tubrod 71 Ultra (Fig. 14) e arame tubular UTP AF LEDURIT 60 (Fig. 15), observadas em microscópio ótico.



Figura 13 - Micrografia aço ASTM A 516 Gr 60
Fonte: Autoria própria

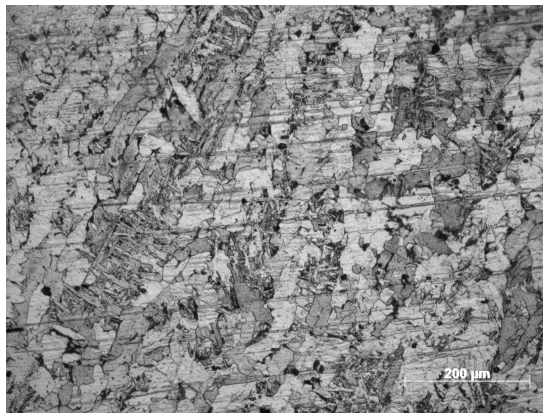
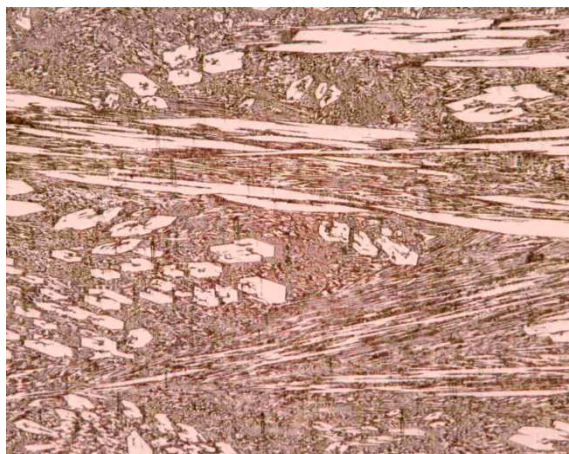


Figura 14 - Micrografia deposição arame tubular ESAB Tubrod 71 Ultra
Fonte: Autoria própria



**Figura 15 - Micrografia arame tubular UTP AF LEDURIT 60 (Vilela's)
Fonte: Autoria própria**

Observando a figura 13, percebe-se a presença de perlita (grãos escuros) e ferrita (grãos claros). Na figura 14, referente ao metal depositado com eletrodo arame tubular Tubrod 71 Ultra, vê-se colônias de ferritas nos contornos de grãos e ferrita.

E na figura 15, referente à micrografia do LEDURIT 60, observa-se que é constituída de carbeto poligonais e prismáticos de ferro e cromo (áreas claras) e austenita e martensita (áreas claras).

4.2. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

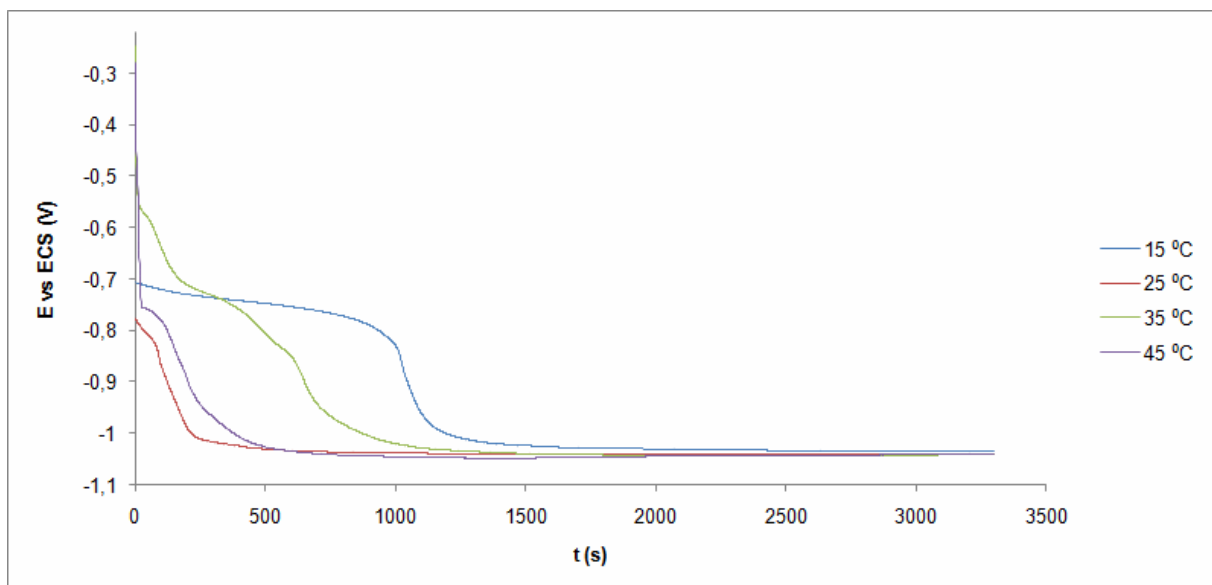
Os ensaio eletroquímicos foram realizados para as amostras de AÇO ASTM 516 Gr 60, o revestimento com eletrodo arame tubular ESAB Tubrod 71 Ultra e com UTP AF LEDURIT 60 nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C e 45°C. Os resultados obtidos dos testes eletroquímicos, foram tratados com a ajuda do software do potenciostado da Autolab, GPES. Estes ensaios foram baseados na norma ASTM G59-97.

O meio corrosivo utilizado para os ensaios foi o “licor branco”. A seguir temos as tabelas simplificadas e os gráficos dos potenciais de repouso do aço ASTM 516 A Gr 60 (tabela 9, gráfico 16), revestimento de eletrodo arame tubular Tubrod 71 Ultra (tabela 10, gráfico 17) e arame tubular UTP AF LEDURIT 60 (tabela 11, gráfico 18). Após cada gráfico temos a análise dos referidos resultados obtidos.

Tabela 9 - Potencial de repouso do AÇO ASTM A 516 Gr 60

Temperaturas	Potencial de repouso (V)				
	E rep. t=0	E rep. t=5	E rep. t=15	E rep. t=30	E rep. t=55
15°C	-0,706	-0,736	-0,789	-1,028	-1,035
25°C	-0,777	-1,017	-1,037	-1,040	-1,041
35°C	-0,246	-0,732	-1,006	-1,042	-1,041
45°C	-0,279	-0,968	-1,044	-1,046	-1,039

Fonte: Autorial própria

**Figura 16 - Gráfico do potencial de repouso do AÇO ASTM A 516 Gr 60**

Fonte: Autorial própria

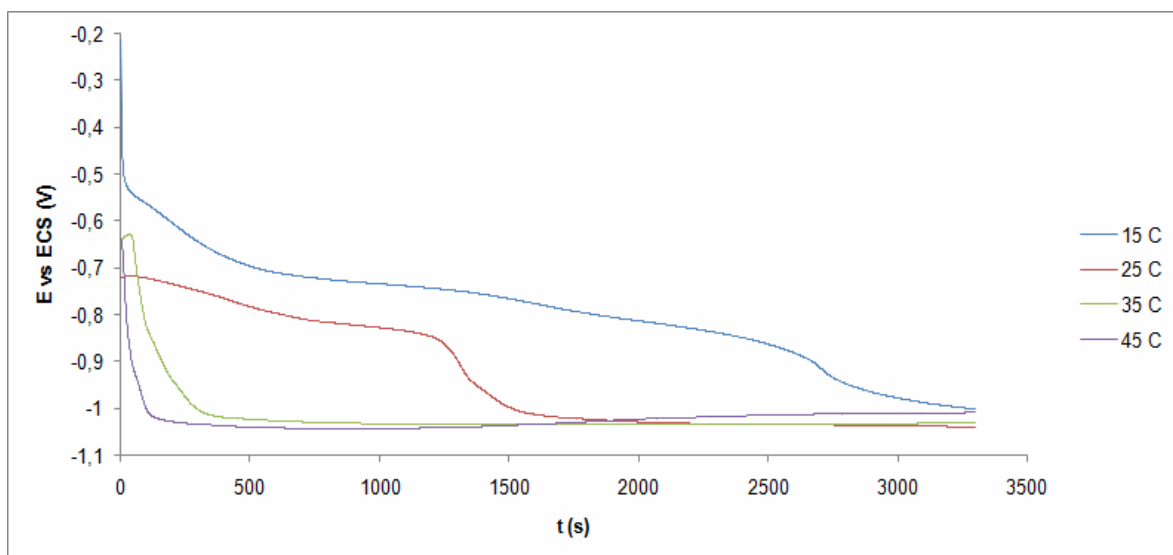
Observa-se na tabela 9 e no gráfico 16 que os ensaios a 15°C e a 25°C iniciam-se com potenciais em torno de -0,706V e -0,777V respectivamente, sendo que o ensaio a 25°C, desloca-se rapidamente para -1,017V contudo ambas se estabilizam catodicamente em torno de -1,035V e -1,041V.

Os ensaios a 35°C e 45°C iniciam seus potenciais em -0,246V e -0,279V respectivamente, deslocando-se catodicamente mais rapidamente nos primeiros 5 minutos até -0,732V e -0,968V, e estabilizaram em -1,041V e -1,039V. Como visto nos ensaios o potencial de repouso após 55 minutos são muito próximos.

Tabela 10 - Potencial de repouso do arame tubular Tubrod 71 Ultra

Temperaturas	Potencial de repouso (V)				
	E rep. t=0	E rep. t=5	E rep. t=15	E rep. t=30	E rep. t=55
15°C	-0,211	-0,644	-0,729	-0,796	-1,002
25°C	-0,720	-0,749	-0,821	-1,023	-1,039
35°C	-0,644	-1,003	-1,031	-1,035	-1,03
45°C	-0,639	-1,034	-1,42	-1,028	-1,008

Fonte: Autorial própria

**Figura 17 - Gráfico do potencial de repouso do Arame tubular Tubrod 71 Ultra**

Fonte: Autorial própria

Observa-se na tabela 10 e na figura 17 que o ensaio a 15°C inicia-se com um potencial de repouso elevado, em torno de -0,211V. Logo, ocorre uma diminuição nos primeiros 5 minutos para -0,644V, e então segue até chegar ao potencial de -1,002V. O ensaio a 25°C tem um comportamento semelhante, contudo o potencial que inicia em -0,720V diminui com o decorrer do tempo até cerca de -1,039V.

No ensaio a 35°C, observou-se que o potencial inicialmente em -0,644V desloca-se anódicamente até cerca de -0,627V, voltando a deslocar-se

catodicamente até estabilizar em $-1,03\text{V}$. Essa variação de potencial nos primeiros segundos sugere que o material pode estar se oxidando, e que provavelmente forma um filme passivante na superfície do eletrodo de trabalho. Em seguida, observa-se provavelmente a quebra da camada passivante e o potencial desloca-se para a região catódica.

Já o ensaio a 45°C inicia com o potencial em $-0,439\text{V}$, e desloca-se catodicamente até estabilizar em $-1,008\text{V}$.

Tabela 11 - Potencial de repouso do arame tubular LEDURIT 60

Temperaturas	Potencial de repouso (V)				
	E rep. t=0	E rep. t=5	E rep. t=15	E rep. t=30	E rep. t=55
15°C	-0,588	-0,632	-0,664	-0,688	-0,719
25°C	-0,705	-0,757	-0,829	-0,994	-1,005
35°C	-0,165	-0,662	-0,735	-0,865	-1,008
45°C	-0,153	-0,632	-0,710	-1,006	-1,015

Fonte: Autoria própria

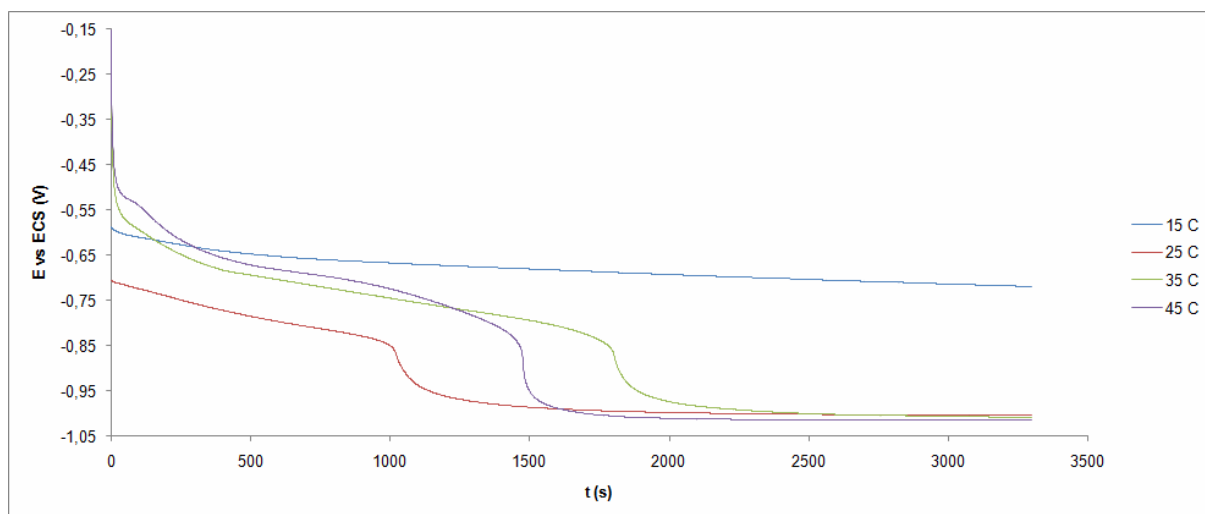


Figura 18 - Gráfico do potencial de repouso do LEDURIT 60

Fonte: Autoria própria

Na tabela 11 e na figura 18 temos o potencial de repouso do material soldado com eletrodo arame tubular LEDURIT 60, sendo que os testes a 15°C e a 25°C iniciam-se com seus potenciais mais baixos, em torno de $-0,588\text{V}$ e $-0,705\text{V}$. Contudo, a amostra a 15°C tem pouca variação durante o teste, tendo em vista que após 55 minutos chega a um potencial de repouso de $-0,719\text{V}$, e o teste a 25°C tem um potencial de repouso em torno de $-1,005\text{V}$.

As amostras a 35°C e 45°C começam com um potencial mais elevado, ficando em torno de -0,165V e -0,153V, mas deslocam-se catodicamente até chegar em um potencial de repouso em torno de -1,008V e -1,015V.

Analisando os potenciais de repouso dos três materiais, nota-se que a variação de temperatura afeta de forma pouco significativa os valores finais do potencial de repouso, pois todos convergem para um resultado muito próximo uns dos outros. Entretanto, a amostra de arame tubular LEDURIT 60 a 15°C, possui um potencial de repouso bem mais elevado em relação a todos os outros. Entre os três materiais testados, o aço ASTM A 516 é o que possui os menores valores de potencial de repouso.

A existência deste filme passivante pode ser observada através das medidas de micropolarização realizadas imediatamente após 55 minutos.

Com a determinação do potencial de repouso do eletrodo, com o eletrodo ainda inserido na célula eletroquímica, inicia-se o ensaio de micropolarização, que gera gráficos que relacionam a corrente de corrosão em relação a variação de voltagem, e esta análise fornece os valores de resistência a polarização R_p .

Analisando as figuras 19, 20 e 21 (a,b), estas que estão representando os ensaios de micropolarização, pode-se observar as diferenças de R_p em relação a variação de temperatura.

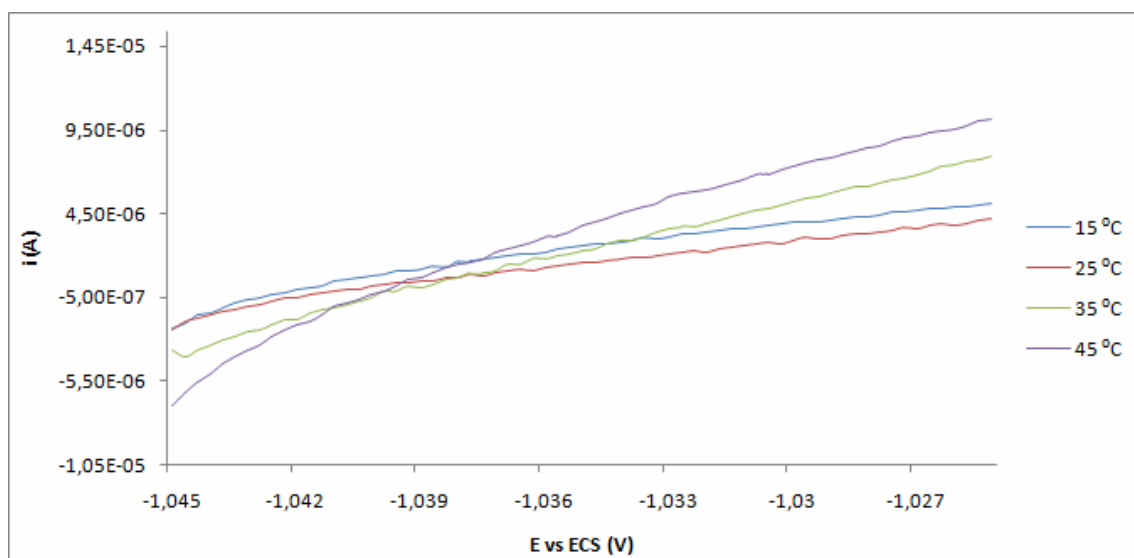


Figura 19 - Voltametria cíclica do aço ASTM A 516 Gr

Fonte: Autoria própria

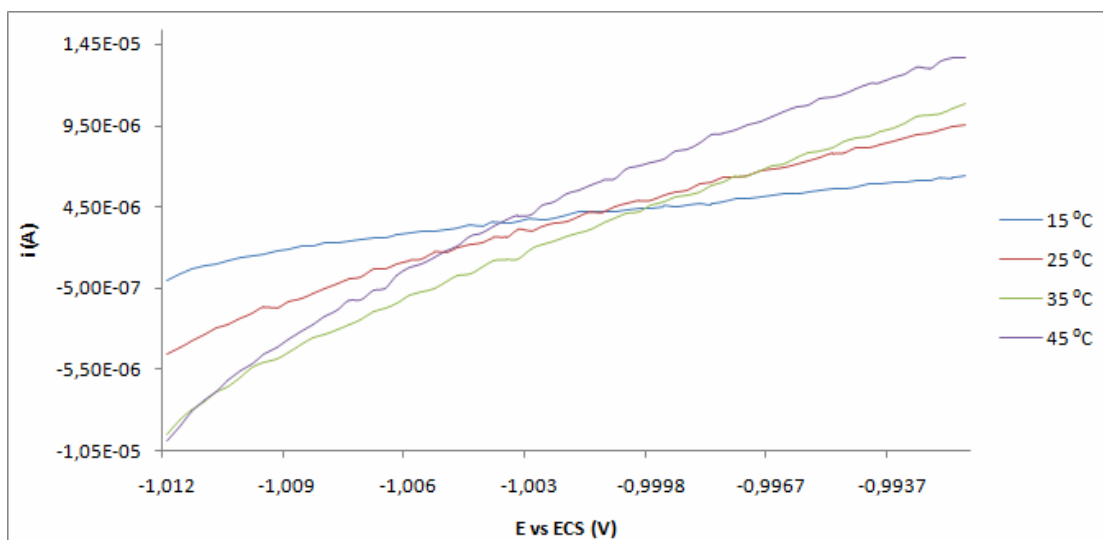
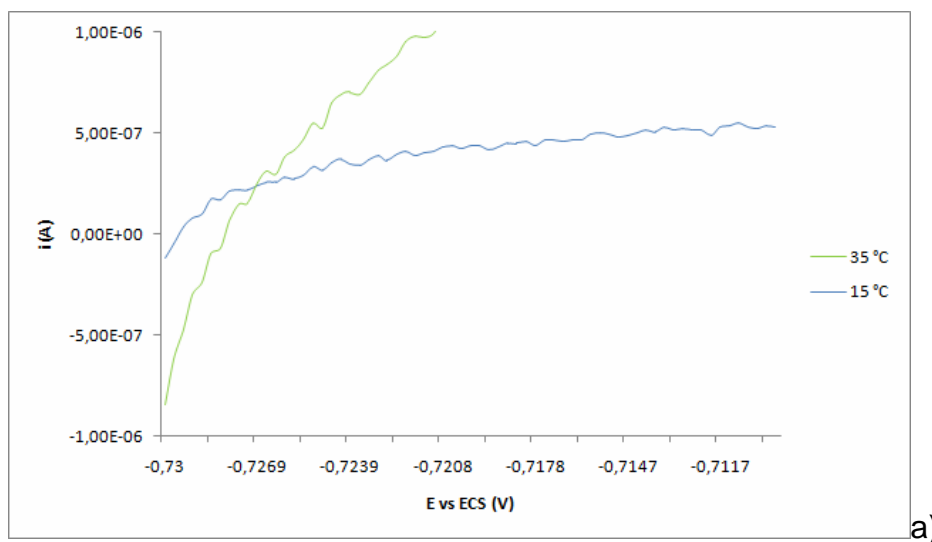
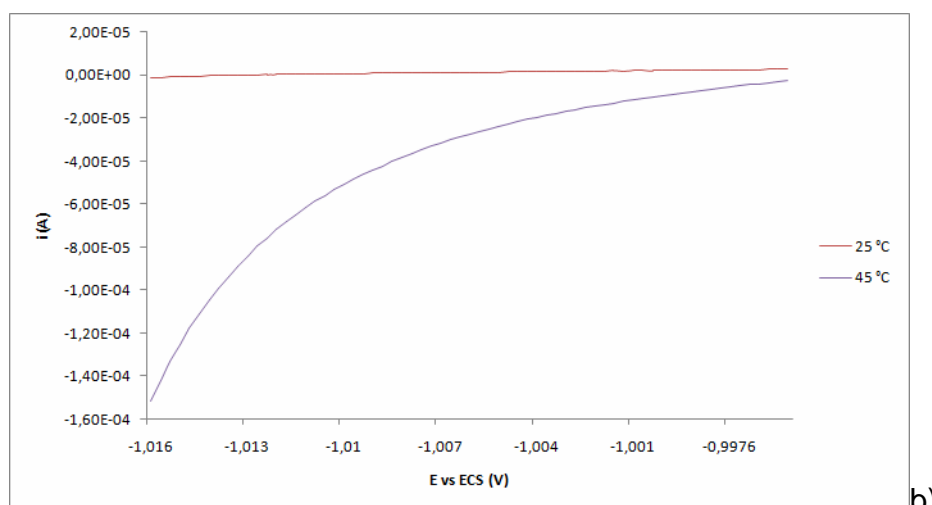


Figura 20 - Voltmetria cíclica revestimento com eletrodo arame tubular Tubrod 71 ultra
Fonte: Autoria própria



a)



b)

Figura 21 - Voltmetria cíclica do revestimento com eletrodo arame tubular UTP AF LEDURIT 60; a) 15°C e 35°C; b) 25°C e 45°C
Fonte: Autoria própria

Para o aço ASTM A 516 Gr 60 verifica-se uma variação de R_p de 3191 Ω para o ensaio a 15°C até 1368 Ω para o ensaio a 45°C. Para o ensaio com o eletrodo arame tubular Tubrod 71 Ultra observa-se uma variação do R_p de 4089 Ω , e para o ensaio à 15°C até 937,2 Ω para o ensaio a 45°C.

No ensaio realizado da amostra de arame tubular LEDURIT 60 a variação é de 72210 Ω para 15°C até 288,1 Ω para o ensaio há 45°C.

A partir dos dados dos três materiais ensaiados, observa-se previamente que a amostra do arame tubular LEDURIT 60 possui os maiores valores de R_p e, portanto, indicara menores valores de taxa de corrosão.

Com os dados coletados da micropolarização, ainda sem retirar as amostras da célula eletroquímica, é dado início ao ensaio de macropolarização, o que nos fornecerá os valores das regiões catódicas e anódicas (β_a e β_c), para então calcular a taxa de corrosão de cada material. Como mostrado nas figuras 22, 23 e 24.

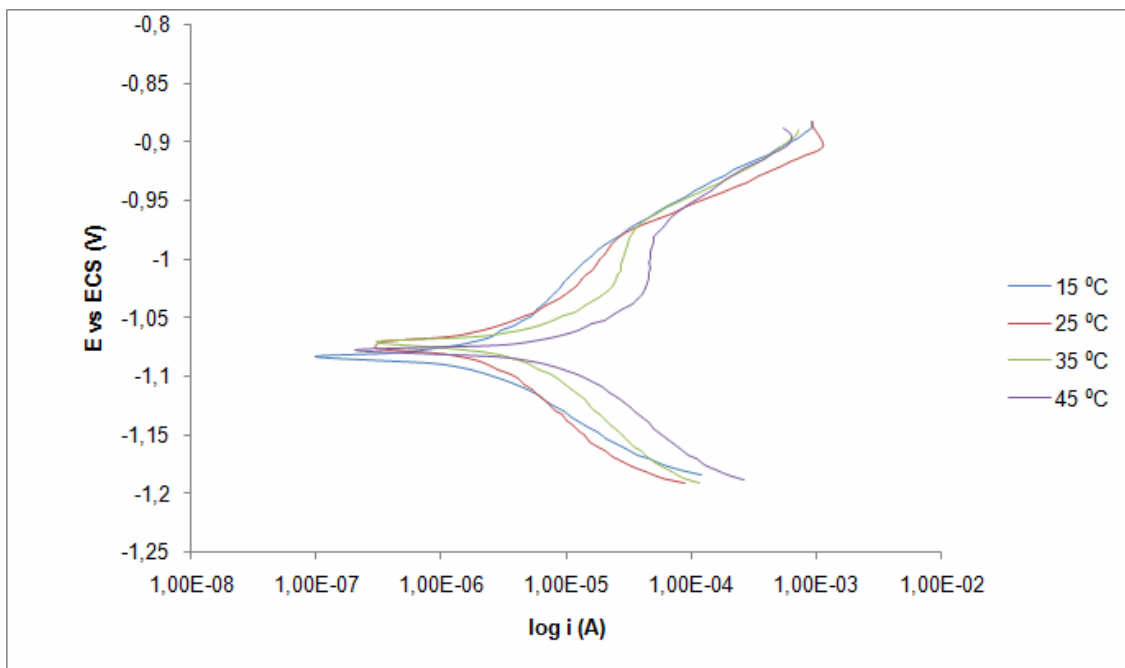
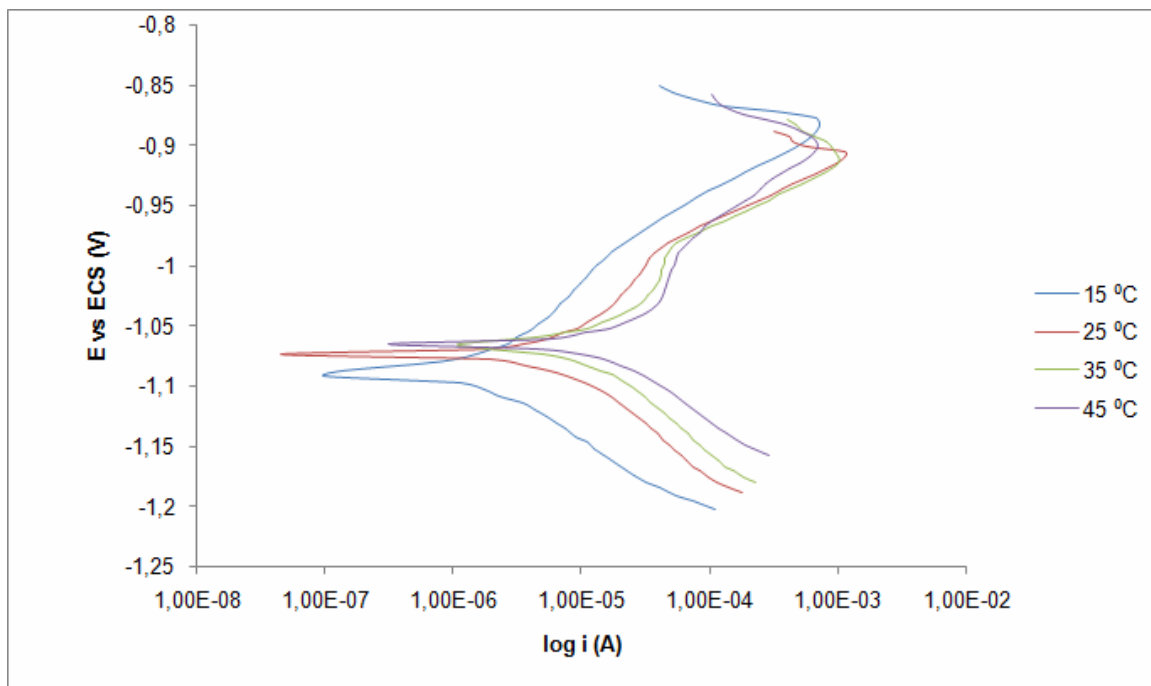
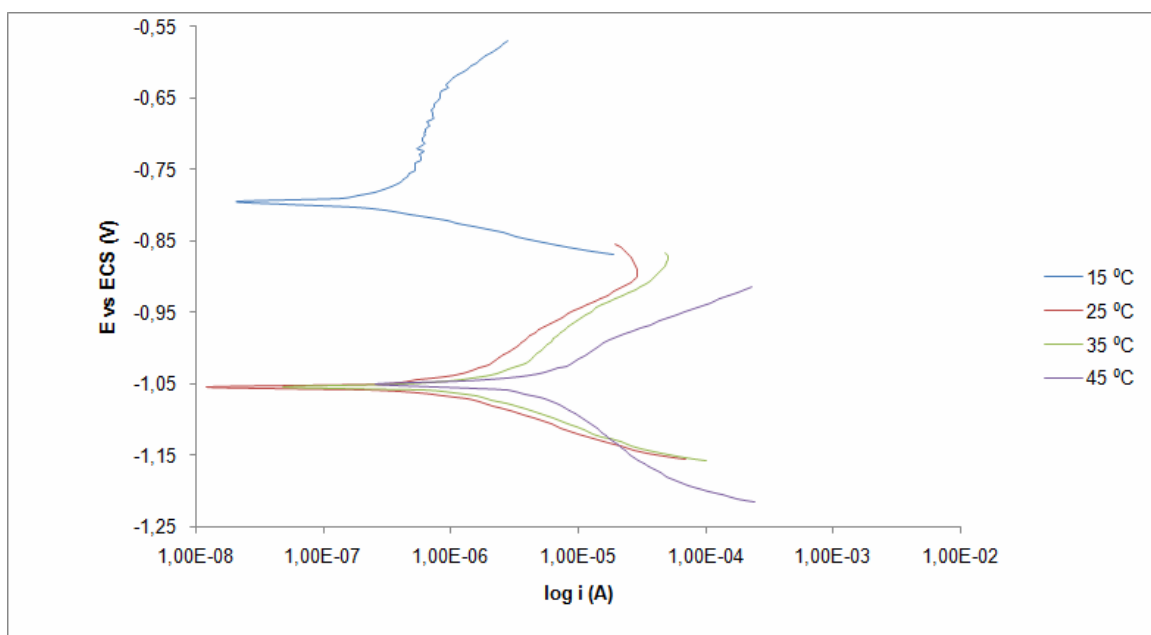


Figura 22 - Curva de polarização do Aço ASTM A 516 Grau 60, a 1mV/seg, intervalo +/- 150 mV em relação a E_{corr} . Nas temperaturas 15,25,35,45°C
Fonte: Autoria própria



**Figura 23 - Curva de polarização do arame tubular ESAB Tubord 71 ultra, a 1mV/seg, intervalo +/- 150 mV em relação a E_{corr} .
Fonte: Autoria própria**



**Figura 24 - Curva de polarização do arame tubular UTP AF LEDURIT 60, a 1mV/seg, intervalo +/- 150 mV em relação a E_{corr} . Nas temperaturas 15,25,35,45°C
Fonte: Autoria própria**

Analisando as figuras 22 e 23, referentes aos ensaios de polarização, observa-se que a região anódica e a região catódica possuem um comportamento semelhante em relação à variação de temperatura. Logo, tanto as reações de oxidação quanto as reações de redução ocorrem de maneira progressiva. Contudo, na região anódica começa uma segunda reação de

oxidação, relacionadas com filmes de passivação, que são formados no eletrodo de trabalho e ocorrem nas regiões de maior concentração de tensão.

A figura 24 possui um comportamento semelhante, contudo observa-se que na temperatura de 15°C, o E_{corr} por ser menor desloca o gráfico de Tafel um pouco acima das outras, e deve ter uma taxa de corrosão menor.

Com a finalização dos testes de micropolarização para determinar a resistência à polarização, e da curva de polarização para obter os valores dos coeficientes de Tafel, foi confeccionada as tabelas 12, 13 e 14 com as taxas de corrosão de cada material para cada temperatura ensaiada em meio corrosivo de licor branco.

Tabela 12 - Valores de E_{corr} , β_a , β_c , R_p e Tx_{corr} do aço ASTM A 516 Gr 60

Temp. (°C)	E_{corr} (V)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	R_p (Ω)	Taxa de corrosão (mm/a)	Taxa de corrosão média (mm/a)
15°C	-1,035	0,031	0,033	3191	0,128	0,2797
25°C	-1,041	0,051	0,044	3814	0,158	
35°C	-1,042	0,041	0,059	1858	0,333	
45°C	-1,033	0,053	0,054	1368	0,500	

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Valores de E_{corr} , β_a , β_c , R_p e Tx_{corr} do arame tubular ESAB Tubrod 71 Ultra

Temp. (°C)	E_{corr} (V)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	R_p (Ω)	Taxa de corrosão (mm/a)	Taxa de corrosão média (mm/a)
15°C	-1,002	0,033	0,037	4089	0,109	0,3707
25°C	-1,039	0,036	0,046	1610	0,321	
35°C	-1,030	0,038	0,052	1122	0,501	
45°C	-1,008	0,039	0,042	937,2	0,552	

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Valores de E_{corr} , β_a , β_c , R_p e T_{xcorr} do arame tubular UTP AF LEDURIT 60

Temp. (°C)	E_{corr} (V)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	R_p (Ω)	Taxa de corrosão (mm/a)	Taxa de corrosão média (mm/a)
15°C	-0,719	0,036	0,025	72210	0,00018	0,01764
25°C	-1,005	0,050	0,042	7023	0,00286	
35°C	-1,008	0,028	0,039	10670	0,00134	
45°C	-1,015	0,040	0,047	288,1	0,0662	

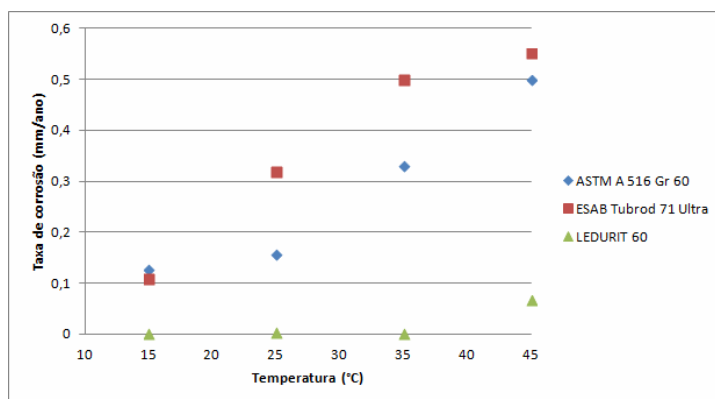
Fonte: Autoria própria

Analisando a tabela 12, a qual representa os dados dos ensaios eletroquímicos e dos parâmetros calculados, nota-se um aumento na taxa de corrosão do aço ASTM A 516 Gr 60 com o aumento da temperatura.

Analisando a tabela 13, que representa os valores dos ensaios eletroquímicos do material soldado com eletrodo arame tubular ESA Tubrod 71 Ultra, nota-se um aumento na taxa de corrosão com o aumento da temperatura.

E analisando a tabela 14, que representa valores dos ensaios eletroquímicos do material soldado com eletrodo arame tubular UTP AF LEDURIT 60, tem-se um aumento da taxa de corrosão, contudo de maneira menos brusca.

Na figura 25 abaixo, temos a comparação das taxas de corrosão das 3 amostras ensaiadas, em relação a cada temperatura.

**Figura 25 - Comparativo das Taxas de corrosão**

Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÕES

Para as três amostras ensaiadas, o potencial de repouso diminuiu com o aumento da temperatura, contudo os ensaios do aço ASTM A 516 Gr 60 a 25°C e o ensaio do arame tubular UTP AF LEDURIT 60 a 35°C tiveram um pequeno aumento no potencial de repouso.

Ainda, a taxa de corrosão de todos os aços aumentou com o aumento da temperatura, sendo que a média da taxa de corrosão dos ensaios foram 0,2792mm/ano para o metal base, 0,3707mm/ano para o arame tubular Tubrod e 0,01764mm/ano para o arame tubular LEDURIT 60.

Com isso, observou-se que o material mais resistente ao meio corrosivo licor branco é o arame tubular UTP AF LEDURIT 60, sendo em média 20 vezes melhor que o arame tubular ESAB Tubrod 71 Ultra e 15 vezes melhor que o aço ASTM A 516 Gr 60.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar esse e outros aços como eletrodo de trabalho, soldados com outros revestimentos, no meio corrosivo de licor branco, além de fazer outros testes em diferentes temperaturas.

REFERÊNCIAS

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

BRACARENSE, Alexandre Q. **Processo de Soldagem com Arema Tubular - FCAW.** Belo Horizonte, 2000. Disponível em : <ftp://ftp.demec.ufmg.br/lr/ProcessosSoldagem_Pos/TEXTOS/11TextoFCAW.pdf>. Acesso em: 04 Jul. 2014, 23:00.

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

CARDOZO, Francisco Ilo Bezerra. **Previsão da dureza em junta soldada de um aço astm a 516 grau 60 sujeito à corrosão sob tensão com h2s.** 2003, 131 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) Submetida a Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

Catálogo de Produtos ESAB. **Consumíveis e Equipamentos para Soldagem e Corte.** São Paulo: ESAB, 2014. 146 p.

Catálogo de Produtos **bohler Welding group.** Bohler Solda Brasi, 2015. Disponível em: <<http://www.bohlersoldabrasil.com.br/pesquisa/pt/index.php?marca=UTP&tipo=&processo=FCAW&separata=&aws=&fbts=&abs=&dnv=&bv=&lr=>>> Acesso em: 24 Jun. 2015, 16:21.

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

CORDEIRO, Amilton. **Ensaio Metalográfico.** Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. 19??. Disponível em: <<http://amiltoncordeiro.com.br/materiais/materiaisDois/mat.pdf>>. Acesso em: 07 Jul. 2014, 21:33..

DUTRA, Aldo C. **Proteção Catódica: Técnica de combate a corrosão.**Rio de Janeiro:Interciência Ltda, 1999.

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**. 2008, 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARQUES, Paulo V; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

OLIVEIRA, Jaime M. D. **Noções de metalografia**. 19??. Disponível em : <http://profpaulofj.webs.com/apostilas/TECNOLOGIA_Metalografia.pdf>. Acesso em: 07 Jul. 2014, 16:25.

PADILHA, Angelo F.. **Materias de engenharia**. São Paulo: Hemus, 1997.

REGIS JUNIOR, Oscar. **Viabilidade dos revestimentos anticorrosivos com Nb₂O₅/Cu, Nb₂O₅/Ni e Nb₂O₅/Al aplicados por aspensão 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.

STERN, M. and GEARY, A.L., J. **Electrochem. Soc.**, 1957, 104,56.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.