

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CT – CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RENAN DAS NEVES SILVA

RODRIGO PEREIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL DE REVESTIMENTO
ISOLANTE EM TESTES DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO
ELETRODO DISCO ROTATÓRIO**

VITÓRIA

2012

RENAN DAS NEVES SILVA
RODRIGO PEREIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL DE REVESTIMENTO
ISOLANTE EM TESTES DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO
ELETRODO DISCO ROTATÓRIO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

VITÓRIA

2012

RENAN DAS NEVES SILVA
RODRIGO PEREIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL DE REVESTIMENTO
ISOLANTE EM TESTES DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO
ELETRODO DISCO ROTATÓRIO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em _____ de _____ de _____.

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins
Universidade Federal do Espírito Santo

Eng. Davi Pereira Garcia
Universidade Federal do Espírito Santo (Mestrando)

A nossas famílias, amigos e professores.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre corrosão-erosão do aço carbono 1020 em solução de 3% de NaCl, utilizando o método de eletrodo disco rotatório e técnicas eletroquímicas.

O estudo da corrosão-erosão é de grande importância para vários setores da sociedade, visto que este processo corrosivo está associado à parcela significativa de gastos com manutenção e substituição de elementos, principalmente metálicos. Entre os principais setores podemos citar a indústria petrolífera, em que os materiais são impostos a condições extremas de operação. Nesse cenário, estimar os efeitos da corrosão-erosão é fundamental para se evitar desastres ambientais e falhas de equipamentos. As dificuldades dessa estimativa incluem o efeito sinergético, que fazem com que os danos causados pela corrosão-erosão não possam ser tratados como uma simples soma dos efeitos da corrosão e da erosão separadamente.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar os efeitos do perfil do revestimento isolante do disco rotatório nas curvas de polarização e nos parâmetros extraídos a partir delas, comparando alguns resultados experimentais com cálculos teóricos. Esta comparação também visa validar o uso do equipamento PGSTAT302N 30V/2000mA do Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da UFES.

Com os resultados obtidos foi possível comprovar a validação do equipamento PGSTAT302N e concluir que dentre os perfis de revestimento isolante analisados, o perfil *Sino* é o mais adequado para ensaios de corrosão-erosão utilizando eletrodo disco rotatório.

Palavras-chave: corrosão-erosão, disco rotatório, polarização, perfil de revestimento isolante.

ABSTRACT

This paper presents a study of corrosion-erosion of 1020 carbon steel in 3% NaCl solution, using the method of rotating disc electrode and electrochemical techniques.

The study of corrosion-erosion has great importance to various sectors of society, since this corrosive process is associated with a significant portion of expenses for maintenance and replacement of elements, mainly metallic. Among the key sectors, we can mention the oil industry, which certain materials are imposed on extreme operating conditions. In this scenario, estimating the effects of corrosion-erosion is critical to prevent environmental disasters and equipment failures. The difficulties of this estimate include the synergistic effect, which makes the damage caused by corrosion-erosion cannot be treated as a simple sum of the effects of corrosion and erosion separately.

The objective of this paper is to analyze the profile effects of the insulating coating of the rotating disc on the polarization curves and the parameters extracted from them by comparing experimental results with theoretical calculations. This comparison also aims to validate the use of the equipment PGSTAT302N 30V/2000mA of the laboratory of Tribology, Corrosion and Materials (TRICORRMAT) UFES.

With these results it was possible to prove the validation of equipment and PGSTAT302N conclude that among the insulating coating profiles analyzed, the Bell profile is best suited for erosion-corrosion tests using rotating disk electrode.

Keywords: erosion-corrosion, rotating disk, polarization, insulating coating profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de corrosão de um metal	14
Figura 2. Estrutura da dupla camada elétrica.	16
Figura 3. Ilustração esquemática de uma pilha eletroquímica.....	17
Figura 4. Representação da reação redox do magnésio em solução de ácido sulfúrico.	18
Figura 5. Algumas formas de se classificar a corrosão.	19
Figura 6. Representação das curvas de polarização anódica e catódica	22
Figura 7. Representação esquemática do processo de erosão.	23
Figura 8. Esquema do mecanismo simplificado de corrosão erosão.	24
Figura 9. Espectro dos processos de corrosão-erosão.	25
Figura 10. Efeito ilustrativo do teor de cromo na taxa de corrosão-erosão.....	26
Figura 11. a) Efeito da temperatura, b) Efeito do pH e c) Efeito do oxigênio dissolvido.....	27
Figura 12. Diagrama esquemático da transição dos regimes de corrosão-erosão com a temperatura.	29
Figura 13. Diagrama esquemático da taxa de corrosão-erosão entre ligas com diferentes resistências à corrosão.	29
Figura 14. Variação da taxa de corrosão com a velocidade de escoamento.....	31
Figura 15. Diferentes regimes de corrosão-erosão com a variação de velocidade.....	31
Figura 16. Variação do potencial de corrosão do zinco, em função do tempo, em solução saturada de hidróxido de cálcio.	32
Figura 17. Corrosão do metal Me num sistema em que se tem duas reações catódicas: a de redução do oxigênio (icO) e a de redução do hidrogênio (icH)	33

Figura 18. Ilustração esquemática da corrosão de um metal cujas reações (anódica e catódica) são controladas pela polarização de ativação na região de Tafel.	34
Figura 19. Eletrodos rotatórios: a) arame, b) disco, c) cilindro, d) cônico e e) hemisférico.	36
Figura 20. Configuração de uma gaiola rotatória.	36
Figura 21. Aparato experimental para os métodos rotatórios.	37
Figura 22. Plote de Levich para a evolução do hidrogênio em solução de CO ₂	38
Figura 23. Efeito da variação do teor de oxigênio na solução e da agitação da solução sobre o potencial de corrosão e a taxa de corrosão do metal <i>Me</i>	39
Figura 24. Principais perfis de revestimento para eletrodos rotatórios.	41
Figura 25. Visão geral do local dos ensaios.	44
Figura 26. (a) Contra eletrodo, (b) eletrodo de referência e (c) rotor.	44
Figura 27. Célula eletroquímica.	45
Figura 28. Eletrodos de trabalho. (SI) perfil <i>Sino</i> , (CIF) perfil <i>Cilindro Finito</i> e (CI) <i>Cilindro Infinito</i>	45
Figura 29. Configuração da célula eletroquímica durante os ensaios.	46
Figura 30. (a) Eletrodo de trabalho após realização de ensaio. (b) Linhas de fluxo atuantes no eletrodo de trabalho.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mecanismos de corrosão.....	15
Tabela 2. Comportamento da taxa de corrosão de matérias em água do mar.	30
Tabela 3. Configuração dos ensaios realizados.	43
Tabela 4. Valores de OCP medidos durante os ensaios realizados.	47
Tabela 5. Valores calculados para a densidade de corrente limite.	50
Tabela 6. Valores estimados experimentalmente para a densidade de corrente limite.	52
Tabela 7. Comparação entre os valores de densidade de corrente limite calculados e estimados experimentalmente.....	52
Tabela 8. Valores de inclinações de Tafel das curvas de polarização de todos os ensaios realizados.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curvas de polarização para os três diferentes tipos de perfil de revestimento isolante e rotação à 100 rpm.....	48
Gráfico 2. Curvas de polarização para os três diferentes tipos de perfil de revestimento isolante e rotação à 4900 rpm.....	49
Gráfico 3. Curvas de polarização para o perfil de revestimento <i>Cilindro Finito</i> e rotações de 100 e 4900 rpm.....	49
Gráfico 4. Região de estabilização da densidade de corrente.....	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação.....	12
1.2	Objetivo.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Corrosão.....	14
2.1.1	Dupla camada elétrica	15
2.1.2	Pilhas eletroquímicas	16
2.1.3	Formas de corrosão.....	19
2.1.4	Polarização.....	21
2.2	Erosão.....	23
2.3	Corrosão-erosão.....	24
2.3.1	Efeito sinergético da corrosão-erosão	24
2.3.2	Espectro da corrosão-erosão.....	25
2.3.3	Parâmetros importantes na corrosão-erosão	26
2.4	Técnicas Eletroquímicas para estudo de processos corrosivos.....	32
2.4.1	Potencial de circuito aberto (OCP).....	32
2.4.2	Curvas de polarização experimentais	33
2.5	Eletrodos rotatórios.....	35
2.5.1	Disco Rotatório.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Condições experimentais.....	42
3.2	Fotos.....	43
3.3	Técnica de análise.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Potencial de circuito aberto (OCP).....	47
4.2	Curvas de polarização catódica e anódica.....	48
4.3	Equação de Levich.....	50
4.4	Inclinações de Tafel.....	53
4.5	Efeitos do fluxo na corrosão do material.....	54

5	CONCLUSÕES.....	55
6	REFERÊNCIAS	57
	ANEXOS	60
	Anexo A – Desenhos Técnicos dos eletrodos de trabalho.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O avanço tecnológico ocorrido no último século veio acompanhado de uma maior utilização de peças e estruturas metálicas em todos os setores de nossa sociedade. Este fato torna o estudo da corrosão, particularmente no que diz respeito ao seu controle, fundamental para preservar a vida útil destes materiais, além de minimizar gastos oriundos dos processos corrosivos. Segundo estudo realizado nos Estados Unidos entre 1999 e 2001, estimou-se em US\$ 276 bilhões (3,1% PIB americano) o custo total da corrosão por ano, sendo que deste valor, US\$ 69 a 82 bilhões (1% PIB) poderiam ser economizados se todas as medidas viáveis de prevenção e controle de corrosão fossem postas em prática [2]. No Brasil, a estimativa de gastos relativos aos processos corrosivos está na faixa de US\$ 15 bilhões ao ano, podendo-se economizar cerca de US\$ 5 bilhões mediante o uso de métodos de prevenção e controle [3].

Muitos dos problemas do cotidiano industrial estão diretamente relacionados aos efeitos degradativos da corrosão associada à erosão. Tais efeitos degradativos são responsáveis por diversas falhas de materiais, consequentemente aumento dos custos com manutenção e reparos de equipamentos, além de colocar em risco tanto o meio ambiente quanto as pessoas envolvidas.

Nos últimos anos, diversos estudos tem sido realizados com o objetivo de entender os mecanismos envolvidos na corrosão-erosão, fazendo uso de métodos como, por exemplo, os eletrodos rotatórios. Entre eles, o eletrodo disco rotatório é um método de simulação de corrosão-erosão que faz uso de um aparato experimental contendo conjunto de elementos que abrange um potenciostato ou galvanostato ligado a um computador para análise dos dados, um rotor com controle de velocidade, o eletrodo de trabalho, eletrodo de referência, contra eletrodo e uma célula que contém o eletrólito. Desta forma, com o auxílio de técnicas eletroquímicas e equações específicas, é possível determinar importantes parâmetros na investigação dos efeitos da corrosão-erosão de um determinado material.

Uma das variáveis dentro dos ensaios de disco rotatório é o perfil de revestimento isolante da amostra. Segundo Opekar e Beran (1975) e Schmitt e Bakkali (2006), o perfil que fornece

resultados mais conformes quando comparados com a literatura é o perfil *Sino*. Outros perfis comuns de revestimento são o *Cilindro Finito* e *Cilindro Infinito*. Diante disto, surge a motivação de estudar a influência do perfil de revestimento nos ensaios de discos rotatórios.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é levantar curvas de polarização catódica e anódica de eletrodos fabricados com aço carbono 1020, e embutidos em revestimentos de teflon com três perfis distintos, por meio de ensaios utilizando eletrodo discos rotatórios. Com tais resultados, realizar uma análise comparativa entre os perfis de revestimento isolante. Em complementação ao trabalho [1], este trabalho visa também contribuir para a validação do potenciómetro PGSTAT302N 30V/2000mA do TRICORRMAT da UFES.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Corrosão

A corrosão refere-se a processos que envolvem a deterioração de materiais metálicos, ligas ou materiais não metálicos pela sua interação química ou eletroquímica, aliadas ou não a desgaste mecânico, num determinado meio agressivo ao qual o material está submetido [13]. Este processo é espontâneo e resulta na formação de produtos de corrosão, passivantes ou não, e na liberação de energia. Quando os produtos da corrosão não inibem seu avanço, devido à baixa aderência, espessura insuficiente, porosidade ou a solubilidade, os materiais atacados perdem suas propriedades e podem não satisfazer mais aos fins a que se destinavam [14].

Há autores que classificam a corrosão como metalurgia extractiva reversa, pelo fato de se tratar de um processo natural onde a liga metálica (metal) retorna a sua forma original (minério) mediante liberação de energia [4]. Na Figura 1 ilustramos o ciclo de corrosão de um metal.

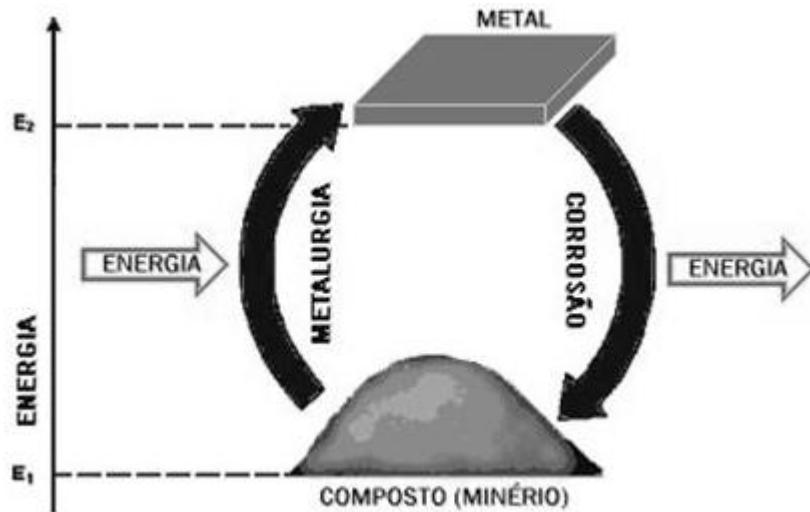


Figura 1. Ciclo de corrosão de um metal

Fonte: [22]

De acordo com o meio corrosivo e o material, podem ser apresentados dois mecanismos para os processos corrosivos [4]:

- Mecanismo eletroquímico: onde ocorrem reações químicas que envolvem transferência de carga ou elétrons através de uma interface ou eletrólito;
- Mecanismo químico: onde ocorrem reações químicas diretas entre o material metálico, ou não metálico, com o meio corrosivo, não havendo geração de corrente elétrica.

A Tabela 1 exemplifica situações da ocorrência de corrosão pelos mecanismos químicos e eletroquímicos.

Tabela 1. Mecanismos de corrosão.

QUÍMICO	(i) corrosão de material metálico em temperaturas elevadas, por gases ou vapores e em ausência de umidade (corrosão seca), (ii) corrosão em solventes orgânicos isentos de água e (iii) corrosão de materiais não metálicos (concreto, borracha...)
ELETROQUÍMICO	(i) corrosão em água ou soluções aquosas, (ii) corrosão atmosférica, (iii) corrosão no solo e (iv) corrosão em sais fundidos.

Fonte: [4]

2.1.1 Dupla camada elétrica

Quando um metal é mergulhado numa solução aquosa, imediatamente se inicia uma reação com a formação dos íons dentro da solução e com a permanência dos elétrons dentro do metal. Estes elétrons carregam eletricamente o metal e criam um campo elétrico dentro da solução, com que faz que os íons, que são carregados positivamente, tendam a ficar retidos na vizinhança da interface metal-solução. Após um tempo relativamente curto estabelece-se uma situação de equilíbrio ou estado estacionário, caracterizada pela formação da chamada dupla camada [5]. A estrutura de uma dupla camada elétrica é a indicada na Figura 2.

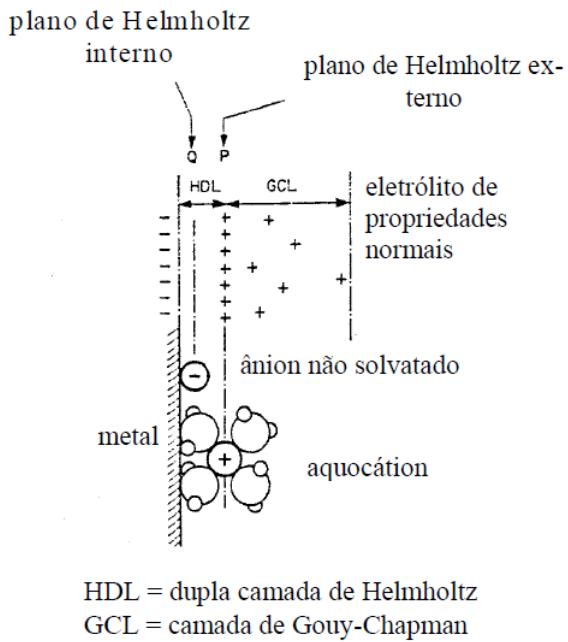


Figura 2. Estrutura da dupla camada elétrica.

Fonte: [5]

A configuração apresentada acima é denominada de dupla camada de Helmholtz. O plano P, saturado com íons metálicos, é chamado de plano de Helmholtz externo, enquanto o plano Q constitui o plano de Helmholtz interno. A estrutura inteira da dupla camada elétrica depende de fatores tais como: o grau de agitação da solução, quais outros íons além de Me^{n+} estão presentes e em qual quantidade, entre outros fatores [5].

Um metal que forma uma dupla camada elétrica é chamado de eletrodo [5].

2.1.2 Pilhas eletroquímicas

Quando se liga dois eletrodos através de um circuito metálico externo obtém-se uma pilha eletroquímica. Estes sistemas permitem a transformação de energia química, liberada pelas reações de oxi-redução que ocorrem nos eletrodos, em energia elétrica; e de energia elétrica, fornecida por fonte de corrente elétrica, em energia química, provocando as reações de oxi-redução nos eletrodos. No primeiro caso, tem-se um processo espontâneo e no segundo um processo não espontâneo [4]. Para que uma pilha eletroquímica seja formada é necessário que se estabeleça uma configuração composta por quatro elementos essenciais:

- Uma superfície anódica, onde devem ocorrer as reações de oxidação do metal;

- Uma superfície catódica, onde devem ocorrer as reações de redução das espécies existentes no eletrólito;
- Um eletrólito em contato simultâneo com ambas as superfícies;
- Um condutor que deverá estabelecer contato elétrico entre os elementos que constituem essas superfícies.

Denominamos os elementos que constituem individualmente as superfícies anódica e catódica, respectivamente, ânodo e cátodo ou simplesmente eletrodos. Eles ficam dispostos em áreas diferentes, geralmente, do mesmo corpo metálico ou podem, cada qual, situar-se em um corpo metálico diferente. A Figura 3 ilustra um esquema simplificado de uma pilha eletroquímica.

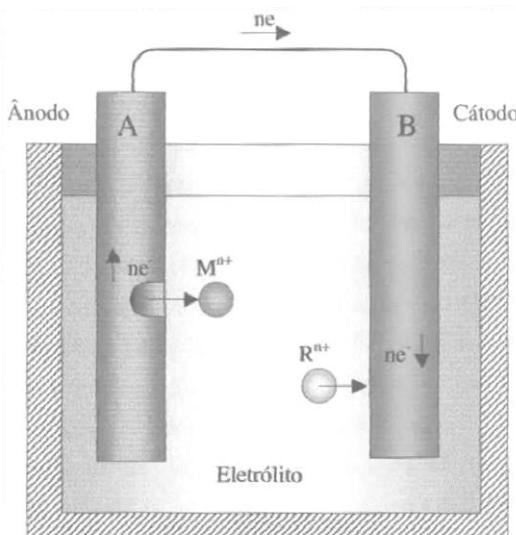
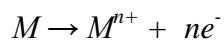


Figura 3. Ilustração esquemática de uma pilha eletroquímica.

Fonte: [23]

Durante a corrosão acontecem simultaneamente dois tipos de reações denominadas, respectivamente, de reações anódica e catódica:

- A reação anódica consiste na oxidação (corrosão) do metal, devido à liberação de íons metálicos M^{n+} para o eletrólito, segundo a equação:

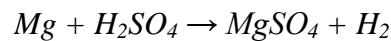


Onde M representa um átomo metálico do retículo cristalino do ânodo, M^{n+} representa um íon de metal diluído no eletrólito e ne^- representa os elétrons livres liberados no metal.

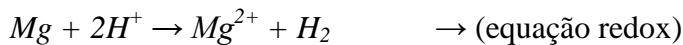
- A reação catódica consiste na redução dos íons contidos no eletrólito, na superfície catódica, segundo a equação:



A junção das reações anódica e catódica é denominada equação redox. A fim de exemplificar de maneira mais clara citaremos o exemplo do magnésio (Mg) em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4).



No caso desta reação temos:



Na Figura 4 podemos observar de maneira esquemática as reações citadas acima.

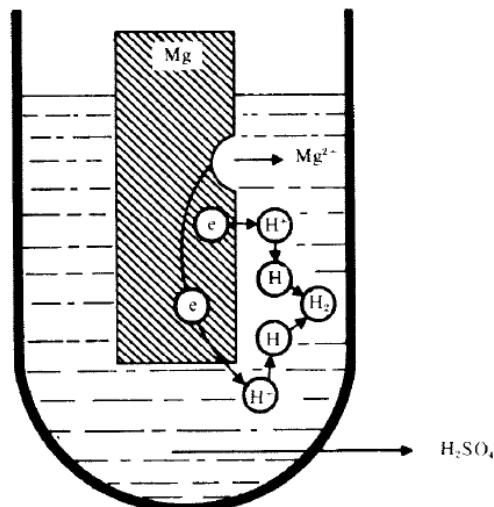


Figura 4. Representação da reação redox do magnésio em solução de ácido sulfúrico.

Fonte: [4]

2.1.3 Formas de corrosão

As formas de corrosão podem ser classificadas de diversas maneiras, algumas delas são ilustradas na Figura 5.



Figura 5. Algumas formas de se classificar a corrosão.

Fonte: [24]

Sumarizamos quatro formas de corrosão para serem apresentadas de forma mais detalhada:

- Corrosão uniforme:

A corrosão uniforme consiste no ataque de toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo com a consequente diminuição da espessura. Este tipo de corrosão ocorre em geral devido a micropilhas de ação local e é, provavelmente, o mais comum dos tipos de corrosão tendo como consequência uma ação uniforme sobre a superfície metálica.

Essa forma se caracteriza por apresentar o desgaste de mais fácil acompanhamento, tendo em vista que a perda de espessura é aproximadamente a mesma em toda a superfície metálica. É entretanto um tipo de corrosão importante do ponto de vista do desgaste, podendo levar o equipamento ou instalação a falhas significativas.

- Corrosão galvânica:

Denomina-se corrosão galvânica o processo corrosivo resultante do contato elétrico de materiais diferentes ou dissimilares. Este tipo de corrosão será tão mais intensa quanto mais distantes forem os materiais na tabela de potenciais eletroquímicos, ou seja, em termos de nobreza no meio considerado.

Terá também grande influência a relação entre as áreas catódica e anódica. A relação deverá ser a menor possível a fim de se obter um desgaste menor e mais uniforme na área anódica.

- Corrosão por pites:

A corrosão por pites é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades de pequena extensão e razoável profundidade. Ocorre em determinados pontos da superfície enquanto que o restante pode permanecer praticamente sem ataque.

É um tipo de corrosão de difícil acompanhamento, já que o controle da perda de espessura ou massa não caracteriza o real dano do material.

É característica dos materiais metálicos formadores de películas protetoras (passiváveis) e resulta, de modo geral, da atuação da ilha ativa-passiva nos pontos nos quais a camada passiva é rompida. Outro aspecto importante é o mecanismo de formação dos pites, já que a falha se inicia em pontos de fragilidade da película passivante (defeitos de formação) e o pH no interior do pite se altera substancialmente no sentido ácido o que dificulta a restituição da passivação inicial.

- Corrosão seletiva:

Os processos corrosivos denominados de corrosão seletiva são aqueles em que se tenha a formação de um par galvânico devido a grande diferença de nobreza entre dois elementos de uma liga metálica. Os dois principais tipos de corrosão seletiva são a grafítica e a dezincificação.

- Corrosão grafítica:

Designa-se corrosão grafítica ao processo corrosivo que ocorre nos ferros fundidos cinzentos e no ferro fundido nodular.

Sendo o grafite um material muito mais catódico que o ferro, os veios ou nódulos de grafite do ferro fundido agem como área catódica enquanto o ferro age como área anódica transformando-se em produto de corrosão.

- Dezinficação:

Designa-se por dezincificação ao processo corrosivo que se observa nas ligas de zinco, especialmente latões.

O processo de corrosão resulta na degradação do zinco (material mais anódico) restando o cobre e produtos de corrosão.

A dezincificação pode ser evitada com tratamento térmico de solubilização da liga e com uso das ligas que contenham elementos inibidores como *As* e *Sb*.

2.1.4 Polarização

Se uma corrente circular por um eletrodo, o potencial variará e o novo valor de potencial E' dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais é conhecida como sobre-potencial [4]:

$$\eta = E' - E_{eq}$$

Onde: η é o sobre-potencial, E' é o potencial do eletrodo fora do equilíbrio termodinâmico, e E_{eq} é o potencial de equilíbrio termodinâmico, todos em Volt.

Pode ocorrer que o potencial inicial seja diferente do potencial de equilíbrio termodinâmico, devido a reações e fenômenos que interferem no processo. Este é o caso mais comum em corrosão, sendo este valor conhecido como potencial de corrosão (E_{corr}) ou potencial misto. O potencial de corrosão também varia ao circular uma corrente pelo eletrodo, sendo esta variação conhecida como polarização (ΔE).[4]

Quando dois metais diferentes são ligados e mergulhados em um eletrólito, estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos. Fechando-se o circuito externo, observa-se uma diminuição dessa diferença de potencial com o tempo. O potencial do ânodo se aproxima ao do cátodo e vice e versa. Tem-se o que se chama polarização dos eletrodos: polarização anódica no ânodo e polarização catódica no cátodo.

$$E' - E_{corr} = \Delta E = a + b \log i$$

Sendo: E' o potencial do metal no eletrólito em uma determinada condição, E_{corr} é o potencial de repouso do mesmo metal no mesmo eletrólito, ΔE é a polarização, que pode ser anódica ou catódica, todos em Volt, a e b são constantes obtidas experimentalmente, e i é a densidade de corrente elétrica, em $[\text{mA/cm}^2]$.

Quando as reações anódicas e catódicas acontecem em um metal, há polarização mutua.

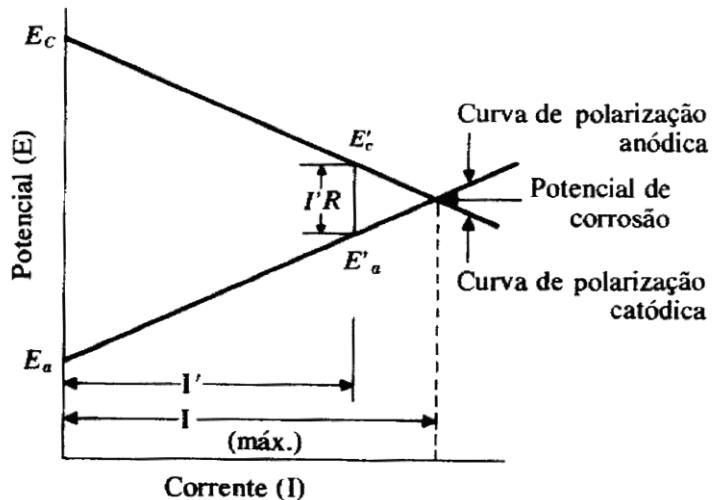


Figura 6. Representação das curvas de polarização anódica e catódica.

Fonte: [4]

A Figura 6 relaciona o potencial E e a corrente I . Quando I é zero, E_a e E_c representam os potenciais reversíveis de equilíbrio das meias pilhas correspondentes. Com a polarização mútua dos eletrodos, os ânodos se tornam mais nobres e os cátodos se tornam mais ativos, tendo-se os valores E'_a e E'_c . O potencial da pilha é igual à corrente I' que flui no circuito, multiplicada pela resistência R , resistência total do circuito de corrosão (dos condutores metálico e eletrolítico e das películas). Tem-se então [4]:

$$(E'_c - E'_a) = I'R$$

Se o ânodo e o cátodo estiverem em curto-círcuito e o eletrólito for de alta condutividade, R é muito pequeno e então a corrente de corrosão será máxima. O potencial decresce para um mínimo e é chamado de potencial de corrosão: ponto de intersecção das duas curvas de polarização [4].

Conforme a polarização das reações dos eletrodos se processa, a velocidade de corrosão é limitada, sendo evidente que quanto mais polarizada se tornar uma reação do eletrodo, menor é a velocidade de corrosão resultante. Portanto, quanto maior a polarização, menor é a sua ação prejudicial na corrosão [4].

2.2 Erosão

Erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou líquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido [25]. Ela pode se manifestar quando, no ambiente de exposição, o material estiver em contato com escoamento de fluidos, partículas sólidas contidas em líquidos ou gases, gotículas contidas em gases e jatos de líquidos ou de gases. A Figura 7 traz uma ilustração destes processos.

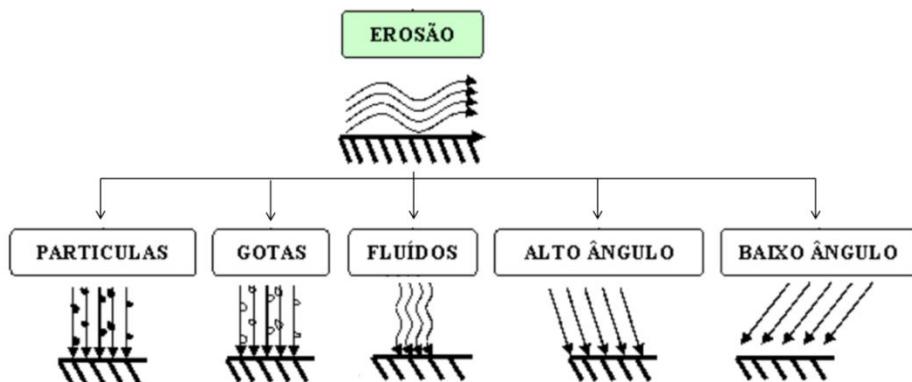


Figura 7. Representação esquemática do processo de erosão.

Fonte: [27]

A interação entre o processo de erosão e o processo de oxidação é considerada benéfica se o óxido formado sobre a superfície reduzir os efeitos da erosão.

Conforme apresentado, a formação de uma película protetora é de fundamental importância para o controle do processo erosivo, assim como o é para o controle do processo corrosivo.

2.3 Corrosão-erosão

Corrosão-erosão é um termo geral que abriga um amplo espectro de interações entre mecanismos químicos, eletroquímicos e mecânicos, que vão desde a corrosão acelerada até o dano puramente mecânico. Atualmente, a corrosão-erosão é considerada um dos mecanismos de perda de material mais críticos na indústria de petróleo (Kermany apud Gomes, 2005).

O principal mecanismo responsável pelo dano de ligas metálicas que sofrem passivação, quando submetidos à solicitações que envolvem corrosão-erosão, é a remoção contínua de camadas passivas, como mostrado esquematicamente na Figura 8. A remoção contínua desta camada passiva pelo efeito erosivo e o seu novo crescimento constituem em um desgaste muito superior do que quando o material é simplesmente submetido à corrosão sem erosão.

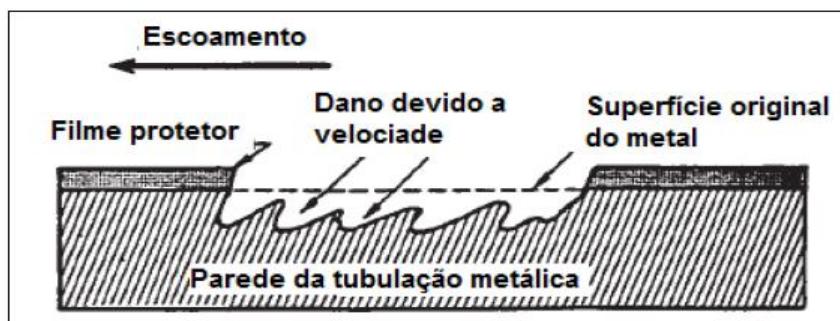


Figura 8. Esquema do mecanismo simplificado de corrosão erosão.

Fonte: [26], nossa tradução.

2.3.1 Efeito sinergético da corrosão-erosão

A ação combinada dos efeitos da corrosão e da erosão pode resultar em uma interação mútua, significativamente maior do que as contribuições individuais, resultando no fenômeno chamado de sinergismo positivo de corrosão-erosão.

Os modos de interação entre os processos corrosivos e erosivos são muitos: podem variar desde processos em que o fluxo de eletrólito faz com que a camada passiva fique mais fina e a corrosão é dominante, até processos em que a etapa dominante é a remoção mecânica da

película passiva, por ação cortante ou por fratura induzida pelo impacto das partículas erosivas.

No primeiro caso, a camada passiva pode ter uma espessura de equilíbrio, e assim, a taxa de corrosão-erosão é controlada pela dissolução da camada protetora. Já no segundo caso a camada passiva é removida completamente e o dano mecânico do metal base é o mecanismo dominante.

2.3.2 Espectro da corrosão-erosão

O desgaste de um material devido à corrosão-erosão é dependente do mecanismo predominante. Tal mecanismo está intimamente relacionado com a parcela dos efeitos mecânicos e químicos de cada sistema [8]. A Figura 9 apresenta o espectro de mecanismos da corrosão-erosão, onde seu limite superior indica total predominância da ação química e o limite inferior a total predominância da ação mecânica.

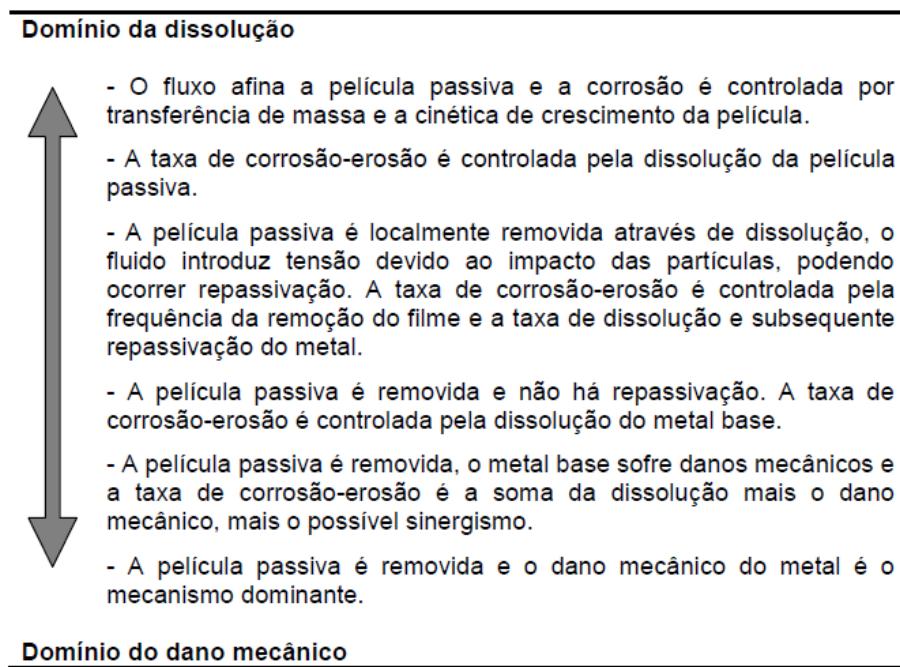


Figura 9. Espectro dos processos de corrosão-erosão.

Fonte: [8], nossa tradução.

A classificação elaborada por Lopez e Stack apud (Yang & Cheng, 2011) é outra forma de se compreender o espectro para os mecanismos de corrosão-erosão.

$$\frac{E}{C} \leq 0,1 \quad \rightarrow \text{Corrosão dominante};$$

$$0,1 < \frac{E}{C} \leq 1 \quad \rightarrow \text{Corrosão erosão};$$

$$1 < \frac{E}{C} \leq 10 \quad \rightarrow \text{Erosão corrosão};$$

$$\frac{E}{C} > 10 \quad \rightarrow \text{Erosão.}$$

Onde C representa o efeito da corrosão e E o efeito da erosão.

2.3.3 Parâmetros importantes na corrosão-erosão

2.3.3.1 Material

Podemos citar como parâmetros importantes para a corrosão-erosão, relacionados ao material, as propriedades químicas e mecânicas dos mesmos. Com relação à resistência à corrosão-erosão, há uma tendência, de uma maneira geral, de que o material que possua boa resistência à corrosão pura e à erosão pura, tenha também boa resistência à corrosão-erosão. Um bom exemplo deste fato está ilustrado na Figura 10.

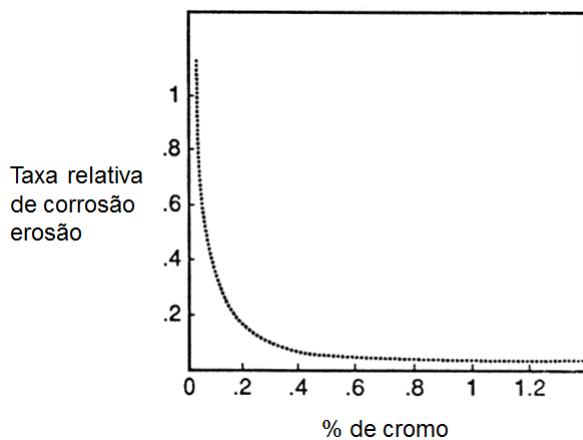


Figura 10. Efeito ilustrativo do teor de cromo na taxa de corrosão-erosão.

Fonte: [8], nossa tradução.

Os aços inoxidáveis possuem, em geral, boa resistência à corrosão devido à formação de películas protetoras, como as de óxido de cromo Cr_2O_3 , na superfície do material. Dessa

forma, espera-se que o teor de cromo no aço seja inversamente proporcional à taxa de perda de massa devido à corrosão-erosão.

Apesar da importância dos fatores relacionados ao material, a seleção de uma liga que seja resistente à corrosão-erosão não deve ser feita apenas com base no material, pois outros fatores interferem no seu desempenho, como, por exemplo, a temperatura e a velocidade do fluxo em contato com a liga. Sob essa ótica, o resultado mostrado na Figura 10 não deve ser levado em consideração para velocidades de escoamento muito altas, ou onde o dano mecânico é predominante [8].

2.3.3.2 Ambiente

Os parâmetros do ambiente mais importantes são pH, quantidade de oxigênio e temperatura [8]. Nas Figuras 11a, 11b e 11c, podemos observar o efeito de cada um desses parâmetros sobre a taxa de corrosão-erosão.

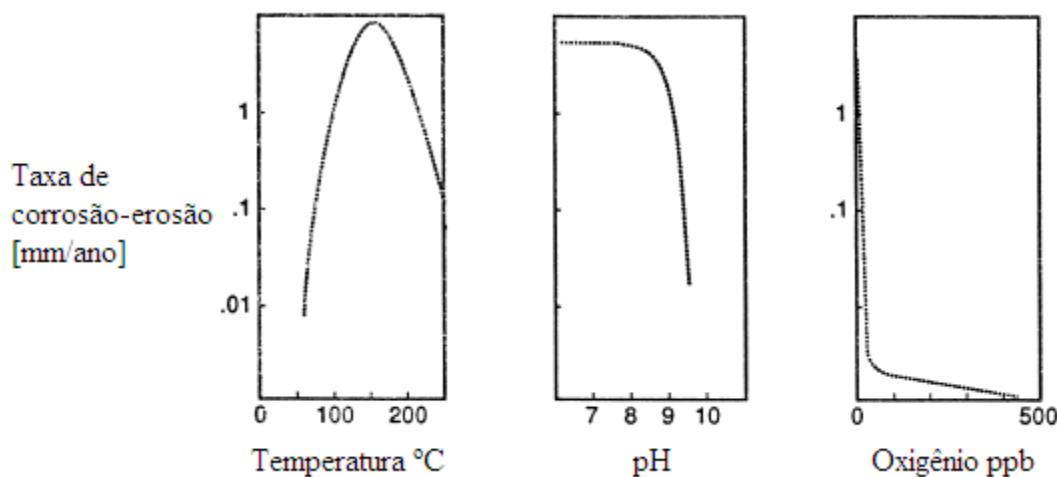


Figura 11. a) Efeito da temperatura, b) Efeito do pH e c) Efeito do oxigênio dissolvido.

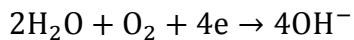
Fonte: [8], nossa tradução.

A observação feita sobre o efeito mostrado na Figura 10 também é válido nos gráficos da Figura 11. Ou seja, a taxa de corrosão-erosão não pode ser estimada observando-se parâmetros isoladamente, embora o conhecimento dos efeitos individuais de cada um facilite a compreensão da interação entre eles.

Abaixo são apresentadas explicações sobre cada efeito mostrado na Figura 11:

Efeitos do pH. Para ligas ferrosas em $\text{pH} < 4$ o aumento da corrosão deve-se à possibilidade de redução do H^+ , sendo assim a difusão do O_2 não é fator fundamental. Em pH entre 4 e 10 verifica-se que a corrosão independe do pH e sim da rapidez que o oxigênio difunde para a superfície metálica. E por fim em $\text{pH} > 10$ a taxa de corrosão diminui, pois o ferro se torna passivo [4].

Efeitos do Oxigênio. O aumento da concentração de oxigênio, de início acelera a corrosão do ferro, pois o oxigênio consome os elétrons gerados pela oxidação do metal, de acordo com a reação [4]:



Entretanto, atinge-se uma concentração crítica na qual a velocidade de corrosão decresce. Este comportamento é devido à formação de um filme de óxido que protege o metal da corrosão [4].

Efeito da temperatura. A temperatura aumenta a taxa de reação química, porém o acréscimo da temperatura também diminui a quantidade de oxigênio dissolvido [17].

De forma geral, a taxa de perda de massa de uma liga aumenta com o incremento de temperatura até atingir um valor crítico e, em seguida diminui [9]. Esta curva de perda de massa em função da temperatura é deslocada em função da resistência à corrosão de cada material.

A Figura 12 mostra um gráfico do efeito da temperatura sobre a taxa de perda de massa do material. Neste gráfico podem-se perceber três regimes diferentes, que se coincide com os regimes já citados no espectro da corrosão-erosão. O deslocamento da curva com ligas de diferentes resistências a corrosão pode ser visto na Figura 13.

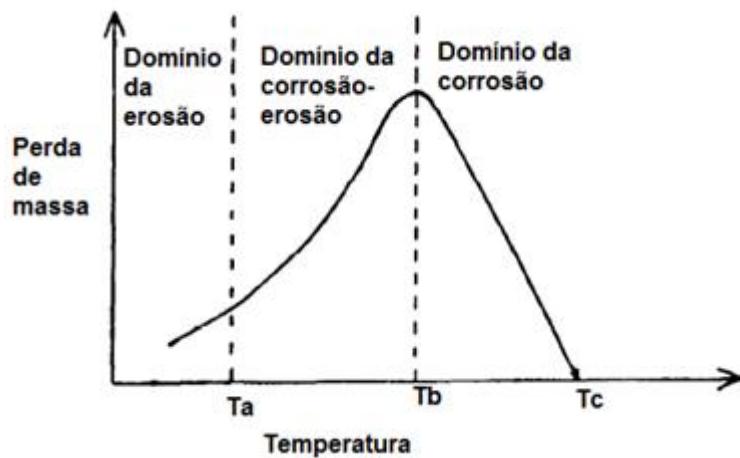


Figura 12. Diagrama esquemático da transição dos regimes de corrosão-erosão com a temperatura.
Fonte: [9], nossa tradução.

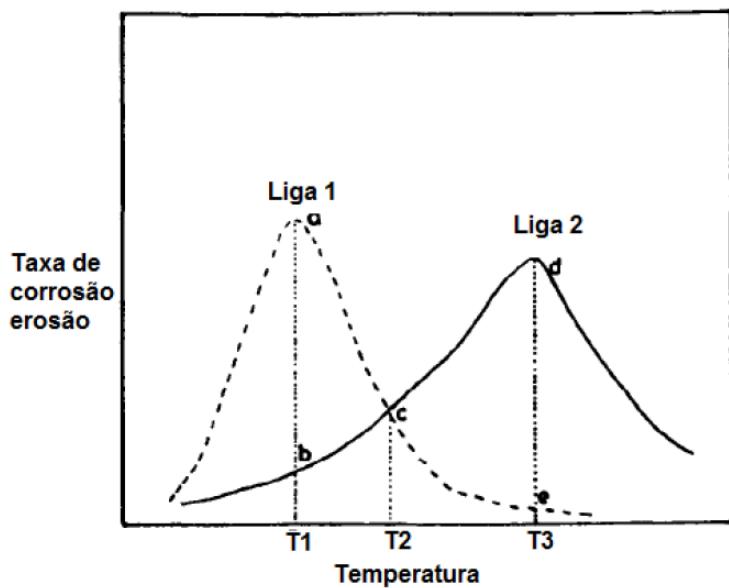


Figura 13. Diagrama esquemático da taxa de corrosão-erosão entre ligas com diferentes resistências à corrosão (taxa de corrosão-erosão da liga 1 > taxa de corrosão-erosão da liga 2).
Fonte: [9], nossa tradução.

Os pontos “a” e “d” são onde ocorre a transição do regime de corrosão-erosão para corrosão pura. A temperatura crítica ocorre onde a espessura do filme protetor é espessa e coesa suficiente para resistir à erosão [9].

2.3.3.3 Parâmetros hidrodinâmicos

Os efeitos de fluxo como o regime de escoamento, tensão de cisalhamento e coeficiente de transferência de massa, estão diretamente relacionados com a velocidade de escoamento.

Em termos gerais o aumento da velocidade aumenta a taxa de corrosão, porém, este aumento pode ser benéfico quando o escoamento é a fonte de oxigênio para formação do filme passivador [17]. Neste caso, aumentando-se a velocidade, a taxa de corrosão aumenta gradativamente até uma velocidade específica, denominada velocidade crítica V_c . Ultrapassando esta velocidade, a taxa de corrosão começa a diminuir devido à formação de um filme protetor consistente.

A Tabela 2 mostra o comportamento da taxa de corrosão de alguns materiais em diferentes velocidades, em água do mar. Pode se notar, em alguns casos, que a taxa de corrosão diminui com o aumento da velocidade [18].

Tabela 2. Comportamento da taxa de corrosão de matérias em água do mar.

LIGA	Pit mais profundo, mm	Média da taxa de corrosão, mm/ano		
		Escoamento em água do mar		
		Água parada	8,2 m/s	35-42 m/s
Aço carbono	2,0	0,075	---	4,5
Ferro fundido cinzento	4,9	0,55	4,4	13,2
Gunmetal almirantado	0,25	0,027	0,9	1,07
Ni Al Bronze	1,12	0,055	0,22	0,97
70/30 Cu Ni + Fe	0,25	<0,02	0,12	1,47
Aço inoxidável 316	1,8	0,02	< 0,02	< 0,01
Aço carbono com 6 % Mo	X	0,01	< 0,02	< 0,01
Ni-Cu liga 40	1,3	0,02	< 0,01	0,01

Fonte: [17], nossa tradução e adaptação.

Na Figura 13 podemos observar a transição entre os regimes laminar e turbulento, e também que a taxa de corrosão-erosão depende da competição entre a formação e manutenção do

filme protetor e o desgaste do mesmo. A partir de uma velocidade crítica V_c , está a região de maior desgaste, onde o efeito do fluxo é muito intenso e o filme protetor não é capaz de proteger o substrato.

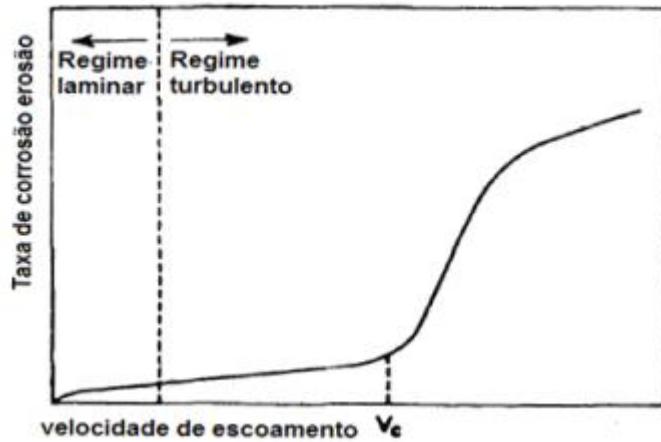


Figura 14. Variação da taxa de corrosão com a velocidade de escoamento.

Fonte: [9], nossa tradução.

Assim como há presença de diferentes regimes de corrosão-erosão para diferentes valores de temperatura, há também diferentes regimes para diferentes velocidades [9], como podemos observar na Figura 15.

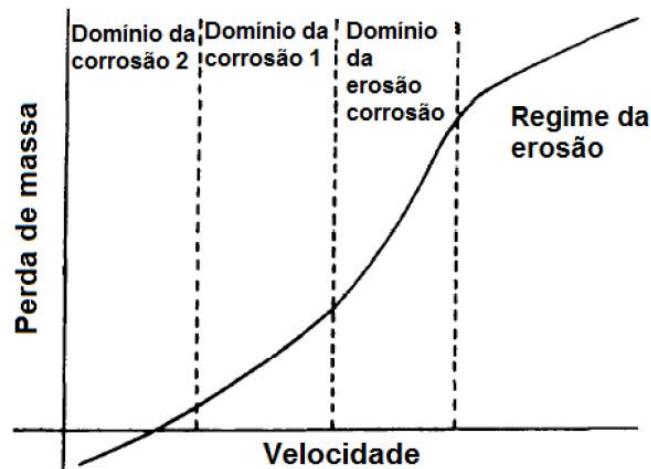


Figura 15. Diferentes regimes de corrosão-erosão com a variação de velocidade.

Fonte: [9], nossa tradução.

2.4 Técnicas Eletroquímicas para estudo de processos corrosivos

2.4.1 Potencial de circuito aberto (OCP)

Um metal que sofre corrosão numa solução de baixa resistividade elétrica assume um potencial característico, designado como potencial de corrosão. Esse potencial é dado pela intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica. O potencial de corrosão é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental. Como se trata de um potencial assumido pelo metal, é suficiente obter a medida direta desse potencial com relação a um eletrodo de referência. Essa medida é conhecida como medida de potencial de circuito aberto.[5]

Em muitas aplicações existe o interesse em se acompanhar o valor do potencial de corrosão ao longo do tempo, sendo conveniente fazer um registro contínuo da variação do potencial. Este procedimento é recomendado, sobretudo nos estágios iniciais do ensaio. A Figura 16 mostra a variação do OCP com o tempo do zinco em solução saturada de hidróxido de cálcio. Nota-se que ocorre uma considerável variação do OCP com o decorrer do tempo.

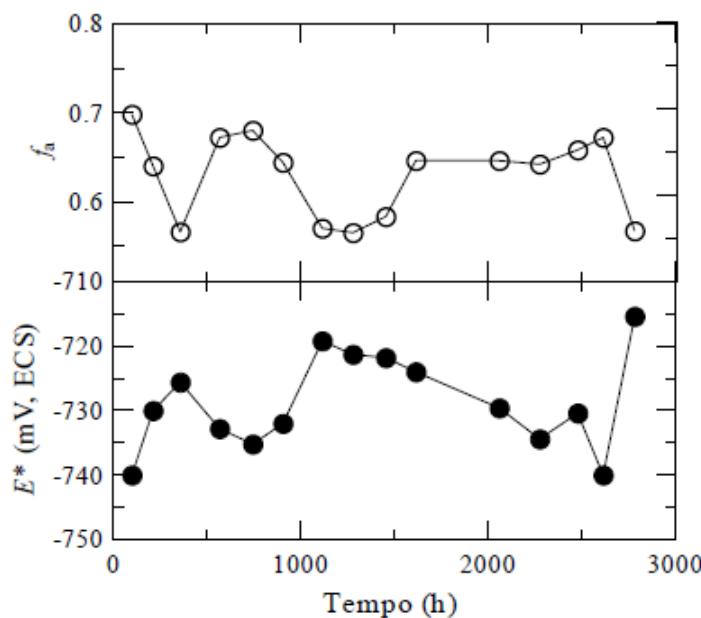


Figura 16. Variação do potencial de corrosão do zinco, em função do tempo, em solução saturada de hidróxido de cálcio.

Fonte: [5]

O caso acima mostra como a medida do OCP, além de simples, constitui-se numa potente ferramenta de investigação.

2.4.2 Curvas de polarização experimentais

A curva de polarização de um metal representa o efeito global de todas as reações que ocorrem simultaneamente sobre o eletrodo, e através dela pode-se avaliar o comportamento eletroquímico de um metal num potencial diferente do potencial de corrosão (ou de equilíbrio). É necessário utilizar fontes externas de potencial, como um potenciómetro, para impor a um eletrodo um potencial diferente do de corrosão. Este potencial é imposto através de uma diferença entre o potencial do eletrodo e do eletrodo de referência, em meios com condutividade moderada a alta, possibilitando dessa forma, medir a corrente de polarização, além de registrá-la em função do potencial. Obtém-se, assim, as curvas de polarização experimentais, conforme mostrado na Figura 17 [4] [5].

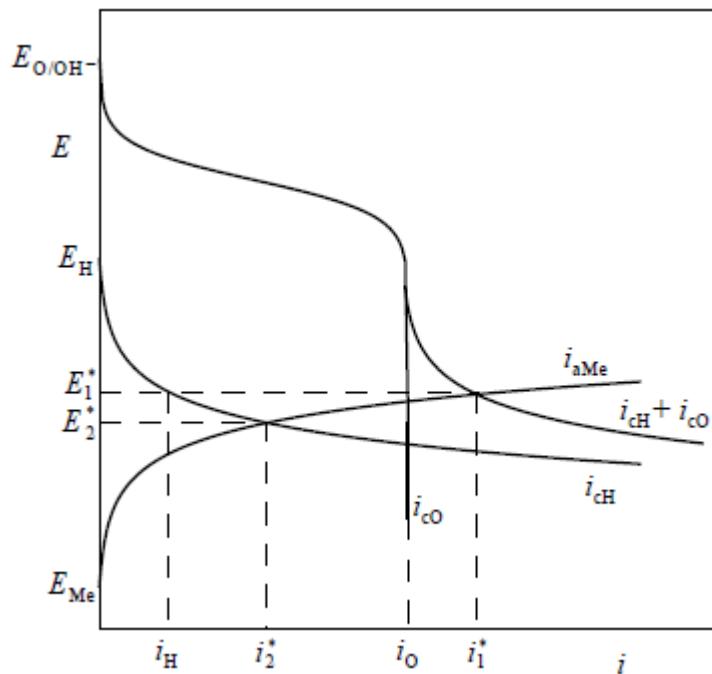


Figura 17. Corrosão do metal Me num sistema em que se tem duas reações catódicas: a de redução do oxigênio (i_{cO}) e a de redução do hidrogênio (i_{cH})

Fonte: [5]

O método de polarização consiste variar o potencial do eletrodo com velocidade de varredura constante v , de um potencial inicial E_i até um potencial final E_f .

Quando a cinética da reação catódica está sob controle por transferência de massa, isto é, a velocidade da reação catódica já atingiu as condições de corrente limite da redução do oxigênio, a corrente de corrosão i_{corr} pode ser determinada. Neste caso é necessário a prévia determinação da corrente limite i_{lim} .

Portanto, utilizando como variáveis a velocidade de varredura e os potenciais iniciais e finais, é possível identificar processos de oxidação, redução e de adsorção/dessorção e determinar se eles acontecem em uma ou várias etapas ou ainda se correspondem a um processo reversível ou irreversível [19].

Para um sistema genérico de corrosão a representação num gráfico de E versus $\log|i|$ das curvas de polarização das reações anódica e catódica leva à curva exemplificada pela Figura 18.

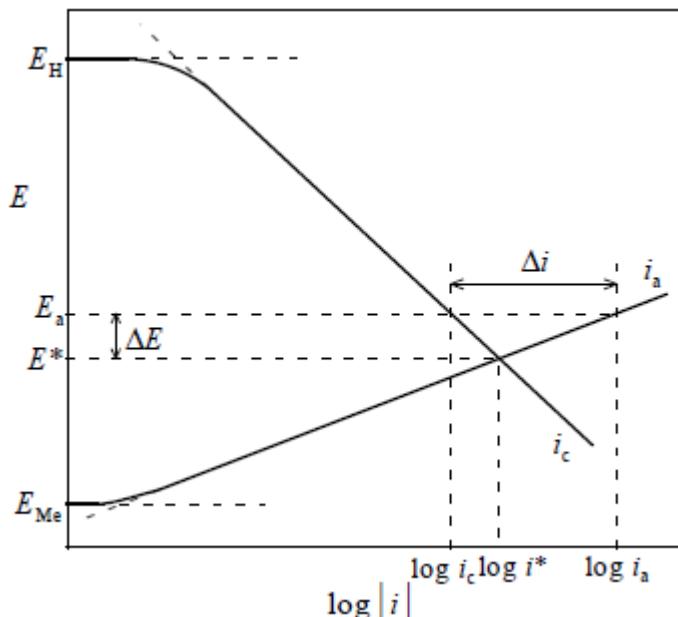


Figura 18. Ilustração esquemática da corrosão de um metal cujas reações (anódica e catódica) são controladas pela polarização de ativação na região de Tafel.

Fonte: [5].

Assim, podem ser medidos experimentalmente o valor do potencial de corrosão E_{corr} e, para um dado valor E diferente de E_{corr} , o valor da corrente Δi , que é a diferença entre a densidade de corrente anódica i_a e a densidade de corrente catódica i_c [5].

$$\Delta i = i_a - |i_c|$$

Sendo i_a a densidade de corrente anódica, em $[\text{mA/cm}^2]$, e i_c a densidade de corrente catódica, também em $[\text{mA/cm}^2]$.

Sendo β_a e β_c as inclinações de Tafel das retas de polarização das reações anódica e catódica, respectivamente, e se $\Delta E = E' - E_{corr}$, tem-se a equação de Wagner-Traud [5]:

$$\Delta i = \left[\exp\left(\frac{2,303\Delta E}{\beta_a}\right) - \exp\left(\frac{2,303\Delta E}{\beta_c}\right) \right]$$

Esta equação é válida somente quando as porções que definem E_{corr} e i_{corr} no diagrama E versus $\log|i|$ são retas. Assim, ela não se aplica aos casos em que E_{corr} fica muito próximo de um dos potenciais de equilíbrio E_{ME} ou E_H , em geral a menos de 30 mV desses potenciais, pois, neste intervalo, a equação de Tafel não é válida [5].

2.5 Eletrodos rotatórios

Os eletrodos rotatórios são métodos úteis de simulação de condições de fluxo para medidas eletroquímicas em ambientes controlados. Estes métodos são utilizados a mais de 100 anos para estudo do controle quantitativo da convecção em solução. A teoria hidrodinâmica foi desenvolvida por Levich, e é válida somente para os discos rotatórios. Apesar disto, o uso de várias outras geometrias é muito comum para estudo dos fatores hidrodinâmicos na corrosão erosão [12].

Os eletrodos rotatórios mais comuns são: o disco rotatório (EDC), cilindro rotatório (ECR) e gaiola rotatória (EGR) [7]. Porém, como podemos observar na Figura 19, existem muitas outras formas menos comuns.

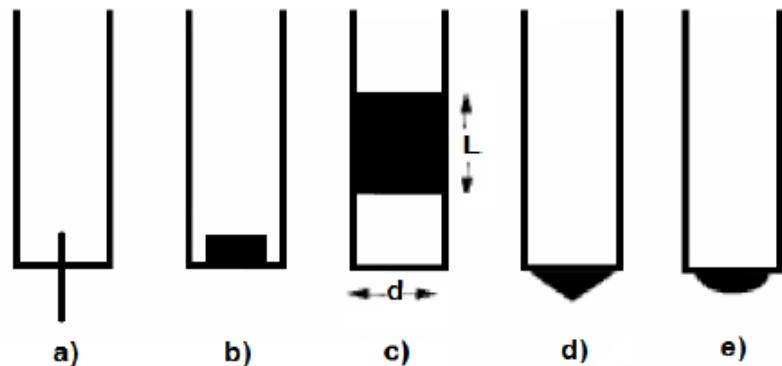


Figura 19. Eletrodos rotatórios: a) arame, b) disco, c) cilindro, d) cônicos e e) hemisférico.

Fonte: [12], nossa tradução.

A Figura 20 apresenta a configuração típica da gaiola rotatória.

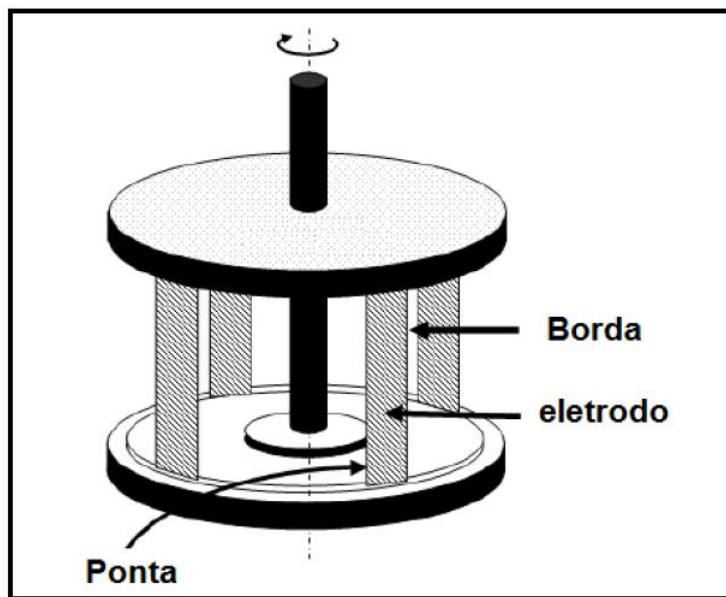


Figura 20. Configuração de uma gaiola rotatória.

Fonte: [7], nossa tradução.

A maioria dos métodos rotatórios apresenta aparelhos experimentais semelhantes, diferenciando apenas o eletrodo de trabalho. A Figura 21 mostra um esquema generalizado da disposição do aparato experimental para análise eletroquímica dos eletrodos rotatórios.

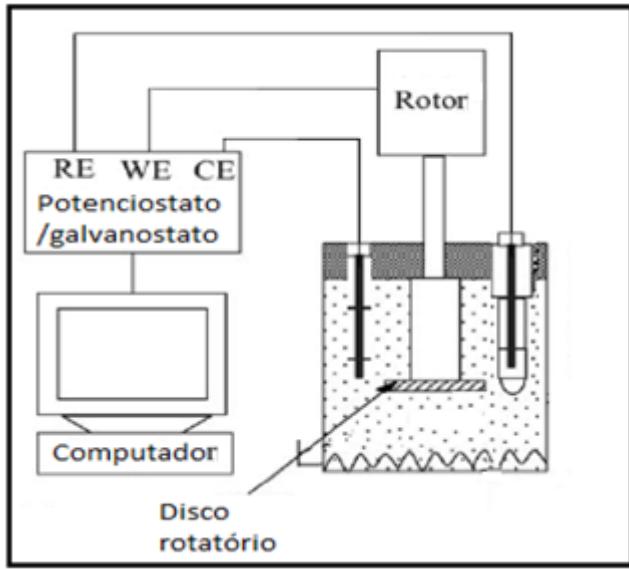


Figura 21. Aparato experimental para os métodos rotatórios.

Fonte: [10], nossa tradução e adaptação.

2.5.1 Disco Rotatório

O disco rotatório é preferencialmente usado no estudo dos efeitos sobre condições de escoamento laminar, pois o regime laminar se faz presente neste método mesmo quando impostas altas velocidades angulares [7]. No estudo da corrosão-erosão, os discos geralmente possuem diâmetros entre 10 e 50 mm. Com tais discos, medidas de perda de massa podem ser obtidas com boa precisão. Já discos com diâmetros menores não fornecem informações confiáveis a respeito da susceptibilidade à corrosão. O uso de discos muito pequenos é válido somente para o estudo eletroquímico dos mecanismos de corrosão, nestes casos podem ser usados diâmetros inferiores a 1 mm.

O disco rotatório é predominantemente usado a fim de investigar o fenômeno do transporte de massa. Segundo os estudos de Levich, o transporte de massa K_d em um sistema controlado é proporcional à raiz quadrada da velocidade angular ω no disco rotatório, sendo assim [7]:

$$K_d = k\sqrt{\omega}$$

Onde K_d é a taxa de transporte de massa, expressa em $[g/m^2h]$ e ω é a velocidade angular do disco rotatório, expressa em $[rad/s]$. A constante k está relacionada com o coeficiente de difusão da espécie D $[m^2/s]$, sua concentração na solução C_{bulk} $[mol/l]$ e viscosidade cinemática ν $[m^2/s]$. Desta forma temos [7]:

$$k = 0.6205 \cdot D^{2/3} \cdot v^{-1/6} \cdot C_{bulk}$$

A taxa de transporte de massa também pode ser estudada eletroquimicamente. No caso do controle de transporte de massa, a medida da densidade da corrente limite de difusão no disco rotatório, é proporcional a raiz quadrada da velocidade angular, de acordo com Levich [7]:

$$J_D = 0.6205 \cdot n \cdot F \cdot D^{0.66} \cdot v^{-0.167} \cdot \sqrt{\omega} \cdot C_{bulk}$$

Onde n é o número de elétrons transferidos da reação no eletrodo, F é a constante de Faraday (96500 C/mol), e os outros parâmetros foram definidos anteriormente.

Um gráfico J_D vs. ω ou w vs. ω deve mostrar uma linha reta passando pela origem caso a reação no eletrodo em questão seja puramente controlada pela difusão. Caso a linha reta corte o eixo das ordenadas segundo a equação $w = a + k\omega$, há problemas experimentais (vibração no eixo, formação de vórtices, arrasto de bolhas de gás, etc) ou, há uma reação adicional no eletrodo em questão a qual não é limitada pela difusão. A Figura 22 mostra um exemplo de cinco curvas de Levich, variando a velocidade angular para cada concentração.

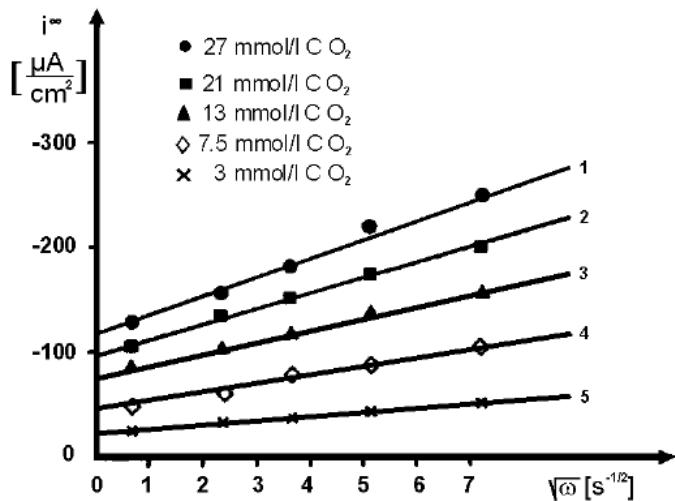


Figura 22. Plote de Levich para a evolução do hidrogênio em solução de CO_2 (0,5M Na_2SO_4).

Fonte: [7].

O número de Sherwood Sh para o disco rotatório é descrito por [7]:

$$Sh = 0.625 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{0.33}, \quad Sh = \frac{k \cdot L}{D}$$

Segundo a lei de Fick, k pode ser expresso em termos eletroquímicos para as condições limites de difusão, como [7]:

$$k = \frac{J_D \cdot L}{n \cdot F \cdot C_{bulk} \cdot D}$$

Combinando as equações anteriores, a densidade de corrente limite, pode ser expressa em termos adimensionais (Re e Sc) na forma abaixo [7]:

$$J_D = 0.6205 \cdot \frac{n \cdot F \cdot C_{bulk} \cdot D}{L} \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{0.33}$$

Onde

$$Re = \frac{w r^2}{v}$$

Esta equação é válida somente para escoamento laminar, ou seja, $Re < 2 \cdot 10^5$.

O valor de J_d é dependente do teor de oxigênio dissolvido e também da agitação do eletrólito. Assim, um aumento no teor de oxigênio ou na agitação da solução provocará um aumento do valor de J_d . A Figura 23 exemplifica o evento descrito.

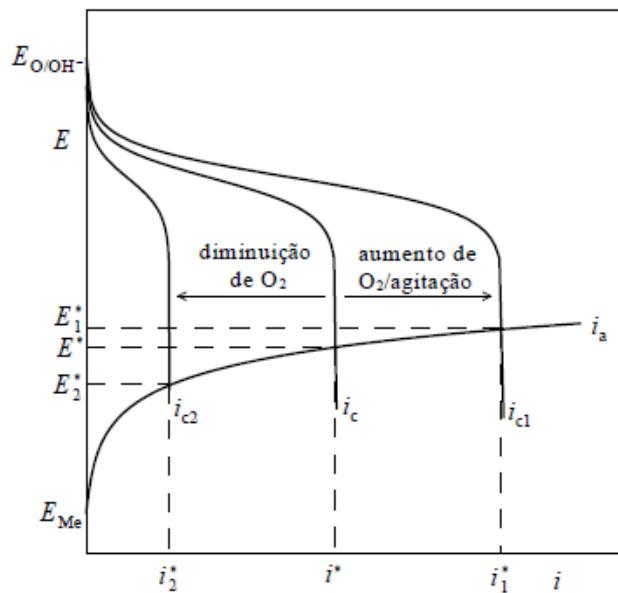


Figura 23. Efeito da variação do teor de oxigênio na solução e da agitação da solução sobre o potencial de corrosão e a taxa de corrosão do metal Me .

Fonte: [5]

Já para conhecermos a tensão de cisalhamento, podemos utilizar a seguinte equação [7]:

$$\tau_w = 6,302 \cdot \rho \cdot \omega \cdot v \cdot Re^{1/2}$$

Experimentos em disco rotatório para estudo da corrosão são geralmente simples e as amostras em forma de disco podem ser produzidas a baixo custo. Equipamentos foram projetados a fim de poder operar com gás definido e evitar a entrada de gás em condições ambientais. No caso de alta pressão ou temperatura pode ser usado um autoclave com acionador magnético. Em experimentos eletroquímicos, as conexões elétricas ainda são um desafio, especialmente em sistemas pressurizados. Sendo assim, as melhores opções de contato são transdutores de mercúrio. Contatos de escovas, mesmo feitas com ouro ou prata, apresentam geralmente mais ruído. Em todos os casos tenta-se evitar vibração no eixo especialmente em altas rotações [7].

2.5.1.1 Perfis de revestimento isolante para discos rotatórios

A precisão das medições com eletrodos em formato de disco depende principalmente da qualidade da sua construção e da uniformidade e reproduzibilidade da sua rotação. Em sua maioria, estes eletrodos são constituídos por uma área ativa do disco (onde ocorre a corrosão-erosão) e um revestimento isolante que protege todo o resto da superfície do eletrodo. São utilizados comumente na confecção destes revestimentos materiais como teflon, polietileno e resinas epóxi. O revestimento isolante deve contribuir minimamente para a agitação da solução e possuir três funções básicas [6]:

- (i) isolar as áreas lateral e superior do material eletroativo;
- (ii) evitar a interação entre os fluxos do fluido abaixo e acima do disco;
- (iii) eliminar os efeitos de borda no disco, pois na prática, não pode ter o raio infinito exigido pela teoria.

Eletrodos com os perfis de revestimentos isolantes mais comuns são apresentados na Figura 24. Segundo Opekar e Beran (1975) e Schmitt e Bakkali (2006), as exigências impostas sobre o revestimento isolante são mais bem satisfeitas pelo perfil de revestimento B (perfil *Sino*).

Com este perfil a interação entre o fluxo abaixo e acima do eletrodo é mínima e o eletrólito é agitado minimamente pelo revestimento isolante.

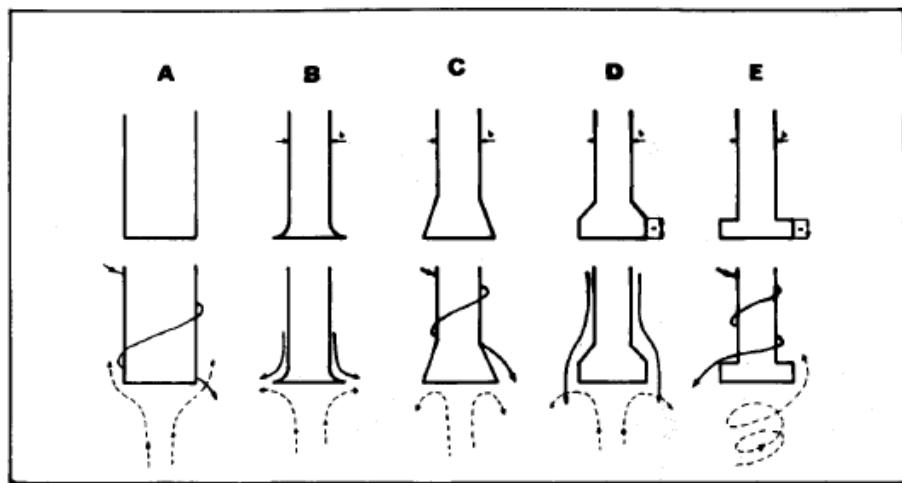


Figura 24. Principais perfis de revestimento para eletrodos rotatórios.

Fonte: [6].

Opekar e Beran citam ainda que os perfis A (perfil *Cilindro Infinito*) e C, também apresentaram bons resultados. Já os perfis D (perfil *Cilindro Finito*) e E se mostraram inadequados, seja do ponto de vista dos aspectos hidrodinâmicos e ou dos de transporte de massa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de corrosão-erosão utilizando o método eletrodo disco rotatório. Desta forma, foram levantadas curvas de polarização linear para três perfis de revestimento isolante e duas velocidades de rotação, a fim de analisar a influência destes perfis de revestimento e verificar a viabilidade do uso dos mesmos.

Os dados foram transmitidos para o equipamento PGSTAT302N 30V/2000mA que possui função de potenciómetro/galvanostato e foram processados utilizando o software nova 1.8.

3.1 Condições experimentais

Os ensaios foram realizados no laboratório TRICORRMAT (UFES) nas seguintes condições:

- **Condições ambientais:**
 - Pressão: 1 atm;
 - Temperatura: aproximadamente 23 °C.
- **Eletrólio:**
 - Solução de 3% de NaCl.
- **Eletrodos:**
 - Eletrodo de trabalho (WE): eletrodo disco rotatório (RDE), de aço 1020, com diâmetro de 9 mm;
 - Eletrodo de referência (RE): prata/cloreto de prata (Ag/AgCl);
Contra eletrodo (CE): platina.
- **Outros acessórios:**
 - Rotor (conectado ao eletrodo rotatório);
 - Controlador do rotor (conectado ao PGSTAT302N);

- Termômetro;
- Conectores e cabos elétricos;
- **Variáveis:**
 - Perfis de revestimento: *Cilindro Infinito* (CI), *Sino* (SI) e *Cilindro Finito* (CIF).
 - Rotação: 100 e 4900 rpm;
 - Tempo de imersão para determinação do OCP: 30 min;
 - Taxa de varredura: 1 mV/s.

De acordo com as variáveis descritas, foram feitas 6 configurações distintas, cada uma sendo reproduzida 3 vezes, totalizando 18 experimentos conforme a tabela abaixo:

Tabela 3. Configuração dos ensaios realizados.

ID	Perfil de revestimento	Rotação [rpm]	Tempo de imersão [min]	Taxa de varredura [mV/s]
I , II e III	<i>Cilindro Infinito</i>	100	30	1
IV , V e VI	<i>Cilindro Infinito</i>	4900	30	1
VII , VIII e IX	<i>Sino</i>	100	30	1
X, XI e XII	<i>Sino</i>	4900	30	1
XIII, XIV e XV	<i>Cilindro Finito</i>	100	30	1
XVI, XVII e XVIII	<i>Cilindro Finito</i>	4900	30	1

Fonte: Autores.

Em todos os experimentos o OCP foi determinado para condição estática (0 rpm). O ensaio de polarização foi realizado utilizando uma diferença de potencial de -750 mV a +400 mV em relação ao valor do OCP.

3.2 Fotos

A Figura 25 exibe uma visão geral de onde foram realizados os ensaios. O computador, o

equipamento PGSTAT302N 30V/2000mA, o controlador do rotor acionador do eletrodo rotatório e os cabos de conexão estão presentes nesta foto.



Figura 25. Visão geral do local dos ensaios.

Fonte: Autores.

A Figura 26 mostra o contra eletrodo (CE), o eletrodo de referência (RE) e o rotor.

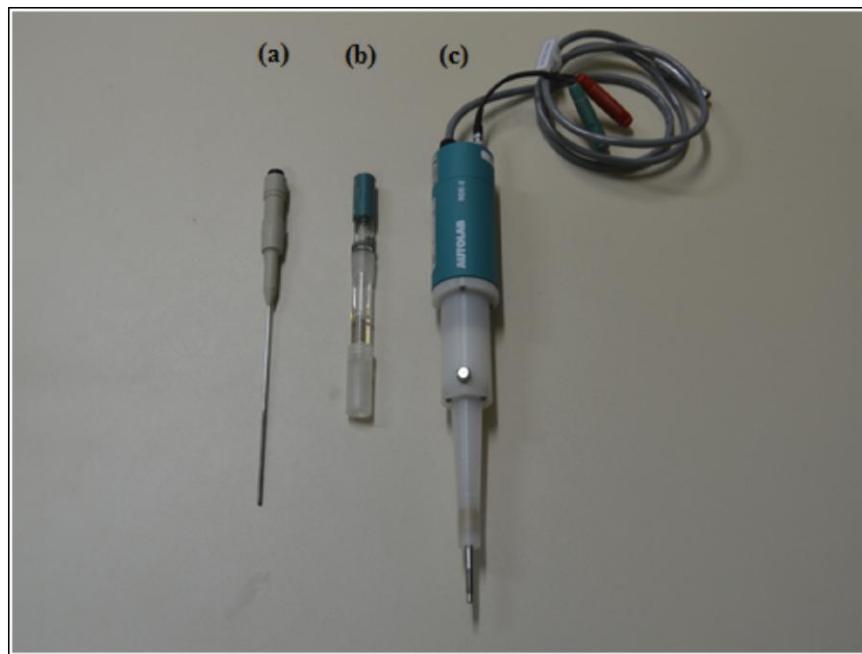


Figura 26. (a) Contra eletrodo, (b) eletrodo de referência e (c) rotor.

Fonte: Autores.

A Figura 27 mostra em detalhe a célula eletroquímica utilizada na realização dos ensaios:



Figura 27. Célula eletroquímica.

Fonte: Autores.

A Figura 28 mostra a configuração dos eletrodos de trabalho, com os três diferentes perfis de revestimentos isolantes utilizados nos ensaios:

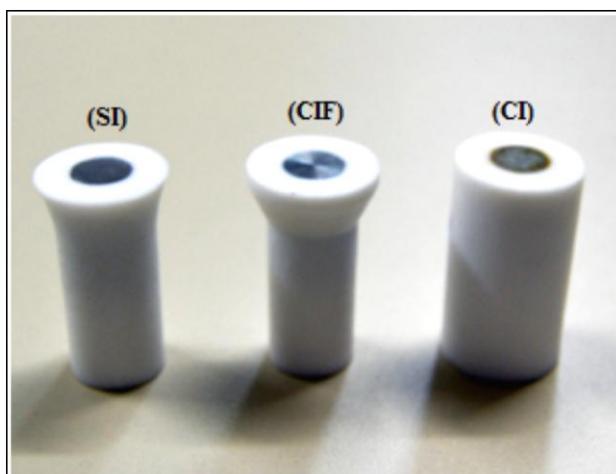


Figura 28. Eletrodos de trabalho. (SI) perfil *Sino*, (CIF) perfil *Cilindro Finito* e (CI) *Cilindro Infinito*.

Fonte: Autores.

A Figura 29 mostra a configuração da célula eletroquímica durante os ensaios. Na foto podem-se observar montados na célula eletroquímica, o rotor acoplado ao eletrodo de trabalho, o eletrodo de referência e o contra eletrodo.



Figura 29. Configuração da célula eletroquímica durante os ensaios.

Fonte: Autores.

3.3 Técnica de análise

Para levantamento das curvas anódica e catódica foi utilizado a técnica de polarização linear, onde se iniciou cada teste variando-se o potencial de -750 mV a +400 mV em relação ao potencial de OCP de cada caso. O tempo para determinação do OCP e a taxa de varredura utilizada foram de 30 min e 1 mV/s respectivamente.

O OCP foi determinado coletando os valores da diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência. O último valor medido após o tempo de 30 min, foi adotado como valor de OCP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a aplicação da metodologia citada na seção 3.3, foram coletados os dados de corrente e tensão para cada ensaio, além do OCP. Todos estes dados foram registrados em gráficos relacionando a densidade de corrente e a tensão, a fim de comparar os resultados obtidos com os previsto na literatura.

4.1 Potencial de circuito aberto (OCP)

Os valores do potencial de circuito aberto medidos entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência após um tempo de imersão de 30 minutos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de OCP medidos durante os ensaios realizados.

ID	Perfil de revestimento	OCP [mV]	ID	Perfil de revestimento	OCP [mV]
I	Cilindro Infinito	-522,1	X	Sino	-531,3
II	Cilindro Infinito	-566,5	XI	Sino	-563,3
III	Cilindro Infinito	-532	XII	Sino	-580,4
IV	Cilindro Infinito	-566,3	XIII	Cilindro Finito	-542,5
V	Cilindro Infinito	-558	XIV	Cilindro Finito	-533,4
VI	Cilindro Infinito	-576,7	XV	Cilindro Finito	-526
VII	Sino	-567,1	XVI	Cilindro Finito	-519,2
VIII	Sino	-553,2	XVII	Cilindro Finito	-531,3
IX	Sino	-536,9	XVIII	Cilindro Finito	-524,6

Fonte: Autores.

Como esperado, os resultados obtidos não indicam influência do perfil de revestimento nos valores de OCP, pois este foi medido na condição estática (0 rpm). Nota-se certa estabilidade nos valores de OCP visto que a diferença entre o maior e o menor valor obtidos é de apenas 58,3 mV.

4.2 Curvas de polarização catódica e anódica

Os Gráficos 1 e 2 apresentam as curvas de polarização levantadas para os dezoito ensaios realizados. Nota-se uma alta reprodutibilidade nos resultados dos ensaios, sejam eles realizados à 100 rpm ou 4900 rpm.

Não foi possível observar influência significativa do perfil de revestimento isolante no traçado das curvas. É possível observar também, que nos ensaios realizados à 4900 rpm a estabilização da densidade de corrente limite acontece em um momento anterior e por um maior período de tempo em relação aos ensaios realizados à 100 rpm.

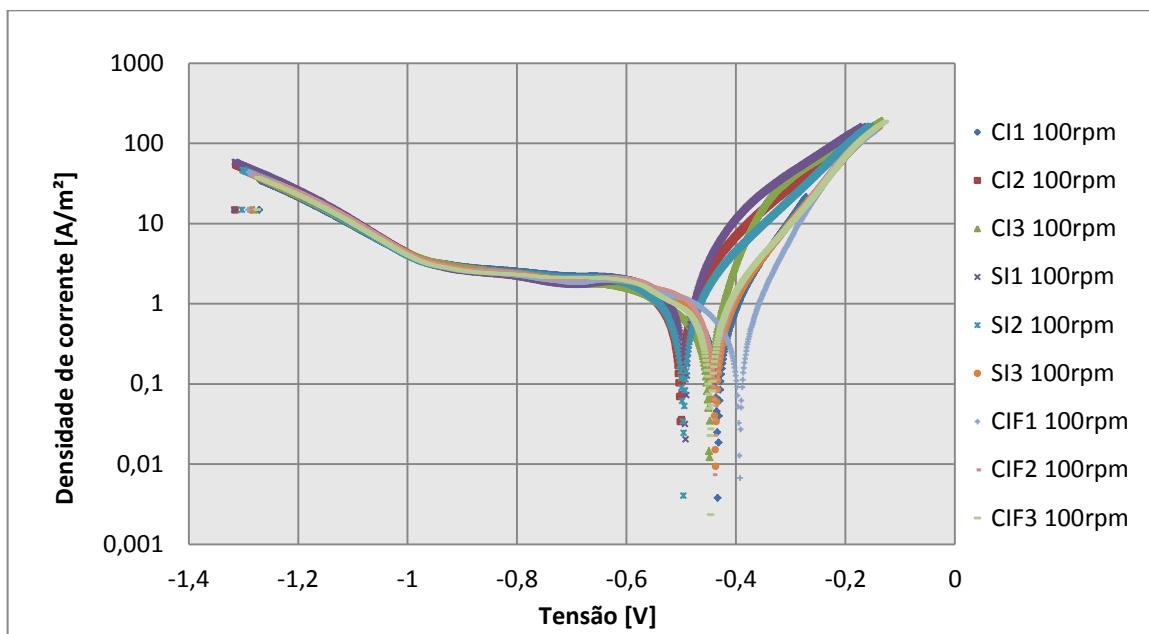


Gráfico 1. Curvas de polarização para os três diferentes tipos de perfil de revestimento isolante e rotação à 100 rpm.

Fonte: Autores.

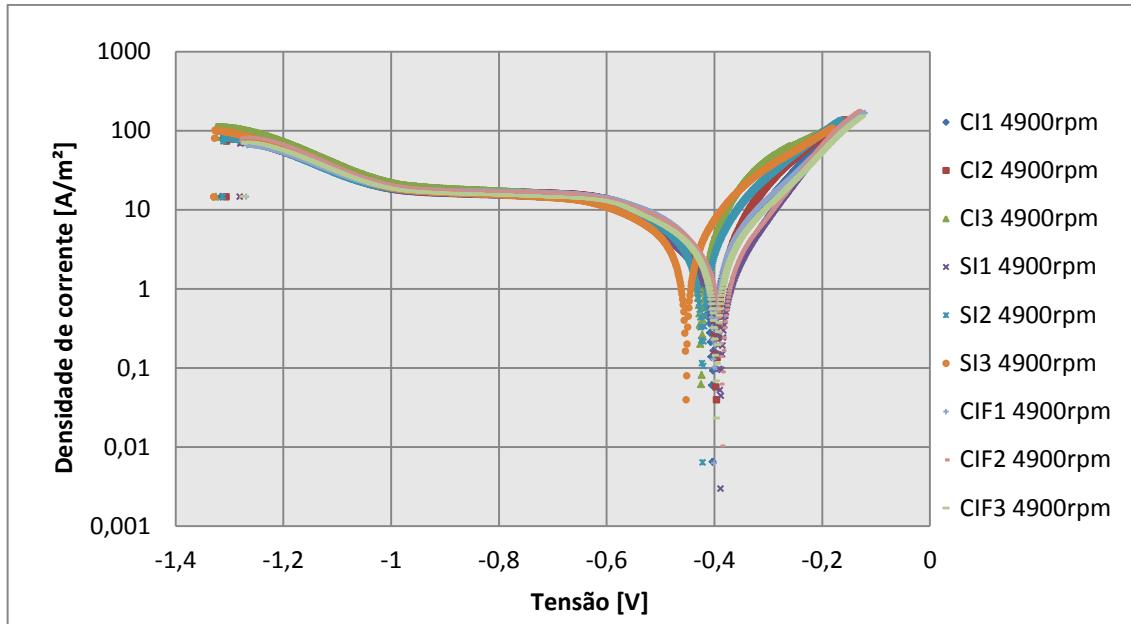


Gráfico 2. Curvas de polarização para os três diferentes tipos de perfil de revestimento isolante e rotação à 4900 rpm.

Fonte: Autores.

O Gráfico 3 apresenta as curvas de polarização para o perfil de revestimento *Cilindro Finito*.

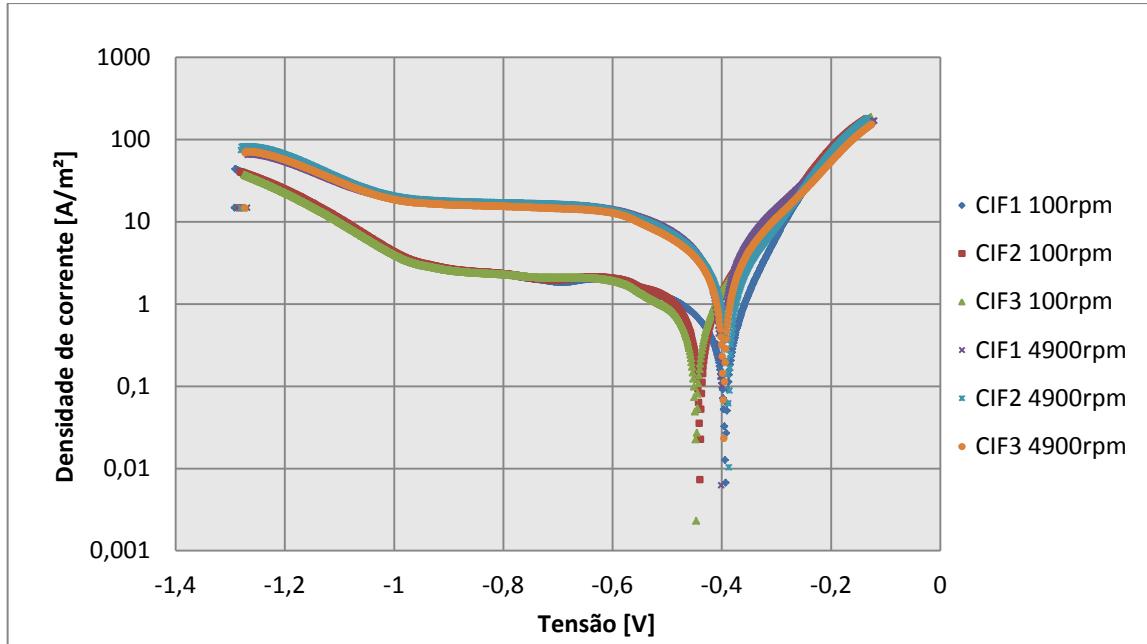


Gráfico 3. Curvas de polarização para o perfil de revestimento *Cilindro Finito* e rotações de 100 e 4900 rpm.

Fonte: Autores.

Quando as curvas com ambas as velocidades são sobrepostas, é possível observar o efeito da velocidade na intensidade da densidade de corrente limite. Os ensaios realizados com velocidades de 4900 rpm apresentaram em média valores de densidade de corrente limite aproximadamente oito vezes superiores aos valores levantados nos ensaios realizados à 100 rpm. Esse aumento da densidade de corrente limite é previsto na literatura, conforme citado na seção 2.5.1 e ilustrado na Figura 233.

4.3 Equação de Levich

A equação de Levich se apresenta como uma maneira eficiente de se avaliar a performance dos perfis de revestimento, bem como para validar o potenciómetro PGSTAT302N 30V/2000mA. Tal equação relaciona a raiz quadrada da velocidade angular do disco com a densidade de corrente limite, e é expressa da seguinte forma [7]:

$$J_D = 0.6205 \cdot n \cdot F \cdot D^{0.66} \cdot v^{-0.167} \cdot \sqrt{\omega} \cdot C_{bulk}$$

A Tabela 5 apresenta os valores de densidade de corrente limite teóricos obtidos através da equação de Levich. Tal tabela foi construída adotando-se os seguintes valores: viscosidade cinemática da solução igual a $1,188 \times 10^{-6}$ [m²/s], coeficiente de difusão igual a $2,13 \times 10^{-9}$ [m²/s], a concentração do espécime igual a $2,64 \times 10^{-4}$ [mol/l] e o número de elétrons igual a 2. Todos os valores foram adotados para temperatura de 23°C, o coeficiente de difusão foi retirado de [20] e a concentração de [21].

Tabela 5. Valores calculados para a densidade de corrente limite.

D [m ² /s]	n	C _b [mol/l]	F [C/mol]	v [m ² /s]
$2,13 \times 10^{-9}$	2	$2,68 \times 10^{-4}$	96487	$1,19 \times 10^{-6}$
ω [rpm]	ω [rad/s]	A [m ²]	Re	J _d [A/m ²]
100	10,471975	$6,36 \times 10^{-5}$	$4,96 \times 10^2$	1,92
4900	513,126775	$6,36 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^4$	13,41

Fonte: Autores.

Para obter os valores de densidade de corrente limite experimentais em uma curva de polarização catódica, devemos estimar o valor de densidade de corrente a qual a mesma tende

a se estabilizar. O Gráfico 4 mostra curvas de polarização para ensaios com o perfil de revestimento *Cilindro Finito* à 4900 rpm, em destaque a região de estabilização da densidade de corrente.

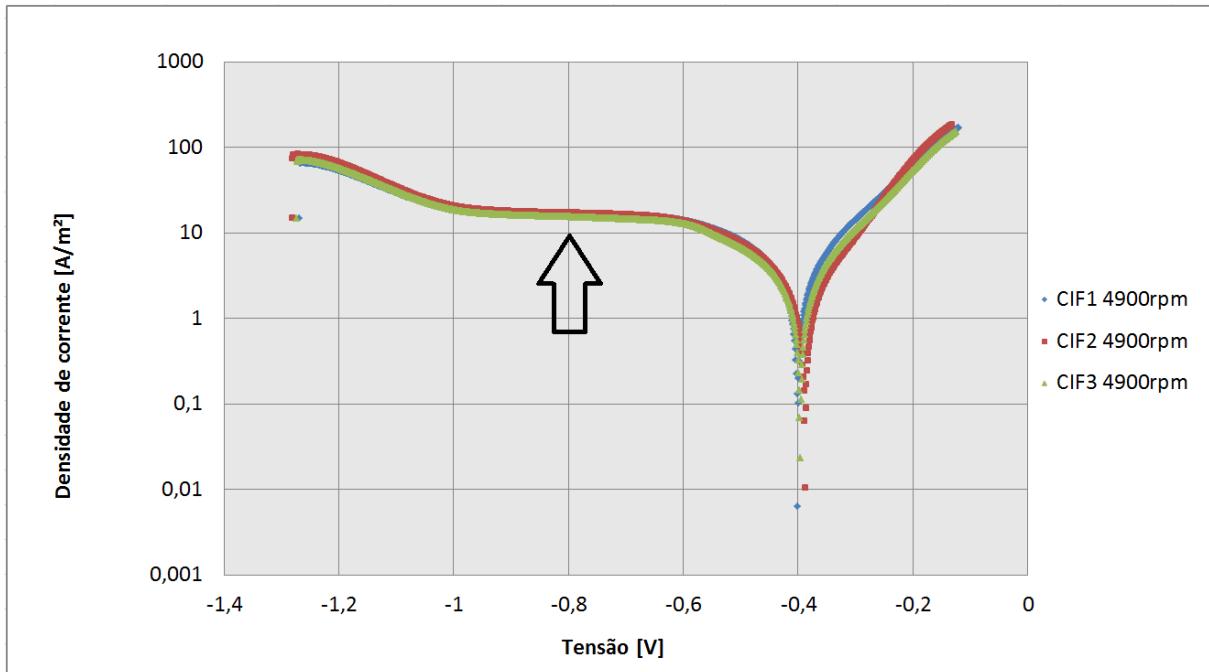


Gráfico 4. Região de estabilização da densidade de corrente.

Fonte: Autores.

Para estimar o valor da densidade de corrente limite de difusão foram coletados os valores de corrente na região de estabilização das curvas catódicas e em seguida foi realizado o cálculo da média aritmética destes valores. Após estimarmos os valores da densidade corrente limite de difusão para cada ensaio, foi calculada a média para cada perfil de revestimento isolante, bem como seu desvio padrão.

A Tabela 6 apresenta os valores de densidade de corrente limite de difusão estimados para cada ensaio, bem como a média desses valores para cada perfil de revestimento isolante e seu desvio padrão. A Tabela 7 compara os valores de densidade de corrente limite encontrados experimentalmente e os calculados através da equação de Levich.

Tabela 6. Valores estimados experimentalmente para a densidade de corrente limite.

ID	Perfil	ω [rpm]	J_d [A/m ²]	J_d Médio [A/m ²]	Desvio Padrão
I	CI	100	2,17		
II	CI	100	2,00	2,11	-0,096
III	CI	100	2,15		
VII	SI	100	1,71		
VIII	SI	100	2,09	1,91	-0,189
IX	SI	100	1,92		
XIII	CIF	100	1,84		
XIV	CIF	100	2,12	2,02	-0,155
XV	CIF	100	2,09		
IV	CI	4900	16,27		
V	CI	4900	16,93	16,73	-0,395
VI	CI	4900	16,98		
X	SI	4900	15,09		
XI	SI	4900	15,25	15,25	-0,157
XII	SI	4900	15,40		
XVI	CIF	4900	16,90		
XVII	CIF	4900	16,93	16,41	-0,871
XVIII	CIF	4900	15,40		

Fonte: Autores.

Tabela 7. Comparaçao entre os valores de densidade de corrente limite calculados e estimados experimentalmente.

ω [rpm]	Perfil	J_d Estimado [A/m ²]	J_d Calculado [A/m ²]
100	<i>Cilindro Infinito</i>	2,11	
	<i>Sino</i>	1,91	1,92
	<i>Cilindro Finito</i>	2,02	
4900	<i>Cilindro Infinito</i>	16,73	
	<i>Sino</i>	15,25	13,4
	<i>Cilindro Finito</i>	16,41	

Fonte: Autores.

Analizando as tabelas acima, nota-se que para rotação de 100 rpm, os valores obtidos para a densidade de corrente limite são próximos ao valor calculado pela equação de Levich, com o perfil de revestimento *Sino* apresentando o melhor resultado quando comparado à teoria. Com o aumento da rotação, nota-se uma tendência de afastamento dos valores da densidade de corrente limite levantados experimentalmente dos calculados pela equação de Levich. A equação de Levich é válida somente para situações onde o regime de escoamento é laminar, a

4900 rpm número de Reynolds calculado é $2,43 \times 10^4$, indicando uma proximidade com o regime de escoamento turbulento, que ocorre para Reynolds maior do que 10^5 . Analisando o desempenho dos perfis de revestimento isolante em ensaios a 4900 rpm, nota-se ainda um maior destaque do perfil *Sino* em relação aos demais.

4.4 Inclinações de Tafel

Os valores de inclinação de Tafel, β_a referente à curva de polarização anódica e β_c referente à parte da curva catódica de redução do hidrogênio, foram calculados pelo método de extrapolação da reta de Tafel e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores de inclinações de Tafel das curvas de polarização de todos os ensaios realizados.

ID	Perfil de revestimento	β_a [mV/dec]	β_c [mV/dec]	ID	Perfil de revestimento	β_a [mV/dec]	β_c [mV/dec]
100rpm				4900rpm			
I	<i>Cilindro Infinito</i>	86,30	264,89	IV	<i>Cilindro Infinito</i>	121,98	355,56
II	<i>Cilindro Infinito</i>	163,23	264,02	V	<i>Cilindro Infinito</i>	170,23	360,78
III	<i>Cilindro Infinito</i>	220,24	265,45	VI	<i>Cilindro Infinito</i>	270,75	351,25
VII	<i>Sino</i>	212,46	242,11	X	<i>Sino</i>	160,36	356,44
VIII	<i>Sino</i>	173,00	250,19	XI	<i>Sino</i>	173,89	358,29
IX	<i>Sino</i>	110,10	251,22	XII	<i>Sino</i>	206,09	355,34
XIII	<i>Cilindro Finito</i>	70,93	249,94	XVI	<i>Cilindro Finito</i>	147,06	357,33
XIV	<i>Cilindro Finito</i>	121,88	249,11	XVII	<i>Cilindro Finito</i>	135,44	345,22
XV	<i>Cilindro Finito</i>	123,69	250,43	XVIII	<i>Cilindro Finito</i>	146,15	362,12

Fonte: Autores.

Pode-se observar que há muita variação nos valores para a inclinação β_a , referente à curva de polarização anódica, para um mesmo perfil de revestimento e mesma rotação. Esta grande variação pode ser explicada pelo fato de não ter sido possível obter trechos lineares bem definidos na curva de polarização, com o comprimento mínimo recomendado de uma década de densidade de corrente. Este fato torna inviável o uso do método de extrapolação da reta de Tafel [5] [28] [29].

Já os resultados para β_c mostram que, para a parte catódica da curva de polarização referente à redução do hidrogênio, há pouca variação na inclinação de Tafel, para ensaios realizados à

mesma rotação e que os valores de inclinação levantados para os ensaios a 4900 rpm são maiores dos que os levantados nos ensaios a 100 rpm.

4.5 Efeitos do fluxo na corrosão do material

A Figura 30 (a) mostra um eletrodo de trabalho após a realização do ensaio a 4900 rpm, e (b) mostra as linhas de fluxo atuantes no eletrodo de trabalho [6]. Nota-se que as marcas de corrosão seguem preferencialmente a direção das linhas de fluxo. Tal comportamento se repetiu para todos os perfis de revestimento isolante.

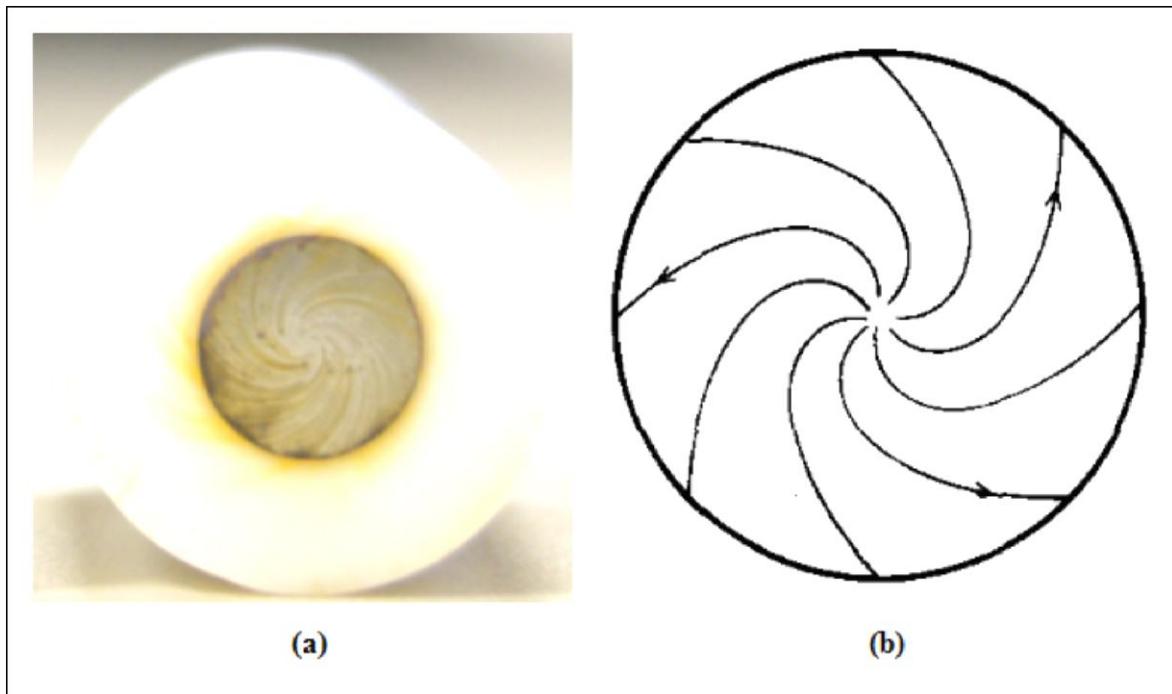


Figura 30. (a) Eletrodo de trabalho após realização de ensaio. (b) Linhas de fluxo atuantes no eletrodo de trabalho.

Fonte: Autores, [6].

5 CONCLUSÕES

Após os resultados apresentados, conclui-se que o equipamento PGSTAT302N está operando corretamente, de acordo com o previsto na literatura, visto que ele foi capaz de estimar os valores de OCP e reproduzir as curvas de polarização satisfatoriamente.

Os resultados obtidos para os valores de OCP apresentaram pouca variação em todos os ensaios realizados. E como esperado, não foi possível identificar influência do perfil de revestimento na determinação do OCP, visto que os valores do OCP foram levantados em condição estática (0 rpm).

Os ensaios se mostraram altamente reproduutíveis, visto que as curvas de polarização levantadas apresentaram semelhança quanto ao traçado, para os três perfis de revestimento isolante, tanto para ensaios realizados a 100 rpm quanto a 4900 rpm.

Os ensaios realizados com velocidades de 4900 rpm apresentaram em média valores de densidade de corrente limite aproximadamente oito vezes superiores aos valores levantados nos ensaios realizados à 100 rpm. Esse aumento da densidade de corrente limite é previsto na literatura, Wolyne (2003).

Os valores obtidos para a densidade de corrente limite, para ensaios a 100 rpm, são próximos ao valor calculado pela equação de Levich, com o perfil de revestimento *Sino* apresentando o melhor resultado quando comparado à teoria. Notou-se que os valores de densidade de corrente limite para ensaios a 4900 rpm, apresentaram maior afastamento em relação ao valor calculado pela equação de Levich. Este afastamento pode ser explicado pela proximidade do valor do número de Reynolds calculado para 4900 rpm e do número de Reynolds crítico, acima do qual a equação de Levich não é válida.

Observou-se uma grande variação nos valores obtidos para a inclinação β_a , referente à curva de polarização anódica, para um mesmo perfil de revestimento e mesma rotação. Esta grande variação pode ser explicada pelo fato de não ter sido possível obter trechos lineares bem definidos na curva de polarização, com o comprimento mínimo recomendado de uma década de densidade de corrente.

Já os resultados para β_c mostram que, para a parte catódica da curva de polarização referente à redução do hidrogênio, há pouca variação na inclinação de Tafel, para ensaios realizados à mesma rotação e que os valores de inclinação levantados para os ensaios a 4900 rpm são maiores dos que os levantados nos ensaios a 100 rpm.

Na face do eletrodo de trabalho após a realização dos ensaios, foi possível observar que as marcas de corrosão seguiram preferencialmente as linhas de fluxo do eletrólito.

Por fim, podemos concluir que dentre os perfis de revestimento isolante analisados, o perfil *Sino* é o que melhor atende aos requisitos necessários a um revestimento em ensaios de eletrodo disco rotatório. Conclusão esta, conforme estudo anterior realizado por Opekar e Beran (1975) e Schmitt e Bakkalli (2006).

6 REFERÊNCIAS

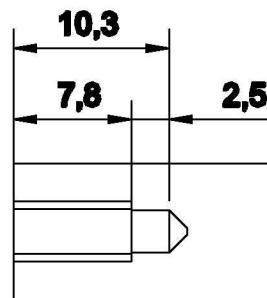
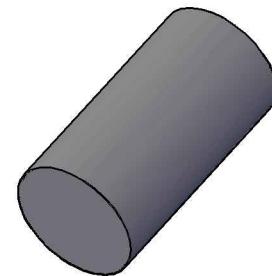
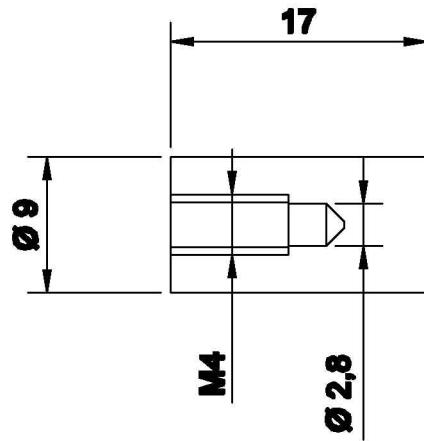
- [1] MONFARDINI, W. A. (2012). **Ensaios De Corrosão Erosão: Um Estudo Bibliográfico.** *Projeto de graduação.* Vitória, Espírito Santo, Brasil: Universidade Federal do Espírito Santo.
- [2] KOCH, G. H. *et al.* (2002). **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States.** NACE.
- [3] BRAMBILLA, K. J. C. (2009). **Investigaçāo do Grau de Corrosividade Sobre Materiais Metálicos das Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica (RD) da Região Metropolitana de Salvador-BA.** *Dissertação de Mestrado.* Curitiba, Paraná, Brasil: Universidade Federal do Paraná.
- [4] GENTIL, V. (2011). **Corrosão** (6^a ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- [5] WOLYNCE, S. (2003). **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.** São Paulo: EdUsp.
- [6] OPEKAR, F. & BERAN, P. (1975). **Rotating Disk Electrodes.** Netherlands: Journal of Electroanalytical Chemistry.
- [7] SCHMITT, G. & BAKKALLI, M. (2006). **A Critical Review of Measuring Techniques for Corrosion Rates Under Flow Conditions.** 61st Annual Conference & Exposition Corrosion NACE.
- [8] POULSON, B. (1999). **Complexities in predicting erosion corrosion.** Wear.
- [9] STACK, M. M. *et al.* (1994). **Relationship between the effects of velocity and alloy corrosion resistance in erosion-corrosion environments at elevated temperatures.** Wear.
- [10] LUO, J. L. *et al.* (2005). **Interaction of mechanical and electrochemical factors in erosion-corrosion of carbon steel.** Electrochimica.
- [11] EFIRD, K. D. (2006). **Flow Accelerated Corrosion Testing Basics.** 61st Annual Conference & Exposition Corrosion NACE.

- [12] GOMES, A. C. (2005). **Análise da Corrosão e da Erosão-Corrosão do Aço Carbono em Meio com NaHCO₃ e CO₂.** *Dissertação de Mestrado.* Curitiba, Paraná, Brasil: Universidade Federal do Paraná.
- [13] ALVINO, A. E. I. (2003). **Avaliação dos riscos em dutovias para transmissão de petróleo e/ou gás mediante o modelo Muhlbauer.** *Dissertação de Mestrado.* Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [14] SHREIR, L. L. (1978). **Corrosion of metals and alloys, Vol. I.** New York: Wiley-Interscience.
- [15] MOTTA, H. N. (2000). **Crescimento de óxido de cádmio sobre cádmio em meio alcalino.** *Dissertação de Mestrado.* Curitiba, Paraná, Brasil: Universidade Federal do Paraná.
- [16] YANG, Y. & CHENG, Y. F. (2011). **Parametric effects on the erosion-corrosion rate and mechanism of carbon steel pipes in oil sands slurry.** WEAR.
- [17] ROBERGE, R. P. (1999). **Handbook of Corrosion Engineering.** New York: McGraw-Hill.
- [18] GARVERICK, L. (1999). **Corrosion in the petrochemical industry.** United States of America: ASM International.
- [19] TICIANELLI, E. A. & GONZALEZ, E. R. (2005). **Eletroquímica: Princípios e Aplicações.** (2^a ed.). São Paulo: Edusp.
- [20] STROE, A. J. & JANSSEN, L. J. J. (1993). **Determination of the diffusion coefficient of oxygen in sodium chloride solutions with a transient pulse technique.** Analytica Chimica Acta.
- [21] DAVIS, C. & FRAWLEY, P. (2009). **Modelling of erosion–corrosion in practical geometries.** Corrosion Science.
- [22] http://www.iope.com.br/3i_corrosao.htm (Acessado em 15/10/2012)
- [23] BALLE, W. C. (2004). **Nitretação à plasma como meio alternativa ou complementar à oxidação negra na proteção à corrosão do aço de baixo teor de carbono.** *Dissertação de Mestrado.* Curitiba, Paraná, Brasil: Universidade Federal do Paraná.

- [24] ZIMER, A. M. (2009). **Estudo da corrosão do aço carbono em meio de sulfeto.** *Tese de doutorado*. São Carlos, São Paulo, Brasil: Universidade Federal de São Carlos.
- [25] BHUSHAN, B. (1999). **Principles and applications of tribology.** Wiley-Interscience.
- [26] DAVIS, J. R. (2000). **Corrosion: Understanding the Basics.** United States of America: ASM International.
- [27] RADI, P. A. *et al* (2007). **Tribologia, conceitos e aplicações.** São José dos Campos, São Paulo, Brasil: Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- [28] KELLY, R. G. *et al* (2002). **Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering.** United States of America: Marcel Dekker.
- [29] MCCAFFERTY, E. (2005). **Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method.** Corrosion Science.

ANEXOS

Anexo A – Desenhos Técnicos dos eletrodos de trabalho.



Universidade Federal do Espírito Santo - Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Descrição: Núcleo do Eletrodo de Trabalho

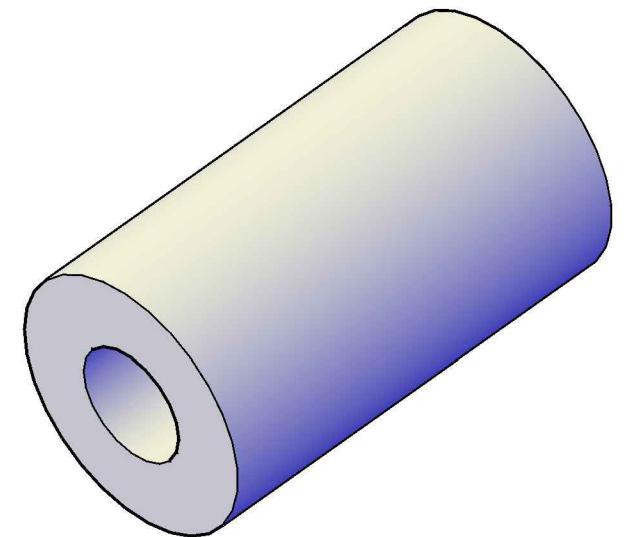
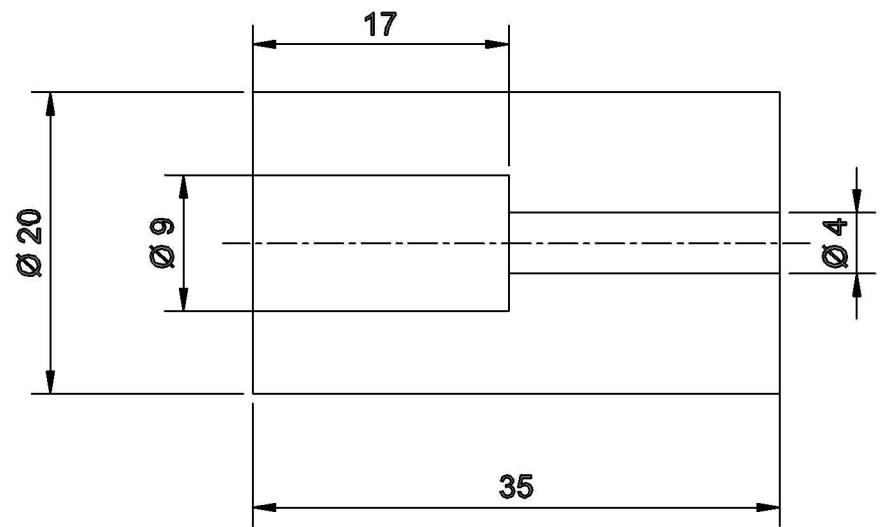
Autor: Renan das Neves Silva

Co-Autor: Rodrigo Pereira Gonçalves

Data: 04/10/2012

Material: Aço Carbono 1020

Escala: 2:1 Unidade: mm



Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Descrição: Revestimento isolante perfil *Cilindro Infinito*

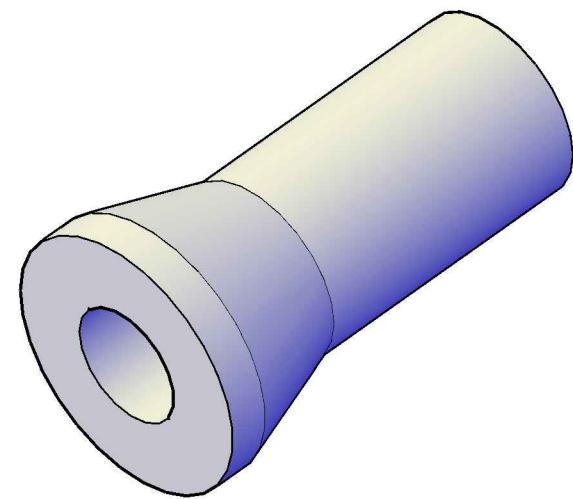
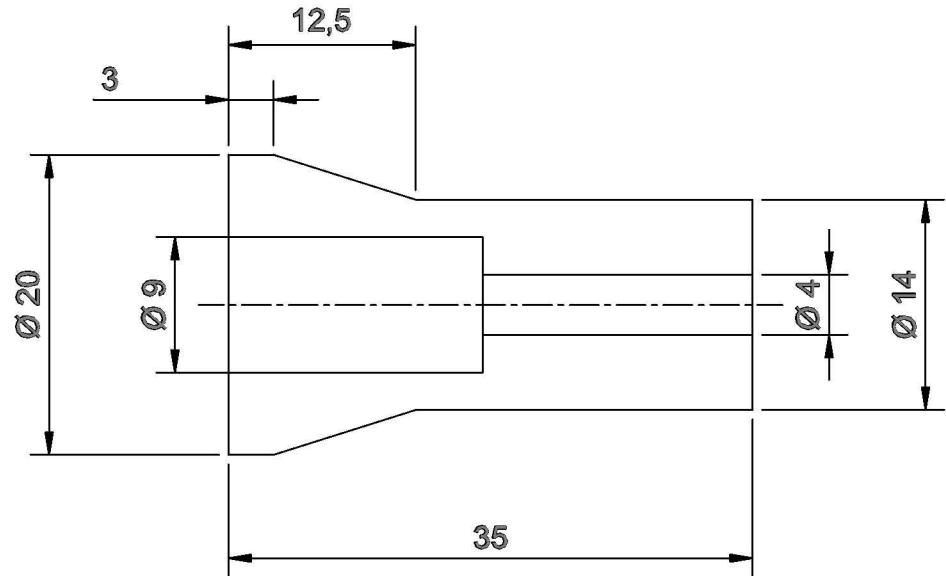
Autor: Renan das Neves Silva

Co-Autor: Rodrigo Pereira Gonçalves

Data: 04/10/2012

Material: Teflon

Escala: 2:1 Unidade: mm



Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

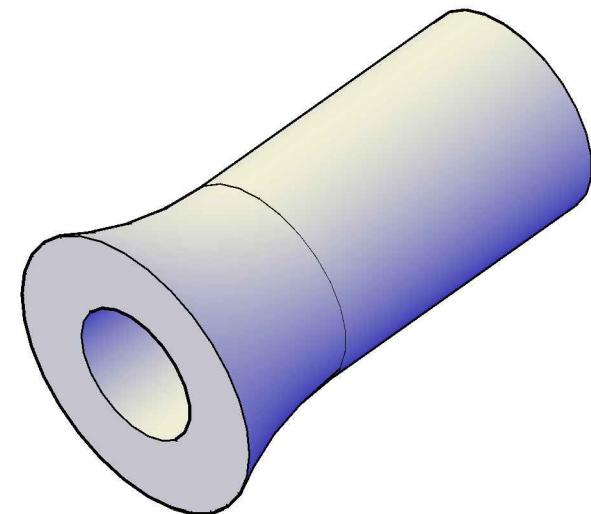
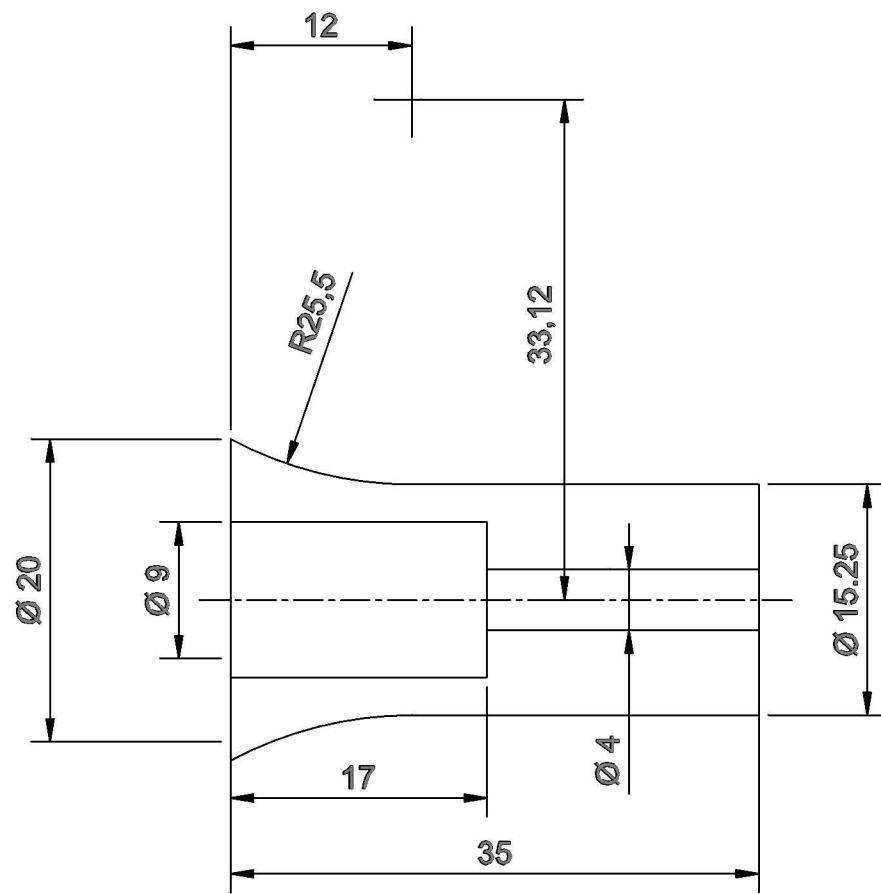
Descrição: Revestimento isolante perfil *Cilindro Finito*

Autor: Renan das Neves Silva

Co-Autor: Rodrigo Pereira Gonçalves

Data: 04/10/2012 Material: Teflon

Escala: 2:1 Unidade: mm



Universidade Federal do Espírito Santo - Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Descrição: Núcleo do Eletrodo de Trabalho

Autor: Renan das Neves Silva

Co-Autor: Rodrigo Pereira Gonçalves

Data: 04/10/2012

Material: Teflon

Escala: 2:1 Unidade: mm