UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CT – CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FILIPE MODENESE RECLA

CARCTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TESTE DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO ELETRODO DISCO ROTATÓRIO ATRAVÉS DE CFD

FILIPE MODENESE RECLA

CARCTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TESTE DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO ELETRODO DISCO ROTATÓRIO ATRAVÉS DE CFD

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. Marcio Ferreira Martins

VITÓRIA

2013

FILIPE MODENESE RECLA

CARCTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TESTE DE CORROSÃO-EROSÃO UTILIZANDO ELETRODO DISCO ROTATÓRIO ATRAVÉS DE CFD

| - | Federal do Esp | ado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico pírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel |
|-------------|----------------|--|
| Aprovado em | de | de |
| | | |
| | | |
| | | BANCA AVALIADORA |
| | | Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins |
| | | Universidade Federal do Espírito Santo |
| | | Orientador |
| | | Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo |
| | | Universidade Federal do Espírito Santo |
| | | Eng. Bruno Moura Furtado |
| | | Universidade Federal do Espírito Santo (Mestrando) |



RESUMO

O presente trabalho apresenta o resultado para a caracterização do escoamento em testes

utilizando o eletrodo disco rotatório. A análise foi feita em CFD, utilizando ferramentas

computacionais disponíveis no mercado. As simulações foram realizadas para diferentes

parâmetros físicos e geométricos dos testes reais.

Com o crescimento do estudo da corrosão, devido à necessidade de minimização dos custos

com manutenção em todos os setores da sociedade, foram desenvolvidas técnicas para uma

avaliação mais precisa da resistência dos materiais metálicos ao fenômeno corrosivo. Sendo

um sistema de grande conveniência do ponto de vista prático, o eletrodo disco rotatório se

tornou uma das técnicas que vem sendo amplamente utilizada. Assim, a necessidade do

estudo mais detalhado deste teste se tornou visível, para que fossem alcançados resultados

mais precisos e confiáveis.

Assim, como objetivos principais deste trabalho têm-se, a caracterização do escoamento por

meio de simulações em CFD, para a comparação com a teoria hidrodinâmica clássica dos

discos rotatórios, e a avaliação dos perfis de revestimento (no que diz respeito a suas funções

hidrodinâmicas).

Com os resultados obtidos das simulações foi possível comprovar que estas atendem a teoria

hidrodinâmica clássica dos discos rotatórios, isso para a região dentro da camada limite.

Também foi comprovado que dentre os perfis de revestimento avaliados, o perfil Sino é o que

melhor se adequa as suas funções hidrodinâmicas.

Palavras-chave: corrosão-erosão, disco rotatório, CFD, perfil de revestimento isolante, Von

Kármán.

ABSTRACT

This paper presents the results for the characterization of the flow tests using the rotating disk

electrode. The CFD analysis was done using computational tools available on the market. The

simulations were performed for different physical and geometrical parameters of the real tests.

With the growth of the study of corrosion due to the need to minimize maintenance costs in

all sectors of society, techniques have been developed for a more accurate evaluation of the

resistance of metallic materials to corrosive phenomenon. Being a system of great

convenience of a practical standpoint, the rotating disk electrode became one of the

techniques that have been widely used. Therefore, the need for more detailed study of this test

became visible, that were achieved results more accurate and reliable.

Thus, main goals of this work have been the characterization of the flow through CFD

simulations, for comparison with the classical theory of hydrodynamic rotating disc and the

evaluation of coating profiles (with regard to their hydrodynamic functions).

With the results of the simulations was possible to prove that these are compatible with the

classical hydrodynamic theory of rotating disc for this region within the boundary layer. It

was also proven that among the evaluated coating profiles, Sino profile is what best fits their

hydrodynamic functions.

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

LISTA DE FIGURAS

| Figura 1. Uma possível classificação dos fluidos contínuos | 14 |
|--|-------|
| Figura 2. Formação da camada limite sobre uma placa plana | 17 |
| Figura 3. Representação esquemática do processo de erosão. | 19 |
| Figura 4. Esquema do mecanismo simplificado de corrosão erosão. | 20 |
| Figura 5. Espectro dos processos de corrosão-erosão. | 21 |
| Figura 6. Variação da taxa de corrosão com a velocidade de escoamento | 22 |
| Figura 7. Diferentes regimes de corrosão-erosão com a variação de velocidade | 23 |
| Figura 8. Eletrodos rotatórios: a) arame, b) disco, c) cilindro, d) cônico e e) hemisférico | 24 |
| Figura 9. Aparato experimental para os métodos rotatórios | 24 |
| Figura 10. Sistema de coordenadas do disco rotatório | 26 |
| Figura 11. Gráfico das funções $F(\gamma)$, $G(\gamma)$ e $H(\gamma)$ | 27 |
| Figura 12. Escoamento em torno do disco rotatório: (A) Visão inferior do escoamento | nas |
| proximidades do disco; (B) Visão Lateral. | 29 |
| Figura 13. Plote de Levich para a evolução do hidrogênio em solução de CO ₂ (0,5M Na ₂ S | SO4) |
| | 31 |
| Figura 14. Efeito da variação do teor de oxigênio na solução e da agitação da solução sob | re o |
| potencial de corrosão e a taxa de corrosão do metal Me. | 32 |
| Figura 15. Formatos dos perfis de revestimento para eletrodos rotatórios | |
| Figura 16. Padrão de escoamento dos perfis de revestimento a 240RPM | 33 |
| Figura 17. Desenho representativo do domínio físico para perfil de revestimento Cilir | ndro |
| Infinito. | 36 |
| Figura 18. Desenho representativo da geometria adotada para o perfil de revestimento Sino | o.37 |
| | |
| Figura 19. Desenho representativo da geometria adotada para o perfil de revestimo | ento |
| Cilindro Finito. | 37 |
| Figura 20. Gráfico das velocidades azimutais próximos à superfície do rotor para as difere | entes |
| malhas | 40 |
| Figura 21 – Linhas de Corrente para o Cilindro Infinito a 100rpm | 43 |
| Figura 22 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 100rpm | 44 |

| Figura 23 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 100rpm. | 45 |
|---|----|
| Figura 24 – Linhas de Corrente para o Cilindro Infinito a 4900rpm | 46 |
| Figura 25 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 4900rpm. | 47 |
| Figura 26 – Linhas de Corrente para o perfil Sino a 100rpm. | 48 |
| Figura 27 – Gráficos dos perfis de velocidade para a posição radial R0 | 49 |
| Figura 28 – Gráficos dos perfis de velocidade para a posição radial R ₁ | 50 |
| Figura 29 – Gráficos da variação da velocidade na direção y dentro da camada limite | 51 |
| Figura 30 – Gráficos da variação da velocidade na direção y fora da camada limite | 51 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 1. Comportamento da taxa de corrosão de matérias em água do mar | 21 |
|--|----|
| Tabela 2. Valores das funções F, G, H e P, para vários valores de γ | 28 |
| Tabela 3. Valores de Re_{Crit} obtidos de experimentos da literatura | 30 |
| Tabela 4. Perfis de revestimento utilizados nos ensaios | 35 |
| Tabela 5. Velocidades adotadas nos ensaios | 35 |
| Tabela 6. Propriedade da água como condição de entrada | 38 |
| Tabela 7. Malhas utilizadas para análise da convergência | 40 |

SUMÁRIO

| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
|---------|--|----|
| 1.1 | Motivação | 12 |
| 1.2 | Objetivo | 13 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 | Conceitos Teóricos da Mecânica dos fluidos | 14 |
| 2.1.1 | Descrição e classificação dos movimentos dos fluidos | 14 |
| 2.1.2 | Análise diferencial dos movimentos dos fluidos | 15 |
| 2.1.2. | 1 Equação da Conservação de Massa | 15 |
| 2.1.2.2 | 2 Equação da Quantidade de Movimento | 15 |
| 2.1.3 | Camada Limite | 16 |
| 2.2 | Corrosão | 18 |
| 2.3 | Erosão | 18 |
| 2.4 | Corrosão-erosão | 19 |
| 2.4.1 | Efeito sinergético da corrosão-erosão | 20 |
| 2.4.2 | Espectro da corrosão-erosão | 20 |
| 2.4.3 | Parâmetros hidrodinâmicos | 21 |
| 2.5 | Eletrodos rotatórios | 23 |
| 2.5.1 | Disco Rotatório | 24 |
| 2.5.1. | 1 Teoria hidrodinâmica | 25 |
| 2.5.1.2 | 2 Transporte de massa | 30 |
| 2.5.1.3 | Perfis de revestimento isolante para discos rotatórios | 32 |
| 3 | METODOLOGIA | 35 |
| 3.1 | Condições de contorno hidrodinâmico | 38 |
| 3.1.1 | Condições de Entrada | 38 |
| 3.1.2 | Condições de Parede | 38 |
| 3.1.3 | Integração numérica | 39 |
| 3.1.4 | Estudo de convergência da Malha | 39 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 42 |
| 4.1 | Padrões dos escoamentos | 42 |

| 4.2 | Perfis de velocidade do escoamento nas proximidades do rotor | |
|-----|--|----|
| 5 | CONCLUSÕES | 53 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 55 |
| ANE | EXOS | 57 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com uma maior utilização de peças e estruturas metálicas, ocorrida no ultimo século. O estudo da corrosão se tornou fundamental para preservação e consolidação desses materiais no mercado. Isso devido principalmente ao aumento da capacidade de controle sobre o fenômeno corrosivo e consequente minimização dos gastos oriundos do mesmo.

A corrosão de materiais metálicos é, ainda, frequentemente associada sinergicamente aos efeitos degradativos da erosão. Por esse motivo a erosão e a corrosão-erosão, também são de grande importância para os estudos que visam minimizar os custos com manutenção em todos os setores da indústria e da construção.

Uma das maneiras, já bastante consolidada, de se avaliar o estudo eletroquímico da corrosãoerosão, é através de experimentos utilizando eletrodos rotatórios, dentre os quais se encontra o
eletrodo disco rotatório. Sendo um sistema de grande conveniência do ponto de vista prático,
o eletrodo disco rotatório vem sendo utilizado em uma ampla variedade de estudos
experimentais desde meados do século passado. Um dos fatores contribuintes desta ampla
utilização foi o fato de, em 1942, V. G. Levich divulgar seus estudos sobre o mesmo. Estes
calculavam a taxa limite teórica da transferência de espécimes eletroativas para o eletrodo
disco rotatório [1].

Na elaboração de seus estudos, Levich fez uso da teoria hidrodinâmica desenvolvida por Theodore Von Kármán. Esta, por sua vez, descreve o fenômeno hidrodinâmico em um disco rotatório e foi analisada e descrita primeiramente pelo autor em uma de suas publicações de 1921. Para a elaboração da solução desse problema hidrodinâmico, Von Kármán definiu algumas condições de contorno, hipóteses simplificadoras e ainda criou um parâmetro adimensional [2].

Uma das variáveis que influenciam diretamente os resultados dos ensaios dos discos rotatórios são as diferentes geometrias utilizadas como perfil de revestimento para o eletrodo de teste. Este perfil de revestimento tem como principais funções, isolar as superfícies lateral e superior da amostra, evitar interações entre os escoamentos, acima e abaixo do disco, e eliminar os efeitos de borda. Sendo as duas últimas estipuladas para tornar a realidade prática dos testes mais compatível com as condições de contorno e hipóteses, definidas na teoria hidrodinâmica de Von Kármán [3].

A influencia dos perfis de revestimento nos resultados eletroquímicos obtidos nos ensaios são confirmadas e evidenciadas por autores como [3], [1], [5], dentre outros. Porém, são poucos os relatos de uma comparação qualitativa dos resultados visuais obtidos por [1] com simulações em CFD, que nos mostrem o padrão de escoamento em ensaios reais utilizando o disco rotatório. Outro fator muito importante que também pode ser analisado é se a teoria clássica hidrodinâmica desenvolvida por Von Kármán sofre influência dos parâmetros reais dos ensaios como, diferença entre os perfis de revestimento, tamanho finito do disco, tamanho finito da célula eletroquímica, dentre outros.

Assim, temos nesses dois fatores, a motivação para a elaboração de simulações numéricas em CFD, utilizando ferramentas computacionais consolidadas, para a caracterização do escoamento em teste com eletrodos disco rotatório. Sendo capaz de comparar os resultados com a literatura.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a caracterização do escoamento do fluido corrosivo no teste de corrosão-erosão utilizando o eletrodo disco rotatório. Podendo assim, comparar a teoria hidrodinâmica desenvolvida por Von Kármán e utilizada por Levich com a simulação numérica. Pretendemos ainda validar resultados apresentados pela literatura [1] e adotadas na elaboração de análises feitas anteriormente por [5] e [9] . A caracterização do escoamento do teste será feita para os três diferentes tipos de perfil de revestimento isolante e para as velocidades de rotação, adotadas nos testes por [5]. Todo esse estudo será feito com o auxílio da ferramenta computacional de simulação de escoamento de fluidos ANSYS CFX, pertencente ao pacote ANSYS.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos Teóricos da Mecânica dos fluidos

Neste tópico serão abordados alguns dos conceitos teóricos utilizados para o desenvolvimento de estudos da dinâmica dos fluidos. Dentre estes, destacam-se principalmente, a equação da conservação da massa e a equação da quantidade de movimento para escoamento de fluidos.

2.1.1 Descrição e classificação dos movimentos dos fluidos

A mecânica dos fluidos é uma disciplina muito vasta e se divide em níveis de estudo e detalhamento, devido principalmente a natureza plural dos escoamentos. Estes podem ser descritos e analisados de várias maneiras, dependendo diretamente do nível de precisão que o estudo exige. Segue abaixo, na figura 1, um fluxograma com os principais tipos de classificação de um escoamento:

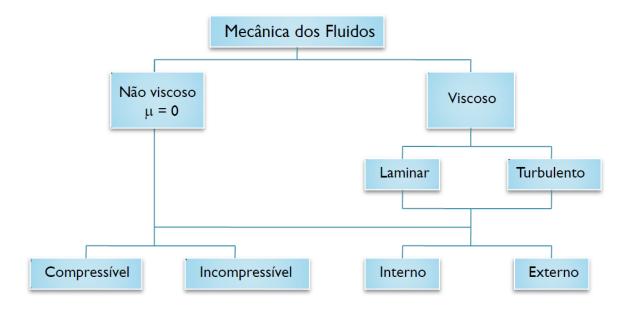


Figura 1. Uma possível classificação dos fluidos contínuos

Fonte:[6]

2.1.2 Análise diferencial dos movimentos dos fluidos

A aplicação das equações de movimento dos fluidos na forma diferencial é necessária para um conhecimento detalhado das variáveis em todo um domínio. Por exemplo, através desse tipo de analise é possível obter o campo de velocidade ponto por ponto de um escoamento qualquer [6].

2.1.2.1 Equação da Conservação de Massa

Tal equação especifica que a massa de um sistema é constante com o tempo, ou seja, a taxa de variação da massa no volume de controle é igual ao saldo dos fluxos de massa através da superfície de controle. Adotando a hipótese de incompressibilidade do fluido, tratando o fluido como contínuo e descrevendo-o em termos de suas características macroscópicas, temos a equação da conservação de massa ou equação da continuidade, descrita a seguir:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0$$

2.1.2.2 Equação da Quantidade de Movimento

Esta equação representa a força exercida por um fluido em escoamento permanente descrevendo a taxa de variação da quantidade de movimento do volume do fluido. Esta taxa deve ser igual ao somatório de forças na partícula de fluido e é descrita por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

Adotando a hipótese de que o fluido é Newtoniano, isto é, os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, onde:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij}$$

• μ é a viscosidade dinâmica [Pa.s];

- p é a pressão estática [Pa];
- g_i é a componente da gravidade $[m/s^2]$;

Desse modo, obtém-se a equação de Navier-Stokes descrita abaixo:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i$$

A equação da conservação da quantidade de movimento (Navier-Stokes) resulta da aplicação direta da segunda lei de Newton, considerando um fluido newtoniano, isotrópico e homogêneo.

Aplicando-se as equações da conservação da quantidade de movimento e de massa a um volume de controle hexagonal e infinitesimal, de lados dx, dy e dz. Obtêm-se as expressões para as componentes de tensões normais e tangenciais, respectivamente abaixo.

$$\text{Componentes das tensões normais:} \begin{cases} \sigma_{x_i} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u + 2\mu \frac{\delta u_i}{\delta x_i} \\ \sigma_{x_j} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u + 2\mu \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \\ \sigma_{x_k} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u + 2\mu \frac{\delta u_i}{\delta x_k} \end{cases}$$

Componentes das tensões tangenciais:
$$\begin{cases} \tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_i} + \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right) \\ \tau_{jk} = \tau_{kj} = \mu \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_j} + \frac{\delta u_i}{\delta x_k} \right) \\ \tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_k} + \frac{\delta u_i}{\delta x_i} \right) \end{cases}$$

2.1.3 Camada Limite

O estudioso da aerodinâmica, Ludwig Prandtl, foi quem originariamente introduziu em 1904, conceito de camada limite. Esse pequeno conceito permitiu a solução de problemas de escoamentos viscosos, que seriam impossíveis de se resolver na época, somente pela aplicação das equações de Navier-Stokes ao campo completo do escoamento. Prandtl mostrou que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados com a divisão do escoamento em duas regiões. A camada-limite é a região próxima às fronteiras sólidas onde o efeito da

viscosidade se tornava um fator importante e devia ser levado em consideração. A outra região é restante do escoamento, e nessa os efeitos viscosos são desprezíveis e por isso não são desconsiderados [6].

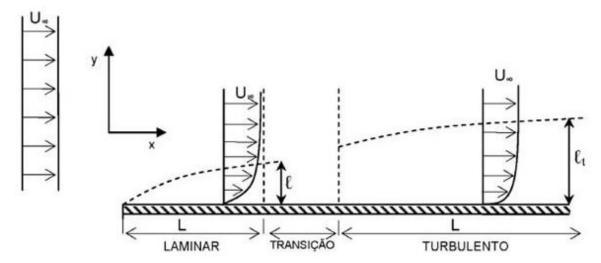


Figura 2. Formação da camada limite sobre uma placa plana Fonte: [6]

O escoamento na camada limite pode ser tanto laminar como turbulento. Esta camada se desenvolve inicialmente laminar e as instabilidades fazem com que ela se torne turbulenta. O número de Reynolds é um dos fatores significativos na caracterização de escoamentos de camada-limite, porém na há valor único do número de Reynolds para o qual ocorra a transição de escoamento laminar para turbulento em uma camada limite. O número de Reynolds é um parâmetro adimensional descrito por:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

• Lé o comprimento característico descritivo da geometria do campo de escoamento [6]. Entre os fatores que afetam a transição da camada limite estão o gradiente de pressão, a rugosidade superficial, a transferência de calor, as forças de campo e as perturbações da corrente livre [6].

2.2 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 ao qual o material está submetido [3]. 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 podem não satisfazer mais aos fins a que se destinavam [7].

Há autores que classificam a corrosão como metalurgia extrativa 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 [8].

De acordo com o meio corrosivo e o material, podem ser apresentados dois mecanismos para os processos corrosivos [8]:

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

2.3 Erosão

Erosão é um tipo de desgaste causado pelo impacto repetitivo de partículas sólidas ou liquidas ou a implosão de bolhas formadas no fluido contra a superfície de um corpo sólido [13]. 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.

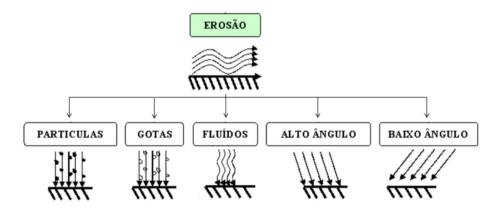


Figura 3. Representação esquemática do processo de erosão.

Fonte: [14]

A interação ente 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.

2.4 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 [12].

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 [15].

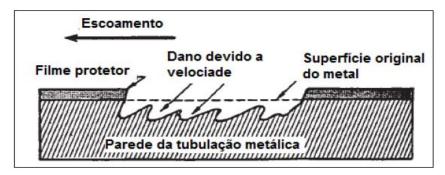


Figura 4. Esquema do mecanismo simplificado de corrosão erosão.

Fonte: [15], nossa tradução.

2.4.1 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 [16].

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 [16].

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 [16].

2.4.2 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 [16]. 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.

Domínio da dissolução



- O fluxo afina a película passiva e a corrosão é controlada por transferência de massa e a cinética de crescimento da película.
- A taxa de corrosão-erosão é controlada pela dissolução da película passiva.
- A película passiva é localmente removida através de dissolução, o fluido introduz tensão devido ao impacto das partículas, podendo ocorrer repassivação. A taxa de corrosão-erosão é controlada pela frequência da remoção do filme e a taxa de dissolução e subsequente repassivação do metal.
- A película passiva é removida e não há repassivação. A taxa de corrosão-erosão é controlada pela dissolução do metal base.
- A película passiva é removida, o metal base sofre danos mecânicos e a taxa de corrosão-erosão é a soma da dissolução mais o dano mecânico, mais o possível sinergismo.
- A película passiva é removida e o dano mecânico do metal é o mecanismo dominante.

Domínio do dano mecânico

Figura 5. Espectro dos processos de corrosão-erosão.

Fonte: [16], nossa tradução.

2.4.3 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 [18]. 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 1 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 [20].

Tabela 1. Comportamento da taxa de corrosão de matérias em água do mar.

| | Pit mais | Média da taxa de corrosão, mm/ano Escoamento em água do mar | | |
|------------------------|-----------|---|---------|-----------|
| LIGA | profundo, | | | |
| | mm | 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: [18], 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 [19].

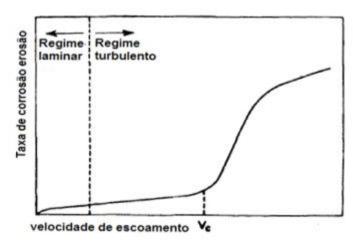


Figura 6. Variação da taxa de corrosão com a velocidade de escoamento.

Fonte: [19], nossa tradução.

Assim como há presença de diferentes regimes de corrosão-erosão para diferentes valores de temperatura, há também diferentes regimes para diferentes velocidades [19], como podemos observar na Figura 7.

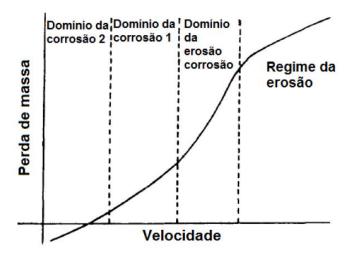


Figura 7. Diferentes regimes de corrosão-erosão com a variação de velocidade.

Fonte: [19], nossa tradução.

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 [17].

Os eletrodos rotatórios mais comuns são: o disco rotatório (EDC), cilindro rotatório (ECR) e gaiola rotatória (EGR) [4]. Porém, como podemos observar na Figura 19, existem muitas outras formas menos comuns.

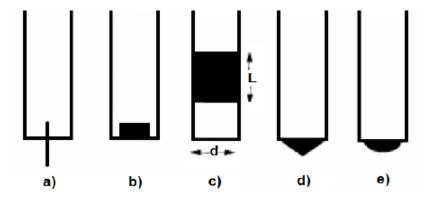


Figura 8. Eletrodos rotatórios: a) arame, b) disco, c) cilindro, d) cônico e e) hemisférico.

Fonte: [17], nossa tradução.

A maioria dos métodos rotatórios apresenta aparatos 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.

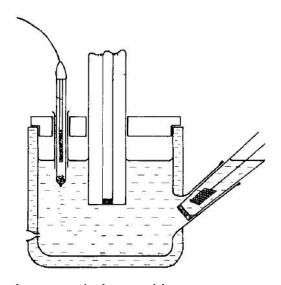


Figura 9. Aparato experimental para os métodos rotatórios.

Fonte: [11], nossa adaptação.

2.5.1 Disco Rotatório

Em 1942, Levich calculou o limite teórico para a taxa de transferência de massa de espécimes eletroativas de um eletrodo de disco rotatório. Sua solução e particularmente simples e o sistema de disco rotatório é muito conveniente do ponto de vista prático, sendo assim esse tipo de eletrodo vem sendo aplicado em uma ampla variedade de estudos experimentais [1].

Não existem dúvidas sobre a validação da teoria desenvolvida por Levich. Porém, existem referências na literatura ([1], [9]) que evidenciam o fato de alguns dos sistemas experimentais de disco rotatórios não atenderem todos os requisitos exigidos pela teoria. Esses requisitos serão descritos no tópico seguinte deste trabalho.

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 [4]. 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 [4].

2.5.1.1 Teoria hidrodinâmica

O desenvolvimento da teoria hidrodinâmica básica dos eletrodos de disco rotatório foi feito por Levich, que adotou hipóteses e definiu condições de contorno para que as equações da conservação de massa e quantidade de movimento pudessem ser resolvidas explicitamente [3]. A teoria foi desenvolvida para um regime laminar de escoamento, sendo apresentada abaixo.

O disco rotatório pode ser representado teoricamente como um plano circular de raio infinito, posicionado horizontalmente na solução do eletrólito em questão. Este plano gira em torno do seu eixo vertical com uma velocidade angular ω. Devido à simetria axial considerada, se torna conveniente utilizar o sistema de coordenadas polares para a resolução das equações da conservação da massa e quantidade de movimento [3]. Abaixo podemos ver uma figura que representa o sistema descrito:

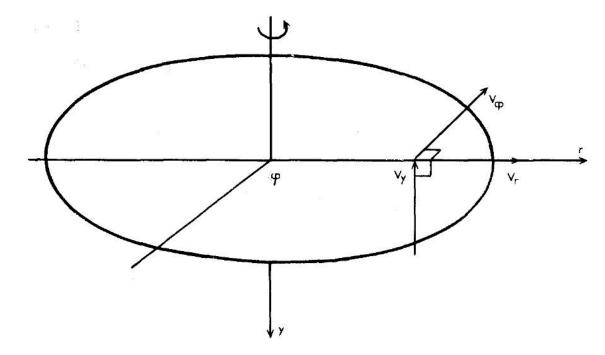


Figura 10. Sistema de coordenadas do disco rotatório

Fonte: [3], nossa tradução e adaptação.

Assim, as seguintes hipóteses foram adotas do Levich [3]:

- O escoamento não é turbulento;
- O fluxo independe da coordenada φ devido a simetria axial;
- O fluido é incompressível;
- A camada limite formada é horizontal e as variações de pressão dentro dessa dependem somente de y;
- A velocidade angular é suficiente para gerar uma forte convecção, o que contribui na eliminação de forças geradas por perturbações externas;
- O raio infinito adotado permite que os efeitos de borda do disco sejam negligenciados.

Os componentes individuais da velocidade da pressão podem ser explicitados através das equações da conservação da quantidade de movimento e conservação de massa em coordenadas polares. As equações estão descritas abaixo.

$$\begin{split} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_{\varphi}^2}{r} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial y} &= v \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial v_r}{r\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] \\ v_r \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial r} + \frac{v_r v_{\varphi}}{r} + v_r \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial y} &= v \left[\frac{\partial^2 v_{\varphi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_{\varphi}}{\partial r^2} + \frac{\partial v_{\varphi}}{r\partial r} - \frac{v_{\varphi}}{r^2} \right] \end{split}$$

$$v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_r \frac{\partial p}{\rho \partial y} = v \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial r^2} + \frac{\partial v_y}{r \partial r} \right]$$

Aplicando as seguintes condições de contorno:

$$v_r = 0$$
 $v_{\varphi} = \omega r$ $v_y = 0$ $para y = 0$

$$v_r = 0$$
 $v_{\varphi} = 0$ $v_y = const.$ para $y \to \infty$

E utilizando os métodos de integração de Kàrmàn e Cochrane, obtemos que:

$$v_r = r\omega F(\gamma)$$

$$v_{\varphi} = \omega r G(\gamma)$$

$$v_y = \sqrt[2]{\omega v} H(\gamma)$$

$$p = \rho \omega v P(\gamma)$$

Onde γ é um parâmetro adimensional da distância até a superfície do disco, dado por:

$$\gamma = \left(\sqrt[2]{\frac{\omega}{v}}\right) \times y$$

As funções F, G e H estão representadas no gráfico da figura 11 e os valores de γ são na tabela abaixo.

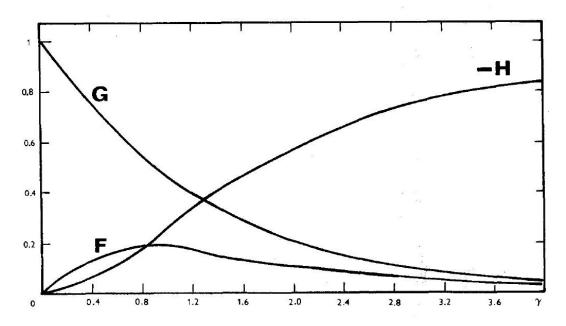


Figura 11. Gráfico das funções $F(\gamma)$, $G(\gamma)$ e $H(\gamma)$

Fonte: [3].

Tabela 2. Valores das funções F, G, H e P, para vários valores de γ.

| γ | F | G | -н | P |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 0.2 | 0.084 | 0.878 | 0.018 | 0.167 |
| 0.4 | 0.136 | 0.762 | 0.063 | 0.275 |
| 0.6 | 0.166 | 0.656 | 0.124 | 0.340 |
| 0.8 | 0.179 | 0.561 | 0.193 | 0.377 |
| 1.0 | 0.180 | 0.468 | 0.266 | 0.395 |
| 1.2 | 0.173 | 0.404 | 0.336 | 0.403 |
| 1.4 | 0.162 | 0.341 | 0.404 | 0.406 |
| 1.6 | 0.148 | 0.288 | 0.466 | 0.405 |
| 1.8 | 0.133 | 0.242 | 0.522 | 0.403 |
| 2.0 | 0.118 | 0.203 | 0.572 | 0.401 |
| 2.2 | 0.104 | 0.171 | 0.617 | 0.398 |
| 2.4 | 0.091 | 0.143 | 0.656 | 0.396 |
| 2.6 | 0.078 | 0.120 | 0.690 | 0.395 |
| 2.8 | 0.068 | 0.101 | 0.721 | 0.395 |
| 3.0 | 0.058 | 0.083 | 0.746 | 0.395 |
| 3.2 | 0.050 | 0.071 | 0.768 | 0.395 |
| 3.4 | 0.042 | 0.059 | 0.786 | 0.394 |
| 3.8 | 0.031 | 0.042 | 0.815 | 0.393 |
| 4.0 | 0.026 | 0.035 | 0.826 | 0.393 |
| 4.4 | 0.018 | 0.024 | 0.844 | 0.393 |
| 00 | 0 | 0 | 0.886 | 0.393 |

Fonte: [3].

Pode-se observar que para $\gamma = 3.6$ o valor de G é aproximadamente 0.05G(0), e H é aproximadamente $0.8H(\infty)$. Esse valor foi adotado por Levich como a espessura da camada limite, isto é, a distância na qual o fluido passa a sofrer influência maior do efeito rotacional e ganhar velocidade na direção radial. Assim, a espessura da camada Limite hidrodinâmica segundo Levich, é obtida da seguinte equação [3]:

$$\partial_0 = 3.6 \times \sqrt[2]{\frac{\overline{\nu}}{\omega}}$$

Porém, esse valor pode diferir, dependendo qual o valor de γ que o autor adota como sendo crítico. Por exemplo, em [1] temos que o valor crítico desta distância é $\gamma=2,8$, isto é, a espessura da camada limite é dada para $G\approx 0,1G(0)$ e $H\approx 0,72H(\infty)$.

As funções F, G e H também nos fornecem ilustrações do padrão do escoamento sob o disco, essas podem ser vistas na figura abaixo.

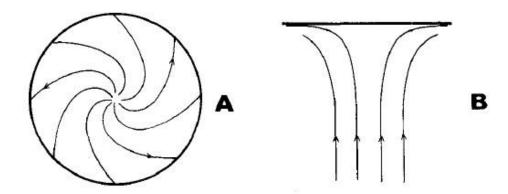


Figura 12. Escoamento em torno do disco rotatório: (A) Visão inferior do escoamento nas proximidades do disco; (B) Visão Lateral.

Fonte: [3].

A partir da ilustração B da figura acima, pode-se observar que, quando $\gamma \to \infty$ e a velocidade é constante, o escoamento é predominantemente perpedicular à superfície do disco. A partir da camada limite definida por Levich o fluido passa a ser carriado tangencialmente, e sua velocidade angular aumenta com a diminuição da distância até a superfície do disco ($\gamma = 0$) [3].

Considerando os valores das Funções H e F, e usando as equações dos componentes das velocidades, os principais conponetes das velocidades podem ser expressos da seguinte forma:

$$v_y = -0.886 \times \sqrt[2]{\omega v} \ para \ y \to \infty$$

$$v_y = -\sqrt[2]{\omega v} \left[0.51 \gamma^2 - 0.333 \gamma^3 + 0.103 \gamma^4 \dots \right] \ para \ 0 < y < \partial_0$$

$$v_r = r\omega \left[0.51 \gamma - 0.5 \gamma^2 + 0.205 \gamma^3 \dots \right] \qquad para \ 0 < y < \partial_0$$

Assim como em como em outros tipos de escoamento, um dos parâmetros adimensionais que definem o regime de turbulência deste \acute{e} o número de Reynolds. Sendo dado, para um disco rotatório de raio r, por:

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

Para certos valores do número de Reynolds, próximo ao $Re_{Crit} \approx 10^5$, o escoamento sofre a sua transição de laminar para turbulento. Essa conversão é gradual e ocorre primeiramente nas bordas do disco, avançando em direção ao centro do disco conforme se aumenta a velocidade de rotação. Valores críticos para o número de Reynolds são definidos por vários autores. Os Re_{Crit} obtidos para várias medições feitas na literatura são dados na tabela 3 [3].

Tabela 3. Valores de Re_{Crit} obtidos de experimentos da literatura.

| $Re_{\mathtt{crit}}$ | | | | | |
|----------------------|---|-----------------|--|--|--|
| 2.4 | X | 10 ⁵ | | | |
| 2.2 | X | 10^{5} | | | |
| 2.7 | | 10^{5} | | | |
| 1.8 | X | 10^{5} | | | |
| 2.1 | X | 10^{5} | | | |
| 3.1 | X | 10^{5} | | | |

Fonte: [3], nossa adaptação.

O regime turbulento pode ocorrer também para valores menores do que o Re_{Crit} . Isso pode ser causado devido vibrações axiais e/ou radiais impostas pelo rotor e desigualdades na superfície do rotor [3].

2.5.1.2 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 [4]:

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

Onde K_d é a taxa de transporte de massa, expressa em [g/m²h] e ω é a velocidade angular do disco rotatório, expressa em [rad/s]. A constante k está relacionada com o coeficiente de difusão da espécime D [m²/s], sua concentração na solução C_{bulk} [mol/l] e viscosidade cinemática ν [m²/s]. Desta forma temos [4]:

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

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 [4]:

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

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.

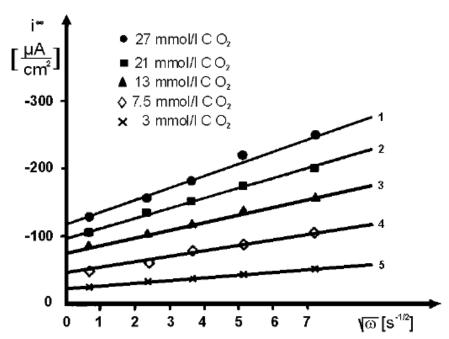


Figura 13. Plote de Levich para a evolução do hidrogênio em solução de CO₂ (0,5M Na₂SO4). Fonte: [4].

A taxa de transporte de massa também pode ser expressa em termos adimensionais ($Re \in Sc$) na forma abaixo [4]:

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

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 [10]. A Figura 23 exemplifica o evento descrito.

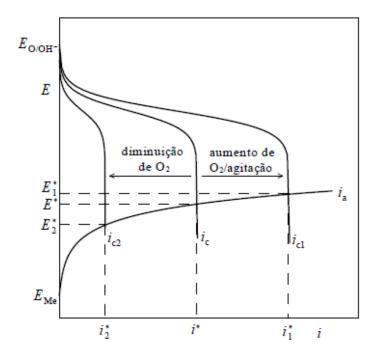


Figura 14. Efeito da variação do teor de oxigênio na solução e da agitação da solução sobre o potencial de corrosão e a taxa de corrosão do metal Me.

Fonte: [10]

2.5.1.3 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 reprodutibilidade 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 [3]:

- Isolar as áreas lateral e superior do material eletroativo;
- Evitar a interação entre os fluxos do fluido abaixo e acima do disco;

• 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.

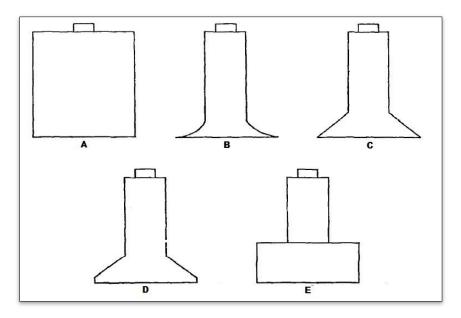


Figura 15. Formatos dos perfis de revestimento para eletrodos rotatórios.

Fonte: [1].

Em 1956, [1] mostrou em artigo os resultados obtidos através de teste que visavam descrever e analisar os tipo de perfis de revestimento que as exigências impostas sobre o revestimento isolante são mais bem satisfeitas pelo perfil de revestimento B (perfil *Sino*). Isto foi feito através da analise visual do padrão do escoamento, e também comparando as correntes limite teóricas com as medidas de maneira prática. Parte do resultado da análise visual de [1] pode ser visto na figura abaixo.

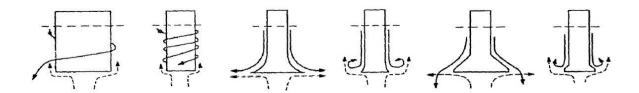


Figura 16. Padrão de escoamento dos perfis de revestimento a 240RPM

Fonte: [1]. Nossa Adaptação.

Com perfil B a interação entre o fluxo abaixo e acima do eletrodo é mínima. Essa é uma das características do escoamento que [1] apontaram para que o escoamento seja compatível com a teoria desenvolvida.

É citado ainda por [1] 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 METODOLOGIA

Conforme o objetivo deste trabalho, devemos apresentar resultados numéricos que descrevam, de maneira satisfatória, o fluxo de escoamento para os testes de erosão-corrosão utilizando discos rotatórios em diferentes tipos de perfis de revestimento. Esses resultados serão diretamente os parâmetros da transferência de massa avaliados durante esses testes.

Os ensaios realizados no laboratório por [5] servirão como base para a definição de parâmetros utilizados na simulação, tais como geometrias dos perfis de revestimento, da célula eletroquímica, dos eletrodos (eletrodo de referência e contra eletrodo) e também as velocidades de rotação. Estes ensaios foram realizados com três diferentes perfis de revestimento, sendo que cada perfil teve seu ensaio realizado em duas velocidades de rotação. As tabelas a baixo nos trazem estas variáveis.

Tabela 4. Perfis de revestimento utilizados nos ensaios.

| Perfis de revestimento utilizados nos ensaios | | |
|---|--|--|
| Cilindro Infinito (CI) | | |
| Cilindro Finito (CF) | | |
| Sino (SI) | | |

Fonte: [5], nossa adaptação.

Tabela 5. Velocidades adotadas nos ensaios

| ω [rpm] | |
|---------|--|
| 100 | |
| 4900 | |

Fonte: [5], nossa adaptação.

O problema é avaliado como um escoamento de fluido incompressível em regime permanente e isotérmico, sendo que a condição de não deslizamento nas paredes foi adotada. Ainda para uma maior simplificação do problema, foi considerado que a célula eletroquímica está completamente cheia do eletrólito (que será analisado como água), o que nos permite avaliar o problema com sendo somente monofásico.

A figura abaixo nos dá uma representação do domínio físico adotado para a simulação dos problemas. Estão representados, o domínio para o perfil de revestimento tipo Cilindro Infinito (CI), e a geometria dos perfis tipo Cilindro Finito (CF) e Sino (SI).

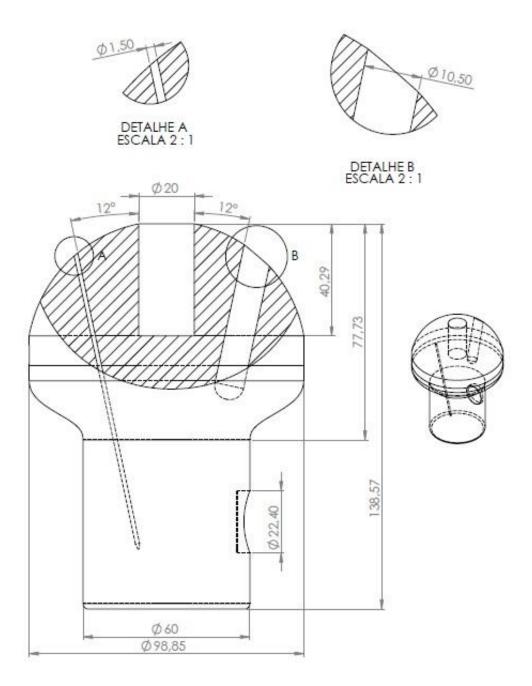


Figura 17. Desenho representativo do domínio físico para perfil de revestimento Cilindro Infinito.

Fonte: Autor

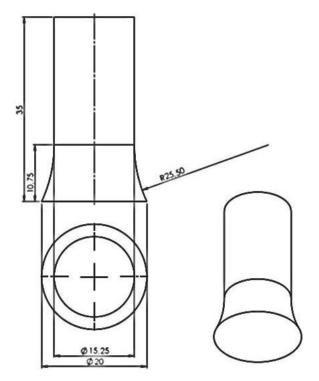


Figura 18. Desenho representativo da geometria adotada para o perfil de revestimento Sino.

Fonte: Autor

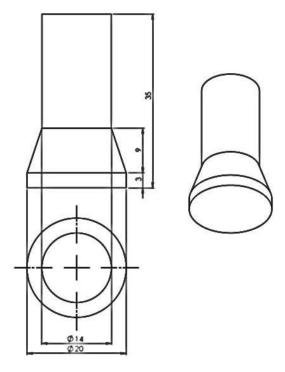


Figura 19. Desenho representativo da geometria adotada para o perfil de revestimento Cilindro Finito.

Fonte: Autor

3.1 Condições de contorno hidrodinâmico

Para que possamos modelar o problema, devemos definir as condições de contorno que regem o escoamento do fluido dentro do domínio físico. A definição apropriada destas condições é essencial para modelar o escoamento com precisão.

Para o problema em questão o fluido é analisado como incompressível e isotérmico. Sendo que para as simulações a baixa velocidade (100rpm) o escoamento foi previsto como laminar, e para a velocidade maior (4900rpm) como turbulento.

3.1.1 Condições de Entrada

O fluido adotado para a representação do eletrólito na simulação foi água. As condições de entrada especificadas no domínio são as propriedades da água a 23°C e 1 atm, que estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 6. Propriedade da água como condição de entrada.

| Propriedades da água a 23°C e 1 atm | | |
|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Densidade [kg/m3] | 997,53962 | |
| Viscosidade [N*s/m2] | $9,32164 \times E^{-04}$ | |
| Viscosidade dinâmica [m2/s] | $9,34463 \times E^{-07}$ | |
| Condutividade térmica [W/(m*K)] | 0,60375 | |

Fonte: [6]

3.1.2 Condições de Parede

O domínio físico das simulações apresenta duas diferentes configurações para as regiões de parede, sendo que para ambas, a condição de não deslizamento foi considerada. Para as condições de contorno das superfícies que representam o rotor (eletrodo disco rotatório e perfil de revestimento), a região de parede gira sobre o eixo central do disco, com as mesmas velocidades as quais os ensaios foram realizados. Esta condição de contorno foi adota utilizando uma ferramenta específica do ANSYS CFX-pre, que permite definir a velocidade de rotação da parede definindo o seu eixo de rotação e sua velocidade angular. Assim, para a superfície do rotor temos que:

$$v_r = 0$$

$$v_{\varphi} = \omega r_n$$

$$v_{\nu} = 0$$

Onde r_n designa a distância radial do nó ao eixo central de rotação.

Já para todas as superfície restantes do domínio teremos a condição de paredes estacionárias, a qual é definida por:

$$v_r = v_\omega = v_v = 0$$

3.1.3 Integração numérica

O software ANSYS cfx utiliza o método dos volumes finitos, que primeiramente envolve a discretização do domínio espacial através da construção da malha e consequentemente a criação de volumes finitos. Tais volumes são utilizados na conservação de quantidades relevantes, tais como massa, quantidade de movimento e energia [CFX - SOLVER THEORY GUIDE]. Para a solução dos termos de advecção, foi adota no software o clássico método "Upwind Difference scheme (UDS)".

Para todas as simulações, foi adotado o critério de convergência como sendo 5.0×10^{-5} , seja para simulações avaliadas com escoamento laminar ou quando utilizado o modelo de turbulência k- ω .

3.1.4 Estudo de convergência da Malha

Para a construção das malhas a serem utilizadas, fez-se uso do software ANSYS Meshing, o qual tem sua licença incluída ao Pacote ANSYS. Este software gera a malha em questão a partir de uma geometria pré-definida e dispõe de ferramentas para que os parâmetros desta malha atendam os requisitos necessários à simulação.

Devido à falta de simetria e complexidade do domínio físico nos casos a serem simulados, optou-se pela construção de uma malha 3D, hibrida e não estruturada. A necessidade de um maior nível de refinamento na região do rotor foi observada, para que os resultados fossem mais precisos e confiáveis nessa região. Na a região da superfície inferior do rotor (onde fica localizado o eletrodo disco rotatório) esse refinamento foi ainda maior visando maior precisão na região da camada limite de interesse.

O refinamento do rotor foi feito a partir de uma ferramenta do ANSYS Meshing, na qual é possível definir o tamanho do elemento na superfície em questão. Abaixo segue uma tabela com os dados das malhas de acordo com o seu nível de refinamento.

Tabela 7. Malhas utilizadas para análise da convergência

| Malha | Tam. do Elemento | N° de nós | N° de elementos |
|-------|------------------------|-----------|-----------------|
| 1 | 1,0 x E ⁻³ | 105.664 | 465.912 |
| 2 | 3,0 x E ⁻⁴ | 161.027 | 613.606 |
| 3 | 8,0 x E ⁻⁵ | 389.935 | 1.219.591 |
| 4 | 2,0 x E ⁻⁵ | 430.926 | 1.420.117 |
| 5 | 8.0 x E^{-6} | 444.571 | 1.496.933 |

Fonte: Autor

O fator adotado na análise da convergência da malha foi a velocidade azimutal do fluxo a 0,154 mm da superfície do disco, que é a espessura da camada limite hidrodinâmica quando o rotor gira a 4900rpm. Para esse fator temos como resultado a seguinte gráfico.

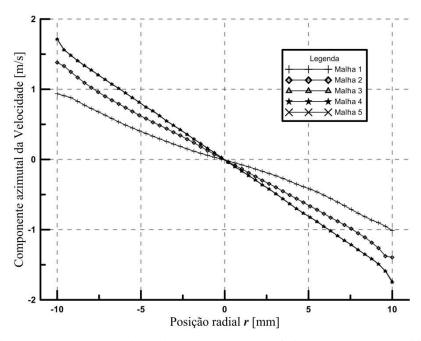


Figura 20. Gráfico das velocidades azimutais próximos à superfície do rotor para as diferentes malhas. Fonte: Autor.

Como podemos observar, a partir da malha 3, a diferença entre os resultados para a as velocidades são ínfimas. Logo adotamos os parâmetros desta malha para a realização da

simulação, tendo em vista o menor esforço computacional assim como acurácia dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De forma a atender os objetivos deste trabalho, com os resultados obtidos das simulações numéricas, iremos fazer primeiramente uma comparação dos padrões de escoamento desenvolvidos para cada perfil de revestimento utilizado. Na sequência iremos comparar os valores teóricos de alguns parâmetros hidrodinâmicos da literatura com os resultados obtidos das simulações.

4.1 Padrões dos escoamentos

Como forma de comparar os escoamentos obtidos das simulações com os observados na literatura de maneira qualitativa, o trabalho irá mostrar as linhas de corrente, de superfície e 3D, obtidas das simulações.

Comparando os resultados obtidos nas simulações, a 100rpm, com os resultados apresentados por [1] a partir de suas observações feitas em laboratório, podemos dizer que o padrão de escoamento observado nas simulações é, de certa maneira, compatível com os reais. Porém, como [1] não especificou ao certo, a geometria das células eletroquímicas utilizadas em seus experimentos, assim como o posicionamento e a geometria dos eletrodos de referência e contra-eletrodo, não podemos fazer maiores comparações entre esses resultados. Pois é perceptível a influência dessa geometria no padrão do escoamento num todo.

Outra diferença entre os resultados foi observada no sentido do fluxo na parte superior do rotor, que é sempre descendente nos fluxos reais observados por [1] sendo, nas simulações, completamente ascendente para o caso do perfil de revestimento tipo CI e contendo partes ascendentes nos tipo CF e SI.

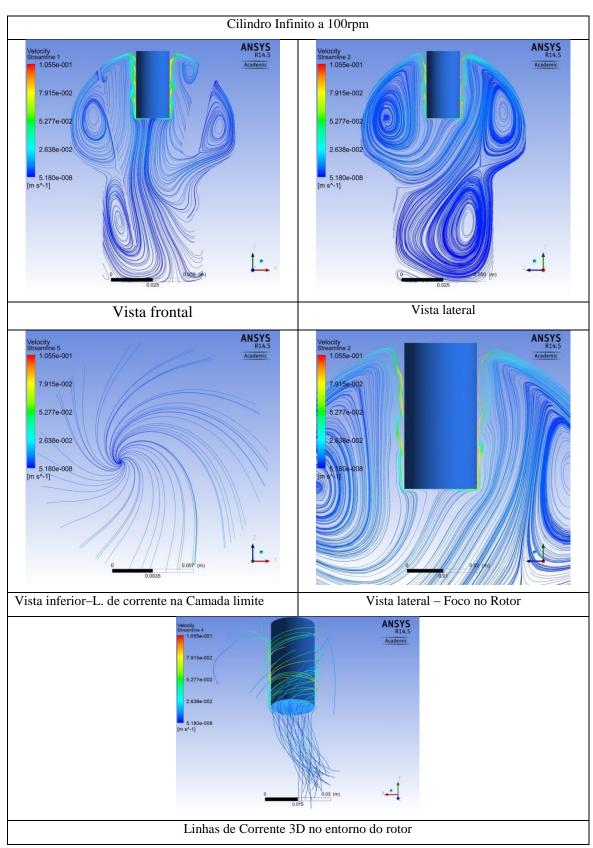


Figura 21 – Linhas de Corrente para o Cilindro Infinito a 100rpm.

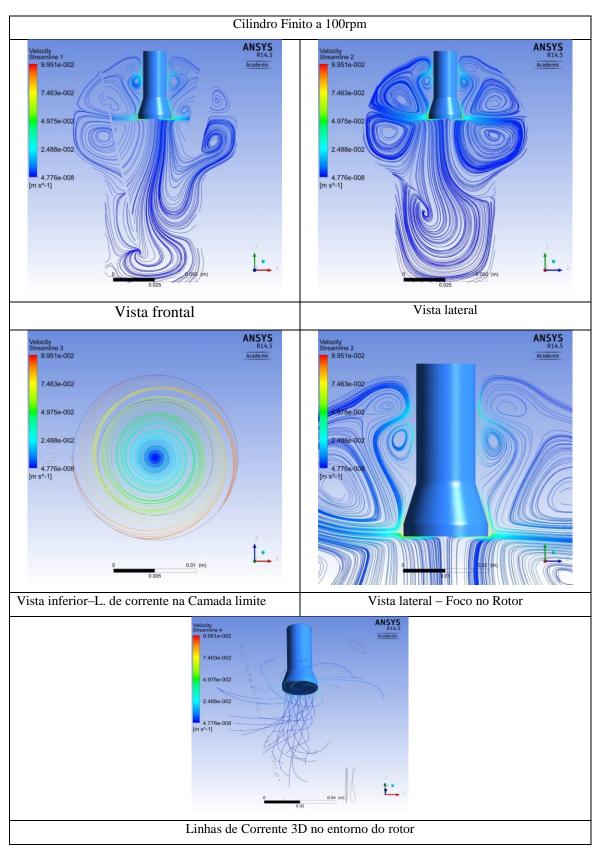


Figura 22 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 100rpm.

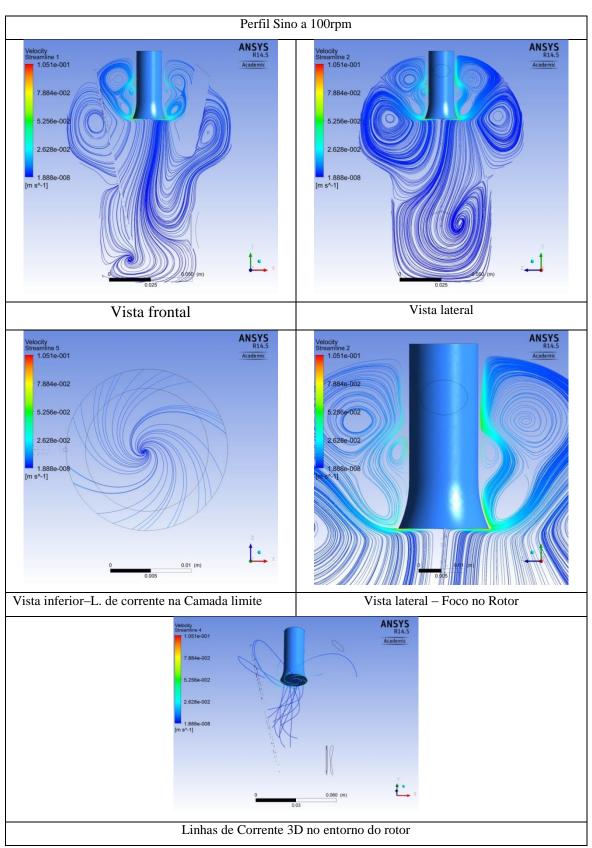


Figura 23 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 100rpm.

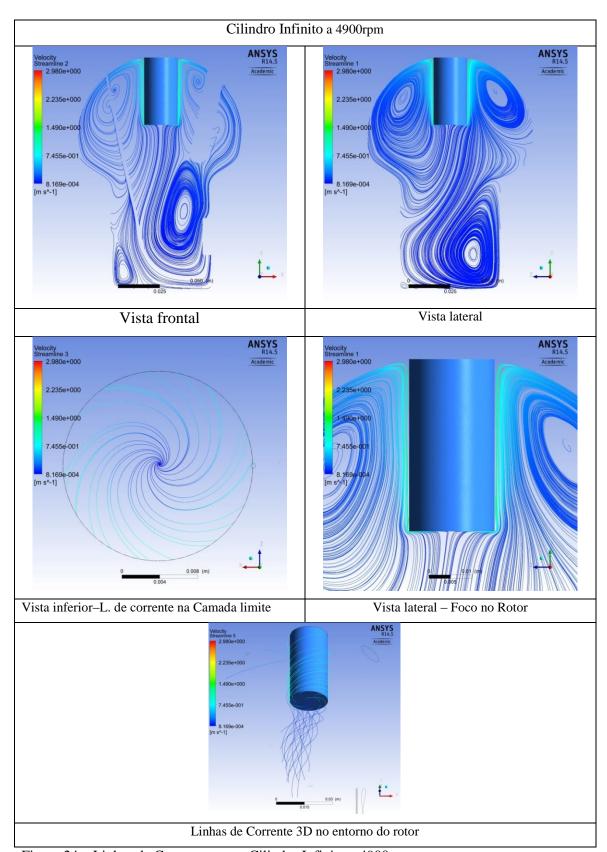


Figura 24 – Linhas de Corrente para o Cilindro Infinito a 4900rpm.

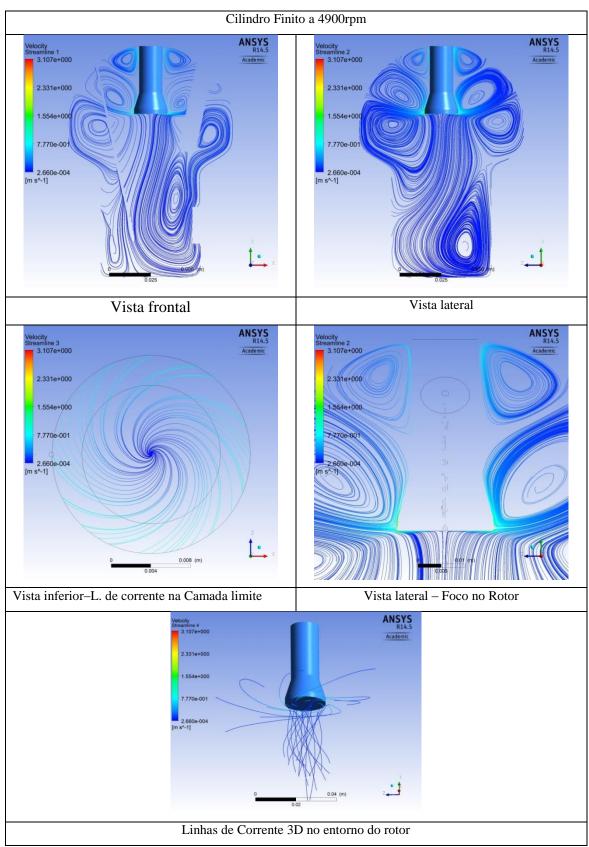


Figura 25 – Linhas de Corrente para o Cilindro Finito a 4900rpm.

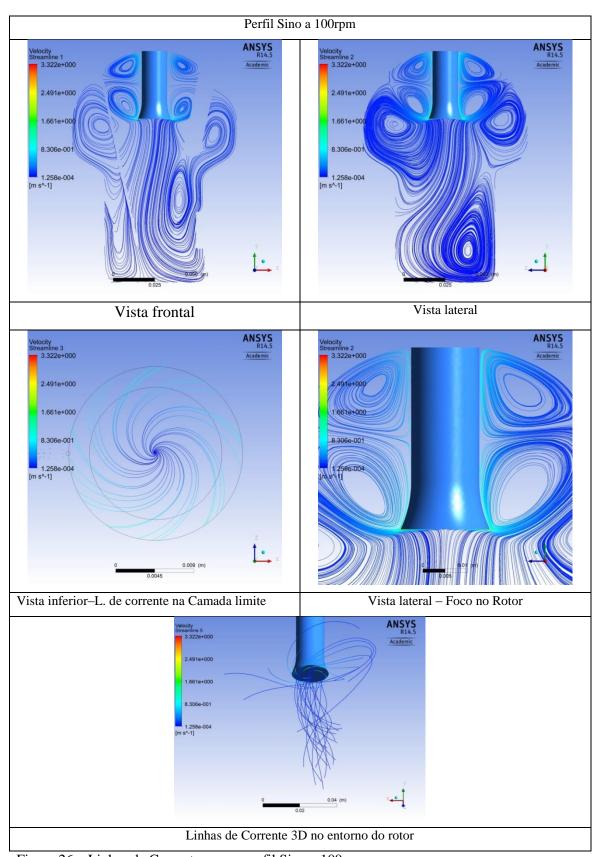


Figura 26 – Linhas de Corrente para o perfil Sino a 100rpm.

4.2 Perfis de velocidade do escoamento nas proximidades do rotor

Para vermos a influência dos perfis de revestimento no escoamento fluido, agora de maneira local, avaliamos os perfis de velocidade na superfície inferior do rotor (local onde se encontra o eletrodo de teste).

Primeiramente, montamos os perfis de velocidade radial dentro da camada limite para ambas as velocidades simuladas, 100rpm (Re \approx 1120) e 4900rpm (Re \approx 54910), comparando-os com o perfil de velocidade teórico. Esse perfil de velocidade varia de acordo com a posição radial adotada, por isso ele foi avaliado em dois pontos, para $R_0 = 0.5$ cm e para $R_1 = 0.75$ cm. Lembrando também R_0 é equivalente ao raio do eletrodo utilizado por [5].

Assim, temos nas figuras abaixo, os gráficos da velocidade radial variando de acordo com a distância Y do rotor.

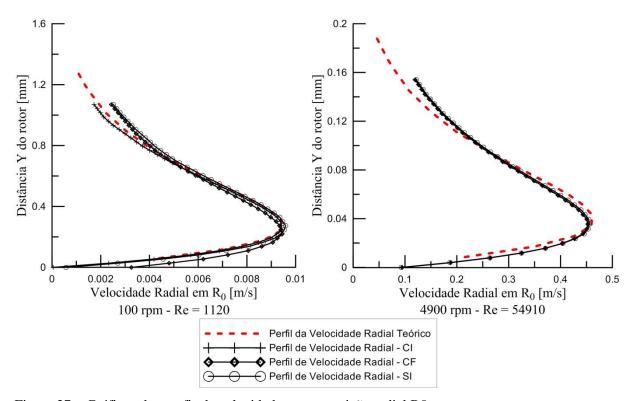


Figura 27 – Gráficos dos perfis de velocidade para a posição radial R0

Fonte: autor

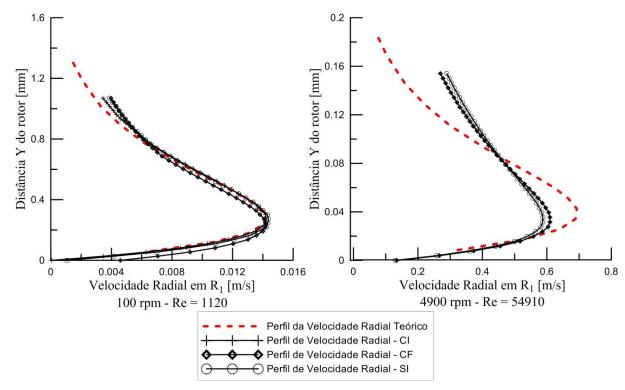


Figura 28 – Gráficos dos perfis de velocidade para a posição radial R₁

Fonte: autor

É possível observar a partir dos gráficos que, a diferença geométrica entre os perfis de revestimento não influencia significantemente os fenômenos hidrodinâmicos dentro da camada limite. Isso é ainda mais visível para os perfis de velocidade em R₀, isto é, a região onde se encontra o eletrodo de teste. A falta de coerência entre os resultados simulados e o perfil de velocidade teórico, em R₁ para a velocidade de 4900rpm, pode ser justifica pelo fato de que os efeitos de borda se intensificam com o aumento da velocidade angular.

Outro parâmetro avaliado foi a velocidade na direção perpendicular a superfície inferior do rotor, em seu eixo de rotação (r = 0). Para uma melhor visualização dos resultados dividimos essa em duas partes, uma dentro da região da camada limite e outra a partir desta até uma distância y = 1 cm do rotor. Desta maneira obtivemos os gráficos mostrados nas figuras abaixo.

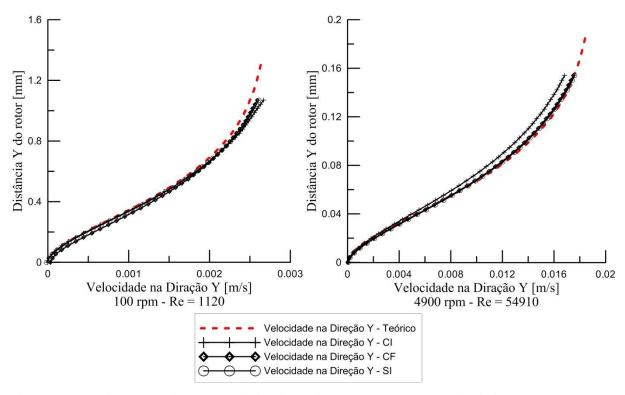


Figura 29 – Gráficos da variação da velocidade na direção y dentro da camada limite.

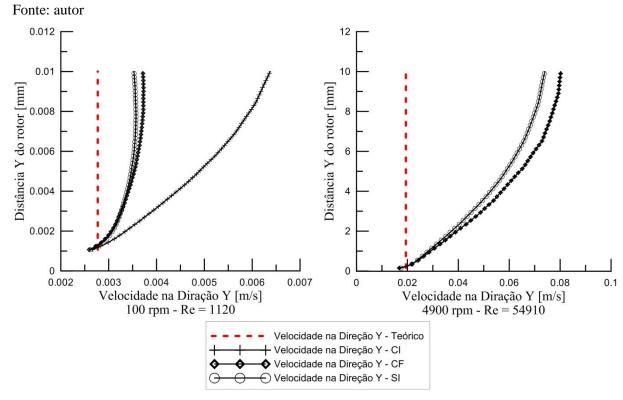


Figura 30 – Gráficos da variação da velocidade na direção y fora da camada limite.

Fonte: autor

Mais uma vez, podemos observar que diferença geométrica entre os perfis de revestimento não influencia significativamente os resultados obtidos dos fenômenos hidrodinâmicos dentro da camada limite. Porém, os resultados obtidos para a velocidade na direção Y, fora da camada limite, diferem consideravelmente da definição teórica. Isso era esperado, pois a literatura considera a velocidade na direção Y constante fora da camada limite, devido uma das condições adotadas no desenvolvimento da teoria hidrodinâmica dos discos rotatórios, que definem tanto o disco quanto o domínio do fluido como sendo infinitos. Sendo assim, essas condições são impraticáveis nos teste de laboratório, justificando também essa disparidade.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, podemos concluir que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado. Pois todas as simulações foram realizadas dentro dos critérios desejáveis e trouxeram resultados conclusivos que ajudaram na caracterização do escoamento em testes utilizando eletrodos disco rotatórios.

Sobre a diferença dos padrões de escoamento para cada perfil de revestimento, podemos concluir que os resultados obtidos nas simulações são compatíveis com o fluxo real observado a partir de resultados da literatura [3], [1]. Porém é visível uma diferença do sentido do escoamento nas superfícies laterais ao rotor. Para os padrões de escoamento observados na literatura, temos nesta superfície um fluxo completamente descendente. No entanto, nos resultados simulados pode-se observar que o escoamento tem sentido completamente ascendente, para o perfil do tipo Cilindro Infinito. Já para os perfis restantes o escoamento apresenta trechos ascendentes.

Tal resultado é justificável pelo fato de as simulações não terem representado o fenômeno hidrodinâmico em sua totalidade, pois foram feitas considerações para simplificação da construção do domínio físico, que é tridimensional e de grande complexidade. Estas considerações acabaram descartando a influência do efeito multifásico e das forças gravitacionais no sistema. Assim podemos concluir que, para uma representação que nos traga resultados ainda mais próximos da real condição do escoamento nas células eletroquímicas, devemos fazer uso das condições de um escoamento multifásico e influenciado pelo efeito gravitacional.

Analisando os escoamentos de forma a classificar qual o tipo de perfil de revestimento que melhor se adequa as funções descritas por [3], podemos concluir, com base nas simulações, que o perfil Sino e o Cilindro Finito apresentaram os melhores resultados, sendo que no perfil Sino os efeitos de borda são menos expressivos. O perfil Cilindro Infinito não atende a função de separação entre os escoamentos acima e abaixo do disco e seus efeitos de borda são bastante significativos no escoamento. Então, assim como já constatado e definido pela literatura, podemos dizer que o perfil Sino é o que melhor se adequa as condições impostas pela teoria hidrodinâmica.

Fazendo agora uma observação mais local do fenômeno hidrodinâmico, isto é, analisando mais detalhadamente a região nas proximidades da superfície onde se encontra o eletrodo de

teste. Conclui-se que as diferenças existentes no escoamento global, devido aos diferentes perfis de revestimento, passam a ser quase imperceptíveis quando o escoamento é analisado dentro da camada limite hidrodinâmica definida por Levich. Isso pode ser observado através dos perfis de velocidade radial colhidos das simulações e apresentados nas figuras 27, 28 e 29. Outra conclusão importante deste trabalho pode ser feita através da comparação entre os perfis de velocidade teóricos, descritos pelos trabalhos de Von Kármán, e os perfis de velocidade obtidos das simulações numéricas. Vemos que para a maioria dos casos, os perfis de velocidade obtidos das simulações apresentam uma grande compatibilidade com a teoria de Von Kármán para escoamentos em discos rotatórios. Assim, chega-se a conclusão de que a teoria hidrodinâmica para discos rotatórios, utilizado por Levich, é satisfeita quando analisamos o escoamento na região do eletrodo de teste, dentro da camada limite hidrodinâmica.

6 REFERÊNCIAS

- [1] BLURTON K., RIDDFORD A. (1965) **Shapes of Practical Rotating Disc Electrodes.** Journal of Eletroanalytical Chemistry.
- [2] P.H. ALFREDSSON, S. IMAYAMA, R.J. LINGWOOD, R. ÖRLÜ, A. SEGALINI (2013). **Turbulent boundary layers over flat plates and rotating disks—The legacy of von Kármán: A Stockholm perspective.** European Journal of Mechanics B/Fluids
- [3] OPEKAR, F. & BERAN, P. (1975). **Rotating Disk Electrodes.** Netherlands: Journal of Electroanalytical Chemistry.
- [4] GENTIL, V. (2011). Corrosão (6ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- [5] SILVA R., GONÇALVES R. (2012). Análise da influência do perfil de revestimento isolante em testes de corrosão-erosão utilizando eletrodo disco rotatório. Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.
- [6] FOX, R. W., McDONALD A. T., PRITCHARD P. J (2004). **Introdução a Mecânica dos Fluidos** (6ªed.). Rio de Janeiro: LTC
- [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). Complexties in predicting erosion corrosion. Wear.
- [9] GONZALEZ J., REAL C., HOYOS L., MIRANDA R., CERVANTES F. (2010). Characterization of the hydrodynamics inside a practical cell with a rotating disk electrode. México: Journal of Electroanalytical Chemistry
- [10] LUO, J. L. *et al.* (2005). **Interaction of mechanical and electrochemical factors in erosion-corrosion of carbon steel**. Electrochimica.
- [11] BRETT C. M. A., OLIVEIRA BRETT A. M. C. F. Hydrodynamic electrodes
- [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-Intersience.
- [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] http://www.iope.com.br/3i_corrosao.htm (Acessado em 10/6/2013)
- [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. (2ª 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.

ANEXOS

Anexo A – Desenhos Técnicos do Domínio Físico e dos eletrodos de trabalho.