

RENATO PACHECO SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE EROSIVO ÁGUA-AREIA
E ÁGUA-AR-AREIA EM TUBULAÇÕES DE 4”
ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE CFD E DE
EXPERIMENTOS LABORATORIAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011**

RENATO PACHECO SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE EROSIVO ÁGUA-AREIA E ÁGUA-AR-
AREIA EM TUBULAÇÕES DE 4’’ ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE CFD E
DE EXPERIMENTOS LABORATORIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco

**UBERLÂNDIA - MG
2011**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

- S586a
2011
- Silva, Renato Pacheco, 1984-
Avaliação do desgaste erosivo água-areia e água-ar-areia em tubulações de 4" através de técnicas de CFD e de experimentos laboratoriais / Renato Pacheco Silva. - 2011.
61 f. : il.
- Orientador: Sinésio Domingues Franco.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Desgaste mecânico - Teses. 3. escoamento bifásico - Teses. 4. Dinâmica dos fluidos - Simulação por computador - Teses. I. Franco, Sinésio Domingues, 1962- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

RENATO PACHECO SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE EROSIVO ÁGUA-AREIA E ÁGUA-AR-AREIA EM
TUBULAÇÕES DE 4" ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE CFD E DE EXPERIMENTOS
LABORATORIAIS**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco – UFU - Orientador

Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto – UFU – Co-orientador

Prof. Dr. Milena Martins Villar – UFU

Prof. Dr. Flávio José da Silva – UFES

Uberlândia, 25 de agosto de 2011

À minha noiva.
À minha família.
A todos aqueles que acreditam em mim.

Agradecimentos

À minha noiva Juliana, pelo companheirismo, pela compreensão, pelos ensinamentos e pela confiança.

À minha mãe pelo incentivo.

A meu pai pelo exemplo de trabalho.

Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco, pela oportunidade e pela competência com a qual conduziu este trabalho.

Ao meu co-orientador e amigo, Professor Dr. Aristeu da Silveira Neto, pela oportunidade e pela disponibilidade em me ajudar a qualquer momento que fosse necessário.

Ao Engenheiro Juliano Oséias de Moraes, por me auxiliar em vários momentos neste trabalho.

Ao Ricardo Vasconcelos Salvo, pela grande ajuda na geração das malhas.

Aos técnicos Flávio Alves dos Santos e Jhonathas Ferreira Santos, pelas ajudas no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste.

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste pela infra-estrutura oferecida e por todas as pessoas lá presentes e que fazem parte deste trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos, ao qual recorri várias vezes para pedir várias ajudas a várias pessoas e fui sempre bem atendido.

À secretaria do programa de pós-graduação, e em especial à secretária Kelly Rúbia Costa, que é uma excelente profissional e que me ajudou muito em várias questões burocráticas.

A todos os meus amigos, que são pessoas que acreditam muito em mim e nos meus ideais.

À FAPEMIG por uma parte do apoio financeiro.

Ao CNPq pela outra parte do apoio financeiro.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro ao projeto.

À Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

A todos que participam da minha vida, das mais diversas formas, direta ou indiretamente.

SILVA, R. P. **Avaliação do Desgaste Erosivo Água-areia e Água-ar-areia em Tubulações de 4" Através de Técnicas de CFD e de Experimentos Laboratoriais**. 2011. 95 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Resumo

O objetivo deste trabalho é a avaliação do desgaste erosivo causado pelo impingimento de areia, nas paredes de uma curva de 90° em uma tubulação de quatro polegadas. As formas como esta avaliação foi feita, contam com técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), experimento em equipamento *Loop* de laboratório, interferometria e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Diferentes parâmetros foram testados de forma computacional (CFD), variando fluidos, velocidades, tipos de escoamentos (bifásico água-areia e trifásico ar-água-areia) e materiais da tubulação (Aço 4140 e Alumínio). Nas análises experimentais uma única condição foi utilizada e esta comparada com a mesma condição simulada computacionalmente. Para medição da taxa de desgaste erosivo, a análise experimental da perda de espessura na superfície (interferometria) foi incapaz de capturar um valor de desgaste representativo, o que é confirmado pela simulação computacional. A análise via microscópio, mostrou o mecanismo de desgaste atuante. Com os resultados obtidos foi possível verificar que a baixas velocidades o desgaste da tubulação é muito pequeno, mostrando ainda a deposição de areia no fundo da tubulação. Foi possível também perceber a necessidade de uma estrutura experimental para determinação dos parâmetros utilizados na simulação, haja vista que os modelos de erosão normalmente utilizados em CFD utilizam muitos dados determinados experimentalmente. Outro fato importante foi observar a dificuldade em se obter o desgaste erosivo puro. As amostras sofreram desgaste corrosivo, além de desgaste erosivo, mostrando um efeito sinérgico de desgaste das paredes da tubulação. Várias condições problemáticas trouxeram muitos ensinamentos sobre as análises realizadas, como por exemplo, o aquecimento do fluido de trabalho e conseqüentemente do sistema devido à ação da bomba centrífuga, prejudicando a autonomia do experimento. A injeção de areia também se mostrou de difícil convergência com o experimento, assim como o coeficiente de restituição utilizado na simulação computacional.

Palavras chave: Simulação, CFD, escoamento bifásico, dinâmica dos fluidos, Loop, erosão, corrosão, sinérgico.

SILVA, R. P. **Evaluation of the Erosive Wear Water-sand and Water-air-sand in 4" Pipes Through CFD Techniques and Laboratorial Experiments.** 2011. 95 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Abstract

The purpose of this work is to evaluate the erosive wear caused by sand impinging particles on a 90° elbow wall, in a four inches pipe. This evaluation was made with computational fluid dynamics (CFD) techniques, experimentation in a laboratory Loop equipment, interferometry and scanning electron microscopy (SEM). Different parameters were tested through computational method (CFD), varying fluids, velocities, flow types (water one-phase and air-water two-phase) and pipe materials (4140 Steel and Aluminum). In the experimental analysis only one condition was set and this condition compared to the same condition computationally simulated. For measuring the erosive wear rate, the experimental analysis of the surface thickness loss (interferometry), was unable to capture a representative wear value, what was confirmed by the computational simulation. The analysis through microscope, showed the acting wear mechanism. With the obtained results, it was possible to see that in low velocities the pipe wall erosive wear is very small, showing also the sand deposition in the bottom of the pipe. It was also possible to see the necessity of an experimental structure for parameters used in the simulation determination, since the erosion models commonly used in CFD uses a lot of experimentally determined data. Another important issue to note was de hardness to obtain pure erosive wear. The coupons also showed corrosive wear, beyond erosive wear, showing a synergy wear effect on the pipe walls. A lot of problematic conditions brought much knowledge about the done analysis, as for example, the work fluid heat and consequently the system heat by the centrifugal pipe action, damaging the experiment autonomy. The sand injection also showed its convergence troubles with the experiment, the same way, the restitution coefficient used in the computational simulation.

Keywords: Simulation, CFD, two-phase flow, fluid dynamics, Loop, erosion, corrosion, synergy.

Lista de Figuras

Figura 1: a) Padrão estratificado liso e b) Padrão estratificado ondulado.....	6
Figura 2: a) Escoamento intermitente <i>slug</i> e b) Escoamento intermitente <i>plug</i>	7
Figura 3: Escoamento anular.....	7
Figura 4: Escoamento bolhas dispersas.....	7
Figura 5: Mapa de escoamento adimensionalizado (Taitel & Dukler, 1976)	9
Figura 6: Mapa de Mandhane (1973) comparado com mapa de Taitel & Dukler (1976).....	9
Figura 7: Padrões de escoamento definidos por Brauner (2001), a) Escoamento estratificado com duas camadas separadas, b) Escoamento estratificado com interface mista, c) Escoamento estratificado dispersão de óleo em água e camada de água abaixo, d) Escoamento estratificado dispersão de água em óleo e camada de óleo abaixo, e) Escoamento estratificado água e dispersão de água em óleo, f) Escoamento estratificado óleo e dispersão de óleo em água, g) Dispersão completa de óleo em água, h) Dispersão completa de água em óleo, i) Camadas de dispersão de óleo em água abaixo e água em óleo acima, j) Camada de dispersão na interface com óleo puro acima e água pura abaixo, k) Escoamento Anular com Óleo no Núcleo, l) Escoamento anular com água no núcleo, m) Escoamento anular com dispersão no núcleo, n) Escoamento anular com dispersão no núcleo e no anel externo, o) Escoamento intermitente e p) Escoamento intermitente com bolhas de um líquido no outro	13
Figura 8: Possibilidade de Configurações Para Escoamentos Estratificado e Anular (Brauner, 2001).....	15
Figura 9: Modelo teórico para cálculo da taxa do microcorte para o microsulcamento de Zum Gahr (1987), a) Deformação plástica em volta da partícula abrasiva penetrante no contato de deslizamento com a superfície, b) Seção transversal da superfície erodida, c) Contato elástico e endentação plástica de uma partícula cônica e esférica, d) deformação ϕ_s	19
Figura 10: Mecanismos de erosão expostos por Zum gahr (1987) a) Mecanismo de corte e sulcamento, b) Mecanismo de erosão por formação de microtrincas, c) Extrusão de material na saída final das crateras de impacto, d) Formação de trincas superficiais e subsuperficiais por fadiga, e) Formação de pequenas estrias pela extrusão e forjamento causado por impactos repetidos de partículas e f) formação de estrias causadas por um processo de extrusão inversa	21
Figura 11: Condição de onda de choque (Koivula, 2000).....	22
Figura 12: Condição de assimetria no impacto de uma bolha (Brennen, 1995)	22
Figura 13: Série de fotos de uma bolha em formato assimétrico colapsando (Brennen, 1995)	23
Figura 14: a) Formação de uma "nuvem" de bolhas em uma determinada região e b) Erosão causada pelo impacto desta nuvem de bolhas (Brennen, 1995).....	23
Figura 15: Mais um exemplo de erosão por cavitação nas pás de um rotor (Brennen, 1995)	24
Figura 16: Taxa de erosão em função do ângulo de impacto para diferentes materiais (Zum Gahr, 1987), (β) metal duro, (α) metal dútil, (δ) borracha, (γ) cerâmicas frágeis.....	25
Figura 17: Taxa de erosão em função do tamanho da partícula, comparando diferentes materiais (Zum Gahr, 1987).....	25

Figura 18: Taxa de erosão em função da velocidade de impacto para materiais dúcteis e frágeis (Zum Gahr, 1987)	26
Figura 19: Resistência à erosão como função da dureza do material (Finnie, 1995)	27
Figura 20: Taxa de erosão em função do tempo de exposição 1) Três etapas do desgaste erosivo, sendo o início do desgaste, aceleração e período estacionário, 2) Três etapas do desgaste erosivo, sendo o período de adição de material (incubação), aceleração e período estacionário e 3) Quatro etapas do desgaste erosivo, sendo o início do desgaste, aceleração, redução do desgaste devido a perda das arestas de corte das partículas e período estacionário (Zum Gahr, 1987).....	28
Figura 21: Queda da taxa de desgaste, com o tempo a partir da diminuição das arestas de corte do material erosivo (MÁSCIA, R., 2002).....	28
Figura 22: a) Geometria da partícula antes do processo erosivo, com arestas de corte evidentes e b) Geometria depois do processo erosivo, com menos arestas de corte.....	28
Figura 23: Simulação computacional de um escoamento externo (Fluent Manual, 2010).....	30
Figura 24: Formação de um <i>slug</i> em um escoamento interno (Silva, 2008)	31
Figura 25: Escoamento complexo envolvendo combustão (Fluent 12.1 User Guide, 2010) .	31
Figura 26: Espectro de energia pelo número de Reynolds	32
Figura 27: Esquema do equipamento <i>Loop</i>	48
Figura 28: <i>Loop</i> no galpão do Laboratório de Tecnologia em Atrito e desgaste.....	49
Figura 29: Porta amostras de Shen, McLaury e Shirazi (2006).....	50
Figura 30: a) Modelo do porta amostra e b) Montagem no <i>Loop</i>	50
Figura 31: Marcas na amostra para interferometria.....	51
Figura 32: Posição de cada marca na amostra.....	51
Figura 33: Distribuição de diâmetro de partícula abrasiva por porcentagem	53
Figura 34: Relação entre maior aresta e menor aresta por porcentagem	53
Figura 35: Medição do perímetro para determinação do raio	54
Figura 36: Medição de duas arestas para determinação da relação de aspecto	55
Figura 37: Geometria e malha para simulação computacional.....	57
Figura 38: Erosão em função do ângulo de impacto (Fluent 12.1 Tutorial Guide, 2010)	59
Figura 39: Comparação do coeficiente de restituição segundo uma função polinomial e uma função por partes.....	59
Figura 40: Coeficiente de restituição proposto pelo Fluent 12.1 tutorial guide (2010)	60
Figura 41: Escoamento bifásico utilizando metodologia RANS e modelo k- ω -sst	61
Figura 42: Escoamento bifásico utilizando metodologia LES e modelo Smagorinsky-Lilly....	62
Figura 43: Malha e geometria utilizada no escoamento bifásico.....	62
Figura 44: Variação da espessura da amostra a 9°.....	65
Figura 45: Variação da espessura da amostra a 18°	65
Figura 46: Variação da espessura da amostra a 27°	66
Figura 47: Variação da espessura da amostra a 36°	66
Figura 48: Variação da espessura da amostra a 45°	67
Figura 49: Variação da espessura da amostra a 54°	67
Figura 50: Variação da espessura da amostra a 63°	68
Figura 51: Variação da espessura da amostra a 72°	68
Figura 52: Variação da espessura da amostra a 81°	69
Figura 53: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 200x.....	70

Figura 54: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 800x.....	71
Figura 55: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 2000x....	71
Figura 56: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 200x.....	72
Figura 57: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 800x.....	72
Figura 58: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 2000x....	73
Figura 59: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 200x.....	73
Figura 60: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 800x.....	74
Figura 61: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 2000x....	74
Figura 62: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 1m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.....	75
Figura 63: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 1m/s do escoamento água-areia, no Alumínio	76
Figura 64: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 2m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.....	77
Figura 65: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 2m/s do escoamento água-areia, no Alumínio	77
Figura 66: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 3m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.....	78
Figura 67: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 3m/s do escoamento água-areia, no Alumínio	79
Figura 68: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.....	80
Figura 69: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio	80
Figura 70: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio.....	81
Figura 71: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio	82
Figura 72: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia.....	84
Figura 73: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia.....	84
Figura 74: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia.....	85
Figura 75: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia.....	85
Figura 76: Vista superior, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia.....	86
Figura 77: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia.....	86
Figura 78: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia.....	87
Figura 79: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia.....	87

Figura 80: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia.....	88
Figura 81: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia	88
Figura 82: Vista superior, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia.....	89
Figura 83: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia	89
Figura 84: Formação do padrão anular em uma seção transversal da tubulação em um escoamento água-ar	90
Figura 85: Vista da formação do padrão anular em outro corte	90
Figura 86: Erosão no escoamento bifásico em mm/ano	91
Figura 87: Níveis de turbulência em %, na região de entrada de ar.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros Geométricos Para Interfaces Curvas e Planas (Brauner, 2001)	16
Tabela 2: Propriedades físicas, químicas e mecânicas do Alumínio (www.matweb.com)	52
Tabela 3: Parâmetros do ensaio de erosão	54
Tabela 4: Condições de simulação para o fluido	57
Tabela 5: Condições da fase discreta	58
Tabela 6: Variáveis empíricas utilizadas nas condições de contorno	58
Tabela 7: Condições de contorno da fase discreta	63

Lista de Símbolos

X: Parâmetro de Martinelli;

T: Taxa de turbulência para as forças gravitacionais atuando no gás;

Y: Forças relativas no líquido na direção do escoamento devido à gravidade e queda de pressão;

F: Número de Freud que representa ação de forças inerciais pelas forças gravitacionais;

K: Número de Freud pelo número de Reynolds superficial da fase líquida.

A_1 : Área preenchida pelo fluido um.

A_2 : Área preenchida pelo fluido dois.

A: Área da seção transversal da tubulação.

$\tilde{A}_1$: A_1 adimensionalizada.

$\tilde{A}_2$: A_2 adimensionalizada.

$\tilde{A}$: A adimensionalizada.

ρ_1 : Densidade do fluido um

ρ_2 : Densidade do fluido dois

S_1 : Perímetro de molhamento do fluido um.

S_2 : Perímetro de molhamento do fluido dois.

S_i : Perímetro da interface.

$\tilde{S}_1$: S_1 adimensinoalizado.

$\tilde{S}_2$: S_2 adimensinoalizado.

$\tilde{S}_i$: S_i adimensinoalizado.

T_1 : Tensão entre o fluido um e a parede do tubo.

T_2 : Tensão entre o fluido dois e a parede do tubo.

T_i : Tensão interfacial.

dp/dz : Queda de pressão.

U_1 : Velocidade do fluido um.

U_2 : Velocidade do fluido dois.

$\tilde{U}_1$: U_1 adimensionalizada.

$\tilde{U}_2$: U_2 adimensionalizada.

U_{1s} : Velocidade superficial do fluido um.

U_{2s} : Velocidade superficial do fluido dois.

D_1 : Diâmetro hidráulico do fluido um.

D_2 : Diâmetro hidráulico do fluido dois.

D : Diâmetro da tubulação.

f_1 : Fator de atrito do fluido um.

f_2 : Fator de atrito do fluido dois.

F_1 : Fator de correção para tensão de cisalhamento nas paredes da fase um.

F_2 : Fator de correção para tensão de cisalhamento nas paredes da fase dois.

F_{i1} : Fator de interação entre os dois fluidos para o fluido um.

F_{i2} : Fator de interação entre os dois fluidos para o fluido dois.

n_1 : Constante exponencial do número de Reynolds para o fator de atrito da fase um.

n_2 : Constante exponencial do número de Reynolds para o fator de atrito da fase dois.

c_1 : Constante para o fator de atrito da fase um.

c_2 : Constante para o fator de atrito da fase dois.

Re_1 : Número de Reynolds da fase um.

Re_2 : Número de Reynolds da fase dois

Re_{1s} : Número de Reynolds superficial da fase um.

Re_{2s} : Número de Reynolds superficial da fase dois

ϵ : Relação entre área ocupada pelo fluido um e a área total da seção transversal.

μ_1 : Viscosidade da fase um.

μ_2 : Viscosidade da fase dois.

μ_t : Viscosidade turbulenta.

q : Relação entre as vazões dos fluidos um e dois.

Q_1 : Vazão do fluido um.

Q_2 : Vazão do fluido dois.

g : Relação para tensão nas paredes.

π : Constante PI (3,14).

Φ_0 : Ângulo de posição da interface.

Φ^* : Ângulo de curvatura da interface.

Ngl : Número de graus de liberdade.

L : Escala de comprimento característico.

l_d : Menor escala.

URANS: Média de Reynolds para as equações de Navier-Stokes transientes.

RANS: Média de Reynolds para as equações de Navier-Stokes.

LES: Simulação das grandes escalas.

t : Tempo.

x : Posição.

k : Energia cinética turbulenta.

ϵ : Taxa de dissipação de turbulência.

ω : Taxa específica de dissipação.

$\dot{m}_p$: Vazão mássica de partículas.

d_p : Diâmetro da partícula.

$C(d_p)$: Função do diâmetro da partícula.

α : Ângulo de impacto da partícula.

$f(\alpha)$: Função do ângulo de impacto da partícula.

v : Velocidade relativa da partícula.

$b(v)$: Função da velocidade relativa da partícula.

A_{face} : Área da face da célula na parede da tubulação.

Sumário

Capítulo I – Introdução.....	1
Capítulo II – Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 – Escoamentos multifásicos.....	4
2.1.1 – Líquido-líquido x gás-líquido.....	5
2.1.2 – Padrões de escoamento.....	6
2.2 – Erosão.....	16
2.2.1 – Tipos de erosão e mecanismos.....	16
2.2.2 – Variáveis envolvidas no processo de erosão.....	24
2.3 – Modelagem computacional da erosão em escoamentos multifásicos.....	29
2.3.1 – Estudo da turbulência.....	30
2.3.2 – Modelagem do escoamento multifásico.....	32
2.3.3 – Modelagem da erosão.....	39
2.3.4 – Modelagem da erosão em escoamentos turbulentos.....	40
Capítulo III – Procedimentos Experimentais.....	47
3.1 – Ensaio de erosão em curvas.....	48
3.1.1 – Descrição do <i>loop</i> de teste.....	48
3.1.2 – Projeto do porta-amostras.....	49
3.1.3 – Caracterização das amostras.....	50
• Caracterização topográfica	
• Propriedades físicas e químicas	
• Propriedades mecânicas	
3.1.4 – Parâmetros de ensaio erosivo.....	52
3.1.5 – Caracterização dos mecanismos de erosão (MEV)	55
3.2 – Análise computacional da erosão.....	56
3.2.1 – Validação através do modelo.....	60
3.2.2 – Simulação da erosão em escoamentos bifásicos.....	61
Capítulo IV – Resultados e Discussões.....	64
4.1 – Erosão em Alumínio comercialmente puro.....	64
4.1.1 – Perda de espessura.....	64
4.1.2 – Mecanismos de erosão.....	69
4.2 – Simulação da erosão.....	71

Capítulo V – Conclusões.....	93
Capítulo VI – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	96
Capítulo VII – Referências Bibliográficas.....	97
Anexo I.....	100

Capítulo I

1 – Introdução

Diante do alto desenvolvimento da indústria petrolífera e da grande procura por energias alternativas, grandes centros de pesquisa nacionais e mundiais, passaram a focar seus estudos nessa área.

O surgimento constante de novos poços de petróleo e a busca de redução de custos para a extração tem viabilizado o desenvolvimento tecnológico a partir de novas ferramentas.

Grandes perdas com manutenção estão diretamente ligadas ao desgaste. O desgaste ao longo de tubulações na extração e no transporte, por sua vez, está diretamente ligado ao tipo de escoamento, fluidos escoados e conseqüentemente parâmetros de operação tais como, temperatura, velocidade, pressão, etc. Em muitos casos, processos de corrosão e erosão estão presentes nesses sistemas e podem atuar simultaneamente, apresentando efeitos sinérgicos significativos ou não.

Dadas as necessidades da indústria no entendimento destes problemas, muitas ferramentas então passaram a ser utilizadas como forma de prever ou entender, os processos de desgaste que ocorrem nas linhas de produção e transporte de petróleo.

Dados experimentais podem ser obtidos para ajudar neste entendimento, quando, por exemplo, tem-se uma réplica de mesma escala da condição de operação que acontece no campo. É o caso de parte da infra-estrutura que conta o Laboratório de tecnologia em Atrito e Desgaste, com a possibilidade de reproduzir aproximadamente as condições em que o desgaste ocorre no interior de tubulações pela presença de particulados, no impingimento de partículas em uma superfície a diferentes ângulos, no atrito entre polímeros.

Outra possibilidade é quando novas tecnologias computacionais permitem a reprodução de fenômenos físicos a partir de equacionamentos matemáticos e métodos numéricos, podendo significar uma enorme redução de custo. Redução de custo tanto com a redução de tempo de trabalho, quanto na confecção de equipamentos experimentais que podem chegar a grandes ordens de valor financeiro.

A possibilidade de se determinar computacionalmente regiões onde podem ocorrer falhas por desgaste erosivo se torna bastante interessante, considerando todo o processo que existe na prática e suas consequências:

1. ocorrência da falha;

2. detecção da falha;
3. desligamento da linha de produção;
4. reparo;
5. re-ligamento da linha.

Considerando a existência de modelos numéricos capazes de calcular a taxa de desgaste erosivo como o modelo de Tulsa, por exemplo, que foi utilizado por Shirazi, McLaury e Edwards (1998) e citado no Fluent 12.1 Theory Guide (2010). Têm-se então a possibilidade de prever este acontecimento da falha sem ter como consequência as etapas citadas acima.

Ainda assim, com todas estas possibilidades, existe um grande caminho a ser percorrido, tanto por conta do entendimento dos problemas físicos quanto pela dependência de dados experimentais para alimentar os softwares capazes de realizar a simulação computacional como por exemplo a simulação de um escoamento bifásico que é utilizado neste trabalho e se mostra ser um problema de difícil entendimento.

Sobre as tratativas dadas a escoamentos bifásicos, Taitel & Dukler (1976) trazem o conceito mais utilizado em trabalhos envolvendo escoamentos bifásicos ar-água a partir de modelagens analíticas, mas com bastante fidelidade, comparando com o trabalho de Mandhane (1974). Brauner (2001), também traz bastante informação não somente para escoamentos bifásicos líquido-líquido, mas também para sua modelagem matemática e ainda comparando com soluções analíticas.

O objetivo deste trabalho é um estudo do desgaste erosivo em tubulações de quatro polegadas, comparando resultados de simulações computacionais entre si, variando o material e comparando com resultados experimentais em uma única condição de velocidade de 5,4m/s. Esta única velocidade utilizada é devido à complexidade de realização do experimento, dificultando o teste de outras velocidades, e também devido ao fato de ser uma velocidade mais facilmente encontrada em campo. Diversas simulações foram realizadas com o intuito de se aprender mais sobre o desgaste erosivo numericamente determinado, assim como o escoamento monofásico e bifásico.

Outros autores também já utilizaram objetos de estudo semelhantes aos deste trabalho, como o trabalho de Chen, McLaury e Shirazi (2006) que serviu de base para a montagem do experimento de desgaste erosivo em curvas, assim como a confiança na ferramenta computacional devido ao comparativo feito entre o experimento e a simulação no mesmo trabalho.

Este trabalho conta com sete capítulos sendo que o primeiro é este (Introdução). O segundo capítulo é uma revisão de literatura para a produção deste trabalho, contendo modelagens matemáticas, métodos numéricos, física do processo de desgaste erosivo,

física dos escoamentos. O terceiro capítulo apresenta a forma como os procedimentos experimentais e computacionais foram organizados e como o trabalho foi conduzido. Equipamentos utilizados, tempo de ensaio, materiais ensaiados são citados neste capítulo. O quarto capítulo apresenta os resultados experimentais e computacionais obtidos e as respectivas discussões. O quinto capítulo trata do que se pode concluir dos resultados deste trabalho. O sexto capítulo traz sugestões no possível prosseguimento deste trabalho. O sétimo capítulo são as referências bibliográficas utilizadas.

Capítulo II

2 – Revisão Bibliográfica

Nesta sessão, uma revisão da literatura é feita. Diversos autores foram estudados a fim de se abordar definições de temas como escoamentos multifásicos, padrões de escoamento, mapas de escoamento, simulação computacional de escoamentos bifásicos, simulação de escoamentos com presença de particulados, erosão e simulação da erosão.

2.1 – Escoamentos Multifásicos

De acordo com Soo, S. L. (1995), a definição de multifases seria uma fase contínua (podendo ser líquido ou gás) e uma fase particulada, podendo esta fase particulada ser partículas de sólidos, bolhas de gás ou bolhas de outro líquido imiscível. Esta definição contemplaria a existência de somente um padrão de escoamento (disperso), o qual será tratado mais adiante.

Quando se fala em outros padrões de escoamento esta definição não se aplica por não existirem fases dispersas no meio contínuo. Sendo assim, escoamento multifásico (ou uma mistura multifásica), pode ser entendido como a presença de dois ou mais fluidos imiscíveis formando entre eles, uma interface de separação. Desta forma, pode-se contemplar qualquer forma em que esse escoamento bifásico venha a se apresentar.

Este conceito na indústria de petróleo é mais comumente tratado deixando um pouco de lado o conceito termodinâmico, em que uma mesma substância pode existir na forma sólida, líquida ou gasosa, pois uma mistura de óleo e água, mesmo estando ambas na fase líquida, é tratada como multifásico por existir uma interface separando-os. Levando-se em conta o conceito de mistura, uma mistura homogênea (uma solução) representaria uma única fase.

Assumindo um líquido como fase contínua, por exemplo, e levando em conta que o objetivo do trabalho visa o tratamento de escoamentos na indústria de petróleo e que a

maior parte desses escoamentos envolve óleo, água, gás e particulados (areia, por exemplo), tem-se:

- Escoamento líquido-líquido: escoamento envolvendo dois líquidos imiscíveis, compondo duas partes, sendo as interfaces deformáveis;
- Escoamento líquido-gás: escoamento envolvendo um líquido e um gás, compondo duas partes, sendo as interfaces deformáveis;
- Escoamento líquido-sólido: escoamento envolvendo um líquido e um sólido imiscíveis, compondo duas partes, sendo as interfaces não deformáveis;
- Escoamento gás-sólido: escoamento envolvendo um gás e um sólido imiscíveis, compondo duas partes, sendo as interfaces não deformáveis

2.1.1 – Líquido-líquido x gás-líquido

Em várias aplicações na indústria, pode-se encontrar escoamentos bifásicos, sendo estes líquido-líquido ou gás-líquido.

Nos problemas envolvendo estes tipos de escoamentos bifásicos, deve-se levar em conta as diferenças existentes, como densidade, viscosidade, visto que estas diferenças poderão afetar os resultados na hora de uma modelagem, por exemplo.

De acordo com Brauner (2001), escoamentos bifásicos do tipo gás-líquido representam um caso particular extremo de dois fluidos, caracterizado pelas baixas relações de densidade e viscosidade. Nos sistemas líquido-líquido, a diferença de densidade entre as fases é relativamente pequena. Entretanto, as diferenças de viscosidade entre as fases podem variar desde uma pequena até uma grande ordem de magnitude. Este resulta numa relação direta no estudo de sistemas líquido-líquido, podendo ser comentado que uma emulsão de água com óleo pode representar um comportamento reológico de um fluido newtoniano ou não newtoniano, dependendo das viscosidades envolvidas (Brauner, 2001).

Sendo assim, a diferença de comportamentos pode ser considerada grande entre sistemas gás-líquido e líquido-líquido, impossibilitando o tratamento de ambos, da mesma forma e exigindo o devido tratamento para cada caso.

2.1.2 – Padrões de Escoamento

Quando em um escoamento bifásico, diferentes velocidades superficiais das fases envolvidas geram diferentes configurações denominadas padrões de escoamento. Entende-se como velocidade superficial, a velocidade que o fluido teria se estivesse atuando sozinho, ou seja, em um escoamento monofásico. Pode-se entender estas diferentes configurações ou padrões de escoamento como sendo diferentes tipos de escoamentos que carregam em si, propriedades físicas diferentes, como níveis de turbulência associados por exemplo. Tais diferenças também podem ser observadas visualmente ao invés de somente analisada através de variações de suas propriedades físicas.

Muitos autores estudaram os diferentes padrões de escoamento, e pode-se separá-los também entre gás-líquido e líquido-líquido.

De acordo com Taitel & Dukler (1976), os padrões de escoamento do tipo gás-líquido que podem ser formados são os padrões estratificado liso, estratificado ondulado, intermitente, anular com líquido disperso e bolhas dispersas. Nenhuma distinção, portanto, é feita entre os padrões que estão presentes no intermitente, como *slug*, *plug* ou bolha alongada, que foi uma definição dada por Dukler & Hubbard (1975).

Padrão estratificado: escoamento em que a fase gasosa se move na parte superior do tubo em uma forma de equilíbrio, estando sempre bem definidas as duas fases com uma interface suave. Divide-se também, normalmente em duas nomenclaturas, sendo estratificado liso (Figura 1a) e estratificado ondulado (Figura 1b). No estratificado liso a interface é bem uniforme e regular, enquanto que no estratificado ondulado, tem-se um perfil ondulado da interface que divide os dois fluidos, devido a um incremento na velocidade da fase gasosa.



Figura 1: a) Padrão estratificado liso e b) Padrão estratificado ondulado

O padrão intermitente é um escoamento no qual bolhas de gás se movem a uma velocidade maior na parte superior do tubo e são separadas intermitentemente pela fase líquida. Neste caso de escoamento, a fase gasosa se move em uma velocidade superior à fase líquida. Várias nomenclaturas distinguem este padrão de escoamento, podendo ser

slug (Figura 2a), bolha alongada, *plug* (Figura 2b). Normalmente estas diferentes nomenclaturas vão fazer referência ao tamanho da bolha formada na parte superior do tubo.

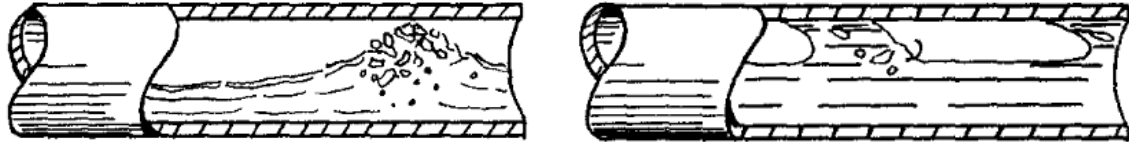


Figura 2: a) Escoamento intermitente *slug* e b) Escoamento intermitente *plug*

O padrão anular apresenta uma fase líquida formando um filme nas paredes do tubo e o gás escoando pelo interior do filme.

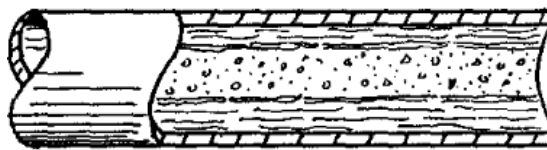


Figura 3: Escoamento anular

No padrão bolhas dispersas, o escoamento apresenta bolhas de gás (no caso de escoamento líquido-gás), totalmente dispersas na fase líquida. Normalmente este padrão de escoamento é observado a altas velocidades da fase líquida.

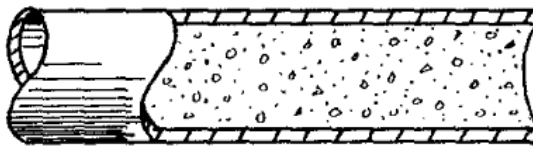


Figura 4: Escoamento bolhas dispersas

Para a análise dos padrões de escoamento, parte-se sempre do padrão estratificado. Nos trabalhos já publicados sobre os padrões de escoamento, sua determinação pode ser feita de forma visual, observando-se uma seção de teste transparente em uma tubulação, via análise do mecanismo que pode ocasionar a mudança do padrão estratificado para um outro padrão, ou ainda via CFD (*Computer Fluid Dynamics*).

Segundo Taitel & Dukler (1976), de forma analítica e adimensionalizada, o equacionamento para a identificação da transição dos padrões de escoamento pode ser obtido da seguinte forma:

$$X = \left[\frac{|(dP/dx)_L^S|}{|(dP/dx)_G^S|} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$T = \left[\frac{|(dP/dx)_L^S|}{(\rho_L - \rho_G)g \cos(\alpha)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G)g \cos(\alpha)}{|(dP/dx)_G^S|} \quad (3)$$

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{U_G^S}{D g \cos(\alpha)}} \quad (4)$$

$$K = F \left[\frac{DU_L^S}{v_L} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

X é o parâmetro de Martinelli;

T é a taxa de turbulência para as forças gravitacionais atuando no gás;

Y é zero para tubulações horizontais e representa forças relativas no líquido na direção do escoamento devido à gravidade e queda de pressão;

F é o número de Freud que representa ação de forças inerciais pelas forças gravitacionais;

K é o número de Freud pelo número de Reynolds superficial da fase líquida.

A partir destes critérios dados, tem-se então um mapa de escoamento adimensionalizado (Figura 5) em que as transições dos padrões de escoamento são controladas pelo seguinte grupo:

Estratificado para anular: X, F, Y

Estratificado para intermitente: X, F, Y

Intermitente para bolhas dispersas: X, T, Y

Estratificado liso para estratificado ondulado: X, K, Y

Anular para intermitente e para bolhas dispersas: X, Y

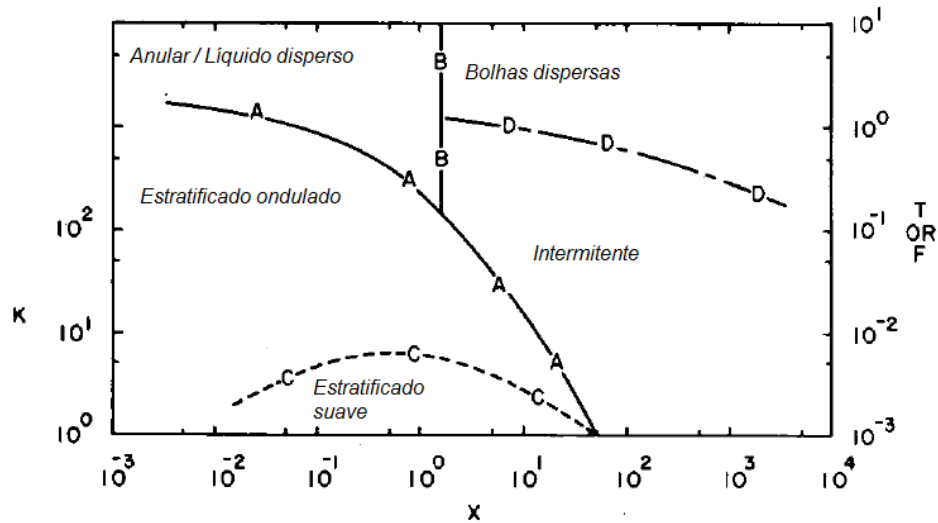


Figura 5: Mapa de escoamento adimensionalizado (Taitel & Dukler, 1976)

Mandhane (1973) fez seu mapa de escoamento a partir de observações visuais, adotando um banco de dados de 5935 dados. O referido mapa segue aproximadamente as mesmas classificações de Taitel & Dukler e pode ser visto conforme Figura 6 que compara o mapa dos dois autores.

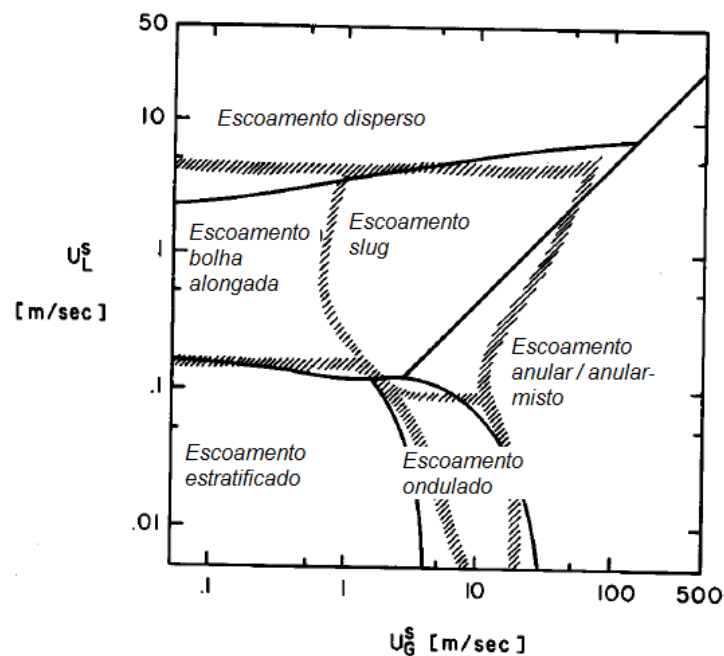


Figura 6: Mapa de Mandhane (1973) comparado com mapa de Taitel & Dukler (1976)

Quando se trata de escoamentos bifásicos líquido-líquido, os padrões de escoamento formados são diferentes daqueles formados nos sistemas gás-líquido. Sua modelagem também se torna um pouco mais complexa e vários autores como Brauner &

Maron (1989), Oliemans & Rodriguez (2005), fizeram propostas de modelagem dos padrões de escoamento líquido-líquido.

No trabalho de Brauner (2001), os padrões de escoamento foram divididos em categorias de forma que em cada categoria várias configurações são observadas. As categorias de padrões de escoamento propostas são: escoamento estratificado, dispersão de um líquido no outro, conhecido como água dispersa em óleo ou óleo disperso em água, escoamento anular e escoamento intermitente.

O padrão estratificado pode ser observado como dois perfis separados, com a possibilidade de uma mistura na interface tornando-a ondulada, como se observa na Figura 7a e na Figura 7b. Outra configuração que pode ser encontrada é a estratificação com uma camada livre de líquido e uma dispersão de outro líquido, chamada de dispersão de óleo em água e água (Figura 7c) ou dispersão de água em óleo e óleo (Figura 7d). E por último, uma configuração que pode ser chamada de camadas estratificadas de um líquido livre e uma dispersão de outro líquido, como por exemplo, água e dispersão de água em óleo (Figura 7e) e óleo e dispersão de óleo em água (Figura 7f).

O padrão disperso pode ser conhecido também como uma emulsão composta por um líquido completamente disperso no outro conforme a Figura 7g e Figura 7h mostram respectivamente uma dispersão de óleo em água e de água em óleo, e ainda camadas de dispersão como mostradas na Figura 7i e Figura 7j.

O padrão anular ou core-anular é um escoamento em que um líquido ou uma dispersão escoam no interior como mostram a Figura 7k, 7l, 7m e o escoamento em que uma dispersão escoam no interior, assim como uma dispersão escoam no anel externo conforme mostra Figura 7n.

No padrão intermitente: um líquido ocupa intermitentemente a tubulação como líquido livre ou como uma dispersão (Figura 7o), ou ainda bolhas alongadas e esféricas de um líquido no outro (Figura 7p).

De acordo com a modelagem de Brauner (2001), para a modelagem destes padrões de escoamento propostos, deve-se utilizar uma modelagem a dois fluidos modificada (Brauner & Maron, 1989) para que se inicie sua modelagem a partir de um escoamento estratificado, supondo que deste padrão surgem os outros.

Para escoamentos laminares, já foi proposta uma solução analítica das equações de Stokes que inclui características da curvatura da interface e outras características do

escoamento como campo de velocidade e pressão. Porém, essa solução analítica envolve muitos cálculos. Em situações práticas de engenharia, existe a necessidade de um modelo que leve em conta a situação em que uma ou ambas as fases operem em regime turbulento. Levam em conta pequenas inclinações da tubulação, assim como a possibilidade de fluidos escoando contra corrente ou concorrente, sempre no padrão estratificado.

Assumindo, então, um escoamento totalmente desenvolvido, tem-se as equações de momento unidimensionais para cada fase:

$$-A_1 \left(\frac{dp}{dz} \right) + \tau_1 S_1 - \tau_i S_i + \rho_1 A_1 g \sin(\beta) = 0 \quad (6)$$

$$-A_2 \left(\frac{dp}{dz} \right) + \tau_2 S_2 - \tau_i S_i + \rho_2 A_2 g \sin(\beta) = 0 \quad (7)$$

Assim, eliminando a queda de pressão:

$$\tau_1 \frac{S_1}{A_1} - \tau_2 \frac{S_2}{A_2} - \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) + (\rho_1 - \rho_2) g \sin(\beta) = 0 \quad (8)$$

O fechamento então para estas equações está condicionado à modelagem das tensões de cisalhamento na parede e na interface, propostas pela modelagem a dois fluidos.

Expressões gerais para as tensões na parede:

$$\tau_1 = -\frac{1}{2} \rho_1 f_1 |U_1| U_1 |F_1|^{n_1} \text{sign}(F_1) \quad (9)$$

$$\tau_2 = -\frac{1}{2} \rho_2 f_2 |U_2| U_2 |F_2|^{n_2} \text{sign}(F_2) \quad (10)$$

Onde:

$$U_1 = \frac{U_{1s}}{\varepsilon} \text{ e } \varepsilon \equiv \varepsilon_1 = \frac{A_1}{A} \quad (11)$$

$$U_2 = \frac{U_{2s}}{1 - \varepsilon} \quad (12)$$

Sendo f_1 e f_2 fatores de atrito baseados no número de Reynolds da fase considerada, que podem ser calculados considerando a equação de Blasius para camada limite tem-se:

$$f_1 = \frac{c_1}{Re_1^{n_1}} \text{ e } f_2 = \frac{c_2}{Re_2^{n_2}} \quad (13)$$

Com:

$$Re_1 = \frac{\rho_1 |U_1| D_1}{\mu_1}; D_1 = \frac{4A_1}{(S_1 + S_i)} \quad (14)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_2 |U_2| D_2}{\mu_2}; D_2 = \frac{4A_2}{(S_2 + S_i)} \quad (15)$$

Dado o regime de operação, se turbulento ou não, tem-se as constantes $c = 16$, $n = 1$ para regime laminar e $c = 0.046$, $n = 0.2$ para regime turbulento. Assim os fatores de atrito podem ser calculados. Os fatores F_1 e F_2 representam correções para tensões de cisalhamento nas paredes, propostas para um escoamento monofásico. A modelagem a dois fluidos convencional considera F_1 e F_2 iguais a 1, diferentemente desta modelagem a dois fluidos que é modificada. Por isso, neste caso, os diâmetros hidráulicos, são calculados negligenciando suas velocidades relativas e considerando a interface entre os fluidos como estacionária. Na forma convencional da modelagem a dois fluidos, considera-se os diâmetros hidráulicos ajustados de acordo com as velocidades relativas entre as duas fases, considerando a interface como estacionária para a fase mais rápida e livre para a fase mais lenta. Sendo assim, as expressões para o cálculo dos fatores de correção podem ser obtidas como se segue:

$$F_1 = \frac{1 + \frac{U_2}{U_1} \left[g_{11} X^2 \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right)^2 - (2\epsilon)^{1-n_2} g_{12} \right]}{1 + \frac{U_2}{U_1} X^2 \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right)^2} \quad (16)$$

$$F_2 = \frac{1 + \frac{U_1}{U_2} \left[g_{22} \frac{1}{X^2} \left(\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right)^2 - (2(1 - \epsilon))^{1-n_1} g_{21} \right]}{1 + \frac{U_1}{U_2} \frac{1}{X^2} \left(\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right)^2} \quad (17)$$

Onde X^2 representa o parâmetro de Martinelli, que é uma relação entre a queda de pressão devido ao atrito superficial, mas em termos dos números de Reynolds superficiais.

$$X^2 = \frac{\left(\frac{-dp_f}{dz} \right)_{1s}}{\left(\frac{-dp_f}{dz} \right)_{2s}} = \frac{c_1 Re_{1s}^{-n_1} \rho_1}{c_2 Re_{2s}^{-n_2} \rho_2} |q|q \quad (18)$$

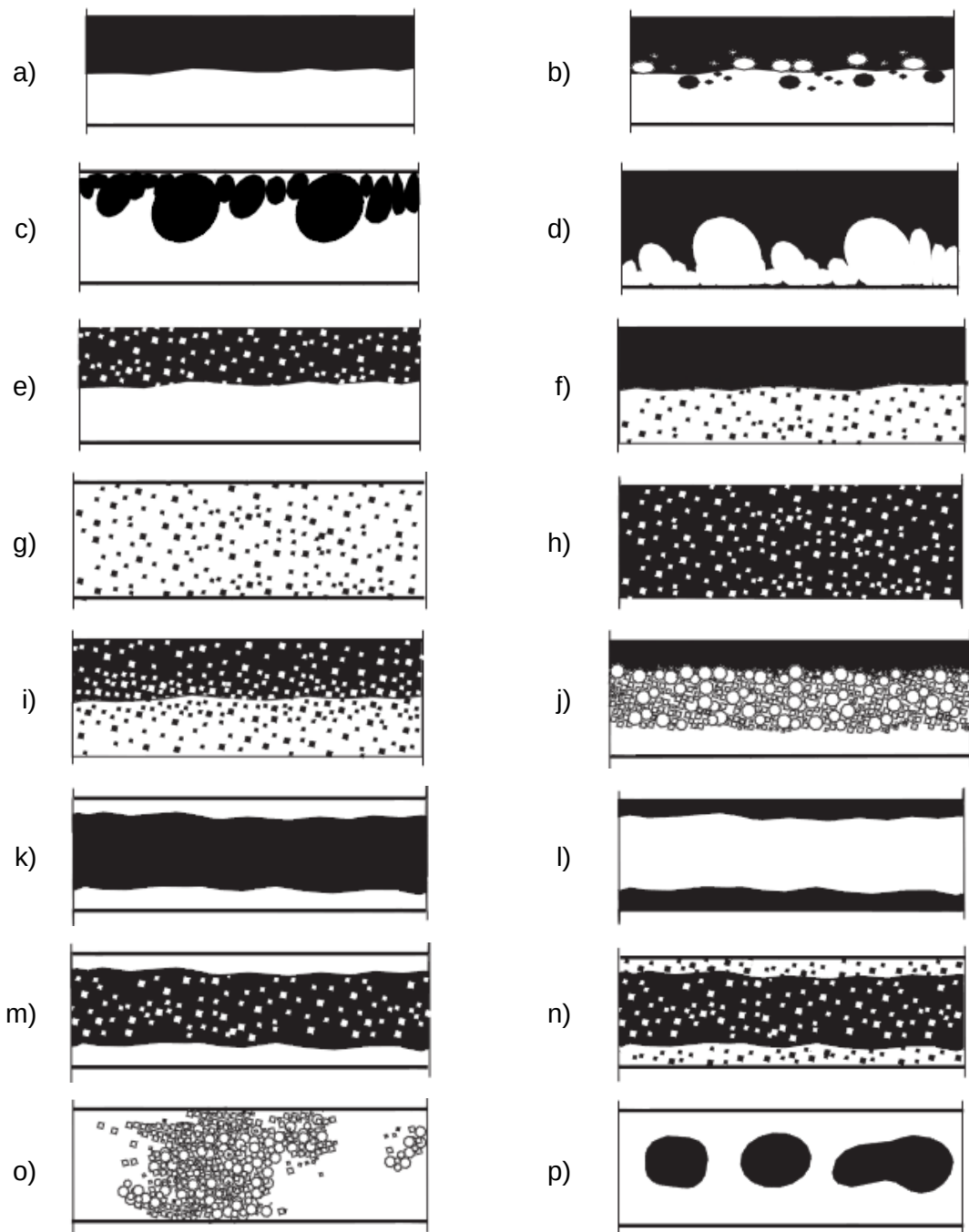


Figura 7: Padrões de escoamento definidos por Brauner (2001), a) Escoamento estratificado com duas camadas separadas, b) Escoamento estratificado com interface mista, c) Escoamento estratificado dispersão de óleo em água e camada de água abaixo, d) Escoamento estratificado dispersão de água em óleo e camada de óleo abaixo, e) Escoamento estratificado água e dispersão de água em óleo, f) Escoamento estratificado óleo e dispersão de óleo em água, g) Dispersão completa de óleo em água, h) Dispersão completa de água em óleo, i) Camadas de dispersão de óleo em água abaixo e água em óleo acima, j) Camada de dispersão na interface com óleo puro acima e água pura abaixo, k) Escoamento Anular com Óleo no Núcleo, l) Escoamento anular com água no núcleo, m) Escoamento anular com dispersão no núcleo, n) Escoamento anular com dispersão no núcleo e no anel externo, o) Escoamento intermitente e p) Escoamento intermitente com bolhas de um líquido no outro

Na equação 18, q representa as relações entre as vazões e na equação 20, g com seus índices representam as relações obtidas por Ullmann (2004) esperados para as tensões nas paredes em alguns casos limitados de escoamentos laminares. g_{11} e g_{22} tem a função de fazer o diâmetro hidráulico da fase mais lenta convergir para o valor que corresponde à interface livre do modelo. g_{12} e g_{21} por sua vez são aplicados a casos particulares correspondendo a escoamentos laminares monofásicos. Estes parâmetros podem ser obtidos como se segue:

$$q = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U_{1s}}{U_{2s}} \quad (19)$$

$$g_{11} = \frac{\tilde{S}_1}{\tilde{S}_1 + \tilde{S}_i}; g_{22} = \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{S}_2 + \tilde{S}_i}; g_{12} = \frac{4}{\pi + 2} \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{S}_2 + \tilde{S}_1}; g_{21} = \frac{4}{\pi + 2} \frac{\tilde{S}_1}{\tilde{S}_2 + \tilde{S}_1} \quad (20)$$

Os fatores de correção F_1 e F_2 , quando iguais a 1, indicam que as tensões nas paredes correspondem àquelas obtidas para um escoamento monofásico. Ainda com uma relação de velocidades $\frac{U_1}{U_2}$ tendendo a 0, F_2 tende a 1. Neste caso, a interface pode ser considerada como uma parede com respeito à fase localizada na parte superior do tubo e pode ser modelada baseada nas correlações do fator de atrito para um escoamento monofásico. Este é um caso que se assemelha a um escoamento bifásico gás-líquido, onde a velocidade do gás é muito maior do que a velocidade do líquido.

Para as tensões interfaciais, as equações gerais da modelagem a dois fluidos modificada são:

$$\tau_i = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho_1 f_1 |U_1| (c_{i2} U_2 - U_1) |F_{i1}|^{n_1} \text{sign} F_{i1} F_{iw}; & |F_{i1}|^{n_1} > |F_{i2}|^{n_2} \\ -\frac{1}{2} \rho_2 f_2 |U_2| (U_2 - c_{i1} U_1) |F_{i2}|^{n_2} \text{sign} F_{i2} F_{iw}; & |F_{i1}|^{n_1} \leq |F_{i2}|^{n_2} \end{cases} \quad (20)$$

Sendo:

$$F_{i1} = \frac{1}{1 + \frac{U_2}{U_1} X^2 \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right)^2}; F_{i2} = \frac{1}{1 + \frac{U_1}{U_2} X^2 \left(\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right)^2} \quad (21)$$

$$c_{i1} = \left| \frac{2q}{1+q} \right|^{1-n_2}; c_{i2} = \left| \frac{2}{1+q} \right|^{1-n_1} \quad (22)$$

Os modelos convencionais utilizados na modelagem a dois fluidos ignoram o fator de interação entre as duas fases, F_i , fazendo com que a tensão da interface seja modelada tendo por base a tensão de cisalhamento na parede, da fase mais rápida. A modelagem modificada a dois fluidos sugere uma estrutura diferente, com a tensão em função da diferença entre as velocidades características, multiplicada pela velocidade da fase mais rápida.

Após esta modelagem, substituindo todas as equações na equação de momento, tem-se uma função do tipo $f(X^2, q, Y, \phi^*, \phi_0) = 0$, que servirá para a determinação do ângulo ϕ_0 , responsável por indicar a posição da interface. Com o ângulo determinado, pode-se obter todas as relações geométricas para os parâmetros normalizados referentes a áreas, velocidades, perímetros, etc.

A Figura 8 mostra as possíveis configurações de interface, considerando a possibilidade de formação de escoamentos anulares e somente a formação de interfaces no padrão estratificado.

Já a Tabela 1 mostra as adimensionalizações necessárias para a determinação de diversos valores geométricos dependentes da posição da interface que foi obtida na modelagem a dois fluidos modificada.

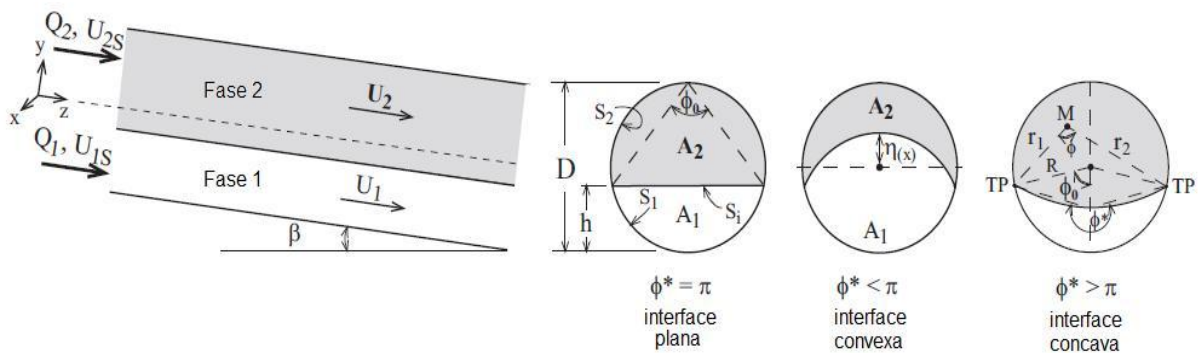


Figura 8: Possibilidade de Configurações Para Escoamentos Estratificado e Anular (Brauner, 2001)

Tabela 1: Parâmetros Geométricos Para Interfaces Curvas e Planas (Brauner, 2001)

	Interface curva, $\phi^* \neq \pi$	Interface plana, $\phi^* = \pi$
$\tilde{A} = \frac{A}{D^2}$	$\pi/4$	$\pi/4$
$\tilde{A}_2 = \frac{A_2}{D^2}$	$\frac{1}{4} \left\{ \pi - \phi + \frac{1}{2} \sin(2\phi) - \left(\frac{\sin \phi_0}{\sin \phi^*} \right)^2 \left[\pi - \phi^* + \frac{1}{2} \sin(2\phi^*) \right] \right\}$	$\frac{1}{2} \left[\pi - \phi_0^p + \frac{1}{2} \sin(2\phi_0^p) \right]$
$\tilde{A}_1 = \frac{A_1}{D^2}$	$\frac{1}{4} \left\{ \phi_0 - \frac{1}{2} \sin(2\phi_0) - \left(\frac{\sin \phi_0}{\sin \phi^*} \right) \left[\phi^* - \pi - \frac{1}{2} \sin(2\phi^*) \right] \right\}$	$\frac{1}{2} \left[\phi_0^p - \frac{1}{2} \sin(2\phi_0^p) \right]$
$\tilde{S}_2 = \frac{S_2}{D}$	$\pi - \phi_0$	$\pi - \phi_0^p$
$\tilde{S}_1 = \frac{S_1}{D}$	ϕ_0	ϕ_0^p
$\tilde{S}_i = \frac{S_i}{D}$	$(\pi - \phi^*) \sin(\phi_0) / \sin(\phi^*)$	$\sin(\phi_0^p)$
$\tilde{U}_2 = \frac{U_2}{U_{2S}}$	$\pi / \left\{ \pi - \phi_0 + \frac{1}{2} \sin(2\phi_0) - \left(\frac{\sin \phi_0}{\sin \phi^*} \right)^2 \left[\pi - \phi^* + \frac{1}{2} \sin(2\phi^*) \right] \right\}$	$\pi / \left[\pi - \phi_0^p + \frac{1}{2} \sin(2\phi_0^p) \right]$
$\tilde{U}_1 = \frac{U_1}{U_{1S}}$	$\pi / \left\{ \phi_0 - \frac{1}{2} \sin(2\phi_0) + \left(\frac{\sin \phi_0}{\sin \phi^*} \right)^2 \left[\pi - \phi^* + \frac{1}{2} \sin(2\phi^*) \right] \right\}$	$\pi / \left[\phi_0^p - \frac{1}{2} \sin(2\phi_0^p) \right]$

2.2 – Erosão

Uma combinação de abrasão com fadiga superficial pode ser definida como erosão. Usualmente, o desgaste erosivo é causado em corpos sólidos pela ação do deslizamento ou impacto de outros sólidos, líquidos, gases ou a combinação entre eles (Zum Gahr, 1987). Dado que os eventos da erosão podem ser muito maiores que os eventos da abrasão, esta definição precisa então ser restabelecida. Uma forma de melhor definir o desgaste erosivo então, é através da análise dos tipos e mecanismos de erosão existentes.

2.2.1 – Tipos de erosão e mecanismos

Zum Gahr (1987) definiu os tipos de erosão mais comumente adotados em engenharia. Ele definiu os tipos de erosão mostrando ainda algumas aplicações dos mesmos, o que facilita bastante o entendimento e uma possível definição do que vem a ser o desgaste erosivo.

Quando uma fase contínua (gás, por exemplo), interagindo com uma fase dispersa (partículas de abrasivo como areia, por exemplo), promove o transporte desse particulado, esse transporte leva à ocorrência de desgaste erosivo denominado erosão por jato de

abrasivo. Geralmente, problemas gerados por esse tipo de erosão, são observados em transportes pneumáticos de poeira de carvão ou turbinas a gás. Neste processo, as velocidades envolvidas na fase contínua assim como sua viscosidade, e propriedades da fase dispersa como a densidade e diâmetro do abrasivo, por exemplo, são fatores determinantes na severidade do desgaste observado.

Outro tipo de erosão que pode ser citado é a erosão por partículas líquidas que ocorre quando uma aeronave a alta velocidade passa por um meio cheio de gotículas de água, gerando um desgaste erosivo na fuselagem da aeronave, por exemplo. Este tipo de erosão também pode ser chamado de erosão de chuva. As altas velocidades envolvidas nesse tipo de erosão é que geram esse desgaste, normalmente observado nas asas dos aviões.

Já no contexto de transporte de fluidos, pode ocorrer uma situação como a implosão de cavidades em líquidos, sobre pás de turbinas, por exemplo. Essas cavidades são provenientes da cavitação e esse tipo de erosão, é chamado de erosão por cavitação. A cavitação vem da palavra “cavus”, que significa cavidade. Segundo Miranda (2007), a cavitação descreve o processo de nucleação, crescimento e colapso das bolhas de vapor em um fluido. O colapso dessas bolhas nas pás da turbina gera o desgaste chamado de erosão por cavitação.

Outro processo de desgaste bastante observado na indústria, é quando erosão e corrosão trabalham juntas. A erosão pode acelerar o processo de desgaste por corrosão e a corrosão pode acelerar o processo de desgaste por erosão. Isto é chamado de efeito sinérgico devido a um processo de erosão-corrosão. Sinérgico porque há a atuação de dois mecanismos simultâneos de desgaste de material. Efeitos sinérgicos podem incrementar substancialmente o desgaste do material. Ocorre por exemplo em linhas transportando líquidos quimicamente agressivos, como a água produzida que sai do poço de extração de petróleo.

Processos eletroquímicos que causam perda de material pela fusão e/ou evaporação causados por uma ação mecânica, térmica, elétrica ou forças magnéticas também são fontes de um outro tipo de erosão, chamada de erosão térmica. Na eletroerosão, por exemplo, tem-se um aumento excessivo da temperatura que causa a perda de material.

Por último, tem-se a erosão em meio lamacento, que é um tipo de erosão causada por um fluxo de líquido carregando partículas sólidas. Tubulações transportando lama é um exemplo deste tipo de erosão.

Associados a estes tipos de erosão, estão os mecanismos de erosão. Existem vários mecanismos atuantes que devem ser considerados. Vários autores se preocuparam em definir qual seria o mecanismo de erosão atuante. Ficaram definidos então, segundo Zum Gahr (1987), como sendo os principais:

- Microcorte e microsulcamento;
- Trinca de superfície (microtrinca);
- Extrusão de material na saída final das crateras de impacto;
- Formação de trinca superficial e subsuperficial por fadiga;
- Formação de pequenas estrias pela extrusão e forjamento causado por impactos repetidos de partículas e formação de estrias causadas por um processo de extrusão reversa.

Microcorte e microsulcamento é um mecanismo que ataca materiais de comportamento dúctil. Ocorre a ângulos agudos normalmente abaixo de 30° . É na verdade um processo combinado de deformação e corte. O choque das partículas sólidas em ângulos agudos corta e faz lascas o material. O microcorte significa que em apenas um passe, a partícula produz e destaca o material. A Figura 9 mostra um modelo teórico para o cálculo da taxa de microcorte e microsulcamento. A Figura 10a mostra como ocorre esse mecanismo de erosão.

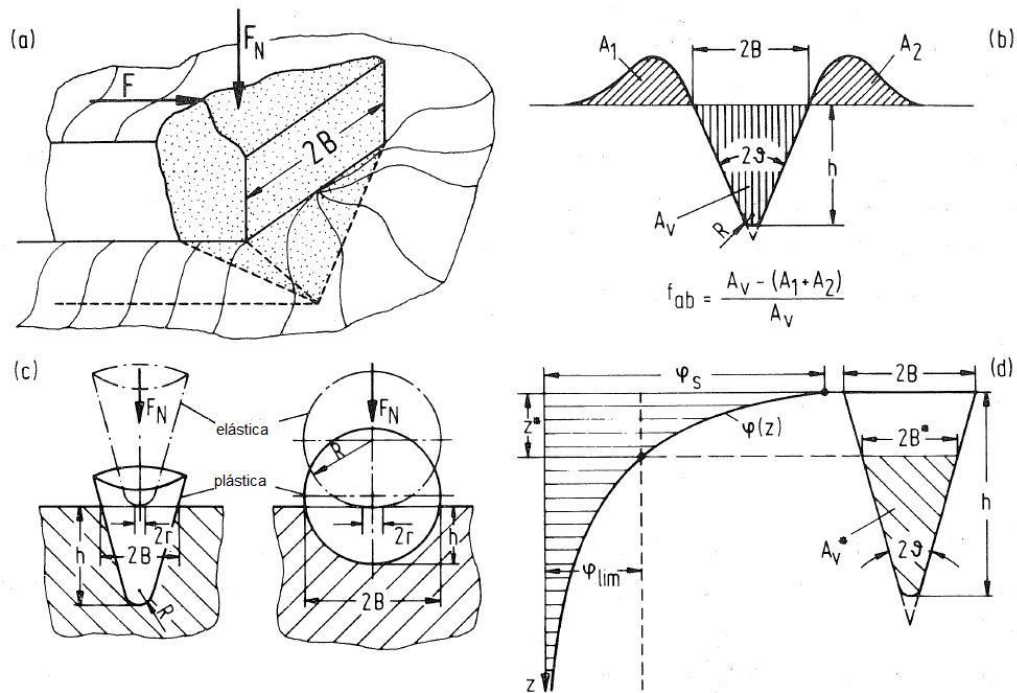


Figura 9: Modelo teórico para cálculo da taxa do microcorte para o microsulcamento de Zum Gahr (1987), a) Deformação plástica em volta da partícula abrasiva penetrante no contato de deslizamento com a superfície, b) Seção transversal da superfície erodida, c) Contato elástico e endentação plástica de uma partícula cônica e esférica, d) deformação φ_s

Já no caso do mecanismo de trincas de superfície, a ângulos de impacto acima de 40° , observa-se a formação de trincas no material pelo impacto das partículas. Este mecanismo se mostra mais atuante em materiais de comportamento frágil. Este efeito é incrementado com o aumento do ângulo de impacto, do tamanho da partícula, da velocidade da partícula e/ou o aumento da fragilidade do material, que são variáveis que influenciam no processo erosivo. Depois da trinca formada, a remoção do material é facilmente feita pelo impacto de outras partículas, podendo também acontecer a formação da trinca e remoção de material em apenas um impacto. A Figura 10b mostra este mecanismo.

O mecanismo de extrusão de material na saída final das crateras de impacto (Figura 10c) é caracterizado pela extrusão localizada pelo impacto da partícula a ângulos oblíquos. Depois da produção dessa extrusão localizada, ocorre o destacamento ao longo das bandas de cisalhamento. A remoção do material pode ser pelo impacto de partículas subsequentes, destacando as bordas extrudidas localizadamente.

Ciclos de carregamento repetidos, ocasionados pelo impacto múltiplo de múltiplas partículas, ocasionam a formação de trincas superficiais e subsuperficiais, gerando por sua vez uma descamação dos detritos. Esse é o mecanismo de formação de trinca superficial e subsuperficial por fadiga (Figura 10d).

A altos ângulos de incidência, outro mecanismo pode ser observado. É o mecanismo de formação de pequenas estrias pela extrusão e forjamento causado por impactos repetidos de partículas (Figura 10e) e formação de estrias causadas por um processo de extrusão inversa (Figura 10f). Neste mecanismo, pequenas estrias podem ser formadas favorecidas pelos múltiplos impactos de partículas cilíndricas. A superfície que sofre o impacto é extrudada e forjada deixando as estrias formadas sob um estado de altas tensões. Quando este impacto ocorre a ângulos normais, ocorre a extrusão inversa.

Quando o mecanismo de erosão envolve o fenômeno da cavitação, a análise é um pouco diferente dos anteriores. Alguns estudos mostram que ainda não são muito bem compreendidos os mecanismos onde acontece a erosão por cavitação. A Figura 13, a Figura 14 e a Figura 15 mostram alguns exemplos práticos de material erodido pelo fenômeno da cavitação. Pode-se considerar dois mecanismos básicos de erosão por cavitação:

- Ondas de choque;
- Micro-jatos.

O mecanismo quando o desgaste é gerado pelo colapso das bolhas, estando estas longe da superfície desgastada, e, mantendo-se uma condição de simetria na bolha, dá-se o nome de ondas de choque. O desgaste então é ocasionado basicamente pela energia liberada do colapso das bolhas, chegando esta energia gerada por valores de pressão de até 1 [GPa] como consequência do colapso de milhares de bolhas. Este valor pode exceder o limite de escoamento do material, causando o desgaste por erosão. Esta condição também é chamada de condição de simetria, de acordo com a Figura 11.

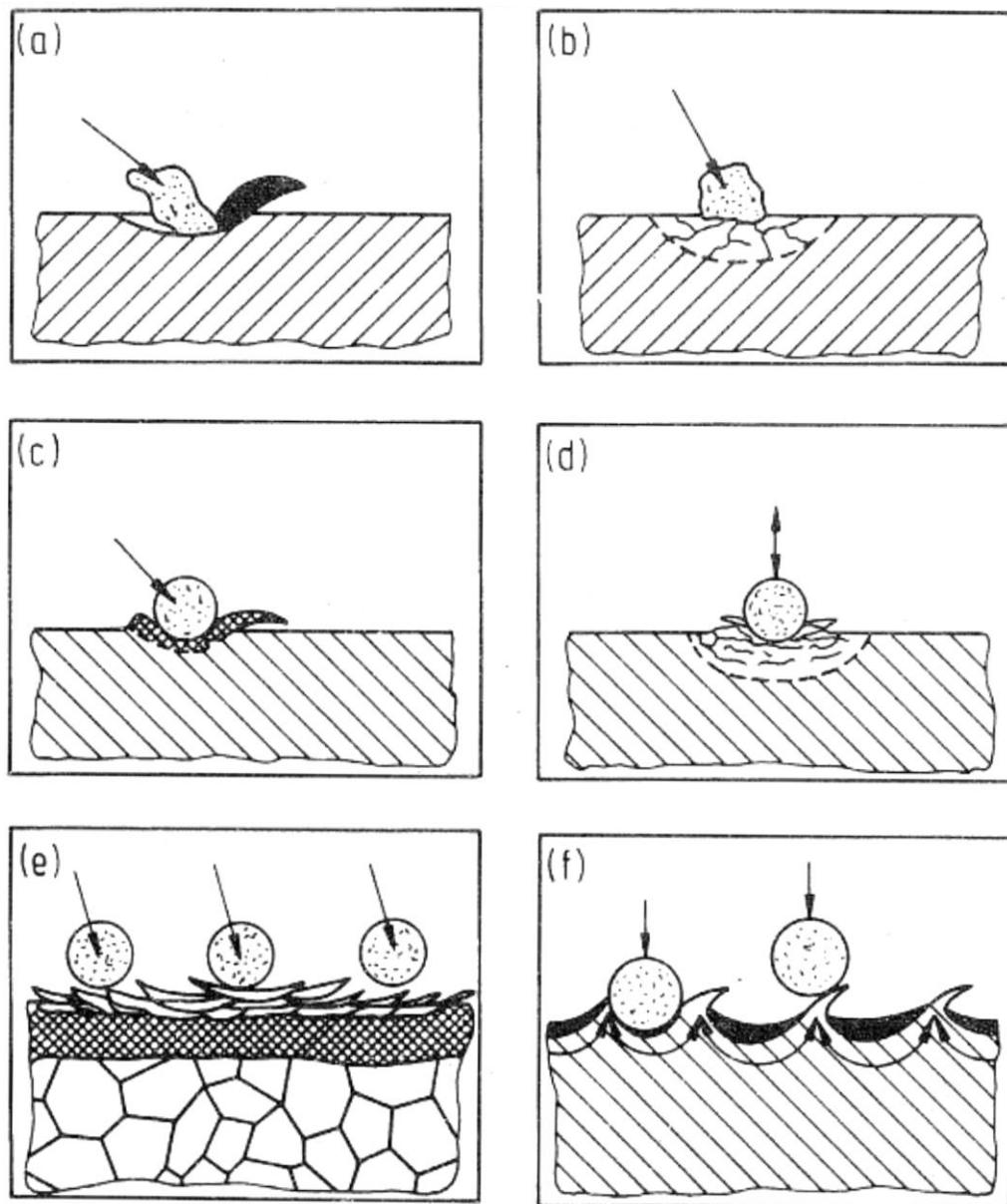


Figura 10: Mecanismos de erosão expostos por Zum gahr (1987) a) Mecanismo de corte e sulcamento, b) Mecanismo de erosão por formação de microtrincas, c) Extrusão de material na saída final das crateras de impacto, d) Formação de trincas superficiais e subsuperficiais por fadiga, e) Formação de pequenas estrias pela extrusão e forjamento causado por impactos repetidos de partículas e f) formação de estrias causadas por um processo de extrusão inversa

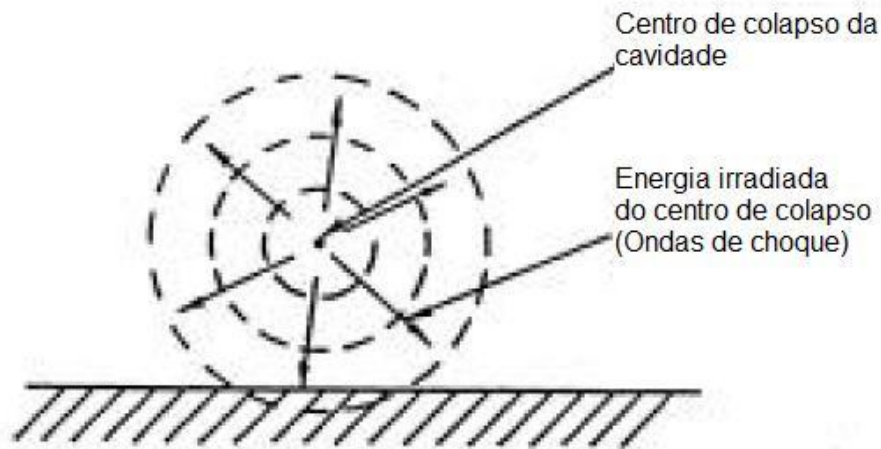


Figura 11: Condição de onda de choque (Koivula, 2000)

Já quando o desgaste é gerado pelo colapso de bolhas que estão mais próximas da superfície desgastada, em uma condição de assimetria, têm-se a erosão por cavitação pelo mecanismo de micro-jatos. Esta condição de assimetria, em outras palavras, faz com que de um lado da bolha, a aceleração seja maior no sentido do interior da bolha (Figura 12 e Figura 13), devido à proximidade da superfície sólida que ocasiona uma perturbação da estabilidade da bolha. Esta maior aceleração faz com que a velocidade aumente, gerando um micro-jato que vai de impacto à superfície a ser erodida.

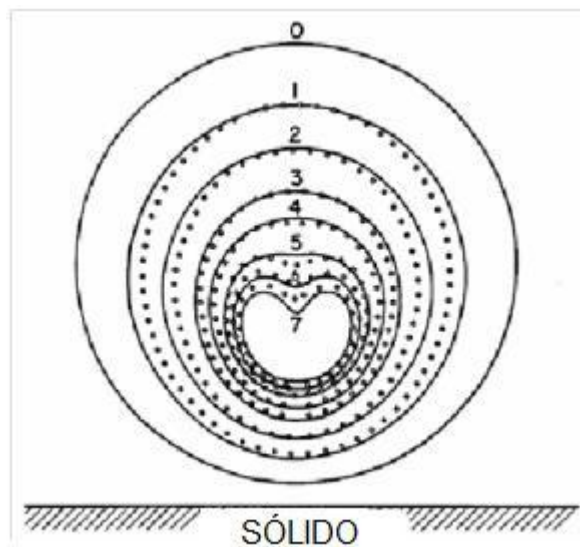


Figura 12: Condição de assimetria no impacto de uma bolha (Brennen, 1995)

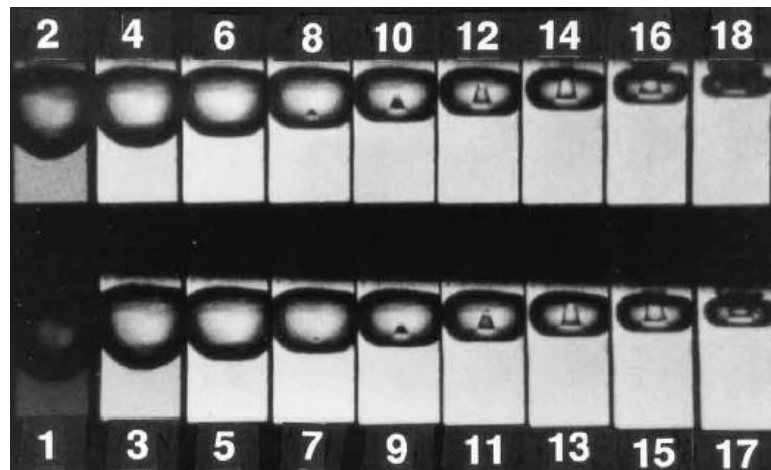


Figura 13: Série de fotos de uma bolha em formato assimétrico colapsando (Brennen, 1995)

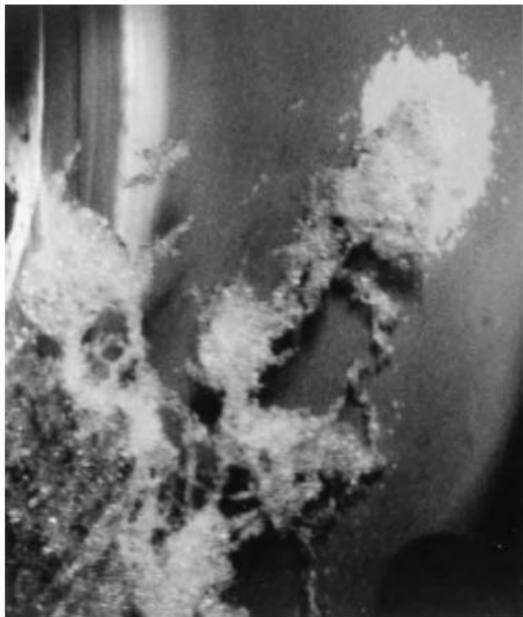


Figura 14: a) Formação de uma "nuvem" de bolhas em uma determinada região e b) Erosão causada pelo impacto desta nuvem de bolhas (Brennen, 1995)



Figura 15: Mais um exemplo de erosão por cavitação nas pás de um rotor (Brennen, 1995)

2.2.2 – Variáveis envolvidas no processo de erosão

Algumas variáveis podem ser citadas como de grande influência em processos de desgaste erosivo. Estas variáveis devem inclusive ser levadas em conta quando se utiliza a modelagem computacional da erosão. São elas:

- Ângulo de impacto;
- Tamanho da partícula erosiva;
- Velocidade de impacto;
- Dureza do material erodido;
- Tempo de exposição e geometria da partícula;

A variável ângulo de impacto pode ser observada quando se varia o comportamento do material erodido. Nos materiais dúcteis, a maior severidade do desgaste erosivo ocorre a ângulos de impacto próximos de 30° . Isto porque nestes ângulos, o mecanismo atuante é o de microcorte e de microsulcamento. Nos materiais frágeis (cerâmicas, por exemplo), altos ângulos de impacto resultam em uma maior taxa de desgaste. Isto ocorre por conta do mecanismo que atua a altos ângulos de impacto. Neste caso o desgaste ocorre muito mais pela formação de trincas nos materiais frágeis. A Figura 16 mostra a variação da taxa de desgaste erosivo para diferentes materiais a diferentes ângulos de impacto.

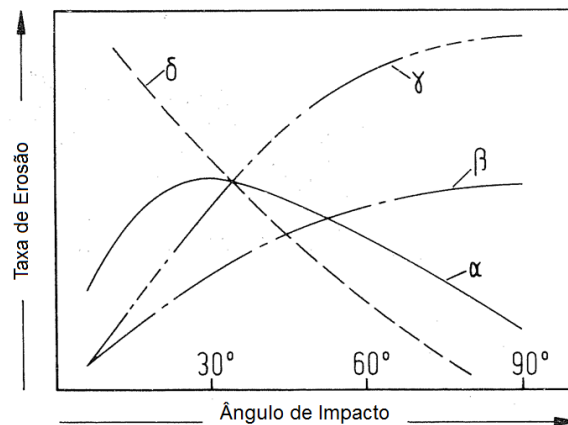


Figura 16: Taxa de erosão em função do ângulo de impacto para diferentes materiais (Zum Gahr, 1987), (β) metal duro, (α) metal dúctil, (δ) borracha, (γ) cerâmicas frágeis

O tamanho da partícula está diretamente associado à sua massa, considerando partículas de mesmo material. O aumento então do tamanho da partícula implica em uma maior energia na colisão, devido a efeitos de inércia. Sendo assim, materiais mais frágeis, que tendem a formar trincas mais facilmente, tem uma severidade de desgaste maior associada ao tamanho da partícula erosiva. Na Figura 17 observa-se um comparativo para materiais de comportamento dúctil e de comportamento frágil, no incremento de duas taxas de desgaste erosivo com o incremento de tamanho das partículas erosivas.

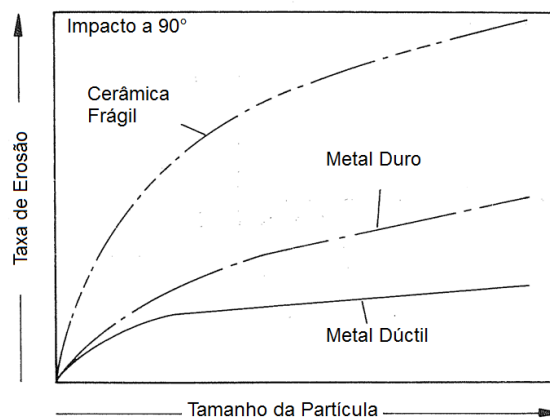


Figura 17: Taxa de erosão em função do tamanho da partícula, comparando diferentes materiais (Zum Gahr, 1987)

Outra variável, a velocidade de impacto, influencia no nível de energia associado à partícula. Altas velocidades de impacto influenciam muito a taxa de erosão, porque aumentam muito a energia de impacto. Cada material tem uma energia de impacto mínima para a ocorrência do desgaste erosivo. Porém, com aumento muito grande da velocidade de impacto, tem-se um incremento no carregamento associado, o que pode promover uma

mudança no comportamento do material, podendo um material dúctil se comportar como frágil. Tal comportamento pode ser observado na Figura 18.

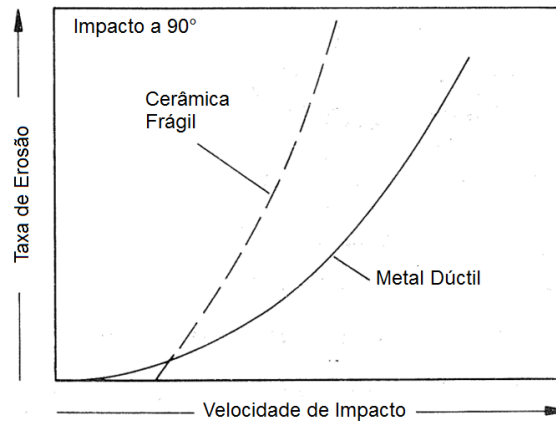


Figura 18: Taxa de erosão em função da velocidade de impacto para materiais dúcteis e frágeis (Zum Gahr, 1987)

Um fator também importante a ser observado, é que durante o processo erosivo, a partícula faz um trabalho de endurecimento da superfície erodida. Uma análise pode ser feita, utilizando dados da dureza Vickers do material *versus* resistência à erosão. A partir desta análise, que segue de acordo com a Figura 19, materiais recozidos com estrutura CFC, tem uma taxa de desgaste inversamente proporcional à sua dureza. Isto acontece porque esses materiais puros, com estrutura CFC têm maior facilidade de encruar. Porém, na mesma figura, nota-se um fato interessante, que é o aumento da dureza de aços a partir de trabalho a frio e têmpera, não resultando em nenhum ganho para resistência à erosão. Isto porque no trabalho a frio, além de aumentar a dureza, tem-se um alto grau de deformação. Com isso, a tensão de escoamento é muito pouco afetada (devido às altas deformações). Além disso, nota-se que com o aumento da dureza tem-se uma redução na capacidade de encruar do material.

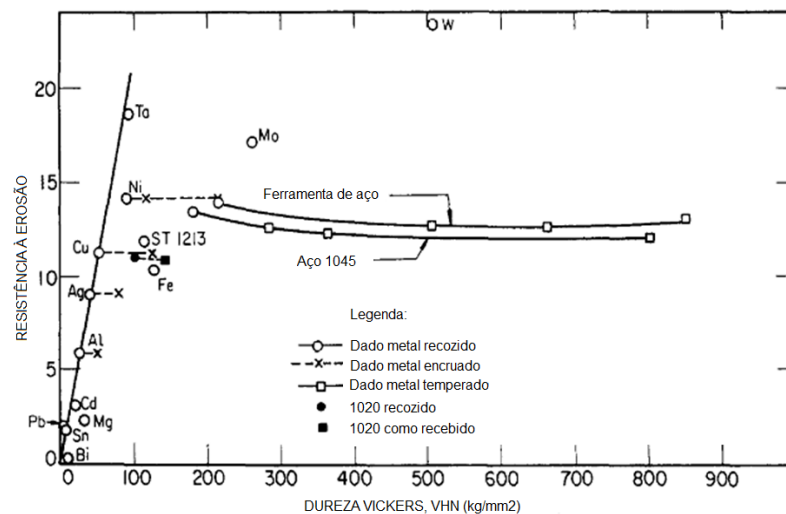


Figura 19: Resistência à erosão como função da dureza do material (Finnie, 1995)

O tempo de exposição e geometria da partícula aparenta ser duas variáveis, mas será tratada como somente uma devido ao fato do desgaste das arestas de corte das partículas erosivas. Na Figura 20 pode-se observar primeiramente, um período de incubação seguido por um período de aceleração do desgaste erosivo. Após esse período de aceleração segue-se um período estacionário, em que o desgaste não aumenta (curva 1) ou em um período de desaceleração, em que a taxa de desgaste diminui e depois se mantém estável (curva 3). Já a curva 2, têm uma estranha taxa de erosão negativa. Isto ocorre em materiais dúcteis a altos ângulos de impacto, em que a partícula erosiva a priori é embutida no material, tendo ao invés de uma taxa de erosão (remoção de material), um aumento de massa. Esse período de ganho de material é chamado de período de incubação. Mas, ao longo do tempo, as partículas perdem sua ação erosiva por conta do seu desgaste que diminui suas arestas de corte. Vale ressaltar ainda, que este efeito ocorre em função do tipo de abrasivo e da velocidade de impingimento. Em situações laboratoriais, quando se utiliza areia de teste, por exemplo, deve-se levar em conta a troca periódica da areia, pois essa taxa decai ao nível de 1/3 somente pela diminuição das arestas de corte. Este efeito é observado na Figura 20.

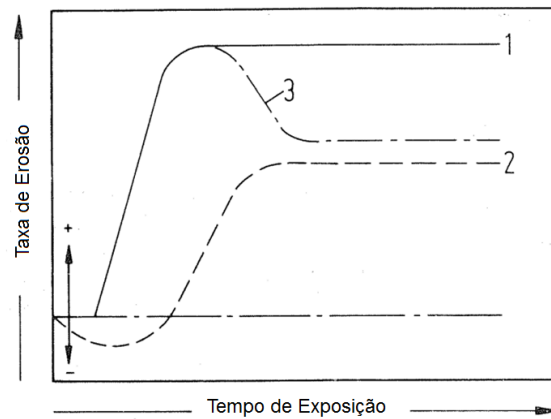


Figura 20: Taxa de erosão em função do tempo de exposição 1) Três etapas do desgaste erosivo, sendo o início do desgaste, aceleração e período estacionário, 2) Três etapas do desgaste erosivo, sendo o período de adição de material (incubação), aceleração e período estacionário e 3) Quatro etapas do desgaste erosivo, sendo o início do desgaste, aceleração, redução do desgaste devido a perda das arestas de corte das partículas e período estacionário (Zum Gahr, 1987)

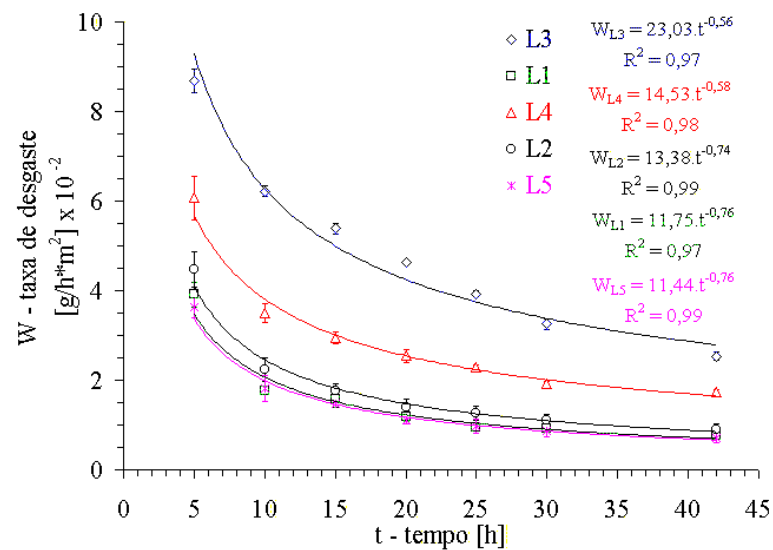


Figura 21: Queda da taxa de desgaste, com o tempo a partir da diminuição das arestas de corte do material erosivo (MÁSCIA, R., 2002)

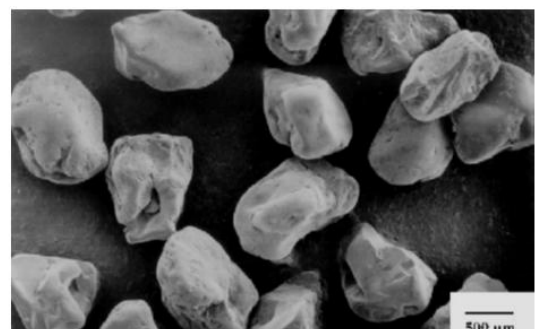
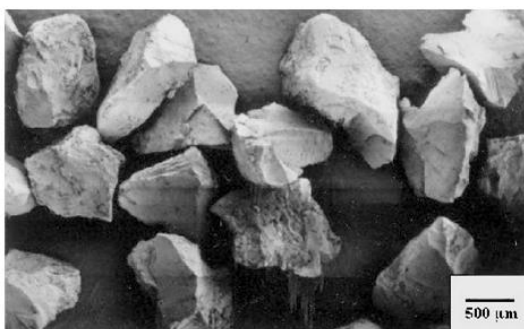


Figura 22: a) Geometria da partícula antes do processo erosivo, com arestas de corte evidentes e b) Geometria depois do processo erosivo, com menos arestas de corte

Com relação à perda das arestas de corte das partículas abrasivas, o trabalho de Mascia (2002), mostra informações muito interessantes. Inclusive em seu trabalho, pode-se observar as fotos tiradas antes e depois do ensaio de erosão realizado, conforme mostra a Figura 22a e a Figura 22b, respectivamente. Ainda de acordo com Zum Gahr (1987), interações entre partículas abrasivas e carbonetos podem ser descritas como:

1. Sulcamento;
2. Corte;
3. Corte e trincamento;
4. Retirada dos carbonetos.

Por vezes ocorre a erosão das partículas abrasivas. Partículas duras podem retirar pequenos carbonetos presentes na matriz. Carbonetos dúcteis, que são maiores do que a média das partículas abrasivas podem ser cortados pelos abrasivos duros. Carbonetos frágeis podem ser cortados ou trincados.

Partículas menos duras de abrasivos, podem promover a retirada de pequenos carbonetos ou produzir grandes *pits*. A endentação de partículas menos duras é substancialmente reduzida por carbonetos duros. Grandes carbonetos que estão mal acomodados na matriz podem ser arrancados por completo pelo deslizamento das partículas erosivas. Grandes carbonetos bem acomodados na matriz podem atenuar o efeito erosivo ou até mesmo fraturar as partículas erosivas.

2.3 – Modelagem computacional da erosão em escoamentos multifásicos

No estudo da modelagem da erosão, é muito importante ter a percepção de como uma fase contínua pode interagir com a fase dispersa (partículas erosivas). Existem basicamente duas formas de se tratar este tipo de problema. Uma seria considerar os efeitos da fase contínua na fase dispersa e vice-versa, e outra seria considerar somente os efeitos da fase contínua na fase dispersa. No caso de escoamentos multifásicos com presença de partículas, normalmente pela segunda opção por questão de menor custo computacional. Mas é muito importante ressaltar que o diâmetro da partícula pode ser o fator decisivo entre usar o acoplamento de uma ou de duas vias, visto que partículas muito pequenas dificilmente têm interação com a fase contínua.

2.3.1 – Estudo da turbulência

Não existe uma definição capaz de definir exatamente o que seria um regime turbulento, mas existem algumas características que induzem a determinar um escoamento como turbulento.

Pode-se classificar o escoamento turbulento como sendo uma condição irregular de escoamento. As várias quantidades variam randomicamente com coordenadas de espaço e tempo.

Como características desse tipo de escoamento, diz-se que são instáveis, apresentam multiplicidade de escalas, tridimensionalidade e rotacionalidade, alta difusibilidade, imprevisibilidade e é um fenômeno contínuo (Silveira-Neto, A., 2002). Além dessas características, ainda associa-se o escoamento turbulento ao número de Reynolds, que será explicado nas próximas seções.

Estes escoamentos podem aparecer de forma chamada escoamento externo, interno e escoamentos complexos.

Escoamentos externos podem ser visualizados como, por exemplo, o escoamento de camadas de ar passando por uma asa de um avião, como mostra Figura 23.

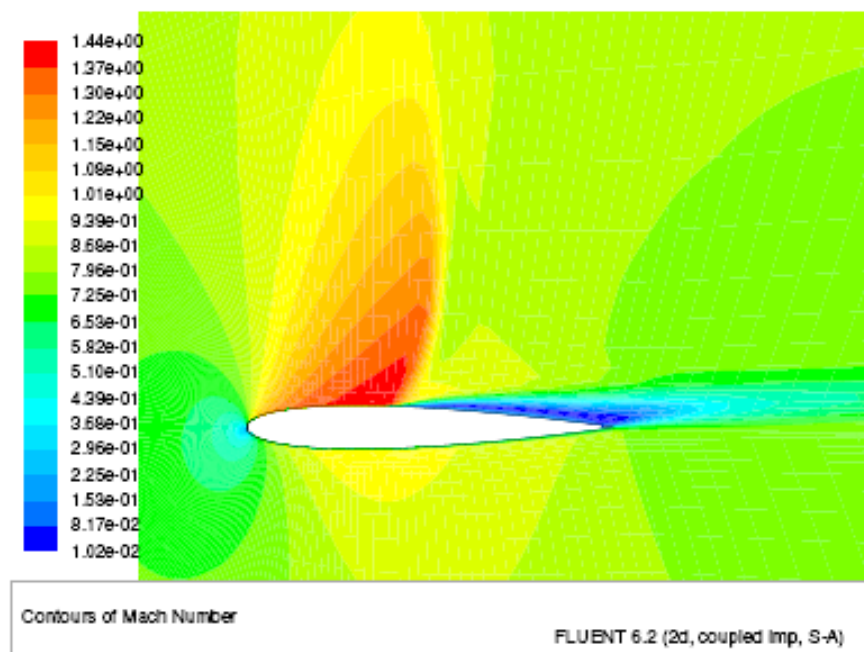


Figura 23: Simulação computacional de um escoamento externo (Fluent Manual, 2010)

Escoamentos internos podem ser entendidos como escoamentos dentro de uma tubulação, por exemplo, de acordo com Figura 24.

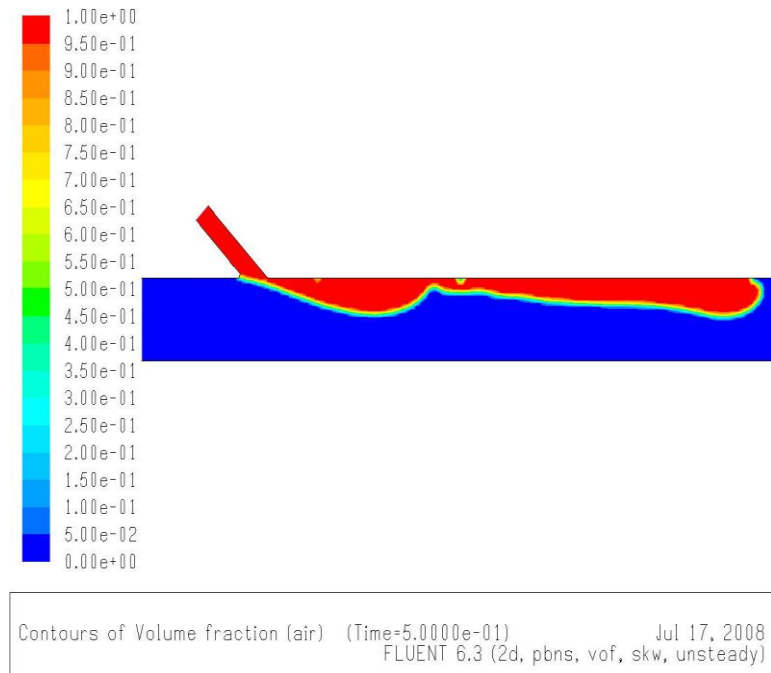


Figura 24: Formação de um *slug* em um escoamento interno (Silva, 2008)

A Figura 25 mostra um escoamento complexo:

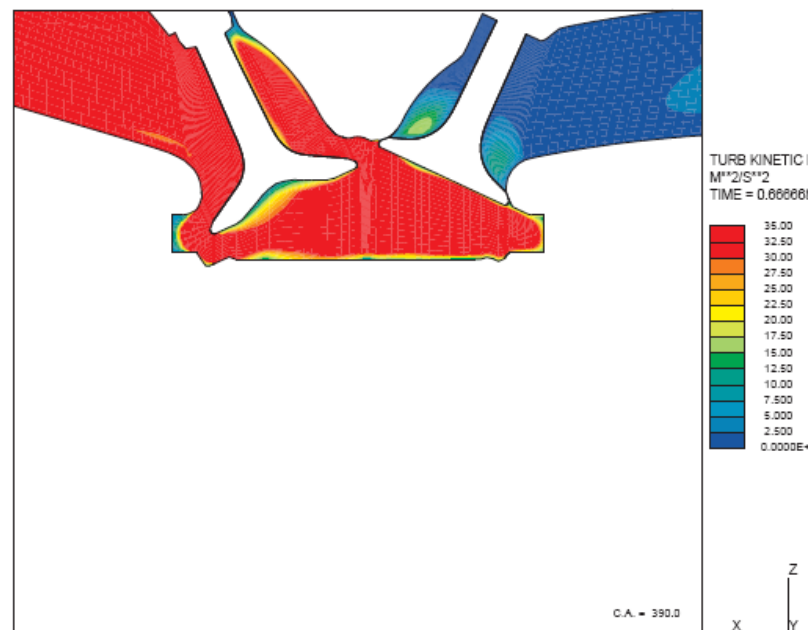


Figura 25: Escoamento complexo envolvendo combustão (Fluent 12.1 User Guide, 2010)

2.3.2 – Modelagem do escoamento multifásico

O escoamento turbulento pode ter uma de suas representações através da sua multiplicidade de escalas. Esta multiplicidade por sua vez, é observada graficamente pela análise de imagens de escoamentos turbulentos, ou através de um espectro de energia pelo número de onda (ou número de Reynolds) plotado em escala logarítmica (Figura 26).

A multiplicidade de escalas representa também o número de graus de liberdade de um escoamento, representado pela equação (5.1).

$$N_{gl} = \left(\frac{L}{l_d} \right)^3 = Re_L^{9/4} \quad (23)$$

Quanto maior então o número de Reynolds, maior o número de graus de liberdade, sendo L a escala de comprimento característica e l_d a menor escala, a escala dissipativa de Kolmogorov, que representa a perda dos efeitos cinéticos sobrepostos pelos efeitos viscosos (Silveira-Neto, 2002).

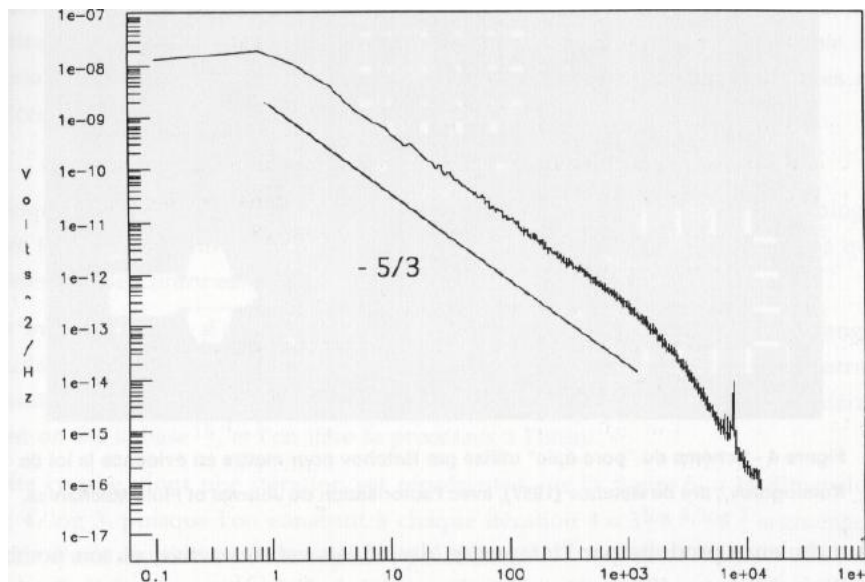


Figura 26: Espectro de energia pelo número de Reynolds

Como normalmente esse número de graus de liberdade é muito grande, surge um grande problema sobre como resolver o problema de fechamento. Uma vez que cada grau

de liberdade representa uma equação, a solução de graus de liberdade da ordem de 10^8 seria um problema proposto de alto grau de complexidade.

Sendo assim, Reynolds propôs uma forma de análise, levando em conta o comportamento médio do escoamento e modelando suas flutuações. Tal proposta foi denominada de Média de Reynolds e deu nome à metodologia URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*) (Silveira-Neto, 2002).

Outra proposta de análise é a metodologia proposta por Smagorinsky, chamada de Simulação das Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). Nesta metodologia tem-se uma proposta para a solução do problema, em que se resolve o espectro de escalas maiores e modela-se as escalas menores.

Dentre as metodologias existentes, a metodologia URANS representa o tratamento da maioria dos problemas de escoamentos turbulentos utilizados em cálculos de engenharia. Para esta metodologia, existem diversos modelos, cada um com sua aplicação mais bem sucedida.

A solução das variáveis no instante das equações de Navier-Stokes é decomposta na média (temporal ou de conjunto) e componentes de flutuação. Para os componentes relativos à velocidade:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (22)$$

onde $\bar{u}_i$ representa a média da velocidade e u'_i representa as flutuações da velocidade, ambos no passo de iteração i .

Assim sendo, tem-se o mesmo padrão de equacionamento para qualquer grandeza escalar do escoamento:

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (24)$$

onde ϕ representará algum escalar que pode ser referente à pressão, à energia ou à concentração de espécies, por exemplo.

Substituindo as expressões nessa forma para as variáveis do escoamento, dentro das equações de momento e continuidade instantâneas e tomando a média (temporal ou de conjunto), e retirando a média da velocidade, resulta na média de conjunto das equações de momento. Elas podem então ser escritas na forma de um tensor cartesiano como se segue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (26)$$

Estas duas equações são chamadas de Média de Reynolds para as equações de Navier-Stokes, com as velocidades e outras variáveis da solução agora representando uma média (de conjunto ou temporal) como valores. Termos adicionais aparecem agora, como representações da turbulência. O tensor de Reynolds, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, por sua vez deve ser modelado de forma a fechar a equação de Navier-Stokes.

Essa aproximação de Reynolds para a modelagem da turbulência requer que o tensor de Reynolds seja apropriadamente modelado. Um método bastante utilizado é a hipótese de Boussinesq, que dá ao tensor de Reynolds os gradientes das velocidades médias.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (27)$$

Esta hipótese é utilizada nos modelos Spalart-Allmaras, k- ϵ e k- ω , por exemplo. A vantagem é que para esta hipótese, o custo computacional associado ao cálculo da viscosidade turbulenta μ_t é muito menor. No caso da metodologia k- ϵ e k- ω , somente duas equações adicionais de transporte representando a viscosidade turbulenta são resolvidas. Uma para a energia cinética turbulenta k e outra para taxa de dissipação de turbulência ϵ ou para a taxa específica de dissipação ω . Daí μ_t é computado como função de k e ϵ ou k e ω . A desvantagem por conta desta aproximação seria que ela assume μ_t como uma quantidade escalar isotrópica. Mas, como as escalas da turbulência não são homogêneas e nem isotrópicas, e uma condição de isotropia poderia ser aproximada para as pequenas escalas em um possível modelamento, pode-se dizer então que existe um erro associado a esta forma de modelagem da turbulência.

Dentre os modelos existentes, alguns podem ser citados como:

- k- ϵ Standard;
- k- ϵ RNG;
- k- ϵ Realizable;
- k- ω ;
- k- ω -SST;
- Spalart-Allmaras.

Nos modelos k- ϵ , todos têm forma similar, sendo as mesmas equações de transporte para k e ϵ . Assim como nos modelos k- ω que também têm forma similar e a particularidade da aplicação utilizada no modelo Spalart-Allmaras.

O modelo mais simples de k- ϵ o k- ϵ -Standard usa duas equações de transporte, no qual a solução permite que as velocidades de turbulência e tamanho das escalas sejam independentemente determinadas. É o modelo mais utilizado na engenharia prática em se tratando de escoamentos. Isto porque é robusto, econômico (baixo custo computacional) e racionalmente preciso para uma grande gama de escoamentos turbulentos. Com o passar do tempo, falta de robustez em determinados casos utilizando este modelo, induziram ao surgimento de algumas variantes, como RNG e Realizable (Fluent Theory Guide, 2010).

No modelo k- ϵ -RNG, é utilizada uma técnica bastante rigorosa de tratamento estatístico (chamada de teoria de renormalização de grupo). A base é a mesma do Standard, mas inclui alguns refinamentos como um termo adicional na equação do ϵ que melhora a precisão para escoamentos que se deformam rapidamente.

Neste modelo, o efeito de rotação na turbulência também está incluído melhorando a precisão para escoamentos rotacionais. Tem uma fórmula analítica para números de Prandtl turbulentos enquanto que no modelo Standard este número é uma constante e possui uma fórmula diferencial derivada-analítica para viscosidade efetiva, o que leva em conta efeitos de baixos números de Reynolds. Em contrapartida, necessita de um bom tratamento da malha na região próxima à parede para que se obtenha bons resultados (Fluent Theory Guide, 2010).

O modelo k- ϵ -Realizable é um modelo relativamente novo, e difere do Standard nos seguintes quesitos: tem uma nova formulação para a viscosidade turbulenta e uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação ϵ derivada de uma equação exata para o transporte da média quadrada da flutuação da vorticidade.

A palavra *realizable* (realizável) significa que o modelo satisfaz certas condições matemáticas no tensor de Reynolds, consistente com a física de escoamentos turbulentos. O Standard e o RNG não são realizáveis. Um benefício imediato deste modelo seria a predição mais precisa da taxa de deformação, tanto para jatos planos como circulares. O modelo é também superior na performance de escoamentos envolvendo rotação, camada limite sob influência de gradientes de pressão muito adversos, separação e recirculação. Como é um modelo relativamente novo, ainda não se sabe exatamente em que ele supera os outros modelos e quais seus pontos fracos. Mas já se sabe que este modelo tem a melhor performance de todos os modelos k- ϵ para validação de escoamentos separados e escoamentos com complexas características secundárias (Fluent Theory Guide, 2010).

Um problema deste modelo é que ele produz uma viscosidade turbulenta não física quando o domínio computacional contém zonas de fluido rotacionais e estacionárias. Isto acontece porque este modelo inclui os efeitos da rotação média na definição de viscosidade turbulenta.

O modelo k- ω também é um modelo recente, baseado no modelo de Wilcox (1998), que tem algumas modificações para o trabalho com baixos números de Reynolds (condição próxima à parede). Utiliza também duas equações de transporte, que determinam independentemente a energia cinética turbulenta k, e a taxa de dissipação específica ω .

Este modelo consegue prever com determinada precisão condições de escoamento como camadas de mistura, jatos, escoamentos livres por exemplo. Tais modelagens estão ainda de acordo com medidas realizadas, a partir das taxas de deformação de escoamentos cizalhantes livres.

Existe também uma variação chamada de k- ω SST (*Shear Stress Transport*), que nos últimos anos vem sendo muito utilizada por sua robustez em situações um pouco diferentes. Este modelo pode ser encarado como um dos mais robustos, pois incorpora diversos incrementos a partir dos modelos acima citados. Dentre esses incrementos, o mais importante seria as diferenças de tratamento do escoamento nas regiões próximas à parede e longe da parede. Nas regiões próximas à parede, o modelo é tratado como o modelo k- ω e na região afastada da parede, tratado como o modelo k- ϵ (Fluent Theory Guide, 2010).

Isto é conseguido tomando-se em conta que este modelo é tido como um modelo híbrido que faz a conversão das equações do k- ω nas equações do k- ϵ . Estas equações por sua vez são multiplicadas por uma função de mistura que é multiplicada por um nas regiões próximas à parede e por zero nas regiões afastadas da parede. Isto permite que se

uma a robustez de um modelo na região próxima à parede ($k-\omega$) com a independência no desenvolvimento do escoamento nas regiões afastadas da parede de outro modelo ($k-\epsilon$).

Além disso, a definição de viscosidade turbulenta é modificada para levar em conta o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta.

Já o modelo Spalart-Allmaras é um modelo simples, de uma equação que resolve a equação do transporte modelada para a viscosidade turbulenta. É um modelo basicamente para baixos números de Reynolds, que não necessita calcular o tamanho das escalas relacionadas com a espessura local da camada cizalhante.

Esse modelo foi desenvolvido especificamente para a indústria aeroespacial envolvendo escoamentos em asas de avião, por exemplo, onde se tem um grande interesse no fenômeno descolamento da camada limite.

Para sua melhor utilização, é necessária uma boa solução da região viscosamente afetada da camada limite. Pode ser trabalhado nessa perspectiva, tanto com uma malha bem fina quanto com uma malha grosseira, visto que para condição de malha grosseira, existe a possibilidade de implementação de uma lei de parede para a correta solução.

Outros modelos podem estar associados à outras metodologias como o modelo de Smagorinsky-Lilly que utiliza a metodologia LES. Esta metodologia foi desenvolvida por um meteorologista chamado Smagorinsky. Lilly por sua vez, foi quem determinou analiticamente a constante de Smagorinsky, C_s , utilizada nos cálculos desta metodologia (Fluent Theory Guide, 2010).

Esta metodologia consiste basicamente na solução das grandes escalas e na modelagem das pequenas escalas. Tal divisão acontece truncando o espectro de energia separando as grandes das pequenas escalas. Como as grandes escalas são menos isotrópicas do que as menores escalas tem-se um menor erro associado à solução do problema, visto que a parte mais isotrópica é agora modelada e a menos isotrópica resolvida.

Em comparação com as metodologias baseadas na média de Reynolds, esta metodologia não mais coloca na média as escalas da turbulência, sendo então fisicamente mais confiável. E como as pequenas escalas são mais isotrópicas, pode-se considerar um pequeno erro associado à sua modelagem.

Para determinar qual o tamanho das escalas que serão resolvidas e modeladas, a metodologia utiliza-se de um filtro. A malha seria então esse filtro. As escalas tão pequenas

quanto o tamanho da malha, serão resolvidas e as escalas menores do que isso serão modeladas.

O problema dessa metodologia é que não trata bem o escoamento na condição próxima à parede, necessitando de uma malha muito fina nesta região e não obtendo bons resultados mesmo assim. Já a rotacionalidade de um escoamento é muito bem determinada por essa metodologia.

Quando se fala em escoamento multifásico, deve-se levar em conta as técnicas de modelagem de escoamentos multifásicos que estão disponíveis em dois grupos: Euler-Euler e Euler-Lagrange.

- Modelo Euler-Euler
 - VOF
 - Modelo de Mistura
 - Modelo Euleriano
- Modelo Euler-Lagrange de fase discreta.

No modelo Euler-Euler, as duas fases envolvidas são tratadas matematicamente como fases contínuas interpenetrantes (Fluent Theory Guide, 2010). Utiliza-se então o conceito de fração de volume da fase, considerando que o local onde uma fase está presente não pode ser ocupado pela outra fase. Isto é conseguido através de um sistema de equações de espaço e tempo cujas somas são iguais a um.

No modelo Euler-Lagrange conhecido como o modelo de fase discreta, é um modelo que trata uma fase como sendo a contínua (referencial euleriano), resolvendo as equações de Navier-Stokes enquanto que a fase discreta, sendo um grande número de partículas, bolhas ou gotas, é tratada relativamente à fase contínua (referencial lagrangiano), utilizando as informações obtidas no cálculo do escoamento.

De acordo com o Fluent Theory Guide (2010), o modelo Euler-Euler VOF (*Volume of Fluid*), o escoamento é tratado como uma única fase escoando, mas com propriedades diferentes, caracterizando então o fluido como bifásico. Utiliza-se uma técnica de captura da interface a uma malha fixa euleriana. O interesse nessa forma de modelagem é somente encontrar a posição da superfície. De acordo com Miranda F. C. (2010), esta forma de modelagem é uma modelagem a um fluido, onde existe a solução de apenas um conjunto de equações de conservação em todo o domínio.

O modelo de mistura também proposto no Fluent Theory Guide (2010), é um modelo muito utilizado para modelagem de separadores de partículas por exemplo. Neste modelo, as equações de quantidade de movimento linear são resolvidas para a mistura e prescreve as velocidades relativas para descrever as fases discretas. É utilizado também na modelagem de sedimentação e escoamentos de bolhas dispersas.

Já o modelo euleriano, é um modelo a n fluidos, onde n representa o número de fases presentes. Desta forma, faz-se a solução de um conjunto de equações para cada fase envolvida e um acoplamento entre as fases, a partir da pressão e de coeficientes de troca interfásica. Neste modelo, as trocas que ocorrem entre as fases dependem muito das propriedades das fases envolvidas. Sendo assim, se torna um modelo bastante adaptável para casos de simulação de problemas de leitos fluidizados, colunas de bolhas, *risers*, entre outros.

2.3.3 – Modelagem da erosão

Para a modelagem da erosão, alguns modelos podem ser considerados, como por exemplo, o modelo de Johnson-Cook utilizado para erosão em materiais de comportamento dúctil. Ou então o modelo de Johnson-Holmquist, utilizado para modelagem da erosão em materiais de comportamento frágil. Estes dois modelos são utilizados normalmente em códigos computacionais que utilizam a solução por meio de elementos finitos, como pode ser observado no trabalho publicado por Wang & Yang (2008).

Nesta forma de abordagem, utiliza-se basicamente de uma equação constitutiva e uma equação de estado.

A equação constitutiva para materiais de comportamento dúctil leva em conta uma constante relativa ao limite de elasticidade, uma constante relativa ao encruamento e sua taxa de deformação plástica. Com estas variáveis determinadas, o modelo é capaz de determinar a tensão de von Mises. Com a tensão determinada, consegue-se determinar a deformação na fratura, com o auxílio de mais constantes experimentais capturadas através de testes de fissura por compressão de Hopkinson (Wang & Yang, 2008). Assim sendo, tem-se um fator de falha quando a variação da deformação plástica pela deformação plástica de fratura atinge 1. A equação de estado para este tipo de material consiste na determinação das forças de compressão através da pressão de Grüneisen.

Já para materiais de comportamento frágil, tem-se uma equação constitutiva que utiliza de constantes dos materiais para determinação das tensões normalizadas para materiais intactos e para a fratura. A falha neste caso ocorre quando a variação da deformação plástica incremental calculada no ciclo computacional pela deformação plástica de fratura atinge 1. Sua equação de estado consiste na determinação das forças de compressão através da pressão estática. A pressão estática depende de algumas constantes que são obtidas pelo experimento de placa de impacto.

Ainda sobre os modelos de erosão, existem os modelos utilizados nos códigos comerciais. Os modelos utilizados nos códigos comerciais, assim como a maioria dos modelos de erosão, dependem em grande parte de constantes obtidas experimentalmente para alimentar a modelagem. De acordo com o software Fluent (ANSYS, Inc.), o modelo de erosão é dado por:

$$R_{erosão} = \sum_{p=1}^{N_{partículas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (28)$$

onde as variáveis envolvidas são funções do diâmetro da partícula, do ângulo de impacto e da velocidade da partícula (*ver página 50 com as funções utilizadas para cada variável*).

2.3.4 – Modelagem da erosão em escoamentos turbulentos

Na modelagem de um escoamento envolvendo erosão, utiliza-se comumente a modelagem Euler-Lagrange, em que o escoamento gerado é a parte contínua (Euler) e a partícula erosiva é a partícula lagrangiana. A forma de modelagem é denominada DPM (*Discrete Phase Model*), Modelagem da Fase Discreta.

Nesta forma de modelagem, algumas outras variáveis devem ser consideradas e são normalmente determinadas experimentalmente:

- Coeficiente de reflexão:
 - Coeficiente normal;
 - Coeficiente tangencial;
- Função do ângulo de impacto:
 - Curva para materiais de comportamento dúctil;

- Curva para materiais de comportamento frágil;
- Função do diâmetro;
- Função do expoente da velocidade:
 - Expoente para materiais de comportamento dúctil;
 - Expoente para materiais de comportamento frágil.

É importante salientar que nesta forma de solução de um problema envolvendo duas fases, várias formulações são utilizadas para dar o movimento da partícula e sua interação com a fase contínua. A capacidade do software Fluent 12.1 (ANSYS, Inc.) de modelar este tipo de problemas, envolve a modelagem de partículas ou gotículas e ainda podendo ser analisado o seu respectivo impacto na fase contínua. Diferentes relações de transferência de calor e massa estão disponíveis de acordo com cada modelo físico envolvido e tipos de partícula.

Este modelo assume que a fase discreta, ou fase secundária, tem uma baixa fração de volume. Mas pode ter um alto carregamento de massa ($\dot{m}_{particulas} \geq \dot{m}_{fluido}$). A trajetória da partícula lagrangiana é calculada separadamente da fase contínua em intervalos durante o cálculo da fase contínua. Isto faz o modelo ser limitado a casos em que a fração de volume da fase discreta possa ser negligenciada.

Para fazer a previsão da trajetória da partícula, integra-se o balanço de forças na partícula, que é escrita utilizando um referencial Lagrangiano. Este balanço de forças equaciona a inércia da partícula com as forças atuando na mesma e é escrita no plano cartesiano da seguinte forma:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (28)$$

Onde:

F_x é um termo de aceleração adicional (força por massa de uma unidade de partícula);

$F_D(u - u_p)$ é a força de arrasto por massa de uma unidade de partícula;

u é a velocidade da fase contínua;

u_p é a velocidade da partícula;

μ é a viscosidade molecular do fluido;

ρ é a densidade do fluido;

ρ_p é a densidade da partícula;

d_p é o diâmetro da partícula.

Sendo:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (29)$$

Outras forças podem estar associadas para serem implementadas outras condições, como a força requerida para acelerar o fluido que envolve a partícula ou forças referentes a um sistema rotativo, como uma turbomáquina por exemplo. Todas estas forças são acopladas ao termo F_x e são elas:

- Força para massa virtual;
- Força em referencial rotativo;
- Força termoforética;
- Força Browniana;
- Força Saffman Lift;

Cada um desses termos referentes a forças específicas devem ser estudados de acordo com o problema e adicionados caso seja de interesse.

A dispersão das partículas devido à turbulência na fase contínua, pode ser prevista utilizando um tratamento estocástico de monitoramento da partícula ou um modelo chamado de modelo de nuvem de partículas. O tratamento estocástico, chamado de *Random Walk*, inclui efeitos de flutuações instantâneas da velocidade turbulenta na trajetória da partícula, utilizando modelos estocásticos. O modelo de nuvem de partículas monitora a evolução estatística de uma nuvem de partículas pela trajetória média. A concentração de partículas na nuvem, é representada por uma função densidade de probabilidade Gaussiana (*Probability Density Function* – PDF) da trajetória média. No modelo estocástico tem ainda um modelo para geração ou dissipação da turbulência na fase contínua.

Quando um escoamento é turbulento, o movimento da partícula deve ser previsto utilizando a velocidade média do fluido, nas equações da trajetória. No tratamento estocástico, é prevista a dispersão turbulenta das partículas integrando as equações de trajetória de cada partícula, usando a velocidade instantânea do fluido (velocidade média

mais suas flutuações no tempo), pelo caminho da partícula, durante a integração. Computando a trajetória desta forma, utilizando um número representativo de partículas, os efeitos randômicos da turbulência na dispersão das partículas pode ser incluído.

Existe também a possibilidade de utilização de um tratamento estocástico chamado DRW (*Discrete Random Walk*), para determinar a velocidade instantânea do gás. No modelo DRW, as componentes de flutuação de velocidade estão em função do tempo e é uma função discreta por partes, constante. O seu valor randômico é mantido constante por um intervalo de tempo dado pelo tempo de vida característico de um turbilhão. Por isso esse modelo é também chamado de modelo de tempo de vida de um turbilhão, ou do inglês, *Eddy Lifetime Model*. Esta modelagem gera resultados não físicos em escoamentos com alta difusão e não homogêneo, como por exemplo partículas muito pequenas tendem a ficar uniformemente distribuídas. Apesar disto, o modelo mostrará a tendência destas partículas de se acumularem em regiões de baixo nível de turbulência.

O uso do conceito de escala do tempo integral é utilizado para esse tratamento da dispersão da partícula, que dá então o tempo gasto no movimento turbulento durante o caminho percorrido pela partícula, ds .

$$T = \frac{\int_0^\infty u_p'(t) u_p'(t+s) ds}{\bar{u}_p'^2} \quad (30)$$

O tempo integral é proporcional à taxa de dispersão da partícula, significando que valores mais altos de T , indicam um maior nível de movimentações turbulentas no escoamento. A difusividade da partícula é dada por $\overline{u_i' u_j'} T$.

Para pequenas partículas, que se movem de acordo com o fluido, o tempo integral se torna o tempo integral Lagrangiano de um fluido, T_L . Esta escala de tempo é aproximada por:

$$T_L = C_L \frac{k}{\epsilon} \quad (31)$$

Sendo, $C_L = 0.15$ para o modelo $k-\epsilon$ e suas variantes, $C_L = 0.30$ para o modelo RSM, $\omega = \frac{\epsilon}{k}$ para substituição na equação quando utilizar o modelo $k-\omega$ e suas variantes. A metodologia LES usa suas escalas de tempo equivalentes.

Como já citado, existe a possibilidade de interação entre fase discreta e fase contínua ou sem interação entre fase discreta e contínua. Os tratamentos são chamados de acoplamento de uma via ou de duas vias. No acoplamento de duas vias tem-se os impactos de uma fase na outra quanto à quantidade de movimento linear, troca de calor e massa. No momento em que a trajetória da partícula é computada, o software mantém o acompanhamento do calor, da massa e da quantidade de movimento linear ganhado ou perdido pela partícula. Essas quantidades acompanhadas podem ser incorporadas nos cálculos da fase contínua. Assim sendo, como a fase contínua sempre impacta na fase discreta, pode-se incorporar os efeitos das trajetórias da fase discreta no contínuo. As soluções são obtidas alternando a solução entre fase contínua e fase discreta, até que as soluções em ambas as fases parem de mudar.

Troca de quantidade de movimento linear: A transferência de quantidade de movimento linear da fase contínua para a fase discreta, é feita examinando a mudança de quantidade de movimento na partícula quando ela passa por cada volume de controle. É computado da seguinte forma:

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{outras} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (32)$$

onde:

μ é a viscosidade do fluido;

ρ_p é a densidade da partícula;

d_p é o diâmetro da partícula;

Re é o número de Reynolds relativo;

u_p é a velocidade da partícula;

u é a velocidade do fluido;

C_D é o coeficiente de arrasto;

$\dot{m}_p$ é o fluxo de massa das partículas;

Δt é o passo de tempo;

F_{outras} é qualquer outra força que venha a interagir no problema.

Essa troca de quantidade de movimento, aparece como um termo fonte de quantidade de movimento no balanço da quantidade de movimento da fase contínua.

Troca de calor: A transferência de calor da fase contínua para a fase discreta é feita examinando a mudança na energia térmica da partícula no momento em que ela passa por cada volume de controle do modelo. Para todos os casos que não forem de combustão, a troca de calor é dada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{\dot{m}_{p,0}}{m_{p,0}} \left[(m_{pin} - m_{pout}) [-H_{latref} + -H_{pyro}] - m_{pout} \int_{T_{ref}}^{T_{pout}} c_{pp} dT + m_{pin} \int_{T_{ref}}^{T_{pin}} c_{pp} dT \right] \quad (33)$$

onde:

$\dot{m}_{p,0}$ é a taxa inicial de fluxo de massa da injeção de partículas (kg/s);

$m_{p,0}$ é a massa inicial da partícula (kg);

m_{pin} é a massa da partícula na entrada da célula (kg);

m_{pout} é a massa da partícula na saída da célula (kg);

c_{pp} é a capacidade calorífica da partícula (J/kg-K);

H_{pyrol} é a quantidade de calor devido à pirólise (J/kg);

T_{pin} é a temperatura da partícula na entrada da célula (K);

T_{pout} é a temperatura da partícula na saída da célula (K);

T_{ref} é a temperatura de referência para entalpia (K);

H_{latref} é o calor latente na condição de referência (J/kg).

O calor latente na condição de referência para partículas é computado como a diferença entre as entalpias padrão de formação do gás e do líquido e pode ser tida como o calor latente nos pontos de ebulição como segue:

$$H_{latref} = H_{lat} - \int_{T_{ref}}^{T_{bp}} c_{pg} dT + \int_{T_{ref}}^{T_{bp}} c_{pp} dT \quad (34)$$

onde:

c_{pg} é a capacidade calorífica das espécies produto do gás (J/kg-K);

T_{bp} é a temperatura de ebulição (K);

H_{lat} é o calor latente na temperatura de ebulição (J/kg).

$$H_{latref} = H_{lat} - \int_{T_{ref}}^{T_{p,init}} c_{pg} dT + \int_{T_{ref}}^{T_{p,init}} c_{pp} dT \quad (35)$$

Onde:

$T_{p,init}$ é a temperatura inicial da partícula.

Troca de massa: a transferência de massa da fase discreta para a fase contínua é computada examinando a mudança de massa da partícula cada vez que ela passa por cada volume de controle. A mudança de massa é computada como:

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (36)$$

Capítulo III

3 – Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais adotados neste trabalho em sua parte experimental começaram com a construção de um porta amostra em curvas. Esta etapa consistiu no projeto e fabricação de um porta amostra que seja capaz de receber uma amostra curva (90°) sujeita a um desgaste erosivo no equipamento *Loop*.

Para os ensaios a serem realizados, um material deve ser adotado. O material a ser adotado deve garantir o desgaste erosivo puro e facilitar a determinação de variáveis como coeficiente de restituição, por exemplo.

Após a escolha do material dos corpos de prova, deve-se então fabricá-los. Estes devem estar em conformidade com o porta amostra e com o instrumento de medição de desgaste erosivo, de modo que se possa garantir o desgaste erosivo na amostra e se consiga medir esse desgaste. A forma como será feita a medição também deve ser clara, sendo neste caso a utilização do processo de interferometria a laser.

Como etapa seguinte, segue a preparação dos corpos de prova. Para que o transiente do desgaste erosivo seja menor, pede-se uma superfície com um bom acabamento (polido). Utilizou-se nesta preparação então quatro etapas, consistindo cada etapa na utilização de uma granulometria de lixa. Foi utilizado então uma lixa 200, uma lixa 400, uma lixa 600 e por último uma lixa 1000. Estando as amostras preparadas, segue então a preparação do experimento.

Os corpos de prova foram colocados no porta amostra e organizou-se as condições de operação. Deve-se fixar as amostras no porta amostra para que não haja vazamento de água. As velocidades de operação do escoamento devem ser selecionadas, assim como o tempo de duração do ensaio, a vazão de abrasivo e diâmetro do abrasivo.

Após estes procedimentos segue a realização dos experimentos e as análises laboratoriais dos resultados obtidos. A duração dos experimentos foi de 4 horas, com intervalos de meia em meia hora para a reposição da areia utilizada. E intervalos diários depois de uma hora de ensaio para resfriamento da água que chega a 50° C (o limite do equipamento é 60°C).

3.1 – Ensaio de erosão em curvas

Para o ensaio de erosão em curvas, foi utilizado um equipamento *Loop* com capacidade de injeção e separação de areia no escoamento (Figura 28).

O ensaio de erosão em curvas, mede o desgaste na curva por considerar que esta é a região onde a tubulação muda sua geometria, fazendo com que a partícula, por efeitos de inércia, colida com a parede da tubulação gerando um desgaste erosivo mais acentuado.

3.1.1 – Descrição do *Loop* de teste

O equipamento *Loop* consiste basicamente em um circuito fechado com duas bombas de deslocamento positivo ou uma bomba centrífuga. Um injetor de partículas faz a injeção de areia e um hidrociclone separa as partículas erosivas da fase contínua após sua passagem pela seção de teste. A Figura 27 apresenta o princípio de funcionamento do equipamento, onde BCP é uma sigla para Bomba por Cavidade Progressiva e o separador de abrasivo é um hidrociclone.

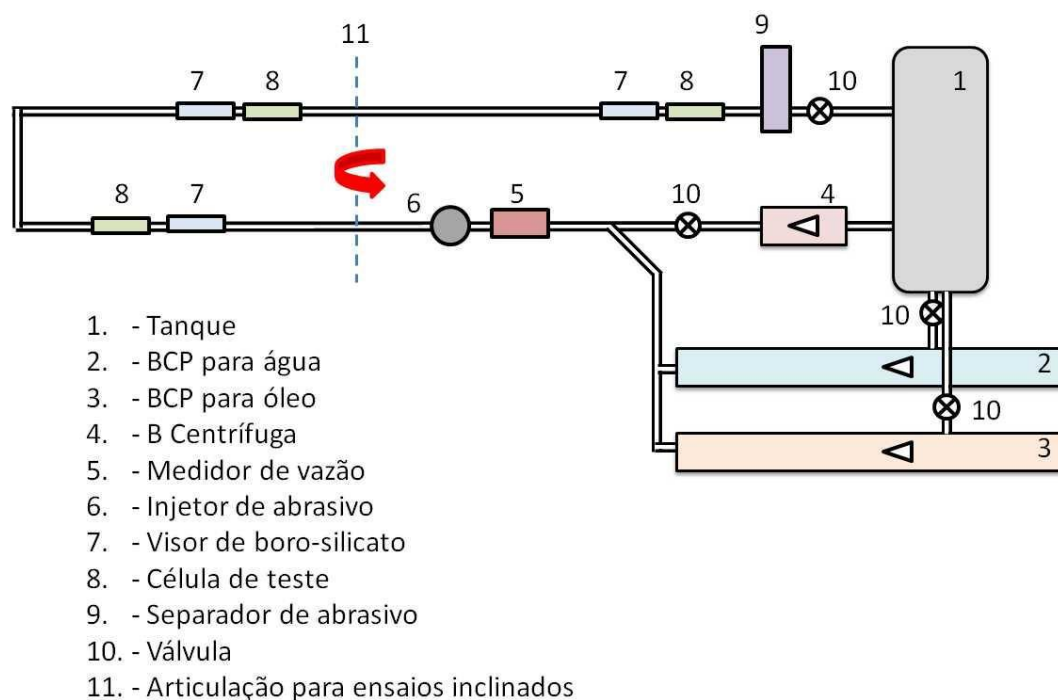


Figura 27: Esquema do equipamento *Loop*

A sua montagem no galpão do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste pode ser observada a partir da Figura 28.

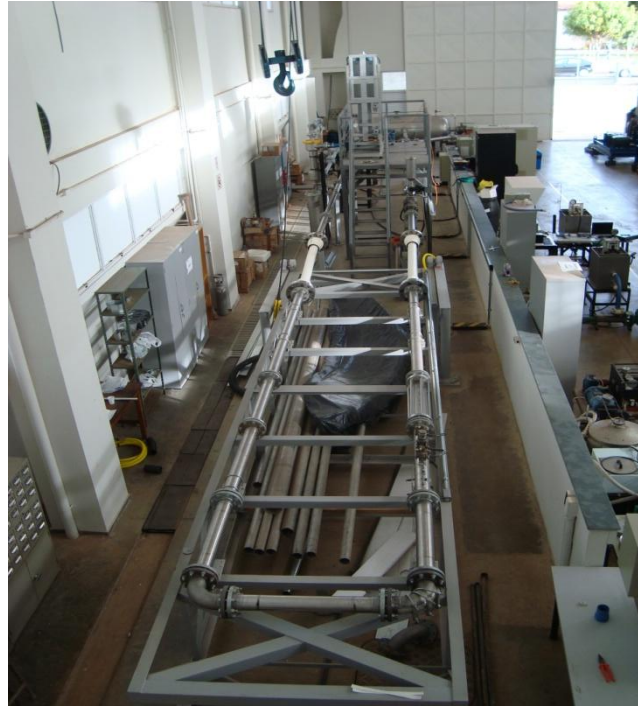


Figura 28: Loop no galpão do Laboratório de Tecnologia em Atrito e desgaste

3.1.2 – Projeto do porta-amostras

Chen, McLaury e Shirazi (2006) realizaram um experimento semelhante, incluindo validação de simulações computacionais, porém trabalharam com o transporte de areia com ar, e com o objetivo de comparar duas configurações de curvas diferentes e diferentes diâmetros de partículas (Figura 29), e os seus resultados foram de extrema importância para este trabalho.

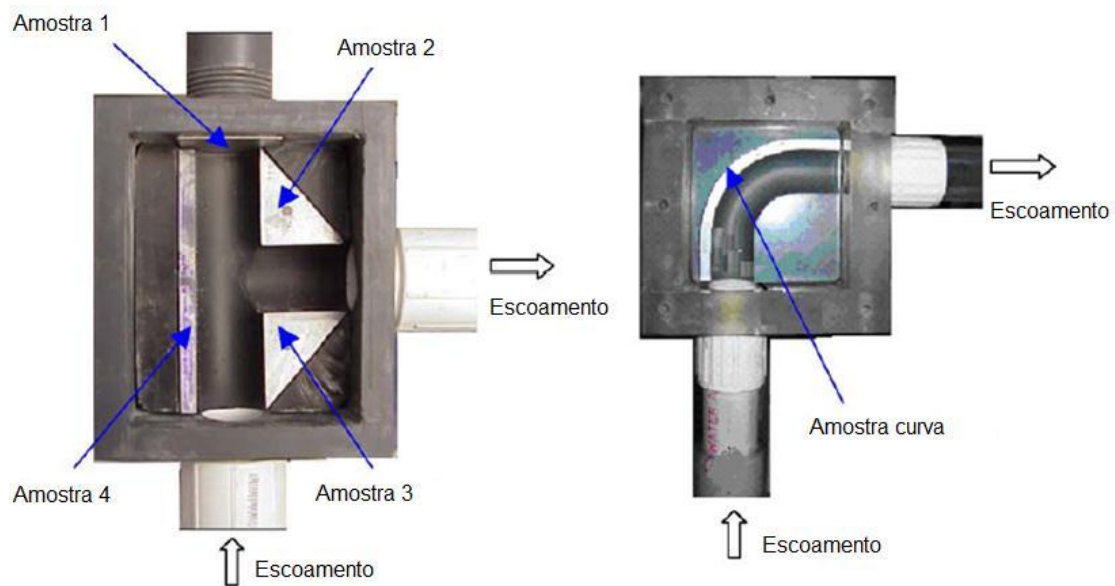


Figura 29: Porta amostras de Shen, McLaury e Shirazi (2006)

Uma curva foi adaptada para receber um corpo de prova que fosse capaz de sofrer desgaste erosivo puro (sem corrosão). A Figura 30a mostra o modelo do porta amostra como foi construído e a Figura 30b, mostra o porta amostra montado no *Loop*.

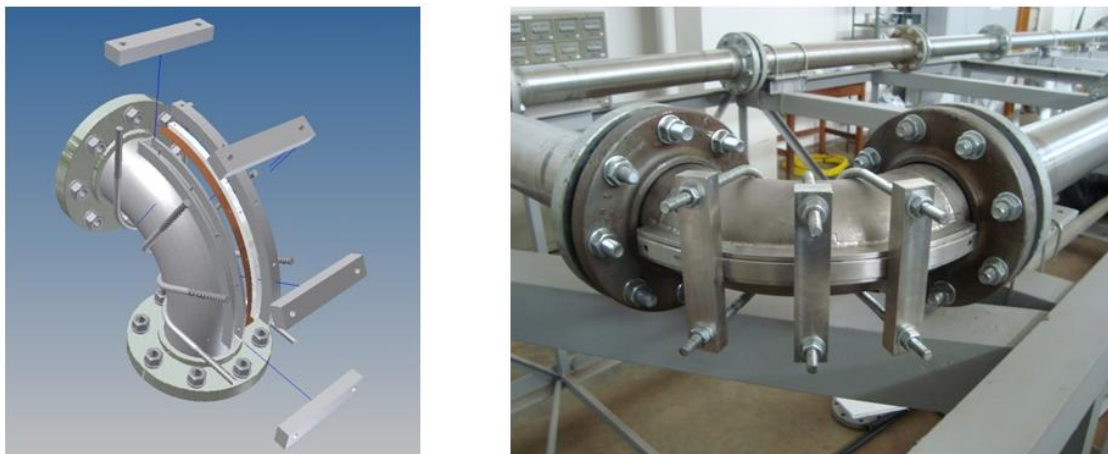


Figura 30: a) Modelo do porta amostra e b) Montagem no Loop

3.1.3 – Caracterização das amostras

A caracterização das amostras consiste em uma caracterização topográfica, caracterização das propriedades físicas e químicas e da caracterização das propriedades mecânicas.

A caracterização topográfica da amostra foi feita a partir do equipamento TalySurf CLI 2000, da marca TaylorHobson. O equipamento é capaz de medir características da superfície da amostra em uma seção ou em uma área. Neste trabalho a amostra foi dividida em nove seções de medição que estão contidas em um intervalo de ângulo de 90° . A cada 9° tomou-se uma seção de medição. A Figura 31 mostra como são as marcas de medição e a Figura 32 mostra as posições de medição. As marcas de medição servem como referência para que se possa realizar uma interferometria antes do ensaio e outra depois, sempre na mesma seção. Como as marcas incluem um risco por toda a amostra e outro risco a 60° cruzando o primeiro risco, por trigonometria sempre é possível saber onde foi realizada a leitura anterior.



Figura 31: Marcas na amostra para interferometria

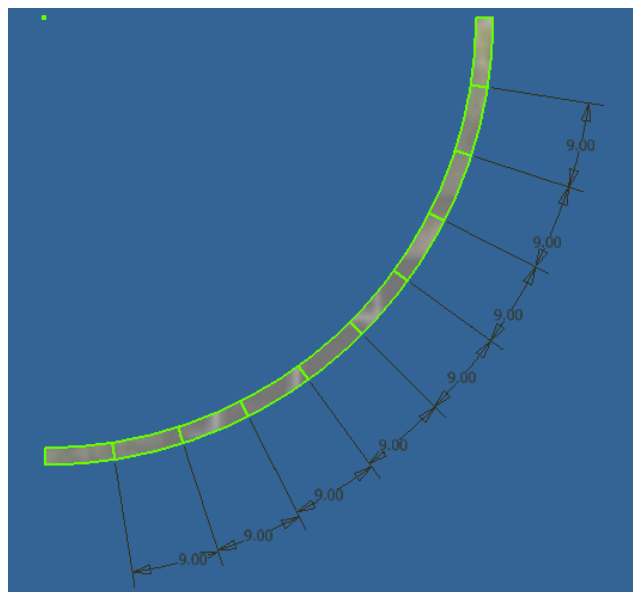


Figura 32: Posição de cada marca na amostra

As propriedades são provenientes do material utilizado: Alumínio comercialmente puro. Com base na Tabela 2 observa-se as propriedades do Alumínio. O material como mostrado na tabela, tem como principal diferença do material utilizado neste trabalho (Alumínio comercialmente puro), o seu valor de dureza Vickers. Por ter 99,5% de Alumina, o comercialmente puro tem uma dureza de aproximadamente 50HV, contra 99,99% de pureza e dureza de 15HV do Alumínio mostrado na tabela.

Tabela 2: Propriedades físicas, químicas e mecânicas do Alumínio (www.matweb.com)

Densidade	2,70 g/cc
Número Atômico	13
Potencial de Eletrodo	-1,69 V
Eletronegatividade	1,61
Raio Ionico	0,510 Å
Dureza Vickers	15,0
Módulo de Elasticidade	68 GPa
Coefficiente de Poisson	0,36
Tensão de Cisalhamento	25 GPa

3.1.4 – Parâmetros de ensaio erosivo

Para o ensaio erosivo, deve-se levar em conta o diâmetro médio dos grãos de partícula erosiva, o material dos grãos da partícula, velocidade da fase contínua, tempo de ensaio, diâmetro da tubulação, raio de curvatura e inclinação do experimento. Com base na Figura 33 admite-se uma distribuição normal do diâmetro das partículas, com a média em 244 μm de diâmetro.

Para o cálculo do diâmetro médio das partículas foram realizadas análises laboratoriais com microscopia ótica, com a finalidade de se obter a distribuição de diâmetro das partículas assim como sua relação entre maior e menor dimensão (razão de aspecto). Foram coletadas medições do perímetro de noventa partículas aleatoriamente, assim como a razão de aspecto de outras noventa partículas. Estes dados foram distribuídos em oito faixas, como pode ser observado na Figura 33 e na Figura 34.

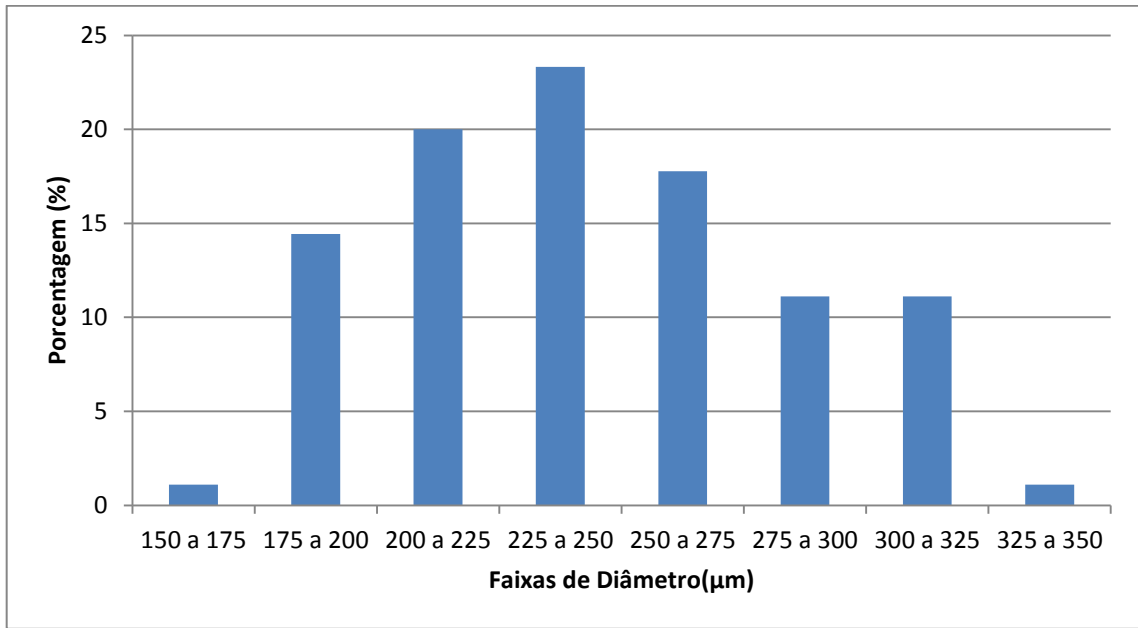


Figura 33: Distribuição de diâmetro de partícula abrasiva por porcentagem

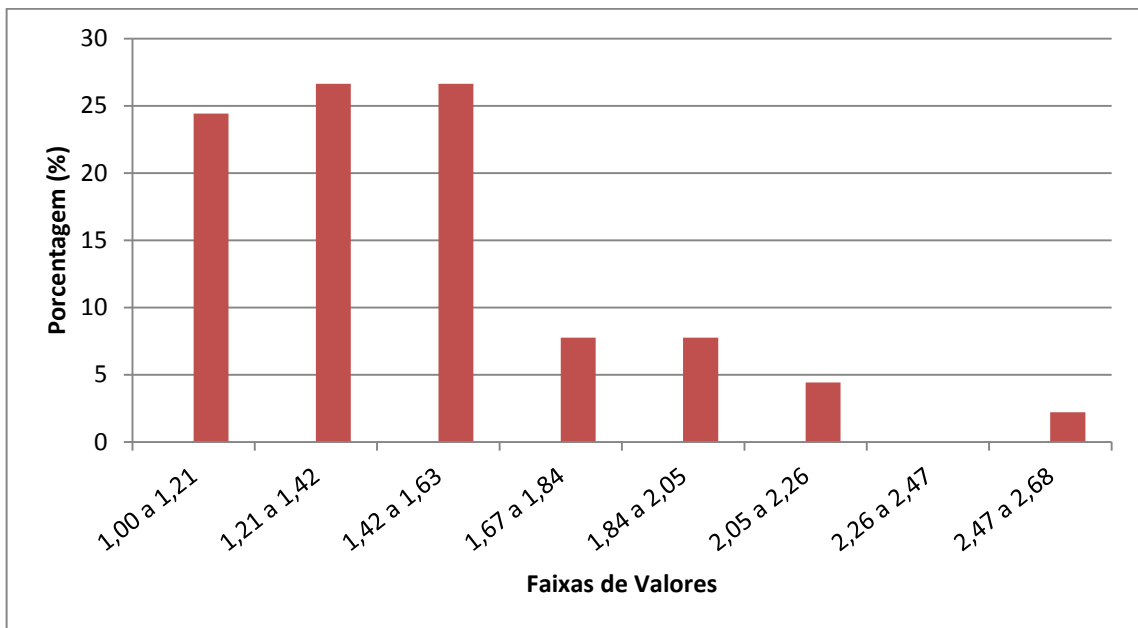


Figura 34: Relação entre maior aresta e menor aresta por porcentagem

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados no ensaio experimental de desgaste erosivo. A densidade utilizada, de 1600 kg/m^3 foi adotada com base na literatura do Fluent 12.1 Tutorial Guide (2010).

Tabela 3: Parâmetros do ensaio de erosão

Diâmetro médio das partículas	244 μm
Velocidade do escoamento	5,4 m/s
Fase contínua	Água
Diâmetro da tubulação	0,1016 m
Fase dispersa	Areia (1600 kg/m^3)
Vazão de areia	0,00355 kg/s
Tempo de ensaio	14400 s
Raio de curvatura da amostra	211,8 mm
Inclinação com a horizontal	0°

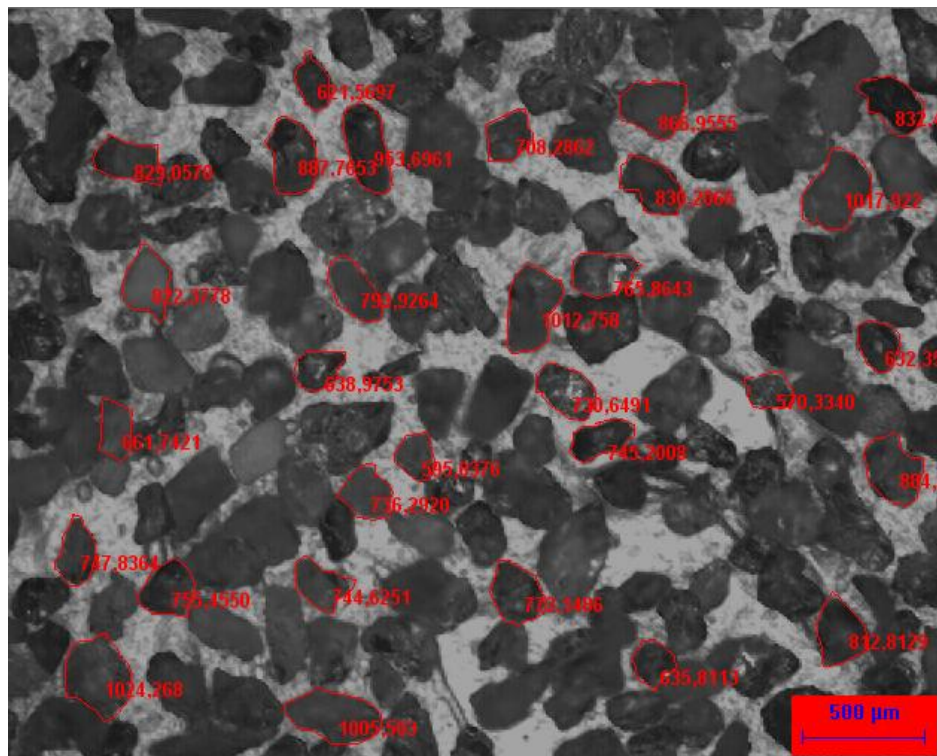


Figura 35: Medição do perímetro para determinação do raio

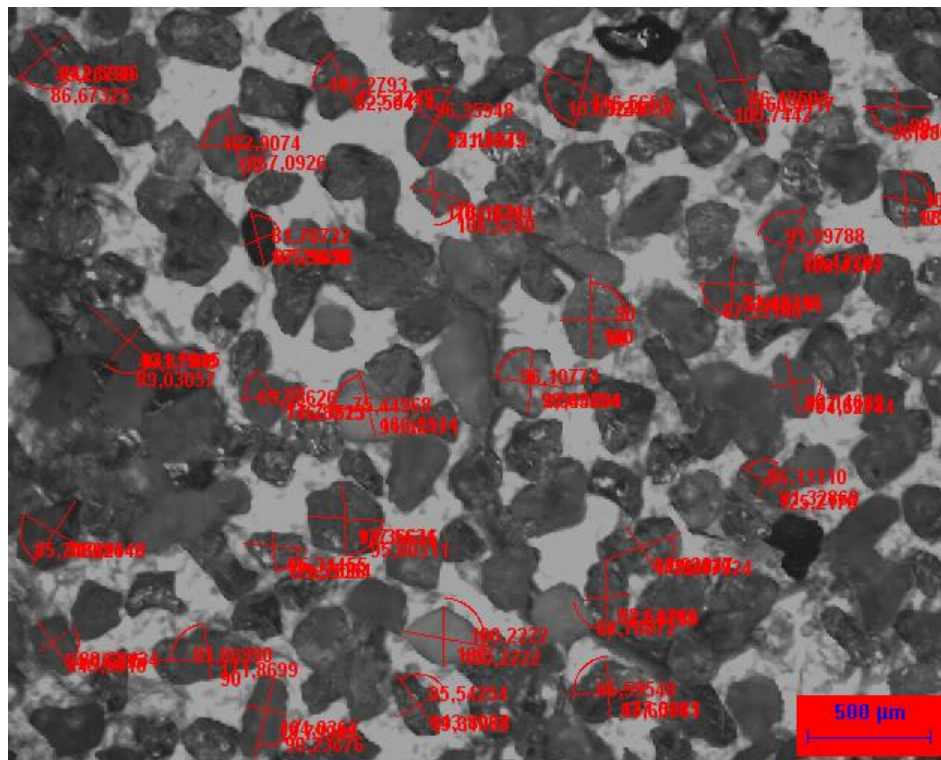


Figura 36: Medição de duas arestas para determinação da relação de aspecto

3.1.5 – Caracterização dos mecanismos de erosão (MEV)

Um microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo Supra 40, foi utilizado para a observação dos mecanismos de desgaste erosivo no corpo de prova. As amostras foram preparadas da seguinte forma:

- Cortadas e separadas 3 amostras:
 - Uma a aproximadamente 20°
 - Uma a aproximadamente 45°
 - Uma a aproximadamente 70°
- Limpas no ultrassom com álcool por 410 segundos;
- Secadas;

Após preparadas, as três amostras foram colocadas no porta amostra do microscópio eletrônico de varredura e foram observadas imagens com inclinação de 23° e ampliação de 200x, 800x e 2000x. Com essas aproximações é possível captar inclusive o risco formado pelo impingimento de um grão de partícula erosiva, mostrando o mecanismo

predominante de microcorte e microsulcamento, e ainda uma possível interação com a formação de óxidos de Alumínio.

3.2 – Análise computacional da erosão

A análise computacional da erosão foi realizada utilizando um software comercial para a dinâmica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O software em questão é o software Fluent (ANSYS, Inc.).

A análise do escoamento foi feita através da metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*), utilizando o modelo k- ω -SST. Para a análise da fase discreta, assim como o desgaste erosivo, foi utilizado o modelo de fase discreta DPM (*Discrete Phase Model*), utilizando as mesmas condições do experimento como condições de contorno, como velocidades, diâmetro de tubulação. Utilizando estes modelos implementados no software Fluent (ANSYS, Inc.), foi realizada a simulação computacional para que haja um comparativo entre o resultado do teste e o resultado numérico.

Além do caso comparativo, que utiliza as mesmas condições do experimento, outras análises foram realizadas via CFD, com outras velocidades de escoamento, com outros fluidos de trabalho e outros materiais. As configurações propostas são configurações que provavelmente serão utilizadas posteriormente no *Loop*.

São elas:

- Escoamento com água e areia nas velocidades de 1, 2, 3, 4 e 5,4 m/s, em uma tubulação semelhante à do *Loop*, com análise da erosão em Alumínio comercialmente puro;
- Escoamento com ar e areia nas velocidades de 10, 15 e 25 m/s, em uma tubulação semelhante à do *Loop*, com análise da erosão em Alumínio comercialmente puro;
- Escoamento com ar e areia nas velocidades de 10, 15 e 25 m/s, em uma tubulação semelhante à do *Loop*, com análise da erosão em aço 4140;
- Escoamento com água, ar e areia na velocidade de 1,5 m/s para a fase água e 15 m/s para a fase ar, em uma tubulação semelhante à do *Loop*, com análise da erosão em Alumínio comercialmente puro.

Para a simulação numérica, foi utilizada uma estrutura composta de um computador com dois processadores Intel Quad Core Xeon X5570 2.93GHz, 8MB de memória cache e 24GB de memória RAM.

Dadas as condições do escoamento, deve-se então atentar para as condições de contorno e outros parâmetros da simulação computacional. A Figura 37 representa a geometria utilizada, que por sua vez representa a geometria real do equipamento na seção de teste. Nesta mesma figura, pode-se observar o sistema de referências e a malha

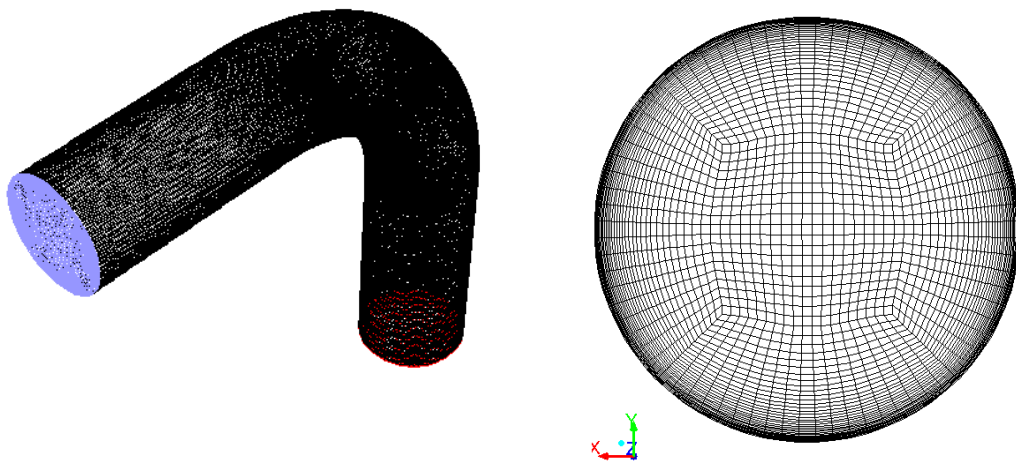


Figura 37: Geometria e malha para simulação computacional

As condições de contorno, operação da simulação, do fluido e da malha são:

Tabela 4: Condições de simulação para o fluido

Face azul	Condição de entrada de velocidade
Face vermelha	Condição de saída livre
Face preta	Condição de parede
Aceleração da gravidade	9.81 m/s na direção e sentido do eixo x negativo
Malha	1130880 células

As condições de contorno da fase discreta são:

Tabela 5: Condições da fase discreta

Distribuição de partículas	Distribuição normal pela área da face de entrada de velocidade, com diâmetro mínimo de 150 μm e máxima de 350 μm
Face azul	Injeção de partículas igualmente distribuídas pela área na direção do eixo z negativo
Face vermelha	Condição de escape de partículas
Face preta	Condição de parede com reflexão de partículas

Para a condição de parede de reflexão de partículas, alguns parâmetros devem ser entrados, como coeficientes de reflexão em função do ângulo de impacto, função do ângulo de impacto de acordo com o material, função da velocidade e função do diâmetro da partícula. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

Tabela 6: Variáveis empíricas utilizadas nas condições de contorno

Coeficiente de reflexão paralelo (areia impingindo no Alumínio)	$0,998 - 1,66\theta + 2,11\theta^2 - 0,67\theta^3$
Coeficiente de reflexão perpendicular (areia impingindo no Alumínio)	$0,993 - 1,76\theta + 1,56\theta^2 - 0,49\theta^3$
Coeficiente de reflexão paralelo (areia impingindo no aço)	$1 - 0,78\theta + 0,84\theta^2 - 0,21\theta^3 + 0,028\theta^4 - 0,022\theta^5$
Coeficiente de reflexão perpendicular (areia impingindo no aço)	$0,988 - 0,78\theta + 0,19\theta^2 - 0,024\theta^3 + 0,027\theta^4$
Função do ângulo de impacto	Uma <i>piecewise linear</i> para materiais de comportamento dúctil
Função da velocidade	Valor constante de 2,6
Função do diâmetro da partícula	Valor constante de 1,8e-9

A função *piecewise linear* é uma função por partes e se apresenta de acordo com a Figura 38.

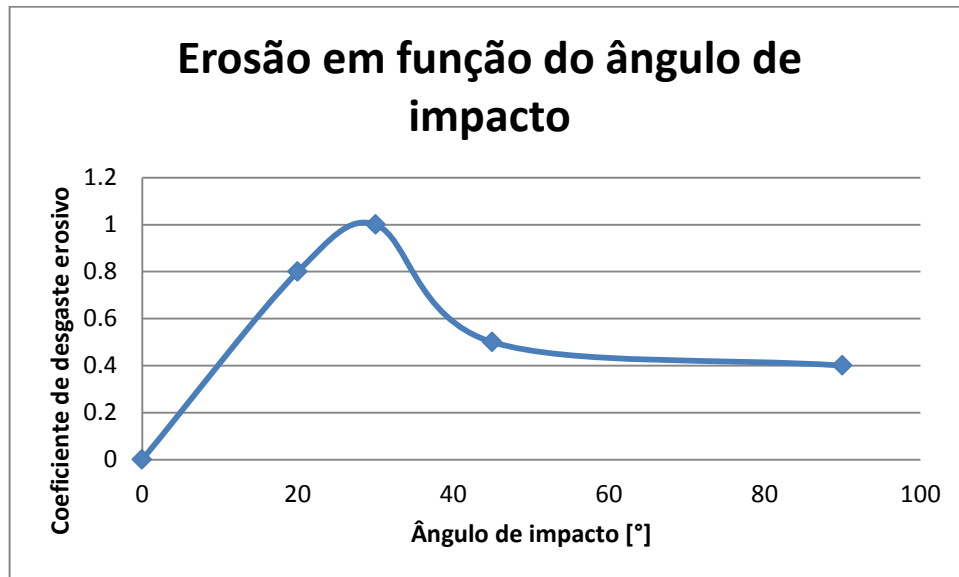


Figura 38: Erosão em função do ângulo de impacto (Fluent 12.1 Tutorial Guide, 2010)

Outro fator importante a ser tratado é sobre o coeficiente de restituição. Os coeficientes de restituição apresentados estão na forma de uma função polinomial, mas foram aproximados durante a simulação, para uma função por partes também. Tal fato se deve pela dificuldade de convergência obtida ao usar a função polinomial. A substituição por uma função por partes não aparenta ter nenhum problema significativo, observando a Figura 39.

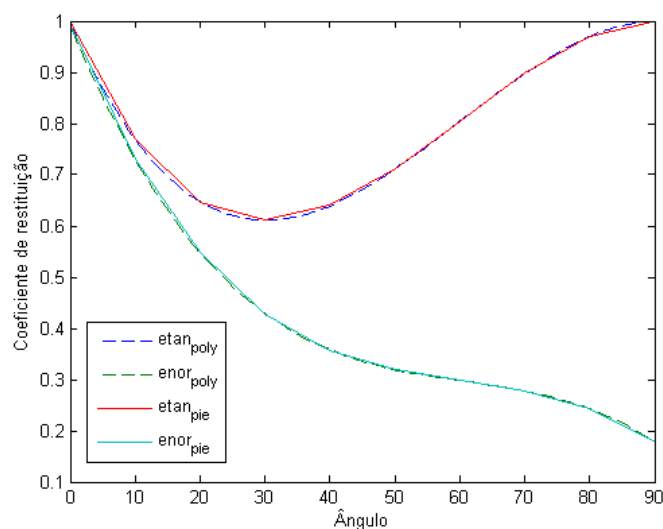


Figura 39: Comparação do coeficiente de restituição segundo uma função polinomial e uma função por partes

Ainda durante as etapas de testes, utilizando o coeficiente de restituição proposto por uma função polinomial de acordo com o Fluent 12.1 Tutorial Guide (2010), os resultados foram completamente diferentes, mostrando a importância de se utilizar os valores corretos de coeficientes de restituição. Estes coeficientes podem ser observados na Figura 40.

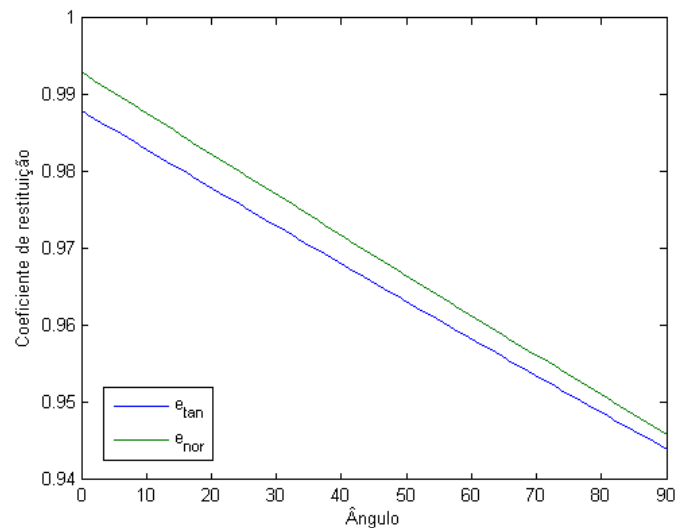


Figura 40: Coeficiente de restituição proposto pelo Fluent 12.1 *tutorial guide* (2010)

3.2.1 – Validação através do modelo

Uma forma de comparação entre resultados experimentais e numéricos é utilizar os resultados de interferometrias feitas ao longo do tempo e comparando com a taxa de desgaste obtida pelo cálculo numérico.

O cálculo numérico fornece como informação direta a perda de massa por área no decorrer do tempo, através de uma solução no regime estacionário. Já a interferometria fornece a perda de espessura em cada dois instantes diferentes de medição (uma medição antes e uma após o ensaio no *Loop*). Com isso, o procedimento é buscar na simulação, a região de maior desgaste e comparar com a mesma região (ou a mais próxima), na interferometria. Isso dará a possibilidade de confirmar se o procedimento numérico é confiável.

Utilizando este mesmo material (Alumínio), e com estas mesmas variáveis, Chen, McLaury e Shirazi (2006) conseguiram validar o seu trabalho. O objeto do estudo era outro. Era necessário verificar através de simulações computacionais, duas geometrias diferentes

de curvas transportando água e areia, observando em qual ocorria um desgaste erosivo mais severo. Para tanto, o trabalho foi validado com experimentos. Ainda diferentemente deste trabalho, Chen, McLaury e Shirazi (2006), não levaram em conta os efeitos da fase discreta no escoamento contínuo, caracterizado como acoplamento de duas vias.

3.2.2 – Simulação da erosão em escoamentos bifásicos

Para a simulação em escoamento bifásico, outras condições foram adotadas. O regime do escoamento, por exemplo, é transiente neste caso. No caso de escoamento bifásico, devido ao equipamento experimental ainda não operar com água e ar ou óleo e água, por exemplo, fica inviável de se fazer esta validação. Mas como o modelo de erosão foi validado utilizando apenas água, pode-se assumir que o modelo de erosão é um bom modelo também para o escoamento bifásico.

De acordo com Silva, Franco e Moraes (2008), ficou definida a estratégia adotada para a simulação de um escoamento bifásico, ar-água. Na ocasião, foi simulado um escoamento bifásico *slug* utilizando diferentes metodologias, RANS e LES, em duas dimensões como mostra a Figura 41 e a Figura 42. Como conclusão final chegou-se à configuração da simulação utilizando RANS com o modelo k- ω -sst, que atendia às necessidades (identificação do padrão de escoamento via simulação). Os resultados observados estão plotados mostrando a fração volumétrica da fase gasosa. As simulações foram realizadas em duas dimensões.

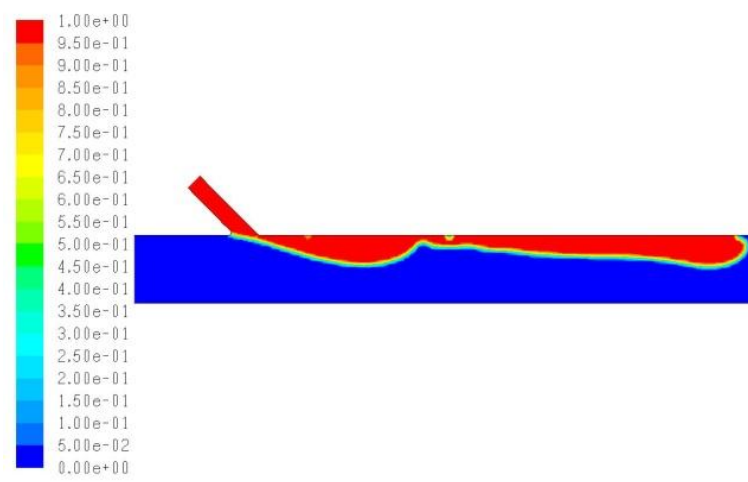


Figura 41: Escoamento bifásico utilizando metodologia RANS e modelo k- ω -sst

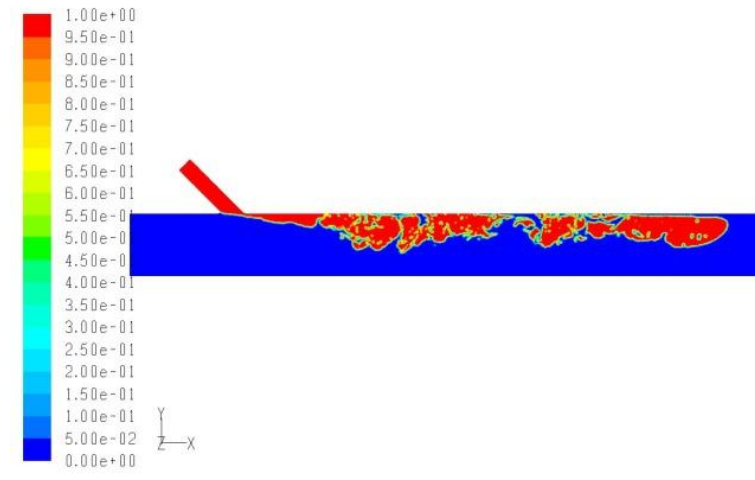


Figura 42: Escoamento bifásico utilizando metodologia LES e modelo Smagorinsky-Lilly

Dada a confiabilidade da metodologia, do modelo de turbulência e do modelo de fase discreta em um meio contínuo, ficou definida então a forma como simular o desgaste erosivo em uma tubulação com escoamento bifásico ar-água. A geometria utilizada pode ser observada na Figura 43, e a malha utilizada é a mesma mostrada na Figura 37.

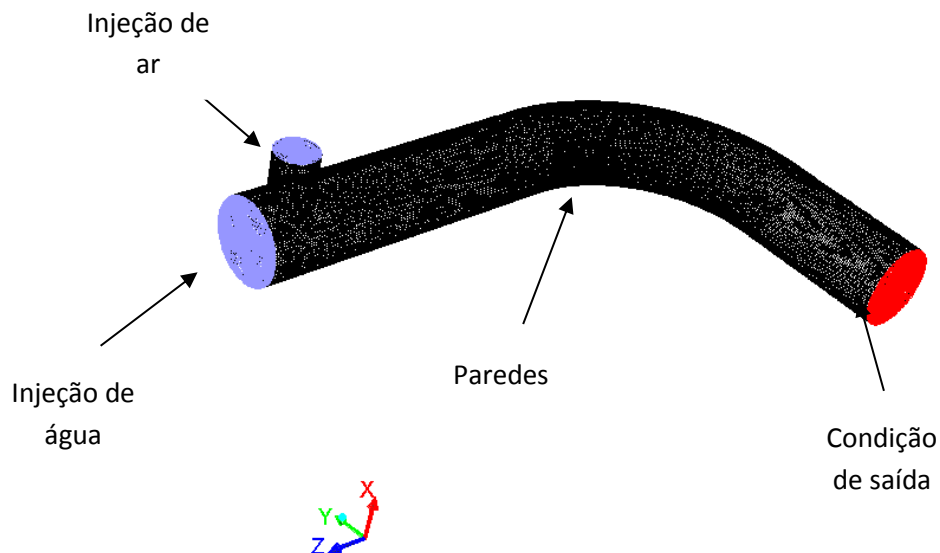


Figura 43: Malha e geometria utilizada no escoamento bifásico

As condições de contorno que contêm variáveis empíricas utilizadas nas condições de reflexão das paredes são as mesmas utilizadas na Tabela 6, haja vista que os materiais tanto da tubulação quanto do particulado são os mesmos.

As condições de contorno da fase discreta são:

Tabela 7: Condições de contorno da fase discreta

Distribuição de partículas	Distribuição normal pela área da face de entrada de velocidade, com diâmetro mínimo de 150 μm e máxima de 350 μm
Face azul (Injeção de água)	Injeção de partículas igualmente distribuídas pela área na direção do eixo z negativo
Face azul (Injeção de ar)	Condição de escape de partículas
Face vermelha	Condição de escape de partículas
Face preta	Condição de parede com reflexão de partículas

Capítulo IV

4 – Resultados e Discussões

Nesta etapa do trabalho são apresentados os resultados obtidos e são feitas discussões sobre os mesmos. Resultados tanto do procedimento experimental quanto do procedimento computacional estão presentes, e muitos deles em forma de gráficos para o melhor entendimento.

4.1 – Erosão em Alumínio comercialmente puro

A erosão máxima no Alumínio, um material de comportamento dúctil, é esperada que seja a ângulos de impacto de 30°. Esta informação é conhecida, mas não é possível saber exatamente onde ocorreu este tipo de impacto na amostra utilizada, sem uma análise microscópica para tentar identificar o mecanismo de erosão.

4.1.1 – Perda de espessura

Como característica do impingimento de partículas erosivas em uma superfície tem-se a perda de espessura da amostra, ou uma mudança topográfica da amostra.

Da Figura 44 até a Figura 52 estão compreendidos os resultados das interferometrias na superfície da amostra, em diferentes pontos de medição. As amostras foram retiradas do escoamento água-areia.

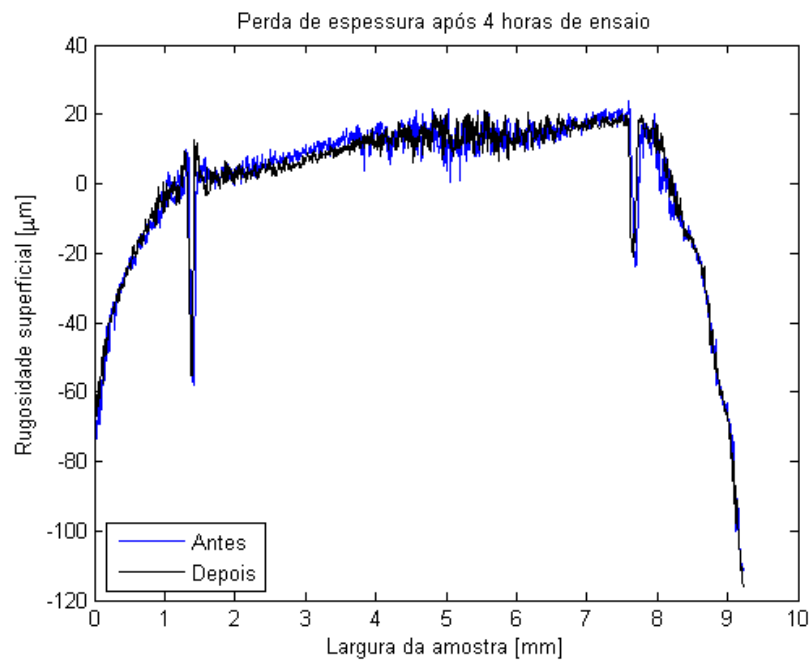


Figura 44: Variação da espessura da amostra a 9°

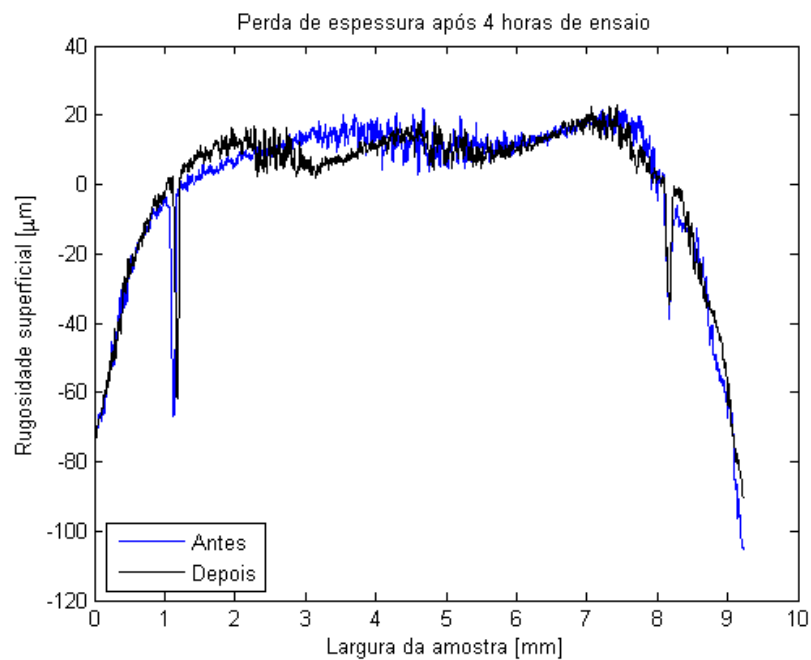


Figura 45: Variação da espessura da amostra a 18°

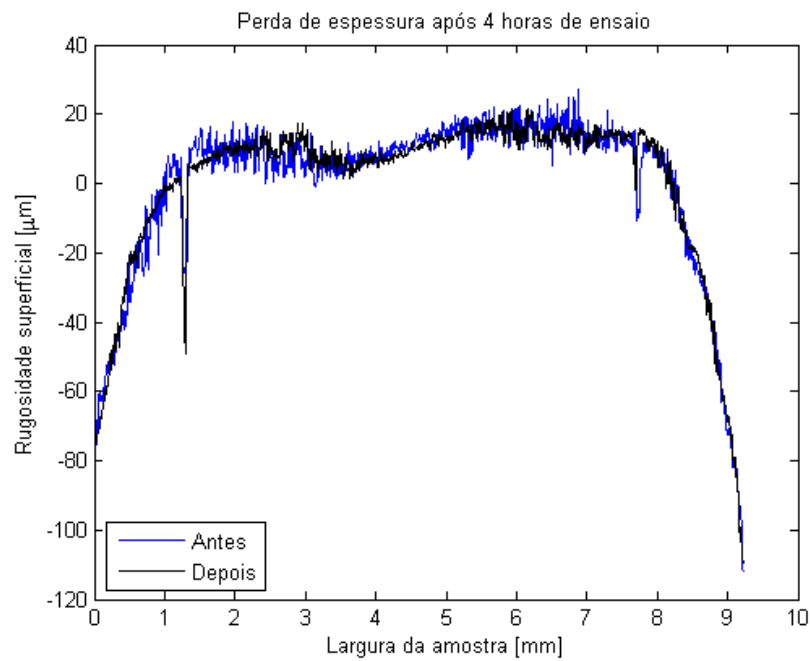


Figura 46: Variação da espessura da amostra a 27°

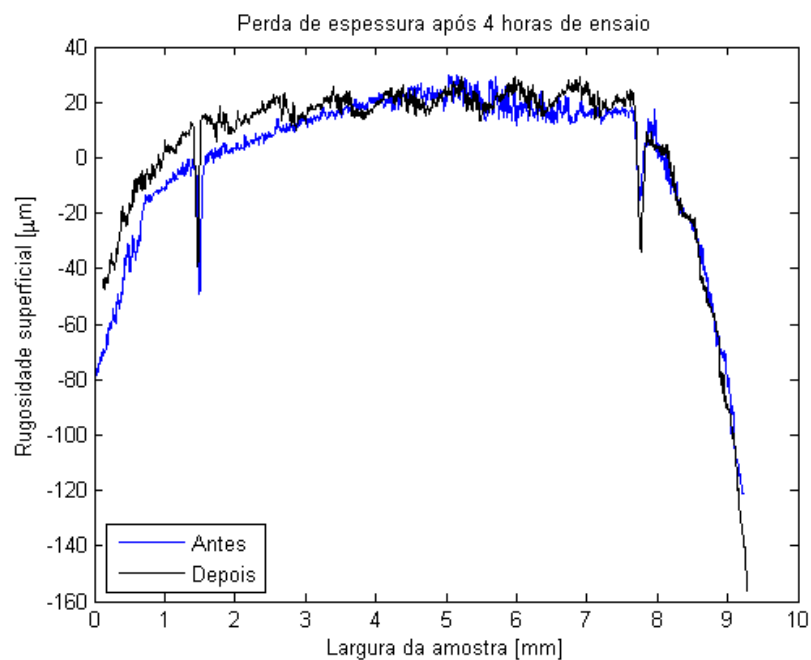


Figura 47: Variação da espessura da amostra a 36°

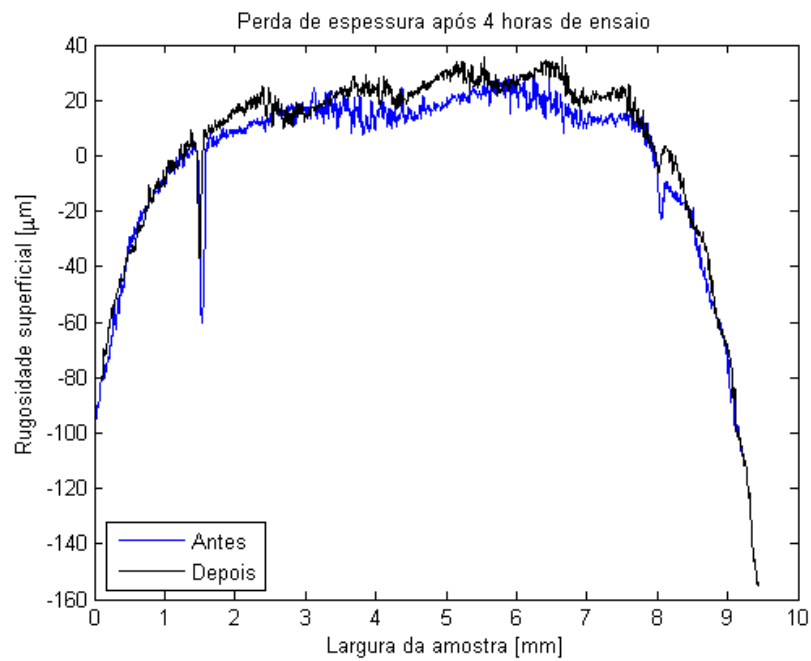


Figura 48: Variação da espessura da amostra a 45°

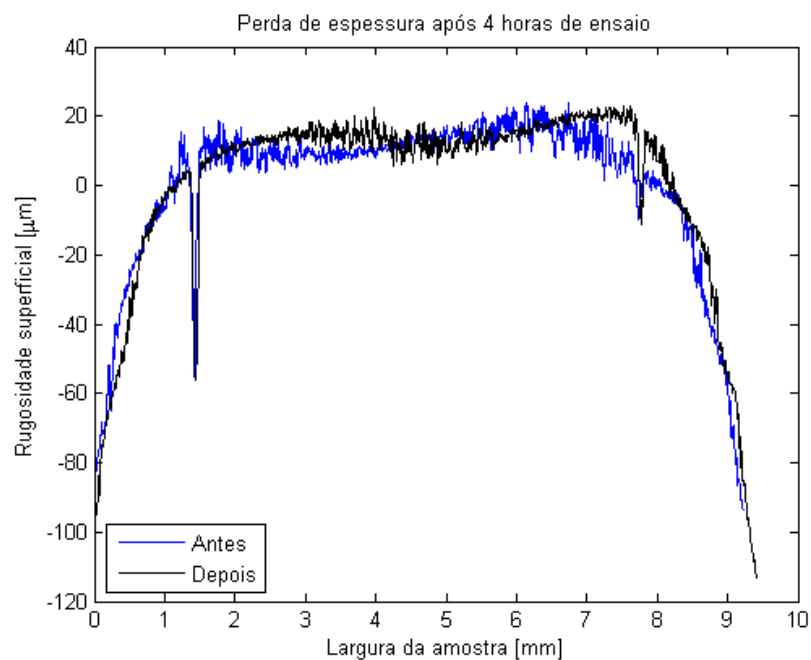


Figura 49: Variação da espessura da amostra a 54°

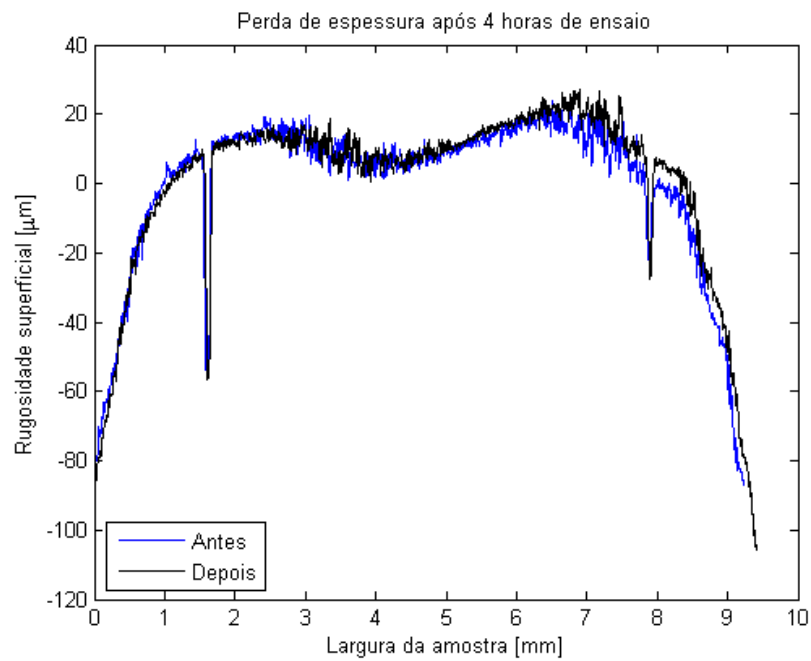


Figura 50: Variação da espessura da amostra a 63°

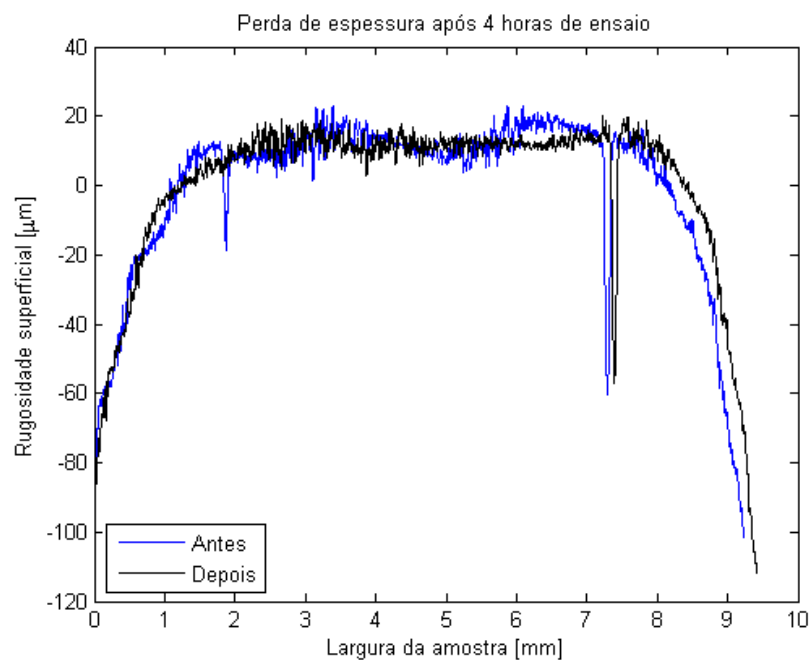


Figura 51: Variação da espessura da amostra a 72°

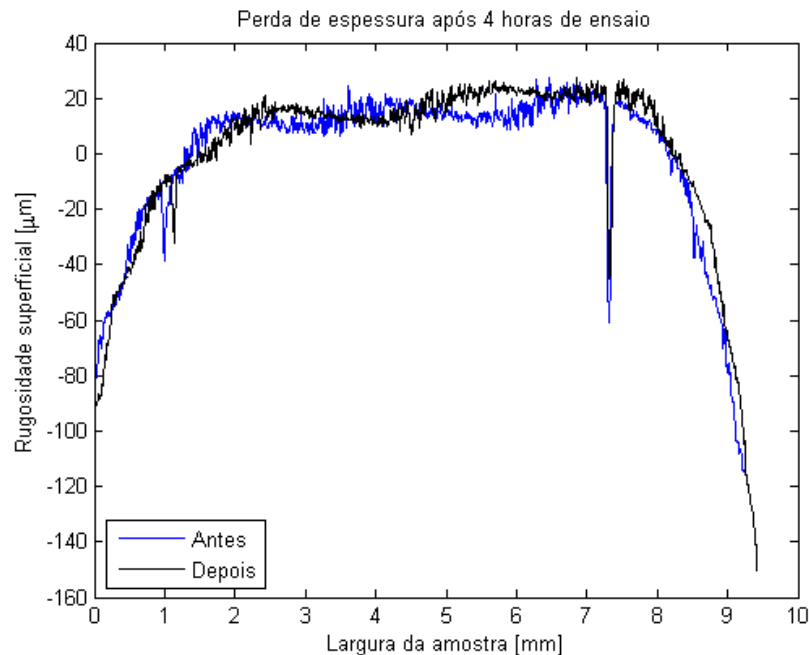


Figura 52: Variação da espessura da amostra a 81°

A partir dos resultados das interferometrias, após quatro horas de ensaio não se pode observar um desgaste erosivo mensurável pela técnica de interferometria a laser. Observou-se uma variação da espessura do material se comparado com as medidas anteriores, principalmente na região de 45°. Porém há um incremento da espessura do material, provavelmente pela formação de pontos de corrosão. Na observação visual, há uma mudança na coloração do material, o que indica a formação de uma camada de óxidos que podem ter se dado também pela variação de temperatura (variou entre temperatura ambiente e aproximadamente 60°).

Há um erro associado na medição, devido ao fato de a amostra ser curva e a interferometria ser feita a laser. Apesar dessa possibilidade não seria suficiente para dizer que a pouca diferença de espessura após o ensaio, foi por causa de um erro de medição. É realmente um resultado o qual não se pode afirmar que houve desgaste erosivo suficiente para ser capturado por uma interferometria a laser.

4.1.2 – Mecanismos de erosão

Com os dados obtidos então pela microscopia eletrônica de varredura, pode-se observar o mecanismo de desgaste atuante no experimento realizado. Em todas as figuras a direção do escoamento é da direita para esquerda, estando indicadas por setas nas figuras.

A Figura 53, mostra a primeira amostra selecionada em que está localizada na região de aproximadamente 20° em relação ao escoamento. Podem-se observar pequenas protuberâncias que sinalizam a formação de pontos de corrosão. Estes pontos de corrosão provavelmente são devido ao rompimento da camada apassivadora no momento do impacto e subsequente formação de uma camada de óxido de alumina. Alguns pequenos riscamentos também podem ser observados, sugerindo o desgaste erosivo. Na Figura 54 e na Figura 55 já podem ser observados os óxidos formados assim como os riscos (em maiores dimensões devido a um aumento maior) decorrentes do processo de desgaste erosivo. Ainda como resultado da oxidação, algumas regiões apresentam trincas que normalmente acontecem quando ocorre o impingimento de uma partícula a altos ângulos, em um material de comportamento frágil. Não parece ser o caso deste experimento. Aparenta estar ligado à natureza comportamental de óxidos de alumina formados no processo corrosivo, e que por sua vez são solicitados de forma a apresentar esse comportamento de trincamento e posterior destacamento.

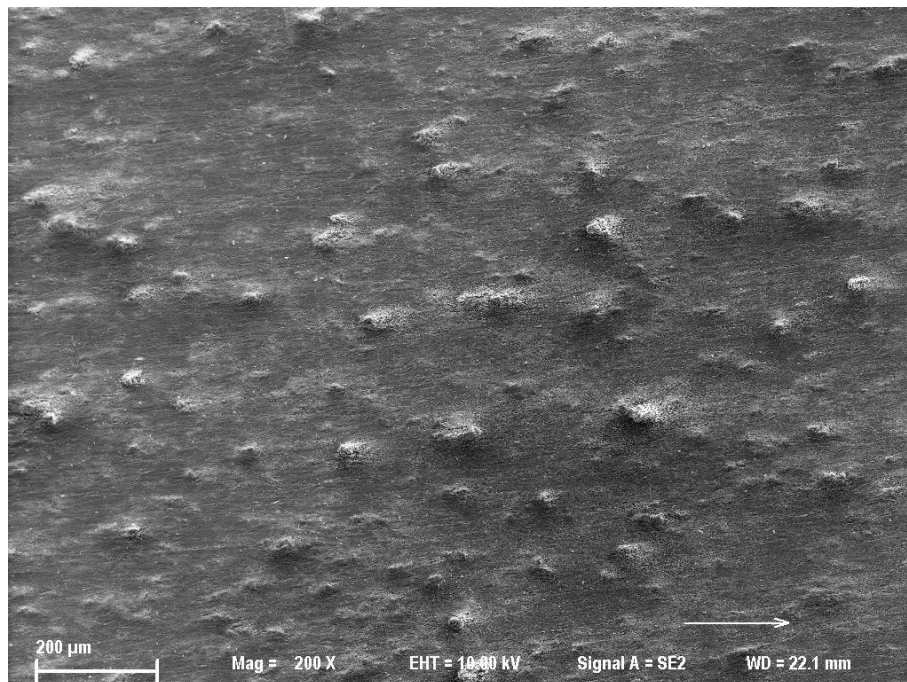


Figura 53: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 200x

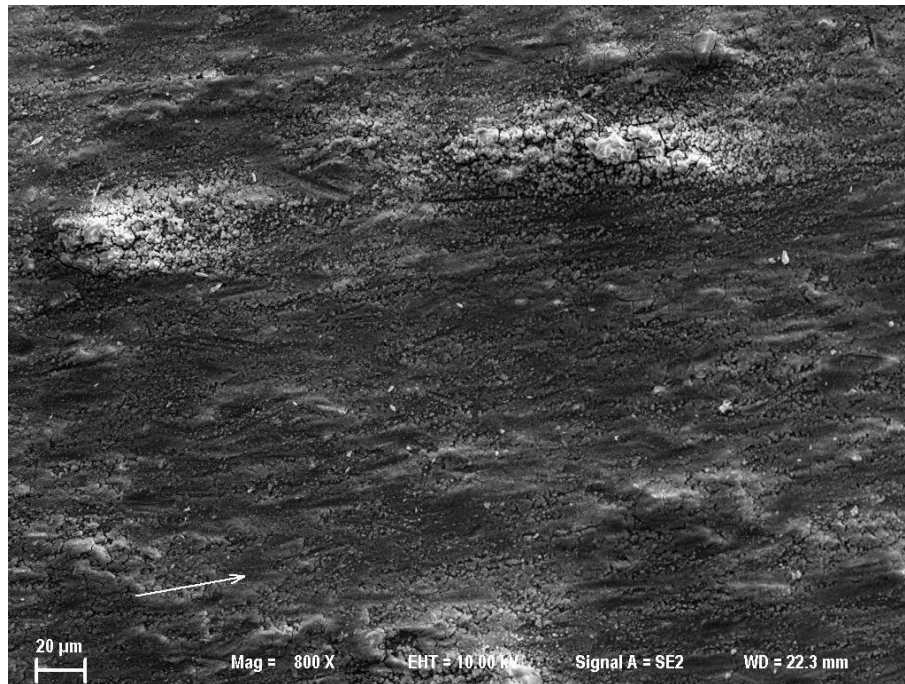


Figura 54: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 800x

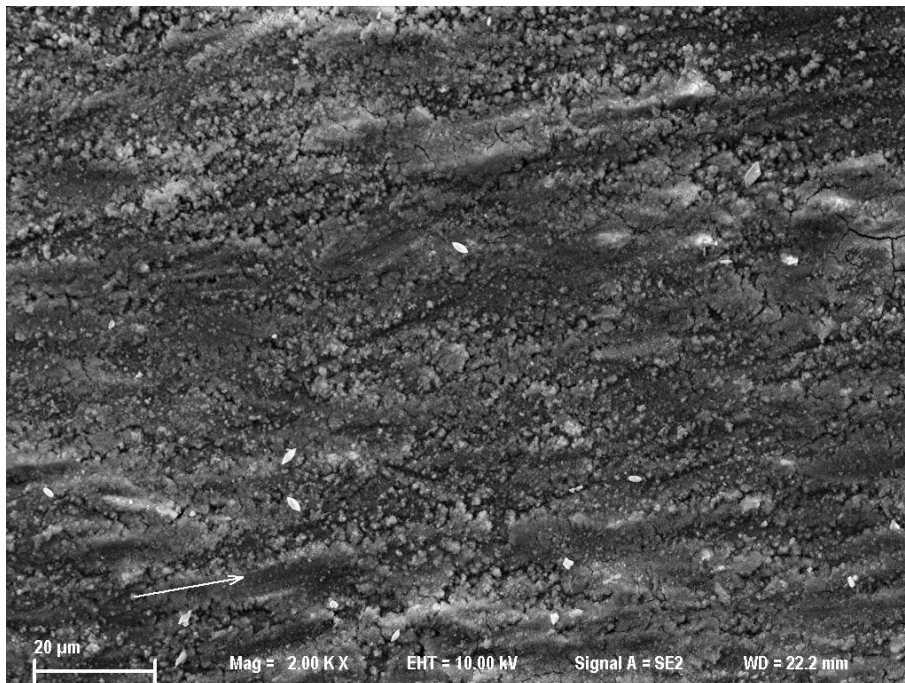


Figura 55: MEV na região de ângulo de aproximadamente 20° com ampliação de 2000x

Nas figuras subsequentes (Figura 56 à Figura 61), observa-se basicamente o mesmo mecanismo ocorrendo em outras seções da amostra (aproximadamente 45° e aproximadamente 90°). Porém devido a essa angulação diferente, a severidade do desgaste aumenta também, o que era de se esperar.

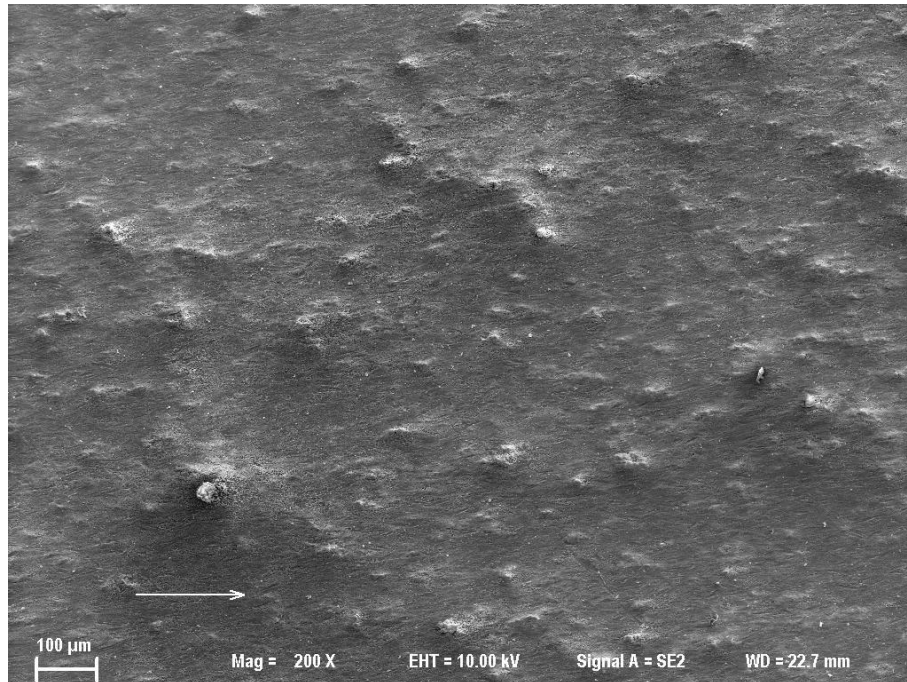


Figura 56: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 200x

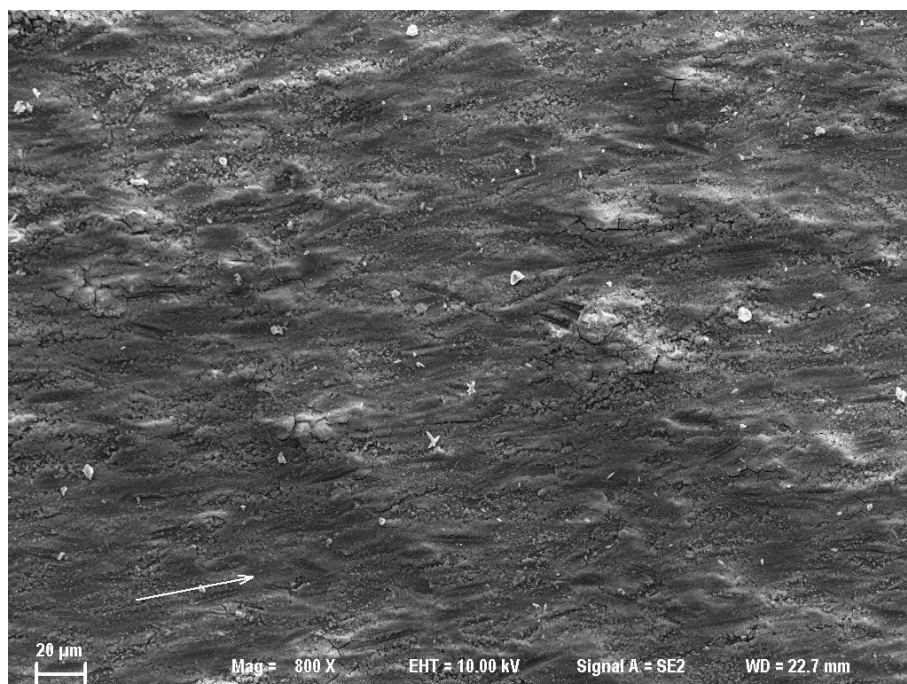


Figura 57: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 800x

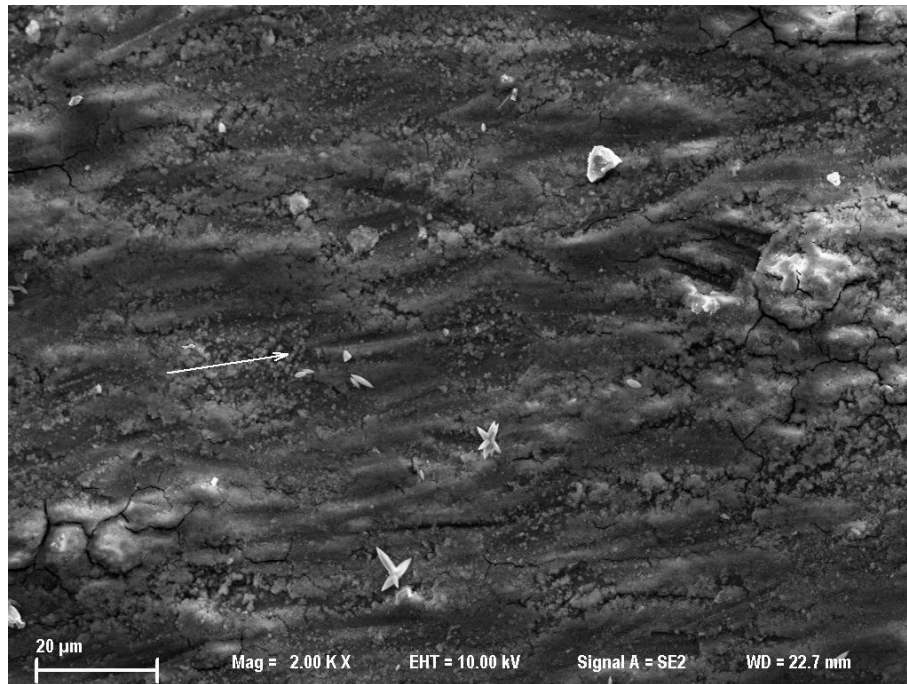


Figura 58: MEV na região de ângulo de aproximadamente 45° com ampliação de 2000x

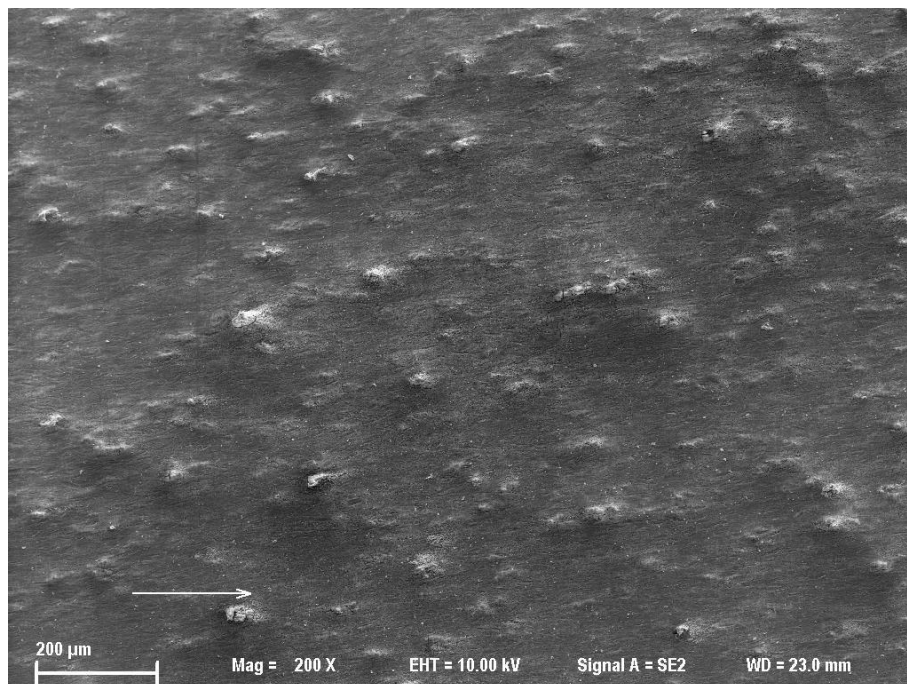


Figura 59: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 200x



Figura 60: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 800x

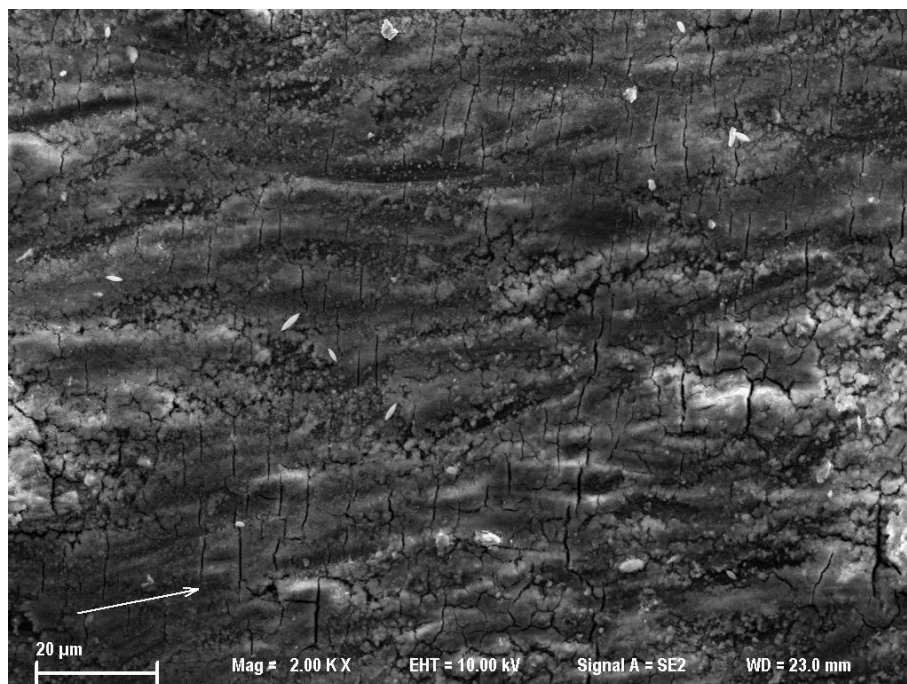


Figura 61: MEV na região de ângulo de aproximadamente 70° com ampliação de 2000x

4.2 – Simulação da erosão

Nas simulações computacionais da erosão, tem-se a taxa de perda de espessura por unidade de tempo. Também pode-se observar o comportamento do material abrasivo (areia) sob diversas condições e magnitudes de forças atuantes.

Segundo Franco, S. D. (2011), velocidades muito baixas no escoamento de água, prejudicam o transporte de particulados, causando a deposição dos mesmo na porção inferior da tubulação. De fato isto se confirma, observando os resultados das simulações realizadas a baixas velocidades. A baixas velocidades do escoamento há uma predominância de forças gravitacionais influenciando nesse processo de deposição. Por isso foram realizadas simulações a velocidades de 1m/s acima, pois nesta velocidade já apresenta indícios de deposição. De acordo com a Figura 62 e a Figura 63, observa-se taxas de desgaste muito pequenas mostrando ainda uma concentração desse desgaste na parte inferior da tubulação. Essa maior concentração do desgaste na parte inferior é devido ao efeito da gravidade sobreposto ao efeito da força do escoamento nas partículas.

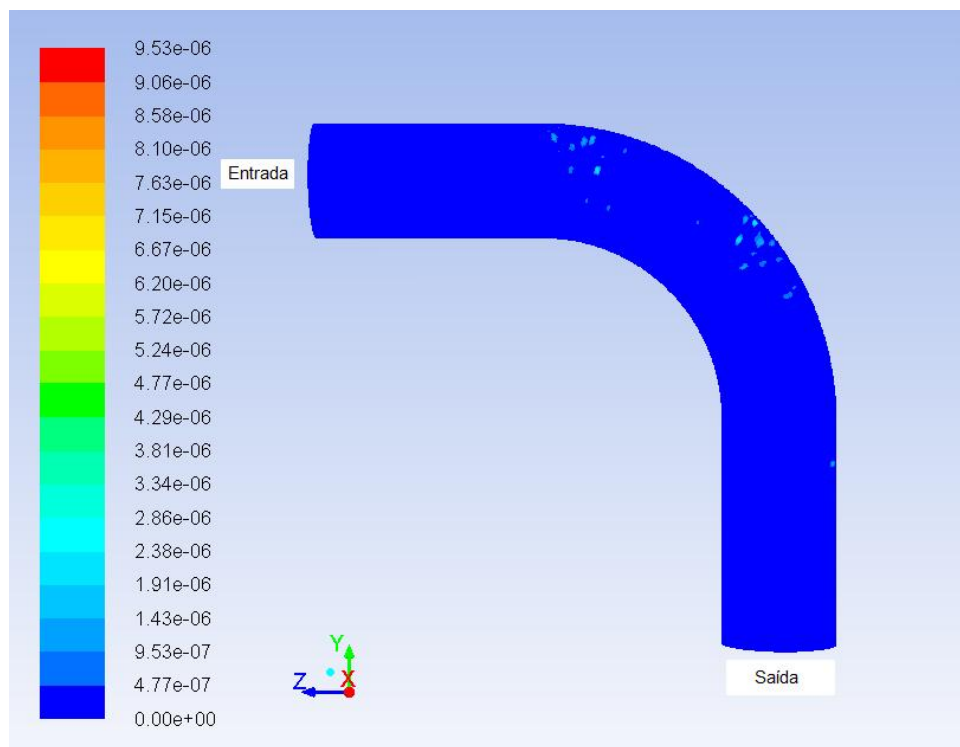


Figura 62: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 1m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

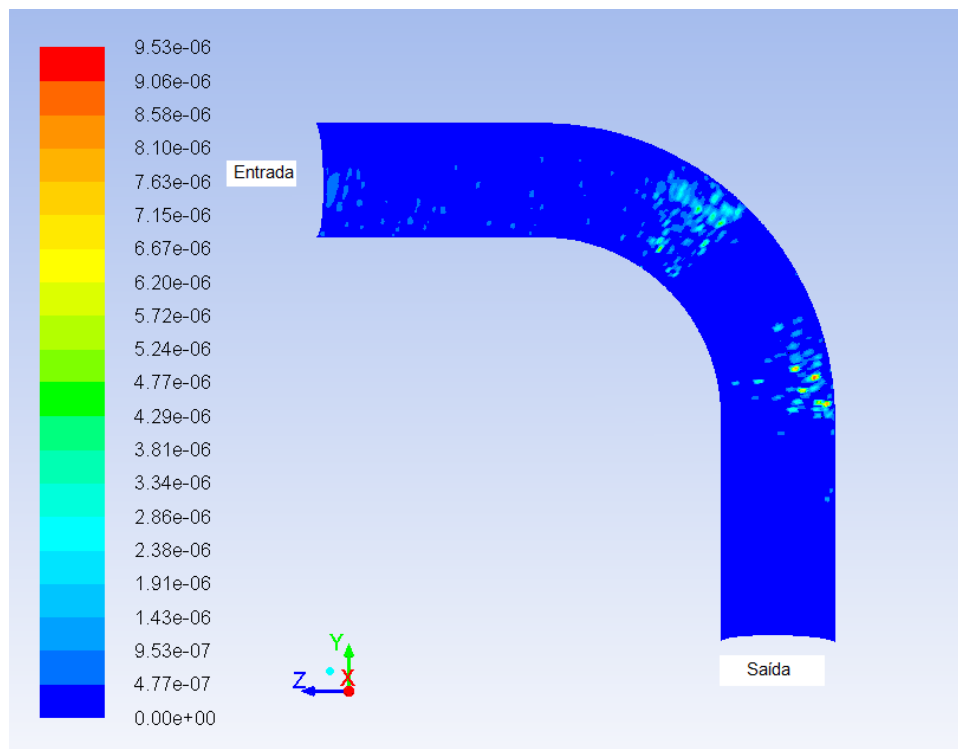


Figura 63: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 1m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

De acordo com a Figura 64 e a Figura 65, que mostram o escoamento a uma velocidade de 2m/s, observa-se neste caso que, com o aumento da velocidade do escoamento, o desgaste erosivo tende a aumentar e aparece também desgaste em outras regiões, o que significa dizer que com o aumento da velocidade, outras forças provenientes da quantidade de movimento linear, começam a ter papel importante no escoamento. Isto faz com que as partículas colidam a velocidades maiores nas paredes. Ainda assim observa-se uma predominância do desgaste na parte inferior da tubulação, como resultado da ação da força da gravidade.

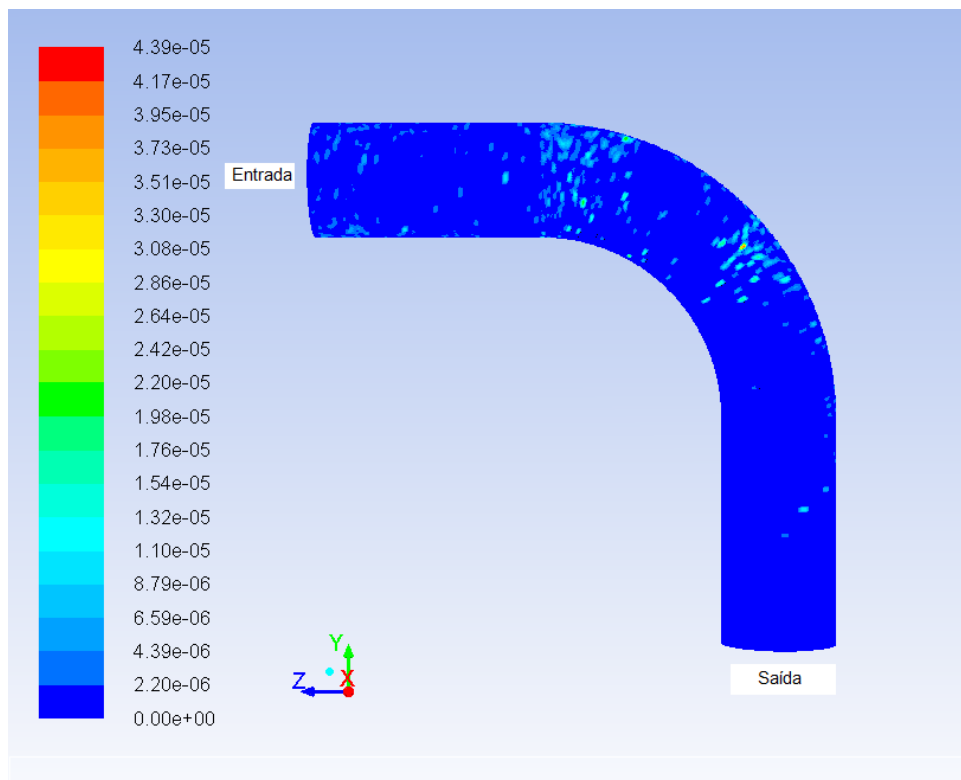


Figura 64: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 2m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

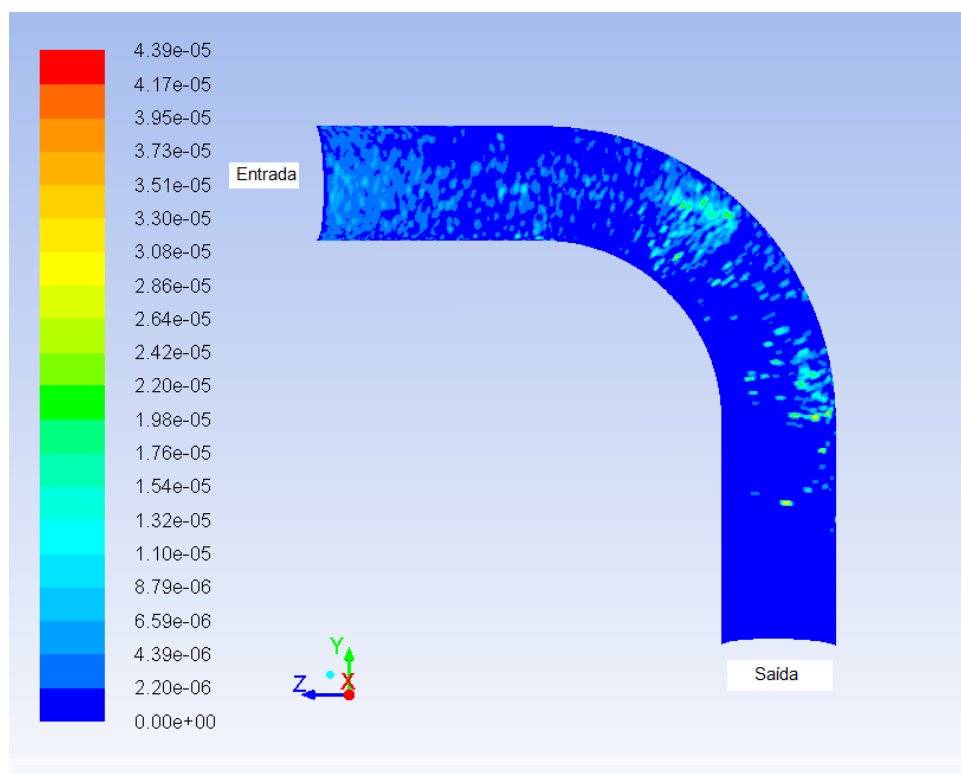


Figura 65: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 2m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

Aumentando a velocidade para 3m/s, tem-se um ligeiro aumento na taxa de desgaste com o tempo, mantendo as características observadas anteriormente, como ação da força da gravidade e intensidade do desgaste por várias regiões da tubulação. A Figura 66 e a Figura 67, mostram esse fato. Ainda assim, a taxa de desgaste permanece a patamares ínfimos. Considerando um critério de falha como sendo a perfuração da parede, pelo desgaste erosivo, de uma tubulação com 1mm de espessura, levaria aproximadamente três mil anos para que esta tubulação falhasse.

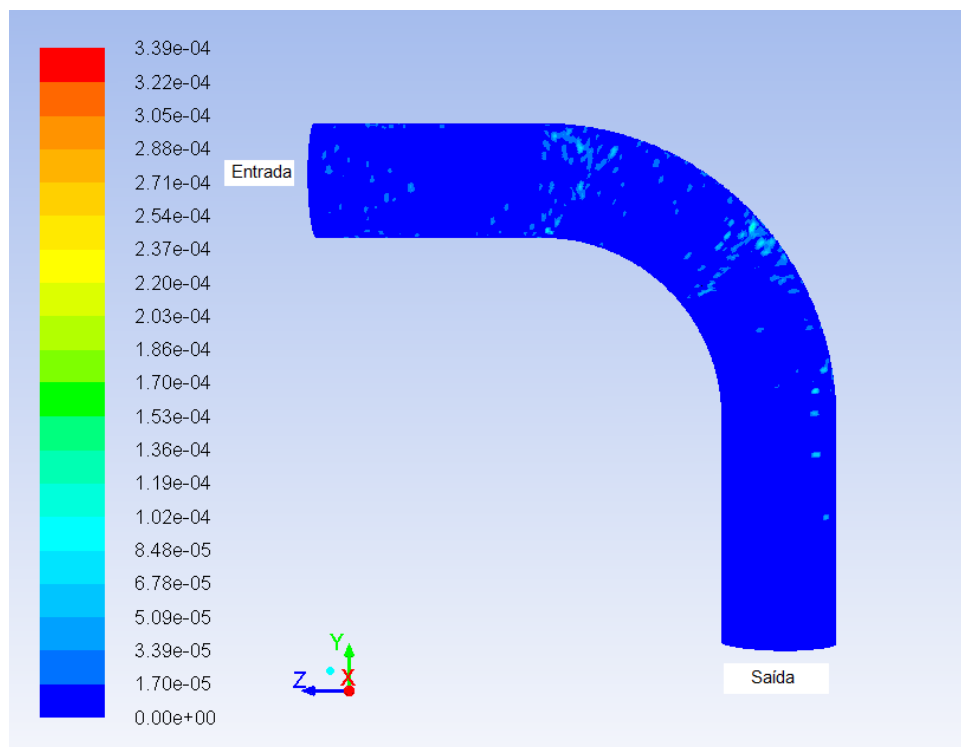


Figura 66: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 3m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

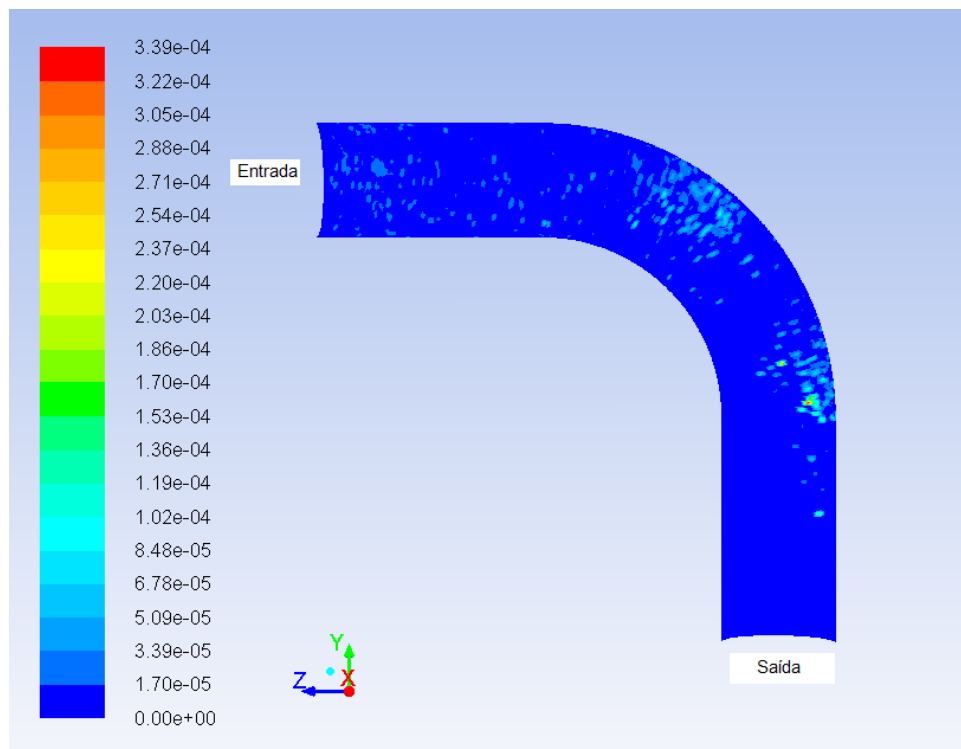


Figura 67: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 3m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

Passando a velocidade de 3m/s para 4m/s (Figura 68 e Figura 69), pouca variação no comportamento do desgaste erosivo acontece. É notório o maior número de regiões de desgaste com a maior velocidade. É importante observar também o desgaste na região de entrada da tubulação. Parece que a baixas taxas de desgaste erosivo, a condição de contorno de entrada tem uma grande influência no resultado simulado do desgaste erosivo. Com uma porcentagem de intensidade turbulenta de 3% (considerada baixa), tem-se grande influência no comportamento erosivo nesta região.

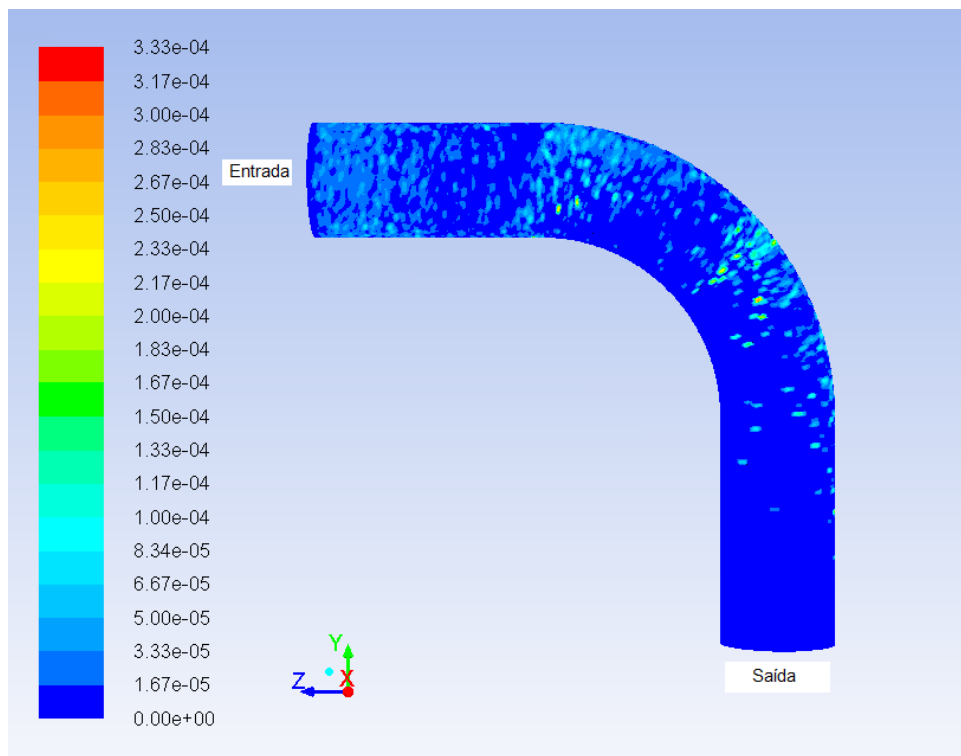


Figura 68: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

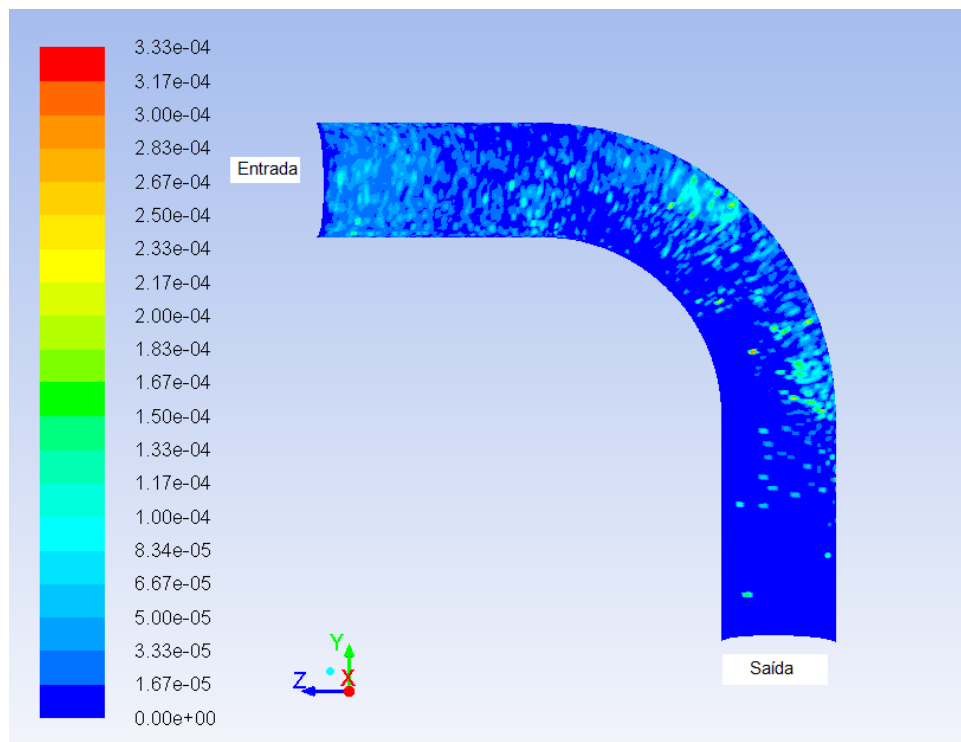


Figura 69: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

Assim como no teste experimental, as taxas de desgaste erosivo na simulação (Figura 70 e Figura 71) são muito pequenas. Seria praticamente impossível capturar em uma interferometria a taxa de desgaste erosivo em regime permanente, em um ensaio feito por quatro horas, uma vez que a simulação computacional mostra que a falha (período em que uma tubulação com parede de 1mm será perfurada devido à severidade do desgaste erosivo) ocorreria em um período de aproximadamente 1200 anos. Pode-se inclusive dizer, a partir da simulação, que dadas as condições de vazão de particulado e vazão de água, em um escoamento similar e similares condições de material e operação, seria mais provável a falha desta tubulação por outros meios do que por desgaste erosivo puro.

Assim também como nos resultados computacionais anteriores, observa-se a região inferior da tubulação, concentrando a maior taxa de desgaste erosivo, por ação da força gravitacional. Observa-se também um desgaste proporcionalmente maior na região de entrada da tubulação à medida que a velocidade foi aumentando, mas mantendo uma baixa taxa de desgaste, o que pode ser considerado um ruído presente na simulação da erosão da forma como foi feita neste trabalho.

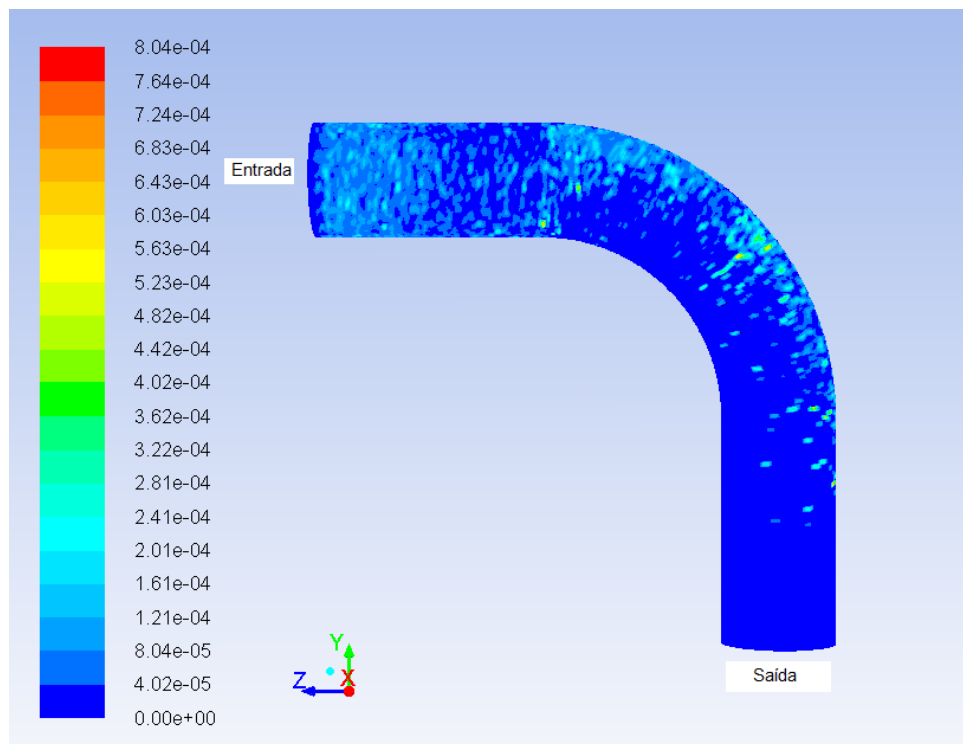


Figura 70: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

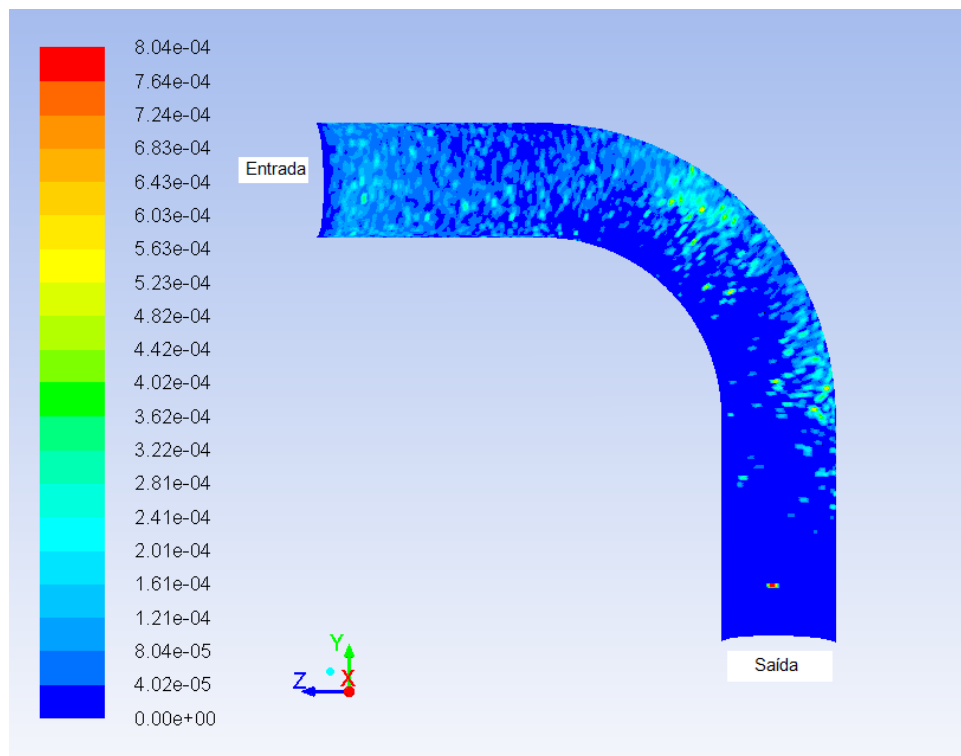


Figura 71: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano com velocidade de 5,4m/s do escoamento água-areia, no Alumínio

Nas simulações onde a fase contínua é ar, caracterizando os escoamento internos às tubulações a altas velocidades (10m/s, 15m/s e 25m/s), outros efeitos interessantes podem ser observados, como por exemplo, a ausência de indicativos de desgaste erosivo na região de entrada do escoamento. Sendo assim, os efeitos da condição de contorno de intensidade turbulenta de 3% não tem um efeito decisivo no cálculo do desgaste erosivo, ou seja, pode ser considerado desprezível dado um escoamento desenvolvido como condição de contorno.

As figuras que seguem mostram os desgastes erosivos tanto na vista superior como inferior, do Aço e do Alumínio, mas agora como estão a maiores velocidades, representam um risco efetivo de falha em serviço. As figuras não mostram muita diferença uma da outra, a não ser que com o incremento da velocidade há um incremento direto da energia cinética e que com a mudança do material do Alumínio para aço, o aço é mais resistente ao desgaste erosivo em condições semelhantes. Considerando que a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade, a taxa de desgaste erosivo também aumentará com aproximadamente o quadrado da velocidade. Ou seja, aumentando a velocidade em 1,5 vezes, o desgaste erosivo deve aumentar em torno de 2,25 vezes. É o que acontece aproximadamente nos resultados observados quando se passa de uma taxa de desgaste

erosivo de 2,01mm/ano a uma velocidade de 10m/s (Figura 72) para uma taxa de 5,68mm/ano a uma velocidade de 15m/s (Figura 74).

Outro fator interessante no transporte de particulados em um meio contínuo como o ar, é que devido à sua viscosidade muito menor do que a da água nota-se que a fase contínua tem pouca influência na mudança de trajetória da partícula. Isto significa dizer, que dada a velocidade da fase discreta, a mesma colidirá com a parede da tubulação a uma velocidade e trajetória muito semelhantes às quais a partícula tinha na entrada da tubulação. Isto porque o tempo de relaxação é dividido pela viscosidade, e quanto menor o tempo de relaxação, mais rápido a partícula tenderá a se adaptar à velocidade e trajetória imposta pela fase contínua (Svarovsky L., 1984). Considerando então que a viscosidade da água é muito maior do que a do ar, quando o meio contínuo é água, pode-se dizer que a fase contínua exerce maior influência sobre a trajetória da fase discreta do que quando o meio contínuo é o ar.

Na simulação do escoamento bifásico, água e ar, a simulação foi realizada no regime transiente, pois não se sabia ao certo qual regime iria alcançar o escoamento nas velocidades propostas. De acordo com a Figura 6, nas velocidades de 1,5 m/s para a fase água e 15 m/s para a fase ar, tem-se que o padrão de escoamento previsto, compreende entre o *slug* e o anular. Como o escoamento tipo *slug* é intermitente, pode ser que o escoamento seja mesmo anular, perdendo a sua formação por instabilidades e voltando ao *slug*. Tal análise necessitaria de um intervalo de tempo maior de simulação. No resultado mostrado na Figura 84 observa-se a formação de um padrão anular a aproximados dois segundos de simulação, com uma fina espessura de filme na parede superior.

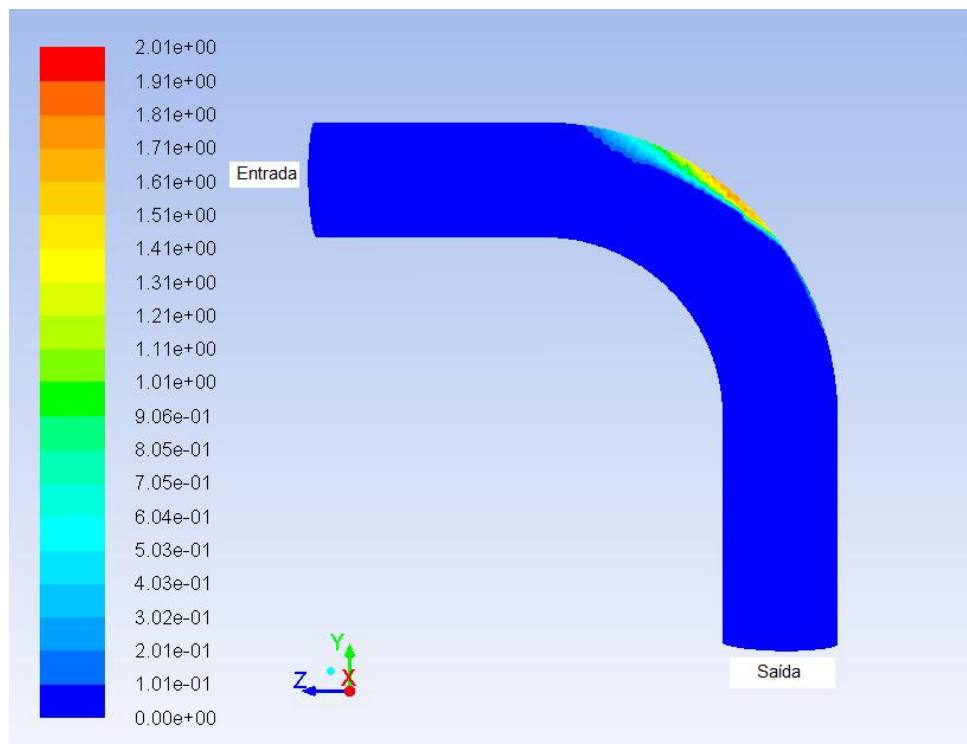


Figura 72: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia

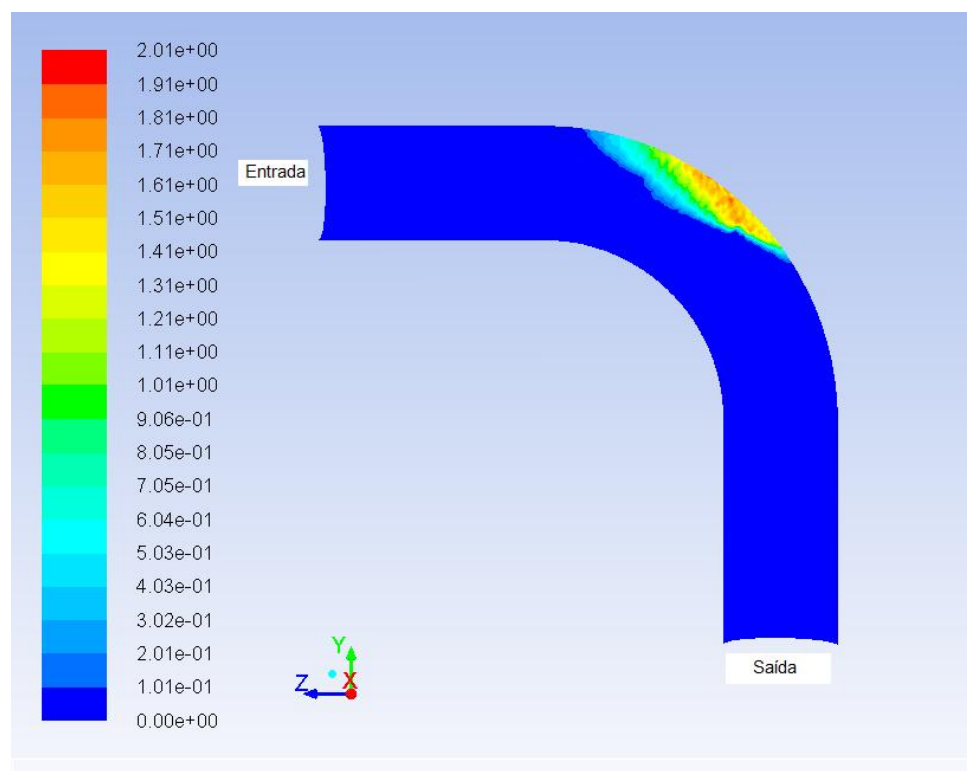


Figura 73: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia

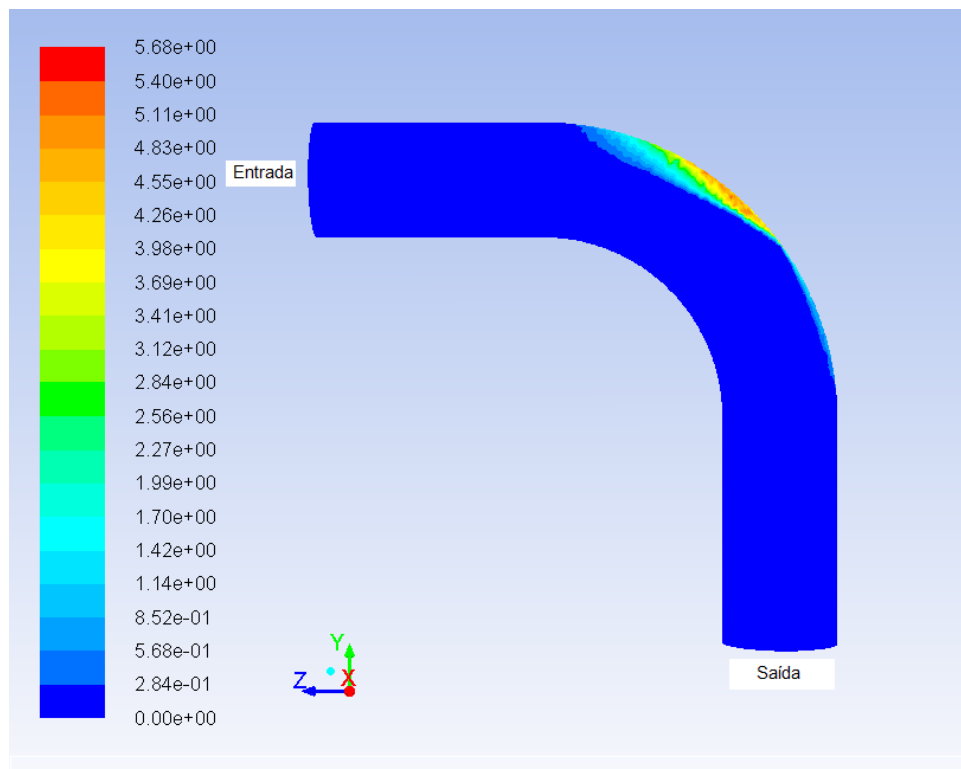


Figura 74: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia

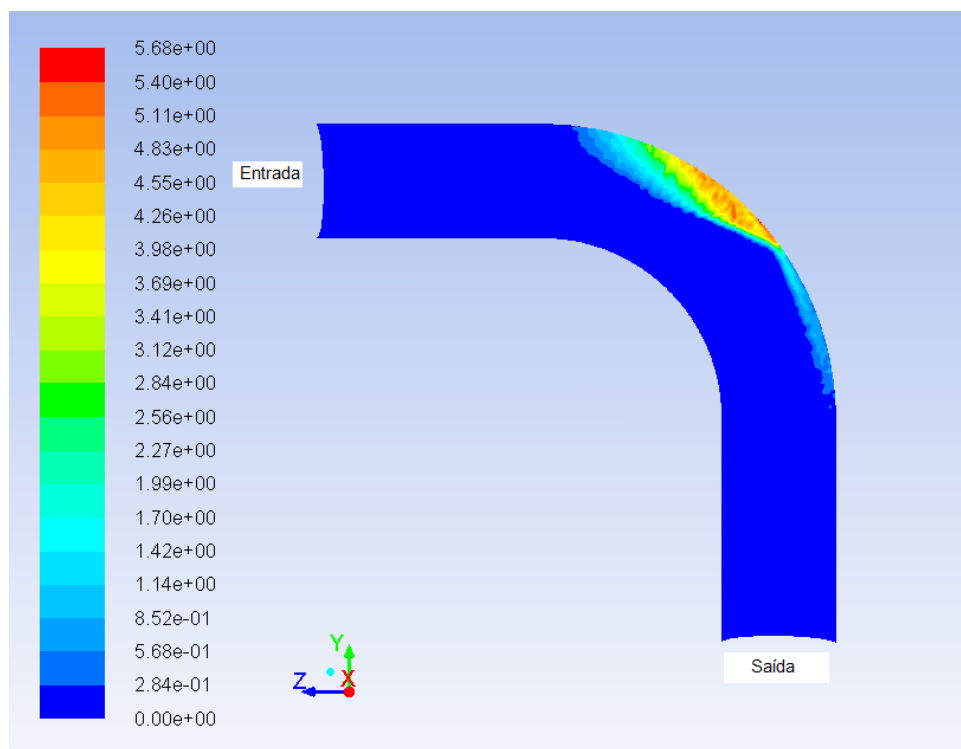


Figura 75: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia

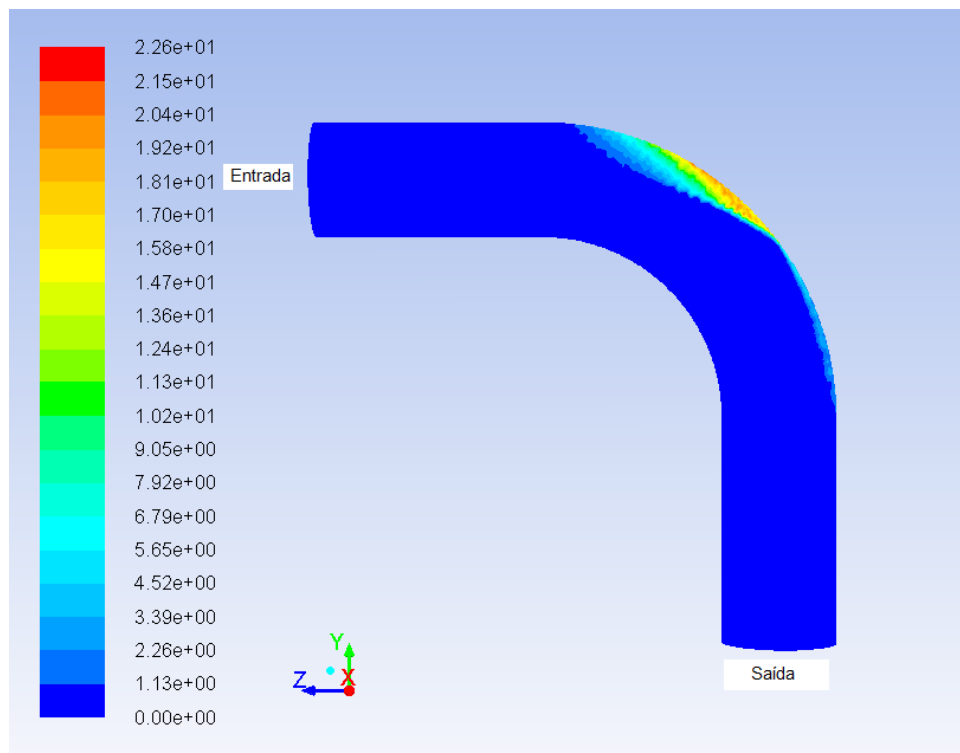


Figura 76: Vista superior, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia

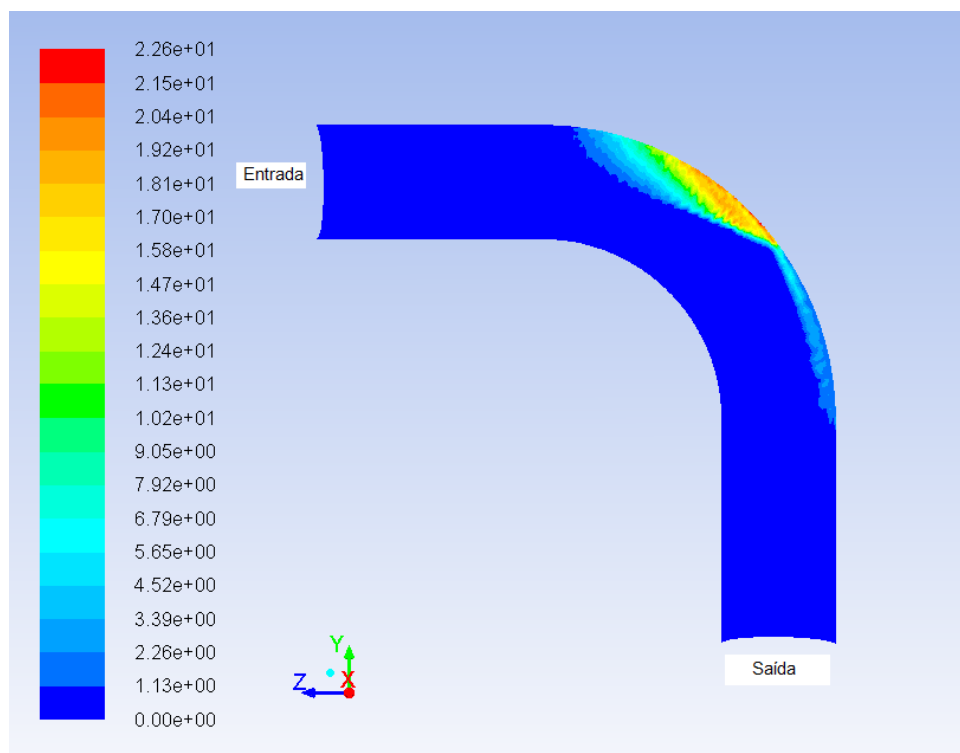


Figura 77: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no Alumínio, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia

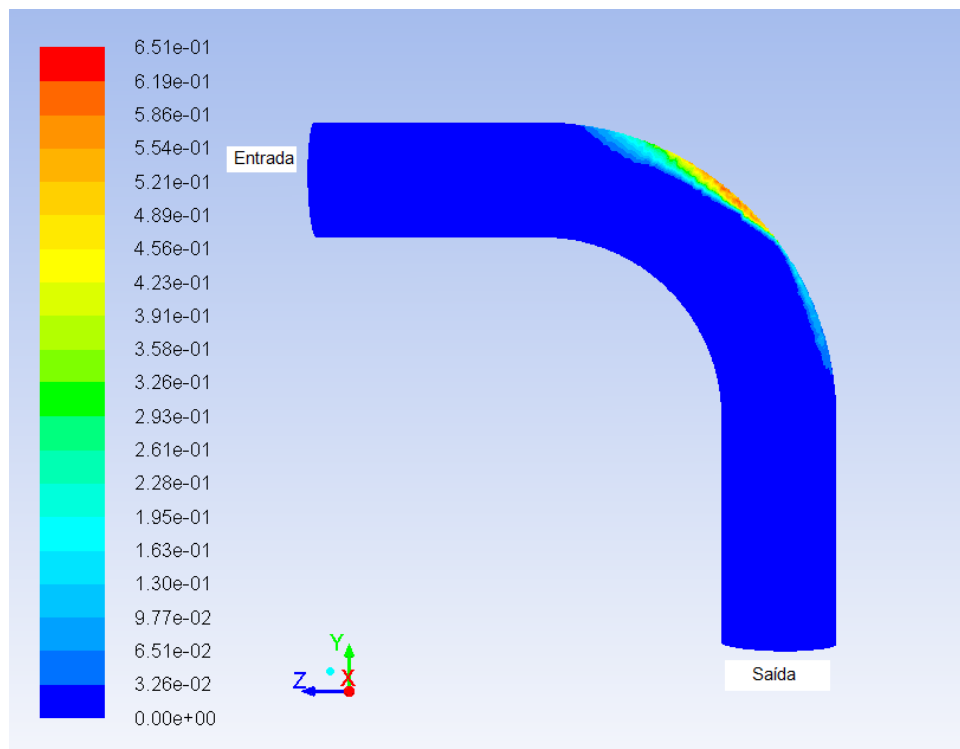


Figura 78: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia

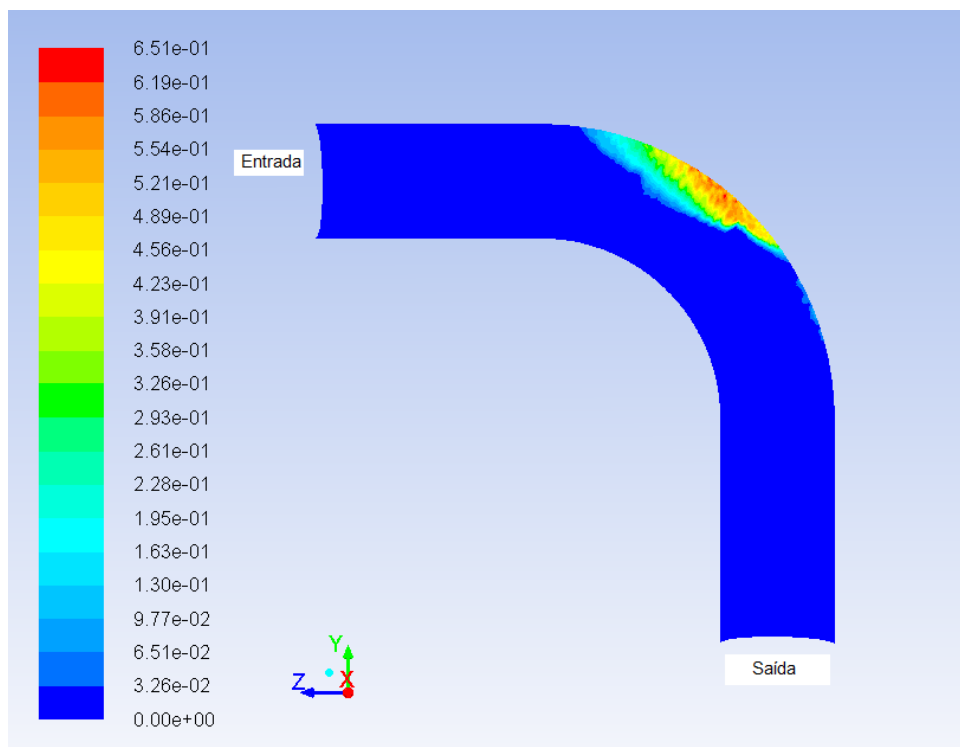


Figura 79: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 10m/s do escoamento ar-areia

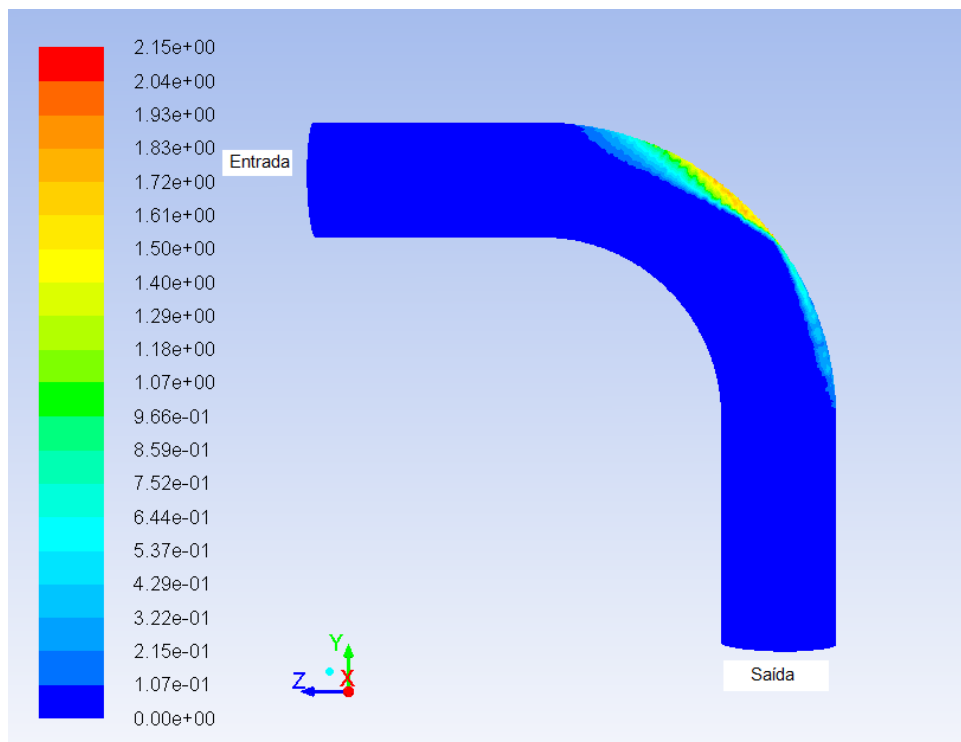


Figura 80: Vista superior da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia

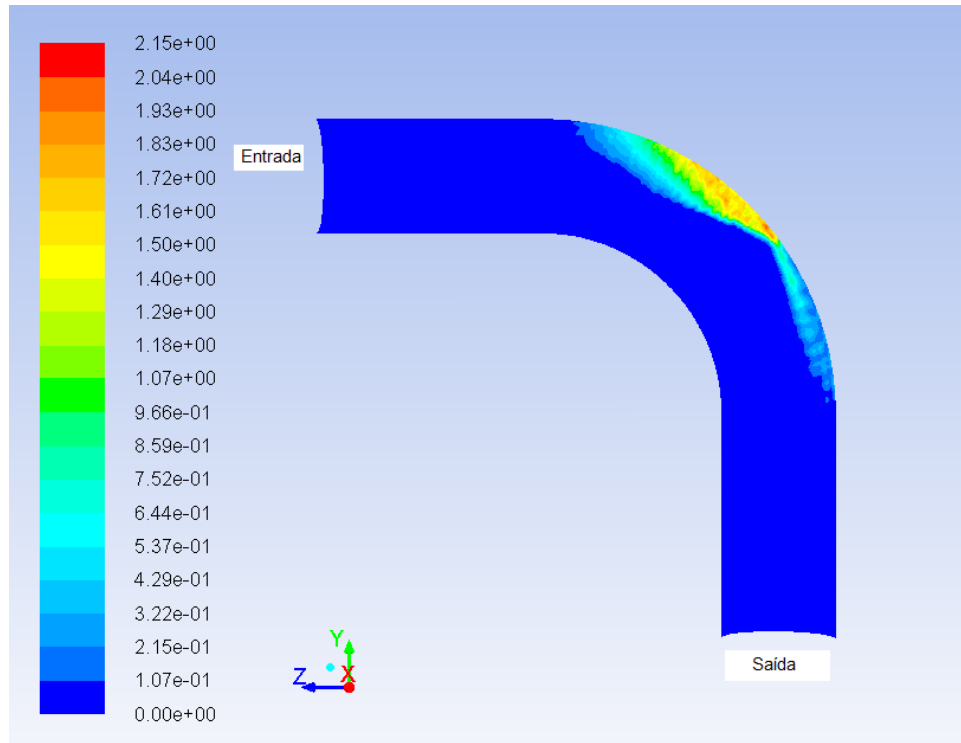


Figura 81: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 15m/s do escoamento ar-areia

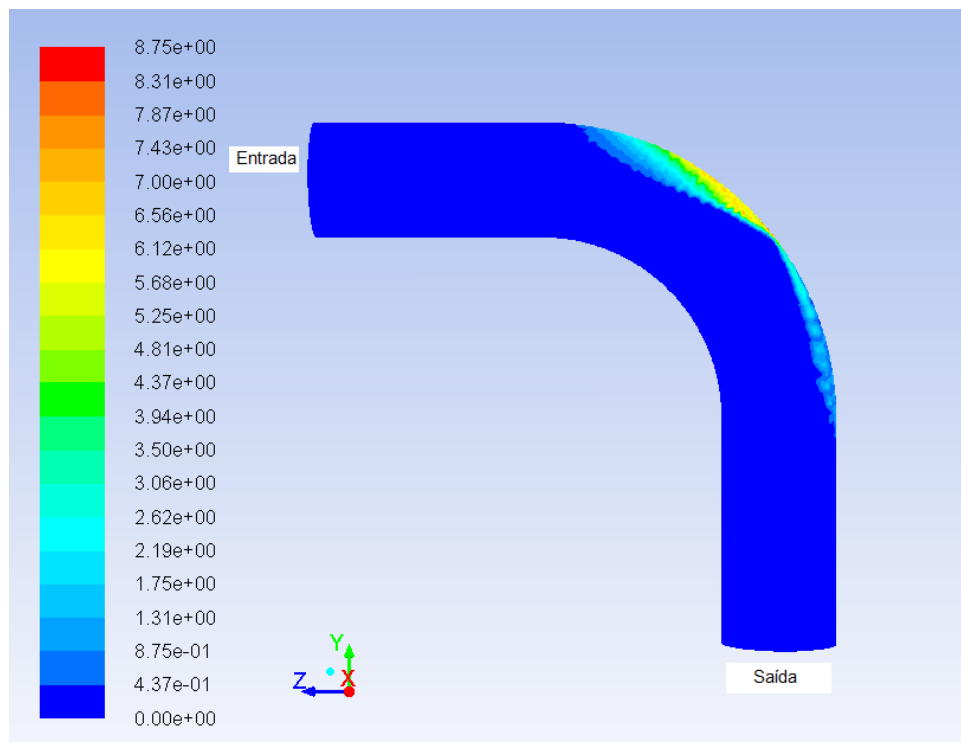


Figura 82: Vista superior, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia

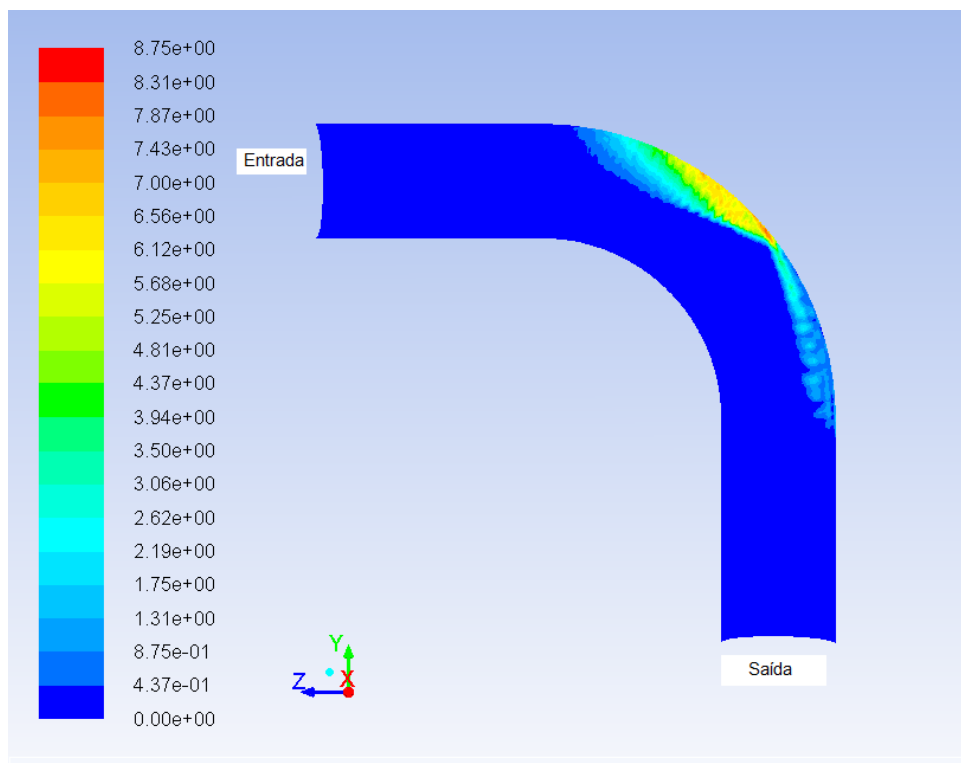


Figura 83: Vista inferior em corte, da taxa de desgaste em mm/ano no aço, com velocidade de 25m/s do escoamento ar-areia

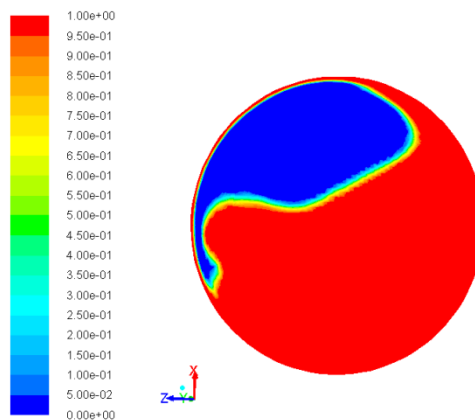


Figura 84: Formação do padrão anular em uma seção transversal da tubulação em um escoamento água-ar

A Figura 85 mostra em outro corte, a formação do mesmo padrão anular. Tal formação acontece após a curva que é mostrada na Figura 43.

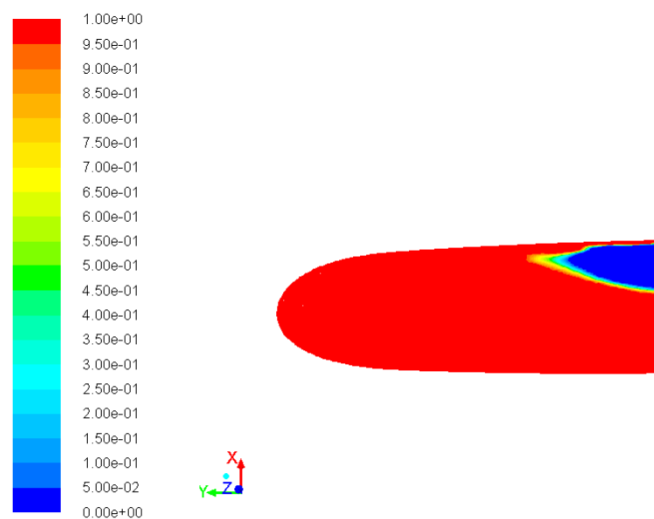


Figura 85: Vista da formação do padrão anular em outro corte

No Anexo I, há uma sequência de imagens, mostrando o desenvolvimento do padrão de escoamento estratificado ondulado logo na entrada de água e ar na tubulação.

Dadas estas condições do escoamento, a injeção de partículas retornou o resultado como pode ser observado na Figura 86. Como esperado também, devido à baixa velocidade com que a fase líquida é injetada, o desgaste erosivo é muito pequeno, representando um critério de falha nulo, visto que a perda de 1.27×10^{-2} mm de espessura em um ano,

representaria a falha de uma tubulação de 1mm de espessura em 78 anos. O que deve ser analisado é a pequena região onde o desgaste erosivo está concentrado, o que pode ser justificado pelos níveis de turbulência atingidos nesta região devido à alta velocidade de entrada da fase gasosa, ou ainda na dificuldade de captura de partículas, dada a baixa velocidade com que são injetadas na região de entrada da fase líquida. A Figura 87 mostra os níveis de turbulência capturados nesta região. Altos níveis de turbulência estão associados a altos níveis de energia, o que transfere mais quantidade de movimento para partículas.

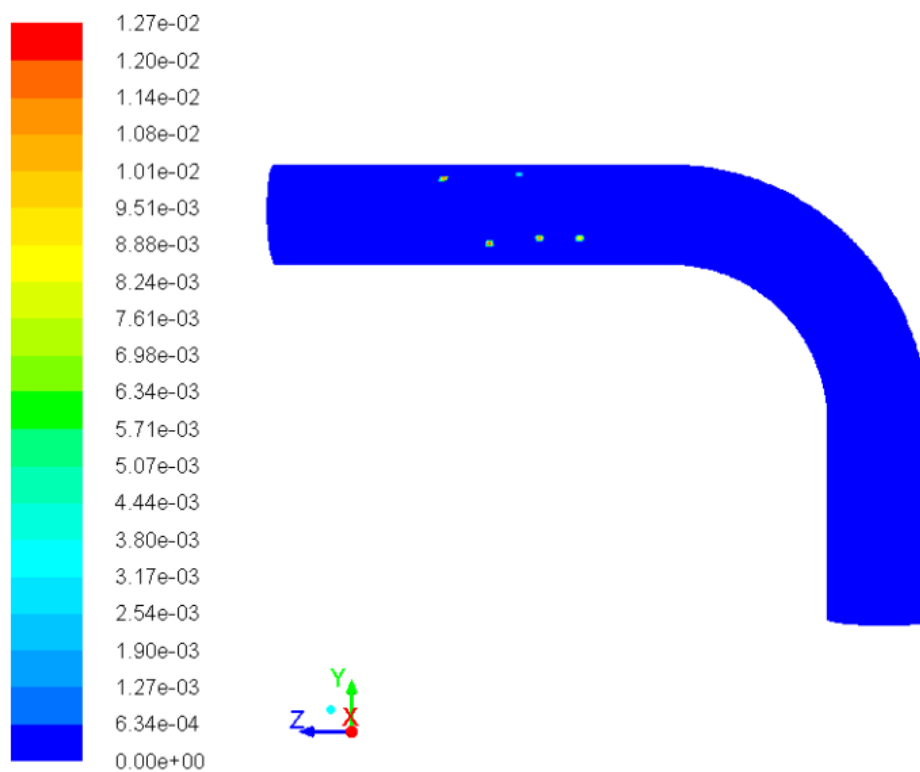


Figura 86: Erosão no escoamento bifásico em mm/ano

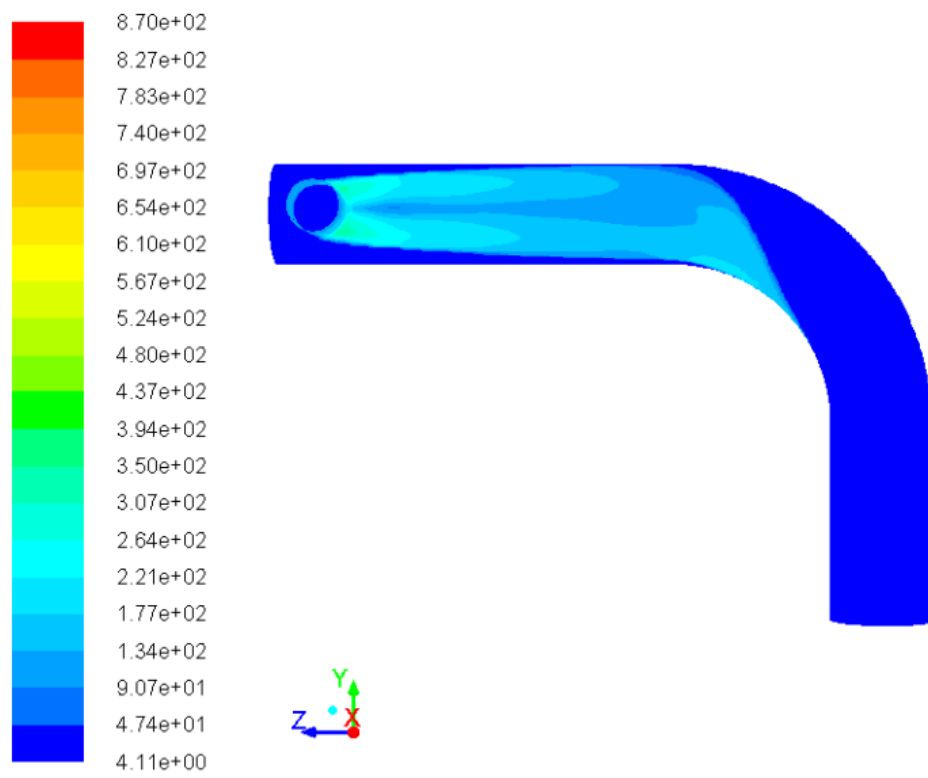


Figura 87: Níveis de turbulência em %, na região de entrada de ar

Capítulo V

5 – Conclusões

A técnica de medição experimental do desgaste erosivo em tubulações de quatro polegadas não apresentou resultados mensuráveis. Acredita-se que o tempo de ensaio não foi suficiente, visto que para que se observe o desgaste erosivo e a possível falha, quatro horas de ensaio não foram o bastante. Mas ainda assim pode-se verificar que o baixo desgaste observado nas simulações, refere-se ao não mensurável desgaste no equipamento experimental.

As velocidades necessárias para que ocorresse o desgaste erosivo não podem ser mantidas nas configurações hoje existentes no laboratório. Após uma hora de ensaio observou-se uma temperatura de 50° da água devido à energia dissipada pela bomba centrífuga. Considerando a temperatura limite de operação de 60°, o ensaio fica de certa forma limitado.

A forma como foi feita a medição da perda de espessura (interferometria a laser), não foi capaz de capturar a variação devido ao desgaste erosivo, mas mostrou ser uma boa técnica desde que o desgaste erosivo seja de ordem maior. A medição por perda de massa a priori aparentava ser a melhor forma de medição, mas devido à configuração do experimento, observou-se que ela não seria eficiente pelos seguintes motivos:

- Como a variação de massa é pequena, uma amostra que apresente corrosão (por menor que ela seja), seria suficiente para influenciar na medição;
- O simples fato de o parafuso retirar material da amostra na hora do aperto no porta amostra, poderia indicar outra forma de incerteza da medição;

O material utilizado (Alumínio comercialmente puro) apresentou vários pontos de corrosão, significando que para erosão pura, outro material deveria ser utilizado.

As microscopias eletrônicas realizadas exerceram um papel muito importante na determinação dos mecanismos de desgaste atuantes na amostra, assim como na observação dos desgastes na amostra. Comparando as regiões de maior desgaste observadas nas simulações numéricas, a microscopia apresentou semelhança de regiões de maior desgaste (a aproximadamente 45°).

As simulações computacionais mostraram uma forma interessante de determinação de regiões que sofrerão desgastes erosivos. Observou-se taxas muito pequenas de

desgaste erosivo na simulação nas mesmas condições do experimento em laboratório, podendo ser considerada uma validação entre experimento e simulação.

Ainda que possa ser considerada essa validação, não se pode dizer que os resultados são quantitativamente confiáveis, pois não puderam ser comparados quantitativamente com os resultados obtidos no experimento.

As diferenças de comportamento na interação entre partícula e fluido, quando o fluido muda de água para ar, são muito interessantes mostrando a grande influência que a viscosidade do fluido exerce no caminho traçado pela partícula.

Durante as simulações, muitos problemas surgiram, como por exemplo a não convergência dos resultados quando utilizando coeficientes de restituição em forma de funções polinomiais. E ainda nas fases de teste, foram comparados diferentes coeficientes de restituição mostrando que diferentes coeficientes de restituição produzem resultados totalmente diferentes, o que não era esperado com tamanha discrepância de resultados.

As condições de contorno também exercem uma influência muito grande no desgaste erosivo, principalmente quando se trabalha com a metodologia RANS em que tem-se a intensidade da turbulência como condição de contorno na entrada. No caso das partículas serem lançadas normais à face de entrada de um fluido, observou-se que influencia diretamente no comportamento erosivo na curva, tão próximo for essa injeção da curva.

Como conclusões deste trabalho tem-se então:

- Para ensaios erosivos necessita-se de um *setup* em que se possa utilizar o equipamento por maior quantidade de tempo;
- Para utilização em maior quantidade de tempo necessita-se:
 - Bombeamento a maiores velocidades e que não seja feito por bomba centrífuga;
 - Maior autonomia no reservatório de injeção de areia;
- Deve-se utilizar um material diferente na amostra, garantindo erosão pura;
- Deve-se utilizar uma geometria maior na simulação computacional, garantindo menor influência das condições de contorno;
- Devido à grande quantidade de dados empíricos utilizados na simulação da erosão, seria interessante que esses dados pudessem ser determinados experimentalmente no laboratório;
- A simulação da erosão nesta fase de trabalho apresenta resultados qualitativos que obedecem à física do problema (transporte de particulados em um meio contínuo monofásico e bifásico);

- A malha precisou ser refeita várias vezes mostrando grande influência nos resultados, principalmente nas regiões de entrada na curva da tubulação;
- A utilização da ferramenta computacional para determinação do padrão de escoamento foi fiel ao que existe na literatura, mas não se sabe o comportamento do escoamento anular por um período maior de tempo.

Capítulo VI

6 – Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de dar maior robustez às técnicas utilizadas neste trabalho sugere-se:

- Capacidade de bombeamento a maiores velocidades no equipamento experimental;
- Capacidade de bombeamento sem aquecer o fluido de trabalho;
- Capacidade de bombeamento bifásico (ar+água), para comparar melhor o desgaste erosivo em escoamentos bifásicos;
- Possibilidade de determinação de coeficientes utilizados na simulação da erosão, no próprio laboratório;
- Incremento da capacidade computacional para os cálculos computacionais;
- Utilização de materiais que garantam o desgaste erosivo puro;
- Maior autonomia na injeção de areia.

Capítulo VII

7 – Referências Bibliográficas

- Açikgöz, M., Franyat , F., Lahey Jr., R. T., An experimental study of three-phase flow regimes, *Int. J. Multiphase Flow* 18, pp. 327-336, 1992;
- Bannwart, A. C., Modeling aspects of oil–water core–annular flows, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 32, pp. 127– 143, 2001;
- Baker, O., Simultaneous Flow of Oil and Gas, *Oil and Gas Journal* 53, pp. 185–195, 1954;
- Benson, D. J., The calculation of the shock velocity - particle velocity relationship for a copper powder by direct numerical simulation, *Wave Motion* 21, pp. 85-99, 1995;
- Brauner, N., and Moalem M. D., Two-phase liquid-liquid stratified flow, *PCH Physico Chemica, Hydrodynamics* 11, pp. 487-506, 1989;
- Brauner, N., Moalem Maron, D. and Rovinsky, J., A Two-Fluid Model for Stratified Flows with Curved Interfaces. *International Journal Multiphase Flow* 24, pp. 975-1004, 1998;
- Brauner, N., The Prediction of Dispersed Flows Boundaries in Liquid-Liquid and Gas-Liquid Systems, *International Journal Multiphase Flow* 27, pp. 911-928, 2001;
- Brauner, N., *Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems*. Ed. V Bertola, CISM Center, Udine, Italy, 2002;
- Brauner, N. and Ullmann, A., Modelling of Phase Inversion Phenomenon in Two-Phase Pipe Flow, *International Journal Multiphase Flow* 28, pp. 1177-1204, 2002;
- Brauner, N. and Ullmann, A., Closure Relations for the Shear Stresses in Two-Fluid Models for Stratified Smooth and Stratified Wavy Flows. 42nd European Two-Phase Flow Group meeting, Genoa, Italy, June 23-26, 2004;
- Brennen, C. E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, 1995.
- Brown, G., Erosion Prediction in Slurry Tee-Junction, *Second International Conference on CFD in Minerals and Process Industries*, 1999;

Chen X.H., McLaury B.S. and Shirazi S.A., Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow, *Wear* 261, pp. 7–8, 2006;

De Schepper, S. C.K., Heynderickx, G. J., Marin, G. B., CFD modeling of all gas–liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chemical Engineering Journal* 138, pp. 349–357, 2008;

Dukler, A.E. and Hubbard M.G., A model for gas–liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 14, pp. 337–347, 1975;

Finnie, I., Some reflections on the past and future of erosion, *Wear*, pp. 186-187 1995;

Fluent 12.1 Theory Guide – 2010;

Fluent 12.1 User Guide – 2010;

Forder, A., Thew, Martin, Harrison, D., A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves, *Wear* 216, pp. 184-193, 1998;

Kalies, G., Arnrich, S., Rockmann, R., Bräuer, P., Simultaneous adsorption at the liquid/solid and liquid/gas interfaces, *Journal of Colloid and Interface Science* 301 (2006) 409–418;

Koivula, T., On Cavitation in Fluid Power, *Proc. of 1st FPNI-PhD Symp.*, pp. 371-382, Hamburgo, 2000;

Máscia, R., Desenvolvimento e Caracterização Tribológica de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo para Indústria Mineradora de Cassiterita, *Dissertação de mestrado, UFU*, 2002.

Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K. , A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553, 1974;

Miranda, C. Z. Projeto, fabricação e operação de uma máquina de ensaio de erosão por cavitação, *Dissertação de mestrado, UDESC*, 2007;

Ogata, P. H., Ramírez, M. G., Goldenstein, H., Gorni, A. A., Landgraf, F. J. G., Caracterização microestrutural de aço api 5l x65, Austenitizado e resfriado a diferentes taxas de Resfriamento, *CBECiMat*, Porto de Galinhas (PE), Novembro de 2008;

Paladino, E. E., Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial, *Tese de doutorado, UFSC*, 2005;

- Rodriguez, O. M. H. and Oliemans, R. V. A., An inverted flow-pattern-dependent model for determining production rates in oil/water flow. In LG Trabasso, M Ziviani, MP Barbosa & FM de Almeida (Eds.), Proceedings COBEM2005 (pp. 1-4). Rio de Janeiro, Brazil: ABCM, 2005;
- Silva, F. J., Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço abnt 8550 nitretado a plasma, Tese de doutorado, UFU, 2008;
- Silva, R. P., Franco, S. D., Moraes, J. O., Validação de um padrão de escoamento multifásico através de simulação pelos métodos RANS-k- ω e LES-Smagorinsky-Lilly, SEMEC2008, 2008;
- Silveira-Neto, A., "Turbulência nos fluidos aplicada", 1.a Edição, 2002;
- Soo, S. L., Multiphase Fluid Dynamics, Science Press, Beijing, 1995;
- Svarovsky, L., Hydrocyclones, Holt, 1984;
- Tang, P., Yang, J., Zheng, J., Wong, L., He, S., Ye, J., Ouc, G., Failure analysis and prediction of pipes due to the interaction between multiphase flow and structure, Engineering Failure Analysis 16 (2009) 1749–1756;
- Taitel, Y., Dukler, A. E., A Model for predicting Flow Regime transitions in Horizontal and near horizontal Gas-Liquid flow, AIChE Journal 22, pp. 47-55, 1976;
- Ullman, A., Zamir, M., Goldstein, A., and Brauner, N. (2004). Closure Relations for the Shear Stresses in Two-Fluid Models for Laminar Stratified Flow, Int. J. Multiphase Flow, 30(7-8) 877-900, 2004;
- Wang, Y. F., Yang, Z. G., Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials, Wear 265 (2008) 871–878;
- Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD. CDW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- Zum Gahr, K. H., Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, 1987.

Anexo I

