



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica



**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**MODELAGEM MATEMÁTICA E  
COMPUTACIONAL DA EROSÃO EM ESCOAMENTOS  
MULTIFÁSICOS COM MALHAS DINÂMICAS**

Discente: Déborah Domingos da Rocha

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho

Uberlândia, MG – Brasil

2023

**DÉBORAH DOMINGOS DA ROCHA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA E  
COMPUTACIONAL DA EROSÃO EM ESCOAMENTOS  
MULTIFÁSICOS COM MALHAS DINÂMICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho

Uberlândia, MG – Brasil

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R672 Rocha, Déborah Domingos da, 1991-  
2023 Modelagem Matemática e Computacional da Erosão em  
Escoamentos Multifásicos com Malhas Dinâmicas [recurso  
eletrônico] / Déborah Domingos da Rocha. - 2023.

Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.383>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio  
Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal  
de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 361, PPGEM				
Data:	26/07/2023	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:45
Matrícula do Discente:	11823EMC004				
Nome do Discente:	Déborah Domingos da Rocha				
Título do Trabalho:	Modelagem matemática e computacional da erosão em escoamentos multifásicos com malhas dinâmicas				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Enio Pedone Bandarra Filho - FEMEC/UFU; João Marcelo Vedovotto - FEMEC/UFU; Luben Cabezas Gómez - EESC/USP; Gustavo Rabello dos Anjos - UFRJ; e Solidônio Rodrigues Carvalho - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Solidônio Rodrigues Carvalho, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior, em 26/07/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior, em 26/07/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por Gustavo Rabello dos Anjos, Usuário Externo, em 26/07/2023, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior, em 26/07/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por Luben Cabezas Gómez, Usuário Externo, em 26/07/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 4659666 e o código CRC 7C6EEA11.

---

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Deila e José Antônio, pelo apoio, amor, dedicação e ensinamentos ao longo da minha vida e à minha irmã Isabella pelo incentivo diário e amizade. Ao Fábio por todo auxílio, companheirismo, paciência e evolução ao longo dos últimos anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho pela colaboração e disposição. A todos do MFLab, especialmente ao Prof. Dr. Francisco José de Souza, Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto e Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto por tornarem esse trabalho possível, assim como aos colegas que realizaram as pesquisas prévias a este trabalho.

Aos membros da banca pela presteza, disponibilidade e pelas contribuições realizadas para este trabalho.

Agradeço muito a todos os professores da UFMG e da UFU que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal ao longo da minha trajetória, especialmente ao Prof. Dr. Douglas Marin e à Profa. Dra. Ana Cláudia Molina Zaqueu Xavier.

À UFU, aos docentes, técnicos e todos os funcionários que proporcionaram as condições para que esse trabalho fosse realizado, mesmo durante o ensino remoto, principalmente a todos da Secretaria de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU pelo auxílio ao longo desse anos.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro ao longo da pós-graduação.

## RESUMO

Em diversas aplicações industriais a erosão tem grande importância e modifica a superfície erodida, o que pode, por exemplo, diminuir a vida útil de tubulações e equipamentos. Como o estudo experimental desses casos pode ser complexo ou até mesmo inviável devido ao alto custo, simulações numéricas são uma ferramenta importante para auxiliar na previsão da erosão e evitar prejuízos e/ou melhorar a desempenho de equipamentos. Porém, em muitos casos a alteração da topologia ganha importância e exige que a malha computacional reproduza a movimentação da superfície erodida, o que requer a utilização de malhas dinâmicas. Esse tipo de malha demanda um custo computacional maior e os códigos disponíveis não possuem uma metodologia robusta que inclua a resolução transiente do escoamento acompanhada da movimentação da malha a cada passo de tempo com a obtenção de bons resultados e de fácil convergência. Sendo assim, foi desenvolvida uma metodologia numérica para atender a essa necessidade e que pudesse ser aplicada a quaisquer condições. Uma dificuldade nas simulações é o surgimento de volumes negativos devido à diminuição da qualidade da malha à medida que ela se deforma. Além disso, observou-se que resultados de erosão podem apresentar ruídos devido à estatística dos impactos nas células das malhas computacionais. Sendo assim, após o estudo do efeito de diversas variáveis e a validação da metodologia, foi implementado no código UNSCYFL3D um método para suavização do gradiente da superfície erodida. Observou-se que a qualidade da malha melhorou de forma significativa e que, para o caso de um jato impingente erosivo, o tempo de simulação diminuiu em até 58% devido à possibilidade de utilização de 8 vezes menos parcelas mantendo a qualidade do resultado obtido. Além disso, o código utilizado neste trabalho permite tanto a utilização de malhas estáticas quanto malhas dinâmicas, podendo-se optar por resolver o escoamento a cada passo de tempo ou utilizar um campo convergido do escoamento para calcular apenas a solução das partículas e, conseqüentemente, da erosão, o que também diminui consideravelmente o custo computacional. Ao comparar a metodologia para malhas estáticas ou dinâmicas utilizada neste estudo com outras disponíveis na literatura observou-se que os resultados são muito mais satisfatórios, apresentando diferenças de 15% em relação à profundidade máxima de erosão experimental, enquanto esse valor chega a 400% em outros trabalhos. Além disso, é a única metodologia com robustez para aplicação a qualquer geometria com possibilidade do estudo da modificação da mesma e sua influência na erosão aliado à obtenção de bons resultados.

Palavras-chave: CFD, método de suavização, malha móvel, modelagem de erosão.

## ABSTRACT

In several industrial applications, the phenomenon of erosion is very important and modify the eroded surface, which can, for example, reduce the useful life of pipes and equipment. As the experimental study can be complex or even unfeasible due to its high cost, numerical simulations are an important tool to erosion prediction and avoid losses and/or improve equipment performance. However, in many cases the topology change due to erosion is relevant and requires a computational mesh that reproduces the movement of the eroded surface, requiring dynamic meshes. This type of mesh presents a higher computational cost and the available codes do not have a robust methodology that includes the transient resolution of the flow followed by the movement of the mesh at each time step, while obtaining good results and easy convergence. Therefore, a numerical methodology was developed to meet this need and be applied to any conditions. A difficulty in simulations is usually the generation of negative volumes due to a decrease in mesh quality as mesh deformation increases. In addition, it was observed that erosion results may present non-physical noise due to the statistics of impacts on the cells of the computational mesh. Thus, after studying the effect of several variables and the methodology validation, a smoothing method was implemented in the UNSCYFL3D code in order to smooth the gradient of the eroded surface. It was observed that the mesh quality improved significantly and for the case of an impinging erosive jet the simulation time decreased by up to 58% due to the possibility of using 8 times fewer parcels while maintaining the quality of the results obtained. In addition, the code used in this work allows the use of both static and dynamic meshes, choosing to solve the flow at each time step or use a converged flow field to calculate only the solution of the particles and, consequently, of erosion, considerably reducing the computational cost. When comparing the methodology for static or dynamic meshes used in this study with others available in the literature, it was observed that the results are much more satisfactory, showing differences of 15% in relation to the maximum depth of experimental erosion, while this value reaches 400% using other methodologies. In addition, it is the only methodology with robustness for application to any geometry with the possibility of studying its modification and its influence on erosion combined with obtaining good results.

Keywords: CFD, smoothing method, dynamic mesh, erosion modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desgaste na tubulação e no ciclone de unidades FCC.....	20
Figura 2 - Desgaste na extremidade e furos do distribuidor de uma unidade FCC.....	20
Figura 3 - Simulação de diferentes diâmetros de partículas em um fluido escoando através de um duto.....	27
Figura 4 - Mecanismo de erosão em materiais dúcteis.....	29
Figura 5 - Mecanismo de erosão em materiais frágeis .....	30
Figura 6 - Exemplos de partículas com diferentes esfericidades, angularidades e circularidades .....	33
Figura 7 - Relação entre taxa de erosão e ângulo de impacto para materiais frágeis e dúcteis.....	34
Figura 8 - Taxa de erosão em função do ângulo de impacto para um refratário de alumina a 25°C (a) e a 1000°C (b).....	35
Figura 9 - Revestimento anti-erosão para unidades FCC .....	38
Figura 10 - Design de tubulação com o objetivo de reduzir a erosão em curvas .....	38
Figura 11 – Esquema da metodologia utilizada no algoritmo para movimentação da malha devido à erosão.....	61
Figura 12 - Fluxograma do algoritmo SIMPLE como implementado no UNSCYFL3D .....	66
Figura 13 - Fluxograma do acoplamento Euler-Lagrange realizado no UNSCYFL3D.	68
Figura 14 - Configuração do jato erosivo em placa plana.....	70
Figura 15 - Profundidade de erosão após 5 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo .....	72
Figura 16 - Profundidade de erosão após 15 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo .....	73
Figura 17 - Profundidade de erosão após 30 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo .....	73
Figura 18 - Profundidade de erosão após 5 minutos utilizando-se diferentes números totais de passos de tempo para simulação do jato erosivo .....	74
Figura 19 - Superfície das amostras erodidas a 30m/s por 5, 15 e 30 minutos. ....	76
Figura 20 - Domínio e seção da malha computacional .....	76

Figura 21 - Comparação da simulação do jato erosivo para 5 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, <i>et al.</i> , 2014.....	77
Figura 22 - Comparação da simulação do jato erosivo para 15 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, <i>et al.</i> , 2014.....	77
Figura 23 - Comparação da simulação do jato erosivo para 30 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, <i>et al.</i> , 2014.....	78
Figura 24 - Exemplo de movimentação da malha dinâmica nas regiões onde ocorre erosão .....	79
Figura 25 - Perfis de erosão após 5 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão .....	80
Figura 26 - Perfis de erosão após 15 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão .....	81
Figura 27 - Perfis de erosão após 30 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão.....	81
Figura 28 - Comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais para o perfil de erosão de jatos com velocidades iguais a 15, 20, 25 e 30m/s utilizando malha estática.....	84
Figura 29 - Comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais para o perfil de erosão de jatos com velocidades iguais a 20, 25 e 30m/s utilizando malha móvel.....	85
Figura 30 - Resultados de perfis de erosão para os diâmetros de 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu$ m utilizando malha estática.....	86
Figura 31 - Resultado de velocidade das partículas de diâmetro igual a 50 $\mu$ m e regiões de ocorrência de presença dessas partículas .....	88
Figura 32 - Resultado de velocidade das partículas de diâmetro igual a 700 $\mu$ m e regiões de ocorrência de presença dessas partículas.....	88
Figura 33 - Resultado de frequência média de impacto para as partículas de diâmetro igual a 50 $\mu$ m e 700 $\mu$ m.....	89
Figura 34 - Resultado de profundidade de erosão ao longo da superfície da amostra para as partículas de diâmetro igual a 50 $\mu$ m e 700 $\mu$ m .....	89

Figura 35 - Relação da profundidade máxima de erosão experimental com o tamanho médio das partículas .....	90
Figura 36 - Resultado de ângulo médio de impacto para as partículas de diâmetro igual a 50 $\mu\text{m}$ e 700 $\mu\text{m}$ .....	91
Figura 37 - Resultado da simulação para 150 $\mu\text{m}$ ao modificar a taxa de erosão nos últimos ciclos proporcionalmente ao que ocorre nos experimentos .....	92
Figura 38 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,75 e 0,58 para o caso de 50 $\mu\text{m}$ .....	94
Figura 39 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,90, 0,75 e 0,58 para o caso de 150 $\mu\text{m}$ .....	95
Figura 40 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,75 e 0,58 para o caso de 700 $\mu\text{m}$ .....	95
Figura 41 – Geometria das simulações com curvas de 90° em série.....	97
Figura 42 - Razão de penetração experimental de Othayq et al. (2021) e numérica na segunda curva de 90° para diâmetros de 300 $\mu\text{m}$ .....	99
Figura 43 - Razão de penetração experimental de Othayq et al. (2021) e numérica na segunda curva de 90° para diâmetros de 75 $\mu\text{m}$ .....	100
Figura 44 - Velocidade das partículas nas curvas em série e razão de penetração na segunda curva de 90° para diâmetros de 300 $\mu\text{m}$ .....	101
Figura 45 - Velocidade das partículas nas curvas em série e razão de penetração na segunda curva de 90° para diâmetros de 75 $\mu\text{m}$ .....	102
Figura 46 - Resultado do formato da erosão na segunda curva de 90° para diâmetros de 300 $\mu\text{m}$ .....	102
Figura 47 - Resultados da simulação de erosão no cubo sem o novo método de <i>smoothing</i> na superfície .....	105
Figura 48 - Resultados da simulação de erosão no cubo com o novo método de <i>smoothing</i> na superfície .....	106
Figura 49 – Comparação da simulação de erosão no cubo sem e com o novo método de <i>smoothing</i> na superfície em regiões de erosão mais significativa.....	107
Figura 50 – Comparação da razão de penetração ao longo da tubulação para as curvas em série com a malha estática e com a malha dinâmica após a implementação do novo método de <i>smoothing</i> na superfície .....	108

Figura 51 - Tempo das simulações das curvas em série com e sem o novo método de <i>smoothing</i> na superfície.....	109
Figura 52 - Resultados das simulações do jato erosivo com o novo método de <i>smoothing</i> na superfície e diferentes números de parcelas injetadas a cada passo de tempo .	110
Figura 53 - Comparação do resultado para 30 minutos de erosão antes e depois da implementação do novo método de <i>smoothing</i> .....	111
Figura 54 - Tempo das simulações do jato erosivo com e sem o novo método de <i>smoothing</i> na superfície e diferentes números de parcelas injetadas a cada passo de tempo .	112
Figura 55 - Comparação de parâmetros de malha para a simulação do jato erosivo com e sem a implementação do novo método de <i>smoothing</i> .....	113
Figura 56 - Comparação dos perfis de erosão obtidos com a reprodução numérica dos experimentos de Nguyen <i>et al.</i> (2014) a partir da metodologia deste trabalho e de outros autores utilizando malha estática.....	116
Figura 57 - Comparação dos perfis de erosão obtidos com a reprodução numérica dos experimentos de Nguyen <i>et al.</i> (2014) a partir da metodologia deste trabalho e de outros autores utilizando malha móvel com a implementação do método de <i>smoothing</i> .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de acidentes industriais causados por processos erosivos indesejados .....	37
Tabela 2 - Condições de simulação para o estudo do jato erosivo em placa plana.....	70
Tabela 3 - Resultados experimentais de erosão para os diâmetros de 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu\text{m}$ .....	86
Tabela 4 - Condições das simulações para o estudo da erosão nas curvas em série .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$	densidade do fluido
$p$	pressão do fluido
$u_i$	componente $i$ da velocidade instantânea do fluido
$\mu_t$	viscosidade turbulenta
$k$	energia cinética turbulenta
$\varepsilon$	taxa de dissipação turbulenta
$C_D$	coeficiente de arrasto
$F_s$	força de sustentação
$\omega_i$	vorticidade
$Re$	número de Reynolds
$T$	torque do fluido sobre a partícula
$C_r$	coeficiente de rotação da partícula
$e_{par}$	coeficiente de restituição paralelo
$e$	coeficiente de restituição normal
$\mu_d$	coeficiente de atrito dinâmico
$\vec{u}_{pr}$	velocidade relativa no ponto de contato
$\alpha$	ângulo de impacto efetivo da partícula
$\alpha_{geo}$	ângulo de impacto geométrico da partícula
$\dot{m}_\pi$	vazão mássica de partículas
$e_r$	razão de erosão
$E_f$	taxa de erosão
$D_p$	diâmetro da partícula
$E_{90}$	razão de erosão para um ângulo de impacto de $90^\circ$
$u$	velocidade de impacto da partícula
$H_v$	dureza Vickers inicial do material erodido
$St$	número de Stokes
$F$	circularidade da partícula

$\delta$	delta de Kronecker
$\kappa$	constante de Von Kármán
$F_s$	força de sustentação
$Re_s$	número de Reynolds
$C_{ls}$	razão entre a força de sustentação e a força de Saffman
$F_r$	força de sustentação originada pela rotação da partícula
$C_{lr}$	coeficiente de sustentação
$\vec{n}$	vetor normal unitário
$\mu_d$	coeficiente de atrito dinâmico
$\gamma$	coeficiente de difusão
$u_{malha}$	velocidade de deslocamento da malha

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FCC	unidade de craqueamento catalítico fluido ( <i>Fluid Catalytic Cracking</i> )
CFD	fluidodinâmica computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
2D	duas dimensões
3D	três dimensões
PVD	deposição física de vapor ( <i>Physical vapour deposition</i> )
CVD	deposição química de vapor ( <i>Chemical vapour deposition</i> )
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
RSM	Modelo de Tensões de Reynolds ( <i>Reynolds Stress Model</i> )
LPC	Conceito de parcela lagrangiana ( <i>Lagrangian Parcel Concept</i> )
DPM	<i>Discrete Particle Method</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
HV	Dureza Vickers
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Pressure-Linked Equations</i>



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 Justificativas e Objetivos deste Trabalho.....	22
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
2.1 Erosão em Escoamentos Multifásicos.....	26
2.2 Mecanismos de Erosão com Partículas Sólidas .....	28
2.3 Principais Variáveis do Processo Erosivo.....	30
2.3.1 <i>Velocidade das partículas</i> .....	31
2.3.2 <i>Tamanho das partículas</i> .....	31
2.3.3 <i>Formato das partículas</i> .....	32
2.3.4 <i>Ângulo de impacto e Temperatura</i> .....	33
2.3.5 <i>Propriedades do fluido, das partículas e do material erodido</i> .....	35
2.4 Consequências da Erosão e Tecnologias para sua Mitigação .....	36
2.5 Estado da Arte – Experimentos e Simulações de Erosão com Partículas Sólidas.....	39
<b>3. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA .....</b>	<b>45</b>
3.1 Fase Contínua .....	46
3.2 Fase Dispersa .....	50
3.3 Modelagem da Erosão .....	56
3.4 Malha Dinâmica.....	59
3.4.1 <i>Implementação do novo método de smoothing na superfície</i> .....	62
3.5 UNSCYFL3D .....	64
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
4.1 Estudo Inicial do Jato Erosivo em Placa Plana .....	69
4.1.1 <i>Influência do tipo de acoplamento</i> .....	71
4.1.2 <i>Influência do número de passos de tempo</i> .....	73
4.1.3 <i>Influência do número de parcelas</i> .....	75
4.1.4 <i>Validação das simulações</i> .....	75
4.1.5 <i>Comparação entre malha estática e dinâmica</i> .....	78
4.1.6 <i>Estudo da influência da velocidade do jato, do tamanho das partículas e da esfericidade na erosão</i> .....	83
4.1.6.1 <i>Velocidade do Jato</i> .....	83
4.1.6.2 <i>Diâmetro das Partículas</i> .....	85
4.1.6.3 <i>Esfericidade das Partículas</i> .....	93
4.2 Curvas em Série.....	96
4.2.1 <i>Descrição da geometria e condições do caso experimental utilizado</i> .....	96

4.2.2	<i>Validação das simulações</i> .....	99
4.3	Método de <i>Smoothing</i> na superfície.....	103
4.3.1	<i>Comparação de uma simulação simples de erosão com e sem o smoothing</i> .....	103
4.3.2	<i>Caso das curvas em série com e sem smoothing</i> .....	107
4.3.3	<i>Caso do jato erosivo em placa plana com e sem smoothing</i> .....	109
4.4	Comparação dos resultados de perfil de erosão para o caso do jato erosivo em placa plana com a metodologia elaborada neste trabalho e de outros autores da literatura .....	115
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>119</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>122</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria, em geral, existem diversos processos que envolvem escoamentos multifásicos para o transporte de partículas. Na indústria petrolífera, unidades de FCC (craqueamento catalítico fluidizado, do inglês *Fluid Catalytic Cracking*), por exemplo, utilizam transporte de partículas de catalisador e são responsáveis pela maior parte da produção de gasolina no mundo e do processamento diário de petróleo (VOGT e WECKHUYSEN, 2015).

Um dos problemas mais relevantes na indústria está relacionado à erosão e ocorre em equipamentos utilizados em processos de craqueamento catalítico (FINNIE, 1960). O controle dos diferentes mecanismos de desgaste, que incluem erosão, abrasão e corrosão, ainda é um dos principais desafios existentes, sendo que esses processos de desgaste provocam altos prejuízos em diversas áreas, com custos que variam de 1 a 4% do produto interno bruto de países industrializados, o que, conseqüentemente, impacta no custo dos produtos finais (DUARTE, 2017).

Em escoamentos multifásicos, a erosão é mais significativa em regiões de tubulações nas quais há uma alteração na direção do escoamento, como em curvaturas, que são amplamente utilizadas na indústria de óleo e gás (PARSI, 2015). Em um riser FCC a direção do escoamento é alterada na região superior, na qual os sólidos saem do riser e são transportados para o ciclone, que faz a separação das fases. Com isso, as partículas de sólidos colidem com a tubulação, que se desgasta cada vez mais ao longo do tempo devido a esse impacto contínuo de partículas, especialmente na curvatura do riser. O mesmo ocorre em outras aplicações que também demandam o transporte multidirecional de partículas.

A Figura 1 ilustra os efeitos da erosão em diferentes regiões de unidades FCC e a Figura 2 ilustra o desgaste no distribuidor de uma unidade FCC, exemplificando como o processo erosivo provoca uma degradação relevante dos diversos equipamentos utilizados.

Figura 1 - Desgaste na tubulação e no ciclone de unidades FCC.



Fonte: CatCracking, 2018.

Figura 2 - Desgaste na extremidade e furos do distribuidor de uma unidade FCC.



Fonte: adaptado de Lisa e Keith, 2010.

A erosão é definida como o desgaste que ocorre devido à interação entre uma superfície sólida e um escoamento de fluido com partículas abrasivas a determinadas velocidades ou devido

ao impacto de líquido ou partículas sólidas com uma superfície sólida enquanto se movimentam (FINNIE, 1960).

Com o tempo, à medida que partículas colidem repetidamente com a superfície, seu material é deformado e removido gradativamente, o que faz com que tubulações ou outros componentes percam massa, ocasionando, dependendo de sua função, a diminuição da espessura de suas paredes ou aumento do diâmetro de furos, por exemplo, até que em algumas regiões sejam geradas fissuras ou mesmo aberturas significativas, levando à falha do equipamento.

Essa redução na espessura das paredes de um equipamento faz com que seu dimensionamento original não seja mais atendido, alterando as condições ideais de operação de temperatura e pressão para as quais ele foi projetado. Devido a isso, ao operar fora das condições ideais, ocorre uma falha prematura desse equipamento, podendo ocasionar um atraso ou uma queda da produção, além gerar de riscos para a segurança durante sua operação e, conseqüentemente, elevação de custos de manutenção e dos produtos (MAZUMDER, SHIRAZI e MCLAURY, 2008).

Devido a esses problemas resultantes da erosão e que comprometem a vida útil dos equipamentos, é de grande relevância o estudo do fenômeno. Porém, como ele envolve escoamentos multifásicos, mecanismos de erosão e diferentes tipos de materiais, é um fenômeno complexo e que é influenciado por diversas variáveis.

Sendo assim, a fim de reduzir a erosão em diversos tipos de equipamentos, diversos estudos experimentais são realizados para investigações de possíveis soluções para esse tipo de problema. Porém, esses estudos podem apresentar altos custos, além de demandarem muito tempo para obtenção de resultados, que muitas vezes podem ser específicos para determinadas configurações e condições de operação, nem sempre apresentando um detalhamento e descrição do processo erosivo ao longo do tempo ou das propriedades das partículas erodentes.

Mesmo que equipamentos e processos industriais tenham apresentado significativa melhoria ao longo dos anos, processos de erosão ainda representam problemas críticos e que acarretam altos custos. Além disso, dependendo da aplicação industrial envolvida, testes de erosão são difíceis de serem realizados experimentalmente, especialmente reproduzindo as condições de interesse.

Dessa maneira, simulações numéricas envolvendo análise e predição da erosão em escoamentos multifásicos tem sido cada vez mais utilizadas para auxiliar nesse estudo da erosão para diversas aplicações industriais.

Como o processo de erosão pode ter diversas consequências negativas para o processo industrial e gerar altos custos de manutenção, uma predição correta do fenômeno da erosão por meio de simulações auxilia tanto na previsão da vida útil do equipamento quanto na detecção de locais críticos da geometria nos quais a erosão ocorre com maior intensidade (PEREIRA, SOUZA e MARTINS, 2014). Logo, simulações facilitam a elaboração de estratégias para alteração da geometria e, conseqüentemente, a diminuição do problema.

Além de apresentarem um custo significativamente mais baixo em relação a experimentos, a investigação da erosão por meio de dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) permite uma análise ao longo do tempo de duração do processo de erosão, assim como em toda a geometria de interesse para o estudo, dando flexibilidade para pesquisas envolvendo alterações da geometria ou de outras variáveis do processo.

Em diversas aplicações industriais os equipamentos e seus componentes estão sujeitos à erosão por intervalos de tempo muito longos, resultando em uma erosão expressiva. Nesse caso, as alterações na geometria ganham importância e influenciam o decorrer do processo erosivo.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Além de ainda haver muitos desafios no estudo da erosão em escoamentos multifásicos, visto que o mecanismo de erosão devido a partículas sólidas não é completamente compreendido, as simulações numéricas geralmente consideram que o perfil da superfície erodida se mantém inalterado ao longo do tempo, ignorando as mudanças instantâneas que ocorrem ao longo dos impactos das partículas erodentes e o efeito disso no escoamento, o que resulta em incertezas de predições da taxa de erosão e sua localização ao longo da geometria (OGUNSESAN, 2020). Sendo assim, a utilização de malhas móveis para simulações numéricas que envolvem erosão se torna um recurso mais interessante e bastante promissor.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma nova modelagem numérica associada a um método de suavização da superfície para malhas móveis em escoamentos com erosão que seja robusta e aplicável a diferentes situações, incluindo aquelas em que a alteração da geometria ao longo do tempo possa ser relevante. Em diversas aplicações industriais, como processamento de óleo e gás, a erosão ocorre durante longos períodos ou com alta intensidade, o que torna importante que a modelagem numérica contemple essas condições de forma adequada. Sendo assim, são objetivos específicos do trabalho:

- validar a metodologia de simulação numérica da erosão;
- estudar a influência da modificação de variáveis dos modelos de erosão;
- comparar os resultados de malha estática e malha dinâmica;
- aprimorar o processo de modificação da malha ao longo do tempo com a implementação do método de *smoothing* na superfície.

Como a erosão depende das condições do escoamento, à medida que a erosão ocorre e a superfície é modificada, a turbulência pode aumentar devido às irregularidades na superfície, o que torna possível um aumento da taxa de remoção de material da superfície. Esse efeito também pode ocorrer em virtude do desalinhamento de peças em um equipamento (FINNIE, 1960).

Desse modo, a modificação de uma superfície devido à erosão ganha cada vez mais importância ao longo da vida útil de uma tubulação ou de equipamentos sujeitos a processos erosivos. Consequentemente, a modelagem dessas alterações se torna necessária.

Portanto, é ideal que o processo erosivo possa ser modelado simultaneamente às alterações geométricas ocasionadas por ele, o que é possível ao se utilizar malhas móveis. Dessa maneira, a modelagem numérica da erosão se aproxima melhor do fenômeno físico em condições reais de operação, permitindo que se faça a modelagem do escoamento e da erosão de forma mais satisfatória e adequada.

Sendo assim, em simulações com malhas móveis, possibilita-se a predição de alterações na geometria devido à erosão, além do estudo de seu desenvolvimento ao longo de todo o intervalo de tempo, o que auxilia na predição de perfis de erosão. Consequentemente, permite-se localizar mais corretamente, por exemplo, regiões de tubulações, componentes ou equipamentos que são

mais suscetíveis ao desgaste, o que auxilia na avaliação da sua vida útil, no aperfeiçoamento da geometria para mitigação da erosão ou no planejamento de sua manutenção.

Com malhas dinâmicas, devido à alteração geométrica ao longo da simulação, o escoamento também pode ser recalculado a cada passo de tempo para contabilizar a influência da modificação da geometria no escoamento e, conseqüentemente, na erosão, reduzindo as incertezas mencionadas por Ogunesan (2020) ao realizar simulações numéricas com malhas estáticas.

Para validar a metodologia de simulação numérica da erosão, os resultados para determinada aplicação obtidos numericamente serão comparados com resultados experimentais. Em relação à malha dinâmica, serão avaliadas as alterações nos resultados de simulações comparando-se malha estática e dinâmica para verificação das vantagens e desvantagens de sua utilização em diferentes aplicações.

Além disso, busca-se aprimorar o processo de modificação da malha com a implementação do método de *smoothing*, o que evita o surgimento de volumes negativos<sup>1</sup> na malha numérica quando se tem deslocamentos consideráveis devido à erosão no decorrer das simulações e pode contribuir para diminuição de ruídos nos resultados observados para erosão. Para isso, a metodologia será aplicada inicialmente a uma geometria mais simples para que, após a confirmação de sua eficácia, possa ser aplicada a outras geometrias e casos mais complexos.

Com isso, pode-se validar uma metodologia de simulação de escoamentos multifásicos com erosão que possibilite a obtenção de bons resultados e permita sua aplicação a qualquer geometria, incluindo os efeitos de sua modificação devido ao processo erosivo.

Assim, no Capítulo 2 será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre erosão em escoamentos multifásicos, as variáveis de importância no processo erosivo e trabalhos publicados sobre o tema utilizando simulações numéricas ou com a realização de experimentos.

A modelagem matemática e numérica para representação do escoamento e do fenômeno da erosão, assim como o código utilizado para esse processo serão descritos no Capítulo 3 deste

---

<sup>1</sup> Volumes negativos indicam que células da malha computacional apresentam conectividade inadequada, o que geralmente é causado devido à distorção de superfícies ou algum erro durante a movimentação da malha.



trabalho. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos por meio de simulações numéricas, que analisaram a influência de diversas variáveis na erosão, apresentaram a comparação de resultados com a utilização de malhas estáticas ou dinâmicas e as melhorias efetuadas com a implementação do novo método de *smoothing*.

No Capítulo 5 são destacadas as conclusões deste trabalho e no Capítulo 6 são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica visa apresentar o referencial teórico referente ao estudo da erosão em escoamentos multifásicos, assim como retratar o desenvolvimento de pesquisas nessa área ao longo dos anos, tanto em estudos experimentais quanto por meio de simulações numéricas.

### 2.1 EROSÃO EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

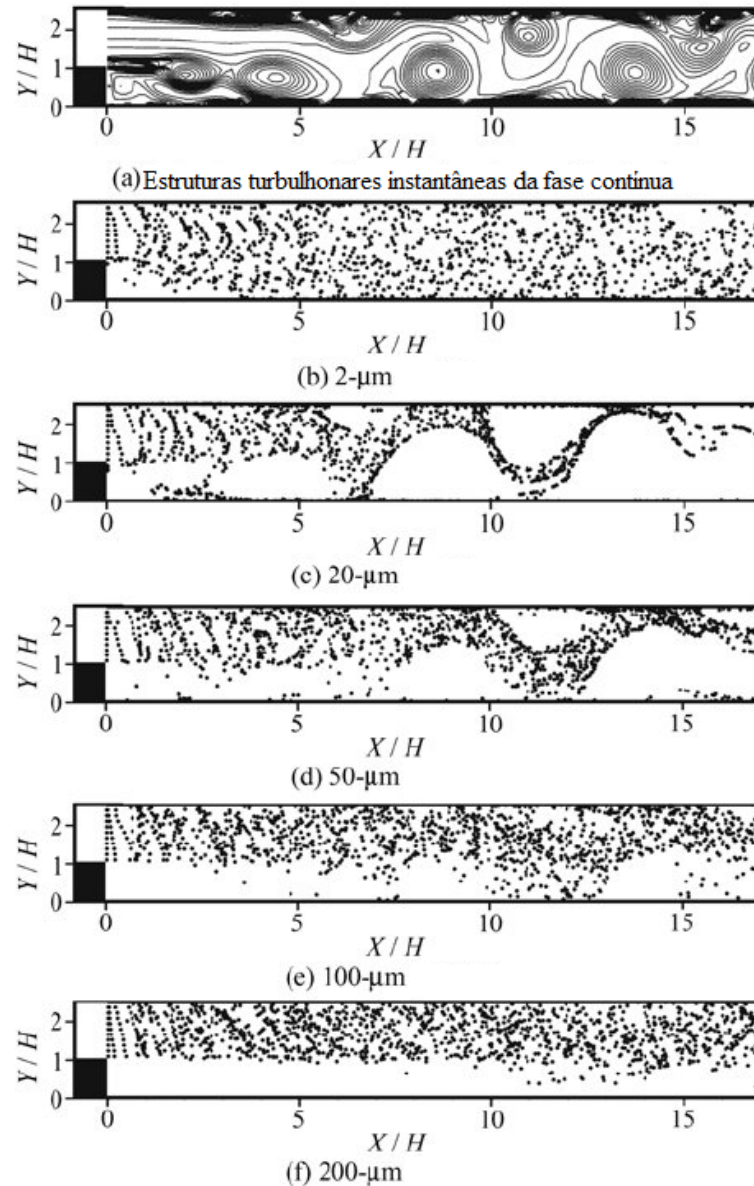
Problemas que envolvem erosão em escoamentos multifásicos compreendem dois pontos principais para seu entendimento: determinar, a partir das condições do escoamento, a quantidade, velocidade e direção das partículas que atingem determinada superfície e calcular a quantidade de material que é removido devido à erosão, o que dependerá do mecanismo de erosão dos materiais envolvidos em tal problema (FINNIE, 1960).

Quando o processo de erosão começou a ser investigado, a maioria dos trabalhos publicados eram realizados de forma experimental variando condições como velocidade de impacto, concentração de partículas e ângulo de incidência das partículas no material erodido. À medida que os experimentos se intensificaram, surgiram diversas correlações empíricas baseadas nesses estudos que relacionam o nível de desgaste de uma superfície em função dos materiais envolvidos (erodido e erodente), além de suas propriedades físicas e mecânicas, propriedades do fluido e do escoamento, além do formato das partículas, por exemplo.

O comportamento de uma partícula em um fluido, ou seja, a tendência de resposta a alterações estabelecidas pelo escoamento, o que resulta na alteração de sua trajetória, pode ser caracterizada pelo número  $\lambda$ , análogo ao número de Stokes (St). Esse número adimensional é definido pela razão entre duas escalas de tempo características da fase sólida e do fluido. Quando  $\lambda \gg 1$ , as partículas respondem mais lentamente a mudanças no escoamento, ao passo que quando  $\lambda \ll 1$  as partículas tendem a seguir as linhas de corrente do escoamento (DUARTE, 2015).

A Figura 3 ilustra um escoamento com partículas em um duto, sendo que os diâmetros variam de  $2\mu\text{m}$  ( $St=0,011$ ) a  $200\mu\text{m}$  ( $St=111,184$ ). Pode-se verificar as modificações mencionadas no comportamento dessas partículas à medida que seu diâmetro e, conseqüentemente, o número de Stokes, aumenta.

Figura 3 - Simulação de diferentes diâmetros de partículas em um fluido escoando através de um duto



Fonte: adaptado de ZHANG, WANG, *et al.* (2008)

A análise numérica da erosão compreende a simulação de escoamentos multifásicos, em geral de misturas sólido/gás ou sólido/líquido, sendo assim necessária a utilização de modelos matemáticos capazes de descrever não apenas o comportamento de fases contínuas como também das fases dispersas, que são as partículas de material erodente. De maneira geral, os modelos utilizados com esta finalidade podem ser categorizados em dois grandes grupos, de acordo com a abordagem que utilizam, Lagrangeana ou Euleriana.

Uma análise experimental aliada a simulações numéricas permite descrever e prever as características do escoamento, direção e velocidade das partículas, quantidade de material removido devido à erosão e, com a utilização de malhas móveis, até mesmo a modificação da geometria e escoamento ao longo do processo erosivo.

Esses resultados provenientes das simulações são muito importantes para previsão da vida útil dos equipamentos e detecção de locais críticos da geometria, o que permite a elaboração de estratégias para alterações da geometria e, conseqüentemente, redução das diversas perdas derivadas dos processos erosivos.

Como a erosão provoca modificações na geometria do material erodido, as características dos impactos das partículas também podem ser alteradas ao longo do processo, o que altera a taxa de erosão e faz com que seja apropriado que esse efeito seja contabilizado na modelagem do fenômeno. À medida que as deformações aumentam no material erodido, além dessas modificações mencionadas, o escoamento se altera, o que também deve ser modelado. Portanto, é importante entender os mecanismos de erosão e principais variáveis que afetam esse processo.

## 2.2 MECANISMOS DE EROSIÃO COM PARTÍCULAS SÓLIDAS

Materiais dúcteis sofrem erosão devido a um processo de deformação plástica que compreende o deslocamento e corte de material devido ao impacto com as partículas de material erodente, enquanto materiais frágeis tem sua massa removida devido à formação e interseção de fraturas que surgem a partir do ponto de impacto com as partículas erodentes (FINNIE, 1960).

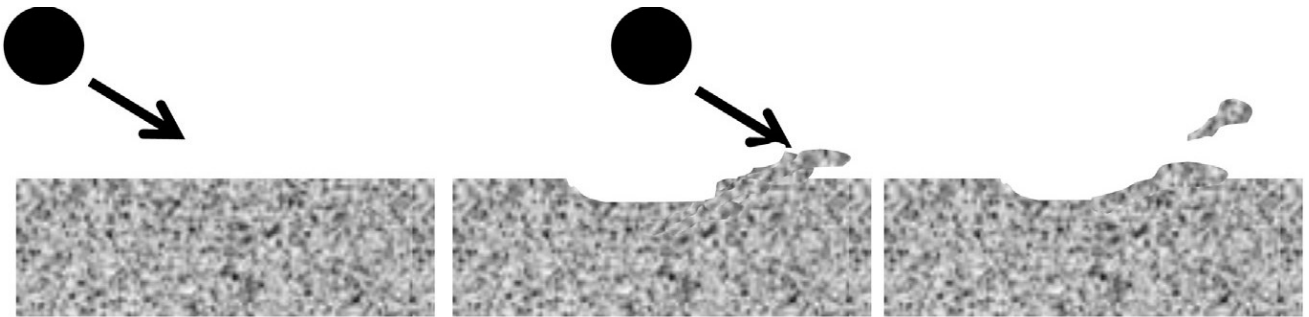
Em uma superfície dúctil que ainda não sofreu erosão, inicialmente à medida que as partículas colidem, formam-se diferentes tipos de cavidades e, em consequência da energia cinética do impacto, que é convertida em energia térmica, a superfície aquece próximo às regiões das cavidades, formando uma zona de superfície aquecida (BELLMAN e LEVY, 1981).

Essa zona da superfície aquecida favorece um aumento da ductilidade dessa região e promove um alívio de tensões nessa região do material. Porém, à medida que a profundidade do material erodido aumenta e distancia-se dessa região, esse efeito é diminuído e observa-se uma

zona em que há o endurecimento do material devido à deformação, até que, em uma profundidade ainda maior, verifica-se uma região que não é afetada pela erosão (BELLMAN e LEVY, 1981).

Assim que essas três regiões são estabelecidas, para toda a faixa de ângulos de impacto entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$  é constatado que a taxa de erosão entra em regime permanente e o processo de erosão ocorre devido a processos de indentação, deformação e corte, sendo que, à medida que as partículas colidem com a superfície, ela é deformada e plaquetas se formam nas imediações das crateras originadas, sendo posteriormente removidas com os impactos subsequentes de partículas, como ilustrado na Figura 4 (BELLMAN e LEVY, 1981).

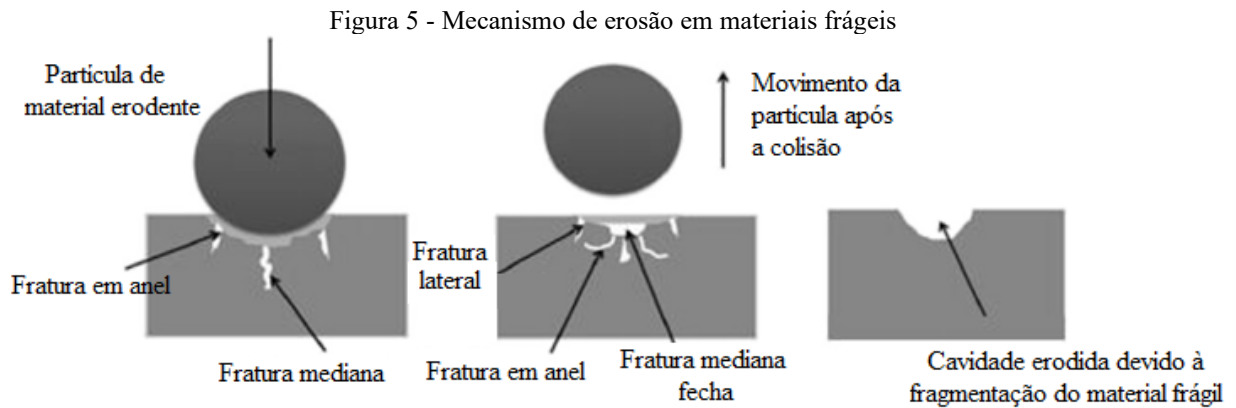
Figura 4 - Mecanismo de erosão em materiais dúcteis



Fonte: PARSI (2015)

Essa formação de plaquetas foi observada como o principal mecanismo de erosão que causa perda de material, independentemente das composições do material erodente (LEVY e CHIK, 1983). Porém, segundo Bellman e Levy (1981), o desgaste por deformação predomina para menores ângulos de impacto, sendo que à medida que esse ângulo aumenta o desgaste por corte se torna mais frequente, até que para ângulos de impacto mais elevados o mecanismo de indentação é predominante.

Com o impacto de partículas em um material frágil, são formadas fraturas laterais e radiais que crescem à medida que outras partículas colidem com o material, fragmentando-o em pequenos pedaços, removidos da superfície pelo impacto posterior de outras partículas, como ilustra a Figura 5 (PARSI, 2015).



Fonte: adaptado de Ogunesan (2020); Sooraj e Radhakrishnan (2013)

Segundo Finnie (1960), ao contrário dos materiais dúcteis, para os materiais frágeis não é possível estimar a erosão em função da trajetória da partícula. É possível se obter a tensão entre a partícula e a superfície erodida, o que permite uma estimativa da trinca inicial formada no material frágil erodido, mas após a sua formação ela se propaga e interage com outras trincas que se formam, o que torna o mecanismo mais complexo de ser modelado.

O autor tentou elaborar correlações para materiais frágeis que envolvessem a velocidade das partículas e ângulo de incidência, como ocorre nos modelos para materiais dúcteis, mas não foi possível obter uma equação generalizada. Verificou-se em experimentos que, ao colidir partículas esféricas de aço com uma superfície de vidro, cada esfera inicialmente causou uma trinca circunferencial (fratura em anel) sem remoção de material. Porém, à medida que se aumentou o número de partículas que colidiam com o vidro, surgiram outras trincas que interagiram com as trincas do tipo anel e resultaram em perda de material erodido (FINNIE, 1960). Portanto, é mais difícil a obtenção de correlações para materiais frágeis do que para os dúcteis.

### 2.3 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO EROSIVO

Diversas variáveis relacionadas a propriedades do escoamento ou dos materiais envolvidos podem influenciar no processo erosivo, o que torna complexa sua modelagem. Nesta seção as principais variáveis serão apresentadas, assim como o efeito de cada uma delas na erosão devido a partículas sólidas.

Além da influência do escoamento e da turbulência, o processo erosivo depende do formato, tamanho, densidade e da concentração das partículas, o que também afeta a interação entre elas (PEREIRA, SOUZA e MARTINS, 2014).

### **2.3.1 Velocidade das partículas**

Quando maior é a velocidade das partículas, maior é a taxa de erosão, que é função direta dessa velocidade elevada a um expoente  $n$ , que varia segundo a literatura de 1,6 a 2,6 (OGUNSESAN, 2020).

Em um experimento realizado por Grant e Tabakoff (1973), ao analisar o efeito da velocidade de impacto de alumina e sílica em uma liga de alumínio, concluiu-se que para um ângulo de incidência de  $20^\circ$  em relação à amostra, a razão de erosão foi proporcional à velocidade elevada ao expoente  $n=2,8$ . Já para o ângulo de  $90^\circ$ , o valor de  $n$  foi igual a 4 para ambos os materiais analisados.

A cavidade erodida de um material pode apresentar uma profundidade até 10 vezes maior ao dobrar a velocidade de impacto das partículas (NGUYEN, LIM, *et al.*, 2014). Portanto, a velocidade é uma variável muito importante e que tem influência significativa na erosão devido a partículas sólidas.

### **2.3.2 Tamanho das partículas**

As partículas com tamanho entre 5 e  $500\mu\text{m}$  de diâmetro são as principais responsáveis por processos de erosão (HUTCHINGS, 2017). Quanto maior esse tamanho, maior é o potencial erosivo devido a uma maior energia cinética da partícula erodente.

Porém, segundo a literatura, a erosão aumenta com o aumento do diâmetro das partículas até um certo limite, o que pode ocorrer devido à concentração maior de força com o impacto dessas partículas desenvolver um estado estacionário em relação ao número de plaquetas, formadas conforme mecanismo descrito anteriormente e ilustrado na Figura 4. Isso pode fazer com que a

zona endurecida do material abaixo da superfície, como mencionado no item 2.2, se forme mais rapidamente, o que dificulta a deformação (LEVY e CHIK, 1983).

Grant e Tabakoff (1973) também observaram essa tendência de estabilização do aumento da erosão à medida que se aumenta o tamanho da partícula erodente, sendo que esse efeito foi ainda mais evidente para maiores velocidades das partículas.

### 2.3.3 Formato das partículas

Partículas que apresentam uma esfericidade menor tendem a apresentar maiores ângulos de ataque, o que ocasiona um aumento da taxa de erosão. As partículas mais esféricas distribuem a deformação em uma área maior, exigindo um número maior de impactos para remoção de material (HUTCHINGS, 2017).

O potencial erosivo de partículas é uma função principalmente da concentração da força que elas exercem no local de impacto do material que sofre erosão. Como partículas angulares são mais capazes de concentrar essa força que partículas arredondadas, elas causam até quatro vezes mais desgaste que partículas esféricas (LEVY e CHIK, 1983).

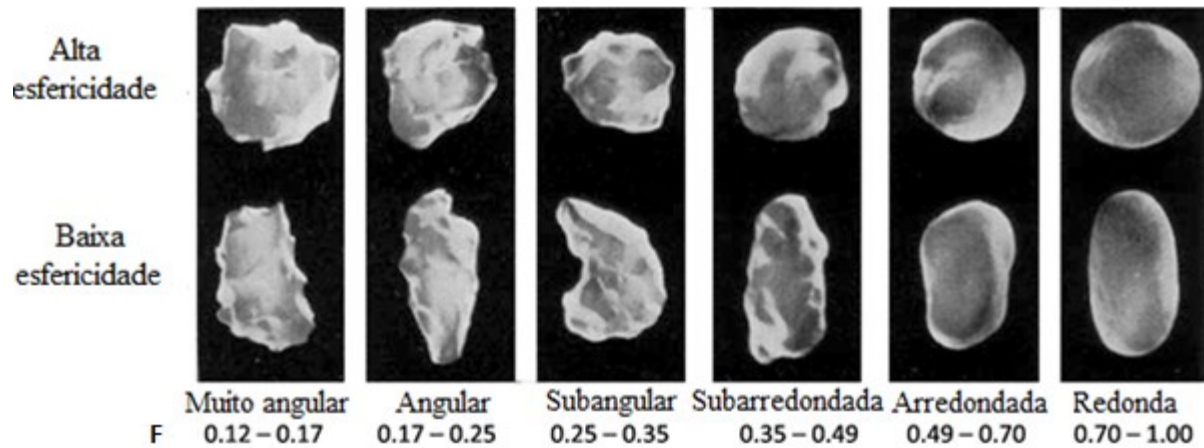
A angularidade, que também é um fator de forma, dificilmente é medida quantitativamente, pois depende de um formato tridimensional da partícula que é complexo e de difícil descrição e medição.

Um fator de forma que pode ser utilizado e medido repetidas vezes em imagens 2D é a circularidade ( $F$ ), que pode fornecer uma aproximação da esfericidade de uma partícula. A circularidade é definida como a razão entre a área de projeção da partícula em uma imagem 2D e a área de um círculo com o mesmo perímetro dessa projeção (HUTCHINGS, 2017).

A Figura 6 ilustra diferentes partículas em função do seu grau de esfericidade e angularidade, assim como as faixas de circularidade para cada formato.



Figura 6 - Exemplos de partículas com diferentes esfericidades, angularidades e circularidades



Fonte: adaptado de Krumbein e Sloss (1963)

Na Figura 6, partículas angulares como ilustrado podem apresentar taxas de erosão cerca de 10 vezes maiores que uma partícula redonda (HUTCHINGS, 2017). Sendo assim, o formato das partículas altera significativamente a erosão e é uma variável que deve ser considerada em simulações numéricas.

#### 2.3.4 Ângulo de impacto e Temperatura

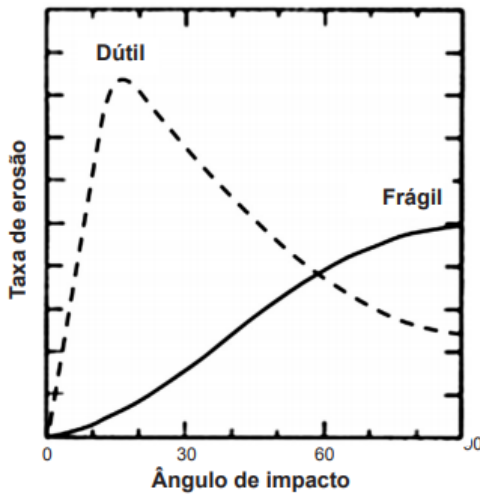
Em geral não se sabe como a temperatura influencia a erosão, mas como ela afeta as propriedades dos materiais, acredita-se que a ductilidade do material erodido aumenta com temperaturas mais altas, o que diminui a taxa de erosão devido à uma maior absorção de energia cinética por deformação plástica durante o impacto das partículas (PARSI, 2015).

O ângulo de impacto das partículas em relação à superfície erodida pode influenciar o mecanismo de erosão em materiais dúcteis, de tal maneira que para ângulos maiores a deformação plástica seja o regime predominante, enquanto para ângulos de impacto menores domine o mecanismo de corte (NGUYEN, LIM, *et al.*, 2014).

Em geral, para materiais dúcteis as taxas de erosão são maiores para ângulos de impacto mais baixos, enquanto para materiais frágeis as taxas de erosão são maiores para ângulos mais

próximos de  $90^\circ$ , como ilustra a Figura 7. Grant e Tabakoff (1973), ao realizarem experimentos com partículas erodentes angulares de alumina e sílica em uma liga de alumínio, verificaram que a erosão foi maior a um ângulo de incidência de  $20^\circ$  em relação à amostra e diminuiu à medida que esse ângulo aumentava até  $90^\circ$ . Além disso, foi verificado que essa relação do ângulo de impacto com a erosão se mantém ao alterar a velocidade de impacto.

Figura 7 - Relação entre taxa de erosão e ângulo de impacto para materiais frágeis e dúcteis

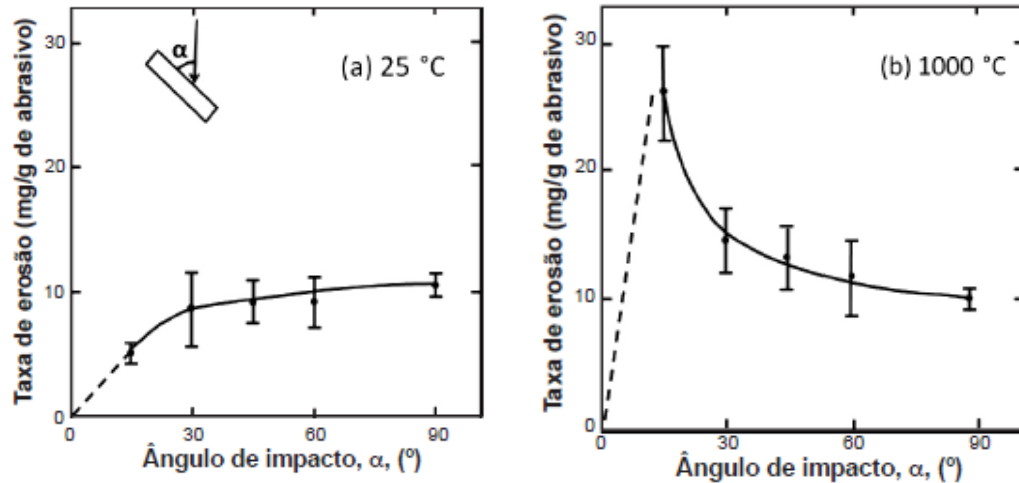


Fonte: GONÇALVES e PANDOLFELLI (2011)

Apesar dessa relação entre ângulo de impacto e o comportamento dos materiais, é importante observar que, dependendo da temperatura de operação de um equipamento, o material de interesse pode apresentar comportamento dúctil, como o refratário de alumina, cujo comportamento é apresentado na Figura 8.

Esse material é utilizado como revestimento interno em equipamentos que trabalham a altas temperaturas de operação e exibe comportamento frágil à temperatura ambiente e dúctil a  $1000^\circ\text{C}$  devido à maior dificuldade para iniciação de propagação de trincas. Quando não há energia cinética suficiente para iniciar trincas ocorre erosão dúctil. Assim, ao modelar a erosão, deve-se observar não apenas as propriedades dos materiais envolvidos, mas também seu comportamento nas condições de estudo.

Figura 8 - Taxa de erosão em função do ângulo de impacto para um refratário de alumina a 25°C (a) e a 1000°C (b)



Fonte: adaptado de Gonçalves e Pandolfelli (2011); Wiederhorn e Roberts (1976)

### 2.3.5 Propriedades do fluido, das partículas e do material erodido

As propriedades do fluido que carrega as partículas sólidas são muito importantes, pois a densidade e a viscosidade afetam o comportamento e, conseqüentemente, a trajetória das partículas e as características de seu impacto com a superfície erodida, o que também tem influência direta na erosão.

Grant e Tabakoff (1973) analisaram a influência do material das partículas erodentes no processo erosivo e concluíram que a dureza e formato das partículas tem relação direta com a magnitude da erosão. Em geral, quanto maior a dureza das partículas maior é a erosão, mas a partir de um determinado valor, o aumento da dureza da partícula não causa mais um incremento significativo na erosão, que passa a apresentar uma taxa aproximadamente constante (LEVY e CHIK, 1983).

Tanto as propriedades das partículas sólidas quanto do material erodido são importantes para modelagem da erosão, não apenas para caracterização de seu mecanismo, mas também porque a intensidade da erosão depende dessas propriedades, como será apresentado na seção 3.3.

## 2.4 CONSEQUÊNCIAS DA EROSÃO E TECNOLOGIAS PARA SUA MITIGAÇÃO

A erosão ocasionada por escoamentos multifásicos afeta diversos setores da economia, com consequências não apenas financeiras como também ambientais e humanas. Esses setores incluem, por exemplo, instalações industriais que lidam com a produção e o transporte de produtos e sedimentos através de tubulações, como fábricas de produtos químicos, refinarias e plantas de produção de energia.

Materiais erodidos não detectados e não controlados nesses ambientes aumentam os riscos de falhas e podem ocasionar diversos tipos de acidentes, portanto o acompanhamento e manutenção de equipamentos e tubulações é de grande importância. Na Tabela 1 são apresentados quatro exemplos de acidentes já registrados e ocasionados por processos erosivos. Apesar de vários outros acidentes terem sido identificados ao longo dos anos ao redor do mundo, esses exemplos permitem evidenciar as extensões dos danos causados pelo controle ineficaz da erosão.

Segundo Chattopadhyay (2001), uma ampla variedade de materiais e processos estão disponíveis para evitar perdas devido ao desgaste erosivo. Isso inclui a melhoria das propriedades de resistência ao desgaste da superfície por meio do encruamento; tratamento térmico seletivo (por exemplo, indução ou endurecimento por chama ou laser); difusão em lacunas intersticiais ou substitucionais (C, N, Al, Cr, Zn); revestimento de conversão (P, Cr); revestimentos de película fina, como galvanoplastia, chapeamento eletrolítico, deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD), processo sol-gel; e revestimento de filme espesso por soldagem e aspersão térmica.

Superfícies de metal, cerâmica ou plástico podem ainda ser protegidas contra o desgaste por meio da modificação da superfície ou pela deposição de materiais resistentes ao desgaste. Os materiais de revestimento resistentes ao desgaste podem ser metais, cerâmicas, plásticos ou compósitos (CHATTOPADHYAY, 2001). Na indústria petrolífera, por exemplo, é comum a utilização de refratários nas unidades de craqueamento catalítico, assim como de sistemas de ancoragem que facilitam a adesão do refratário e reforçam a proteção (DRIES e MCAULEY, 2001; SADEGHBEIGI, 2020). Na Figura 9 são ilustrados esses métodos preventivos utilizados em refinarias.

Tabela 1 - Exemplos de acidentes industriais causados por processos erosivos indesejados

Descrição do acidente	Referência
<p>Em 16 de abril de 2001 uma explosão e um incêndio ocorreram na refinaria Conoco Humber, após a falha catastrófica de uma tubulação aérea de uma coluna de desetanização da usina de gás saturado. O acidente ocorreu devido a erosão e a consequente redução de espessura da parede do tubo a tal ponto que uma curva de 90° se rompeu quando não foi mais capaz de conter a pressão de seu conteúdo. Cerca de 180 toneladas de produtos da refinaria foram liberadas durante o incidente, extensos danos estruturais foram causados pelas explosões e incêndio, as propriedades nas áreas circundantes foram significativamente afetadas e várias pessoas se machucaram.</p>	<p>CARTER, DAWSON e NIXON (2006)</p>
<p>Em 9 de agosto de 2004, na usina nuclear de Mihama, no Japão, um duto de aço carbono que transportava água quente sob alta pressão se rompeu, matando cinco trabalhadores que trabalhavam em uma manutenção próxima. Oito meses depois, o comitê de investigação da Agência de Segurança Industrial e Nuclear concluiu que a causa da ruptura foi o resultado da redução da espessura da parede do tubo devido à erosão-corrosão. O acidente foi similar ao da usina nuclear de Surry, nos EUA, que ocorreu em 1986 e matou quatro trabalhadores.</p>	<p>MATSUMURA (2006)</p>
<p>Em 6 de agosto de 2012, a Unidade de Petróleo número 4 da Refinaria de Richmond da Chevron pegou fogo, resultando no seu fechamento até que o fogo fosse contido. Embora o acidente não tenha causado mortes, quinze mil pessoas foram enviadas para diversos hospitais devido ao incêndio. Em um relatório técnico de 2009, o engenheiro da Chevron citou possíveis riscos de vazamento/ruptura devido à corrosão/erosão na tubulação aérea, o que poderia resultar em perdas de contenção, possíveis incêndios e lesões corporais, como ocorreu.</p>	<p>KHAN (2013)</p>
<p>Em 17 de abril de 2016 um oleoduto que ligava um terminal portuário de petróleo a uma usina de petróleo a jusante, na parte norte da Itália, se rompeu e derramou aproximadamente 600 m<sup>3</sup> de petróleo em um rio e posteriormente no porto de Gênova. Pelo menos 20 pontos críticos de erosão/corrosão com redução de espessura da tubulação já haviam sido encontrados alguns anos antes do acidente. Além das consequências ambientais, o acidente gerou prejuízos econômicos e de abastecimento em razão do fechamento da linha por alguns meses.</p>	<p>VAIRO, TOMASO, et al. (2017)</p>

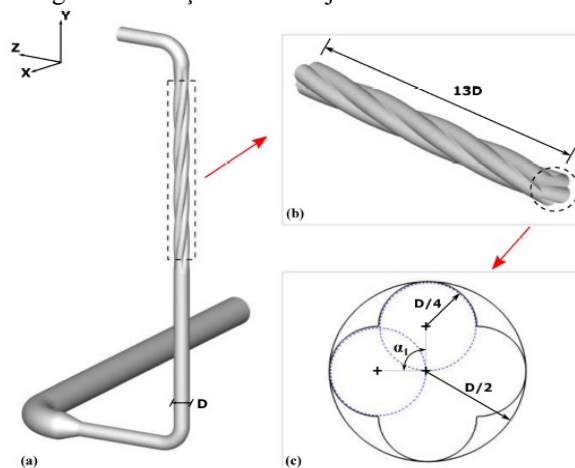
Figura 9 - Revestimento anti-erosão para unidades FCC



Fonte: Beijing Tongda Refractory Technologies Co, Ltd. (2019)

Alterações de projeto na geometria dos dispositivos sujeitos aos escoamentos multifásicos erosivos também podem contribuir para o controle da erosão. A utilização de câmaras que interferem no escoamento das regiões de mudança de direção das tubulações (DUARTE, SOUZA e SANTOS, 2016) ou a adoção de tubulações retorcidas (DUARTE e SOUZA, 2017) como a apresentada na Figura 10 podem reduzir o desgaste erosivo.

Figura 10 - Design de tubulação com o objetivo de reduzir a erosão em curvas



Fonte: DUARTE (2017)

Essas alterações geométricas interferem diretamente nos parâmetros do escoamento multifásico, afetando o impacto das partículas nas superfícies atingidas. Desse modo, quaisquer outras mudanças que afetem as partículas e suas características, como densidade, tamanho e quantidade, ou as características do escoamento, como velocidade, viscosidade e níveis de turbulência, podem alterar positivamente ou negativamente o processo de desgaste erosivo.

No trabalho de Othayq, Haider, *et al.* (2021), verificou-se também que o aumento da distância entre duas curvas de 90° em série de uma tubulação pode reduzir a erosão na segunda curva, então de acordo com cada aplicação pode-se adotar diferentes estratégias para mitigação da erosão e prevenção de acidentes. Contudo, essas modificações e seus efeitos ao longo do tempo no processo erosivo ainda necessitam de mais estudos, especialmente considerando efeitos contínuos no escoamento de mudanças na geometria devido ao desgaste.

## 2.5 ESTADO DA ARTE – EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES DE EROSÃO COM PARTÍCULAS SÓLIDAS

Em trabalhos como o de Nguyen et al. (2014) devido à importância da alteração da geometria ao longo do processo erosivo, perfis 3D da superfície erodida da amostra obtidos experimentalmente para diferentes intervalos de tempo foram incluídos na simulação para representar os efeitos relativos à erosão associados aos impactos na geometria estudada. Porém, para representar esses efeitos nas simulações foi necessário obter experimentalmente as geometrias da superfície ao longo do tempo, o que limita a reprodução dessas modificações em simulações para diversas aplicações industriais. Essa limitação poderia ser eliminada com a utilização de malhas móveis, para as quais não há necessidade de perfis superficiais experimentais para representar as modificações geométricas ao longo do tempo.

Nesse trabalho de Nguyen et al. (2014), foram obtidos perfis 3D da superfície erodida da amostra para intervalos de tempo de 0,5, 5, 15 e 30 minutos, com velocidade do jato igual a 30 m/s. Esses perfis experimentais foram introduzidos nas simulações para representar os efeitos relativos à erosão que modificam a geometria, mas esses perfis não foram comparados com os resultados numéricos obtidos. Além disso, as partículas erodentes foram reutilizadas em diversos ciclos dos experimentos, o que fez com que a taxa de erosão variasse até 300% entre eles.

Uma metodologia numérica proposta por Messa e Malavasi (2018) obteve uma concordância razoável entre resultados experimentais e numéricos. Porém, as simulações realizadas foram bidimensionais e foi assumido que velocidade e energia cinética nas cavidades produzidas pela erosão eram nulas, o que resulta numa significativa simplificação do fenômeno.

Outro trabalho, que utilizou modificações geométricas nas simulações, mas que foi feito com simulações tridimensionais, foi apresentado por López, Stickland e Dempster (2018). O perfil de erosão obtido é semelhante àquele observado experimentalmente por Nguyen et al. (2014), mas a magnitude da erosão obtida pelas simulações numéricas foi muito maior que nos experimentos, o que fez com que utilizassem um fator de escala para que os resultados numéricos se aproximassem dos experimentais.

No estudo de Parsi *et al.* (2019) reproduziram-se experimentos de jato erosivo utilizando-se malhas estáticas e dinâmicas, mas os resultados numéricos obtidos com a malha estática apresentaram valores de profundidade de erosão muito acima do esperado, com variações de até 400%. Essas sobrepredições não ocorreram com a utilização de malhas dinâmicas, que apresentaram resultados de erosão mais coerentes com aqueles obtidos experimentalmente, mas apenas em algumas regiões da amostra. Nesse estudo o modelo implementado para deformação da malha tem uma abordagem pseudo-transiente, pois exige que a solução do escoamento seja feita em regime permanente para que então seja calculado o movimento das partículas e as taxas de erosão na superfície, a partir das quais a posição da malha é atualizada.

Por meio de simulações CFD-DEM, Varas, Peters e Kuipers (2017) investigaram a distribuição de partículas de vidro em um riser pseudo-2D com as velocidades superficiais do ar iguais a 5,55, 5,95, 6,35 e 6,74m/s em condição diluída. A partir dos resultados, analisaram a formação de clusters, suas velocidades e perfis axiais e radiais da distribuição de sólidos. Dados experimentais obtidos com a técnica de PIV foram utilizados para a validação das simulações e foi verificado que a abordagem Euler-Lagrange é adequada para predição de clusters na condição de estudo, os quais se acumulam principalmente nas paredes do riser.

Porém, foi observado que há certa variação dos resultados numéricos em relação aos experimentais quando compara-se o fluxo mássico de sólidos, o perfil axial de distribuição de sólidos na região de entrada e alguns perfis radiais de sólidos, sendo que algumas dessas divergências podem ter contribuição de desvios e variações das medições experimentais feitas em



laboratório, nas quais o fluxo mássico de sólidos medido por meio de PIV foi de  $32 \pm 12 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , por exemplo.

Solnordal et al. (2015) avaliaram a erosão provocada por um escoamento de ar com velocidade de 80 m/s e areia (diâmetro médio de  $184 \mu\text{m}$ ) em um joelho de tubulação padrão, com uma curva de  $90^\circ$  e relação  $r/D$  de 1,5. Inicialmente os autores conseguiram mensurar a profundidade da erosão na região da curva por meio de uma técnica experimental com um perfilador de superfície.

Na sequência, Solnordal et al. (2015) realizaram simulações numéricas utilizando uma abordagem Euler-Lagrange no código comercial Ansys-CFX, assumindo que as partículas não interagiam entre si e que as paredes eram lisas. Tanto os valores máximos de profundidade da erosão como seu formato característico ficaram distantes do observado experimentalmente. Os autores obtiveram uma melhora nos resultados ao incorporar os efeitos da rugosidade no cálculo das colisões entre as partículas e as paredes, mas concluíram que diversos outros fatores poderiam ter sido levados em consideração para a obtenção de valores mais próximos, como o formato das partículas e as mudanças nas superfícies erodidas.

Zahedi et al. (2018) também investigaram experimentalmente e numericamente a erosão em curvas de  $90^\circ$  de uma tubulação, em escoamentos multifásicos envolvendo apenas gás e areia ou uma mistura de ambos com líquido. As tubulações foram testadas na horizontal e na vertical para a avaliação da influência dessa configuração nos padrões de erosão. Nos experimentos eles realizaram análises visuais empregando paredes transparentes de acrílico e testes com tinta, nos quais as superfícies eram recobertas por um pigmento e a erosão observada após os impactos das partículas removerem a tinta.

Para as simulações numéricas de Zahedi et al. (2018) foi utilizada uma abordagem Euler-Lagrange no código comercial Ansys-Fluent. As velocidades do gás variaram de 15 m/s a 37 m/s e o tamanho médio das partículas de areia foi de  $300 \mu\text{m}$ . Tanto para os experimentos de gás e areia como para uma mistura de ambos com líquido, independentemente do tamanho da partícula e vazões do fluido, a erosão máxima foi observada na faixa entre  $40^\circ$  a  $50^\circ$  na curva e a erosão por ricochete das partículas observada na faixa entre  $60^\circ$  a  $90^\circ$ . Apesar de visualmente não estarem muito próximos dos resultados experimentais, os autores afirmaram que os resultados numéricos

preeditos para a erosão foram satisfatórios, sobretudo em razão dos modelos utilizados para interação partículas-paredes e erosão.

No trabalho de modelagem CFD de erosão em tubulações realizado por Ogunesan (2020), para diminuir o custo computacional inerente às simulações de escoamentos multifásicos devido ao rastreamento de partículas, foi utilizado um modelo pseudo-monofásico para aproximação de velocidades médias e propriedade do fluido e o rastreamento das partículas também foi simplificado. Para isso, propriedades dos fluidos foram resolvidas como se fossem uma mistura e o modelo de Oka, Okamura e Yoshida (2005) foi utilizado para erosão. As simulações, feitas no Ansys-Fluent, foram validadas com dados experimentais já publicados e foram investigados os efeitos da variação de distância entre curvas em série e velocidade do fluido para concluir as melhores condições de operação para a tubulação.

Apesar da validação e conclusões apresentadas por Ogunesan (2020), foi utilizada uma malha estática para as simulações, então uma das observações do trabalho é que assumir que a superfície erodida não é modificada ao longo da análise ignora o efeito da mudança do perfil de erosão ao longo do tempo, assim como efeitos no escoamento, então isso pode ser uma fonte de erro na predição de taxas de erosão e sua localização na tubulação.

Em um estudo mais recente, Othayq et al (2021) também analisaram os efeitos da distância entre duas curvas em série no comportamento da erosão de partículas sólidas na segunda curva. Experimentos com a técnica de remoção de tinta foram realizados para investigar o padrão de erosão em uma curva de 90° de 76,2 mm com uma relação  $r/D$  igual a 1,5 para uma condição gás-areia com diferentes tamanhos de partículas. Os autores avaliaram as distâncias entre as duas curvas em série equivalentes a duas vezes o diâmetro (2D) e doze vezes (12D). As magnitudes de erosão foram observadas em uma curva de aço inoxidável por meio de uma técnica ultrassônica.

As simulações numéricas de Othayq et al (2021) também foram realizadas utilizando o programa comercial Ansys Fluent, com o modelo de turbulência RSM e verificou-se que a distribuição de partículas e velocidade se alteram antes da segunda curva com a alteração da distância entre as curvas em série. Porém, destacou-se que os experimentos são complexos e apresentam incertezas devido a fatores como tipo de partícula utilizada e erros na medição de velocidade e da perda de massa da parede.

Dentre trabalhos de simulação de erosão, encontram-se algumas das pesquisas desenvolvidas com o próprio programa computacional UNSCYFL3D. Esses estudos têm sido fundamentais para o aperfeiçoamento dos modelos que serão utilizados na modelagem tridimensional de escoamentos multifásicos com erosão no presente trabalho.

Pereira, Souza e Martins (2014) utilizaram modelos CFD para um escoamento gás-sólido e analisaram com o código UNSCYFL3D a erosão em uma tubulação com curvatura de 90°. Foi concluído que a rugosidade da parede tem relação direta com a erosão, diminuindo sua intensidade devido ao aumento da colisão das partículas com a parede causado pela superfície rugosa, o que faz com que seja removida mais energia do que em uma colisão com uma parede perfeitamente lisa e, assim, as partículas atinjam a curvatura com menor velocidade.

No trabalho de Duarte *et al.* (2017) foi estudada a interação partícula-parede em uma tubulação com curvatura de 90°. As simulações foram feitas utilizando-se o UNSCYFL3D com o modelo de Oka, Okamura e Yoshida (2005) para a estimativa de erosão e o de Grant e Tabakoff (1975) para os coeficientes de restituição.

A metodologia de simulação de Duarte *et al.* (2017) foi validada com dados experimentais e então estudaram-se os efeitos da rugosidade da superfície, coeficientes de fricção e da carga mássica na profundidade da erosão na parede. Foi observado que, devido à consideração das colisões partícula-partícula, à medida que a carga/quantidade de partículas aumentava, a profundidade máxima de erosão diminuía devido ao amortecimento que ocorria com a presença de maiores quantidades de partículas, além do perfil de erosão deixar de ser simétrico.

Com o aumento da rugosidade também foi notada uma diminuição da profundidade máxima de erosão devido à alteração do comportamento das partículas após a colisão, que são dispersas novamente, o que causa uma diminuição da velocidade de impacto e aumento do ângulo de impacto. Foi verificado que o coeficiente de fricção não afetou significativamente a interação partícula-parede, o que evidenciou que o ângulo de impacto tem mais influência da rugosidade da parede que dos coeficientes de fricção.

No estudo de Duarte, Souza e Santos (2016) foram feitas simulações numéricas utilizando o UNSCYFL3D e acoplamento quatro vias para comparar a erosão em uma tubulação com curvatura de 90° com e sem uma câmara de vórtice na curvatura, sendo que essa câmara é uma

alteração na geometria que força uma rotação do escoamento na região crítica de erosão. A simulação do escoamento gás-sólido com a geometria original foi validada com dados experimentais para a posterior alteração dessa geometria e estudo dos efeitos da adição da câmara.

Foi verificada uma significativa diminuição da razão de erosão com a adição da câmara na curvatura da tubulação quando se compara com os resultados da tubulação modificada com os da geometria original. Além disso, os efeitos de redução da taxa de erosão com o aumento da carga mássica, que ocorrem devido às colisões partícula-partícula diminuírem o número de colisões das partículas diretamente com a parede, são potencializados ao adicionar a câmara de vórtices na curvatura do duto.

Percebe-se que a grande maioria dos trabalhos que envolvem simulação de erosão utilizam malhas estáticas e ainda apresentam variações significativas entre os resultados numéricos e experimentais. As alterações geométricas resultantes do processo erosivo ocasionam mudanças no escoamento que não são representadas quando se utiliza malhas estáticas. Dessa maneira, a utilização de malhas móveis apresenta vantagens para representação do fenômeno da erosão, especialmente para casos em que as deformações geométricas são mais significativas, seja devido à alta intensidade do processo erosivo ou ao longo tempo de exposição à erosão.

Sendo assim, deseja-se que as simulações numéricas sejam capazes de predizer o perfil de erosão e o escoamento ao longo do tempo, o que pode ser aperfeiçoado com a modelagem numérica associada às modificações geométricas resultantes da erosão, ou seja, a implementação de malhas dinâmicas.

### 3. Modelagem Matemática e Numérica

As três etapas que caracterizam uma modelagem matemática são: a interação, que envolve o reconhecimento da situação-problema e a familiarização com o assunto que será trabalhado na modelagem utilizando boas referências teóricas; a matematização, que envolve a formulação do problema, traduzindo-o para a linguagem matemática para que se possa obter uma solução em termos do modelo; e a validação do modelo matemático, em que se interpreta a solução do modelo e realiza-se uma avaliação para verificar o quanto ele se aproxima da situação real (BIEMBENGUT e HEIN, 2009).

A modelagem matemática é amplamente utilizada na ciência por permitir essa representação matemática de situações reais, fazendo com que os modelos elaborados e validados possam servir como suporte para outras situações semelhantes, permitindo diversas previsões e compreensão de fenômenos.

Para escoamentos multifásicos, modelos matemáticos são necessários para uma descrição da fase contínua e da fase discreta, incluindo o processo de erosão. A interação entre as fases contínua e discreta pode ser modelada utilizando-se o acoplamento de uma via, no qual o movimento das partículas tem influência apenas do escoamento; de duas vias, no qual ocorre troca de quantidade de movimento entre o fluido e as partículas; e de quatro vias, em que além da troca de quantidade de movimento entre as fases modela-se a colisão entre partículas.

O código computacional UNSCYFL3D, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da Universidade Federal de Uberlândia, foi utilizado para as simulações de erosão em escoamentos multifásicos realizadas neste trabalho e, como será demonstrado no Capítulo 4, a modelagem utilizando-se o acoplamento de uma via será adequada e por isso outros tipos não serão abordados em detalhes.

Utilizando o método dos volumes finitos e malhas não estruturadas, os escoamentos multifásicos com erosão serão tratados a partir da abordagem euleriana-lagrangeana, na qual as equações médias ou filtradas de Navier-Stokes são aplicadas para a fase contínua, enquanto a fase dispersa é tratada na abordagem lagrangiana e tem o movimento de suas partículas calculado com base na segunda lei de Newton.

Portanto, além da descrição dos modelos matemáticos utilizados na modelagem da erosão em escoamentos multifásicos, neste capítulo serão apresentadas também as ferramentas utilizadas para aplicação dos modelos matemáticos na resolução de problemas simulados numericamente e para a utilização de malhas móveis nas simulações.

A obtenção de soluções numéricas utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD) geralmente engloba duas etapas, sendo a primeira a formulação de equações diferenciais parciais que governam o escoamento com base nas leis de conservação e a segunda a criação da geometria e da malha do domínio computacional em estudo, sendo para ele são especificadas as condições de contorno e são aplicados os métodos numéricos adequados para resolução das equações de conservação. Para escoamentos multifásicos pode-se escolher a abordagem mais adequada para cada fase envolvida de acordo com as condições físicas do fenômeno estudado, a interação entre elas e os modelos matemáticos adequados.

Para escoamentos turbulentos, existem três abordagens numéricas principais, que são a Simulação Numérica Direta (DNS, do inglês *Direct Numerical Simulation*), a Simulação de Grandes Escalas (LES, do inglês *Large Eddy Simulation*) e a metodologia que utiliza as equações médias de Reynolds (RANS, do inglês *Reynolds-averaged Navier-Stokes*). A escolha da abordagem mais adequada para cada caso dependerá da prioridade entre as informações desejadas em relação ao escoamento e o custo computacional inerente à cada uma das abordagens.

A abordagem DNS resolve as equações de Navier-Stokes todas as escalas do escoamento e as interações entre suas estruturas turbilhonares e, devido a isso, requer que a malha computacional seja refinada, resultando em um alto custo computacional. Já na LES, são resolvidas apenas as grandes escalas e as menores são modeladas. Por fim, a metodologia RANS, adotada neste trabalho, modela todas as escalas da turbulência, obtendo-se os campos médios das variáveis e possibilitando a utilização de malhas menos refinadas, o que gera um custo computacional menor.

### 3.1 FASE CONTÍNUA

Para a modelagem de escoamentos incompressíveis de um fluido Newtoniano utiliza-se as equações de Navier-Stokes, que em notação indicial são dadas, respectivamente, pelas Equações 1

e 2, nas quais  $\rho$  é a densidade do fluido,  $p$  é a pressão e  $u_i$  é a componente  $i$  da velocidade instantânea do fluido.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad 1$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad 2$$

Ao decompor as variáveis instantâneas em médias e flutuações, como mostra a Equação 3 para a componente  $i$  da velocidade, obtém-se as equações médias transientes de Navier-Stokes. Dessa maneira, com as Equações 3 e 4 e pode-se resolver o comportamento médio do escoamento e modelar suas flutuações.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad 3$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + \bar{f}_i \quad 4$$

Na Equação 4 o termo  $\overline{u'_i u'_j}$  é denominado tensor de Reynolds, o qual é simétrico e apresenta seis termos diferentes resultantes das flutuações de velocidade nas três direções do sistema de coordenadas, conforme Equação 5, tratando-se de um momento de segunda ordem.

$$\overline{u'_i u'_j} = \begin{bmatrix} \overline{u' u'} & \overline{u' v'} & \overline{u' w'} \\ \overline{v' u'} & \overline{v' v'} & \overline{v' w'} \\ \overline{w' u'} & \overline{w' v'} & \overline{w' w'} \end{bmatrix} \quad 5$$

Esses termos do tensor de Reynolds podem ser solucionados utilizando-se uma equação diferencial de transporte, onde cada termo representa um processo físico de transporte, sendo eles:

derivativo temporal, advecção, difusão turbulenta, difusão molecular, produção, tensão-pressão e dissipação turbulenta (LAUNDER, REECE e RODI, 1975). Porém, a resolução dessa equação gera um momento de ordem maior, além de se ter um sistema com mais incógnitas que equações, o que dá origem ao problema de fechamento da turbulência.

Sendo assim, para resolução desse problema é necessário adotar modelos adicionais de fechamento da turbulência, como o modelo de transporte das componentes do tensor de Reynolds. No modelo de tensões de Reynolds (RSM), para modelagem do termo do transporte difusivo turbulento, temos a Equação 6, onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $\sigma_k = 0,82$  (LIEN e LESCHZINER, 1994):

$$\frac{\partial}{\partial x_k} [\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}] = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \left( \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \right] \quad 6$$

Para modelagem da energia cinética turbulenta,  $k$ , e da taxa de dissipação turbulenta,  $\varepsilon$ , utiliza-se as equações de transporte 7 e 8, respectivamente, onde  $\sigma_k = 0,82$ ,  $\sigma_s = 1,0$ ,  $C_{s1} = 1,44$ ,  $C_{s2} = 1,92$  e  $P_{ii}$  é o termo produtivo da equação diferencial de transporte solução do tensor de Reynolds.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ii} - \rho \varepsilon \quad 7$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_s} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \frac{C_{s1} \varepsilon P_{ii}}{2k} - \frac{C_{s2} \rho \varepsilon^2}{k} \quad 8$$

Para calcular a viscosidade turbulenta, utiliza-se a Equação 9, na qual  $C_\mu = 0,09$ .



$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 9$$

Em relação ao termo tensão-pressão das tensões de Reynolds, que equilibra a energia turbulenta entre todos os demais termos do tensor de Reynolds, pode-se modelá-lo de acordo com a Equação 10, na qual  $\phi_{ij,1}$  é o termo de retorno à isotropia,  $\phi_{ij,2}$  é o termo rápido e  $\phi_{ij,w}$  é o termo de reflexão de parede. Esses termos são calculados conforme as Equações 11, 12 e 13, nas quais  $A_{ij}$  é o termo advectivo da equação diferencial de transporte solução do tensor de Reynolds,  $\delta$  é o delta de Kronecker,  $n_k$  é a componente unitária da direção  $x_k$ ,  $d$  é a distância até a parede,  $C_1 = 1,8$ ,  $C_2 = 0,6$ ,  $C'_1 = 0,5$ ,  $C'_2 = 0,3$ ,  $C_l = C_\mu^{3/4}/\kappa$  e  $\kappa = 0,4187$ , que é a constante de Von Kármán.

$$\overline{p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,w} \quad 10$$

$$\phi_{ij,1} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[ \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ik} k \right] \quad 11$$

$$\phi_{ij,2} = -C_2 \left[ (P_{ij} - A_{ij}) - \frac{2}{6} \delta_{ij} P_{ij} \right] \quad 12$$

$$\begin{aligned} \phi_{ij,w} = C'_1 \frac{\varepsilon}{k} & \left( \overline{u'_k u'_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_i u'_k n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k n_i n_k} \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon d} \\ & + C'_2 \left( \phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k \right. \\ & \left. - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon d} \quad 13 \end{aligned}$$

### 3.2 FASE DISPERSA

A partir das características do escoamento que será simulado, a fase dispersa pode ser tratada em um referencial Euleriano ou Lagrangiano. Nas simulações numéricas deste trabalho, como a fração volumétrica da fase dispersa é baixa e as partículas são pequenas em relação às dimensões da malha utilizada para a fase contínua, adotou-se a abordagem Lagrangiana para a fase dispersa. Sendo assim, todas as simulações utilizarão a abordagem Euler-Lagrange.

Nessa abordagem a fase dispersa é tratada no referencial Lagrangiano e as partículas são modeladas como ponto-partícula. Assim, após a resolução do campo de escoamento da fase contínua, as partículas são rastreadas e, com base na posição do seu centro de massa, seus movimentos e trajetórias são calculados de acordo com a segunda lei de Newton. No código utilizado, os parâmetros de erosão também são baseados no centro de massa da partícula, cuja distância nunca será menor que o raio da partícula, evitando que eles sejam calculados em uma posição coincidente com a parede.

Segundo Sommerfeld (2017), quando as partículas das simulações na verdade representam um conjunto de partículas reais cujas propriedades são as mesmas, elas são chamadas de parcelas, sendo este o conceito de parcela Lagrangiana (LPC, do inglês *Lagrangian Parcel Concept*). Caso o número de partículas da simulação seja muito alto, ao adotar esse conceito de parcelas pode-se reduzir o custo computacional das simulações. Caso seja possível ou necessário rastrear todas as partículas reais, sem a utilização de parcelas, utiliza-se o método da partícula discreta (DPM, do inglês *Discrete Particle Method*).

Em ambos os métodos as partículas são representadas utilizando-se o modelo de esferas rígidas, no qual ocorrem colisões instantâneas entre duas partículas, o que é mais adequado para escoamentos nos quais a fração volumétrica da fase dispersa apresente um valor igual ou até 0,1.

No código UNSCYFL3D, assume-se que as forças de corpo para uma partícula são as forças resultantes da aceleração gravitacional sobre ela e do empuxo, sendo elas proporcionais à massa dessa partícula. Em relação às forças de superfície, que são proporcionais à área superficial da partícula, o código considera a força de arrasto, que é aquela que se opõe ao movimento relativo da partícula do meio fluido. As forças de colisão, que somada às forças de corpo e de superfície resultam na força sobre a partícula, incluem efeitos de colisões entre partículas ou entre a partícula

e paredes. É importante mencionar que, diferentemente de outros códigos comerciais, o UNSCYFL3D inclui na solução a rotação das partículas, o que é relevante para casos de partículas de diâmetros maiores, que serão estudadas neste trabalho e frequentemente colidem com as paredes (SOUZA, 2018).

A fase dispersa é composta por partículas discretas, que são rastreadas ao longo de todo o domínio computacional, consideradas como esferas rígidas e cujo movimento é descrito pela segunda lei de Newton, conforme as Equações 14, 15 e 16, que representam, respectivamente, a trajetória, movimento linear e movimento angular.

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad 14$$

$$\frac{m_p du_{pi}}{dt} = m_p \frac{3\rho C_D}{4\rho_p d_p} (u_i - u_{pi}) + F_{si} + F_{ri} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) m_p g_i \quad 15$$

$$I_p \frac{d\omega_{pi}}{dt} = (0,1m_p d_p^2) \frac{d\omega_{pi}}{dt} = T_i \quad 16$$

Na modelagem RSM (Modelo de Tensões de Reynolds, do inglês *Reynolds Stress Model*), utilizada neste trabalho por considerar a anisotropia do escoamento sem que seja necessário resolver todas as suas escalas,  $u_i$  é a soma da componente média da velocidade do fluido e da componente da flutuação da velocidade do fluido, que é calculada de acordo com o modelo de dispersão de Langevin (SOMMERFELD, 2001). Nesse modelo a posição da partícula no novo passo de tempo se relaciona com a posição dessa partícula no passo de tempo anterior conforme uma função de correlação composta por uma parte Lagrangiana e uma parte Euleriana, que inclui uma contribuição aleatória na flutuação de velocidade do fluido.

O coeficiente de arrasto para cada uma das partículas é calculado de acordo com a relação proposta por Haider e Levenspiel (1989) para partículas não esféricas, conforme a Equação 17, na

qual os coeficientes A, B, C e D são funções da esfericidade, conforme as Equações 18, 19, 20 e 21, respectivamente, nas quais  $\varphi$  é a esfericidade da partícula (HAIDER e LEVENSPIEL, 1989).

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + A Re_p^B) + \frac{C}{1 + \frac{D}{Re_p}} \quad 17$$

$$A = \exp(2,3288 - 6,4581\varphi + 2,4486\varphi^2) \quad 18$$

$$B = 0,0964 + 0,5565\varphi \quad 19$$

$$C = \exp(4,905 - 13,8944\varphi + 18,4222\varphi^2 - 10,2599\varphi^3) \quad 20$$

$$D = \exp(1,4681 + 12,2584\varphi - 20,7322\varphi^2 + 15,8855\varphi^3) \quad 21$$

Uma das forças de superfície associada ao movimento da partícula é a força de sustentação, que se origina a partir da rotação da partícula e cisalhamento do fluido ao seu redor. Essa sustentação devido ao cisalhamento,  $F_s$ , pode ser calculada com base na equação analítica proposta por Saffman (1965), que foi ampliada por Mei (1992) segundo a Equação 22 para escoamentos turbulentos que apresentam altos números de Reynolds e não atendem às condições da equação proposta inicialmente por Saffman.

$$F_s = 1,615d_p\mu Re_s^{0,5} C_{ls} \frac{[(u_i - u_{pi}) \times \omega_i]}{|\omega_i|} \quad 22$$

Na Equação 22,  $\omega_i$  representa a vorticidade,  $Re_s = \rho d_p^2 |\omega_i| / \mu$  é o número de Reynolds da partícula no escoamento cisalhante e  $C_{ls}$  é a razão entre a força de sustentação e a força de Saffman, que pode ser calculada segundo a Equação 23.

$$C_{ls} = \begin{cases} (1 - 0,3314\beta^{0,5})e^{-0,1Re_p} + 0,3314\beta^{0,5} & se Re_p < 40, \\ 0,0524(\beta Re_p)^{0,5} & se Re_p \geq 40 \end{cases} \quad 23$$

Na Equação 23 o  $\beta$  é proporcional à razão entre o número de Reynolds da partícula no escoamento cisalhante e o número de Reynolds da partícula, apresentando valores entre 0,005 e 0,4 e dado por  $\beta = 0,5 \frac{Re_s}{Re_p}$ .

A força de sustentação originada pela rotação da partícula,  $\vec{F}_r$ , pode ser calculada com base na relação de Rubinow e Keller (1961) e foi complementada para contabilizar também o movimento relativo entre a partícula e o fluido ao seu redor, de acordo com a Equação 24.

$$F_r = \frac{\pi}{8} \rho d_p^3 \frac{Re_p}{Re_r} C_{lr} \frac{[\Omega_i \times (u_i - u_{pi})]}{|\Omega_i|} \quad 24$$

Na Equação 24,  $Re_r = \rho d_p^2 |\Omega_i| / \mu$ ,  $\Omega_i = 0,5 \nabla_i \times u_i - \omega_{pi}$  e  $C_{lr}$  é o coeficiente de sustentação, que pode ser obtido por meio da correlação proposta por Lun e Liu conforme a Equação 25 (LUN e LIU, 1997).

$$C_{lr} = \begin{cases} \frac{Re_r}{Re_p} & se Re_p < 1, \\ \frac{Re_r}{Re_p} (0,178 + 0,822 Re_p^{-0,522}) & se Re_p \geq 1 \end{cases} \quad 25$$

O fluido gera um torque,  $T$ , sobre a partícula, o que faz com que haja um movimento rotacional. Para o cálculo desse torque, utiliza-se a correlação de Rubinow e Keller (1961), que também foi estendida para escoamentos turbulentos, conforme a Equação 26.

$$T = C_r \frac{\rho d_p^5}{64} |\Omega_i| \Omega_i \quad 26$$

Na Equação 26, o coeficiente de rotação,  $C_r$ , foi obtido via Simulação Numérica Direta e é dado pela Equação 27 (DENNIS, SINGH e INGHAM, 1980).

$$C_r = \begin{cases} \frac{64\pi}{Re_r} & \text{se } Re_r < 32, \\ \frac{12,9}{\sqrt{Re_r}} + \frac{128,4}{Re_r} & \text{se } Re_r \geq 32 \end{cases} \quad 27$$

Como a razão entre as massas específicas da fase dispersa e do fluido são da ordem de  $10^3$ , a força de massa virtual e de Basset não foram consideradas, visto que nesse tipo de escoamento elas não são relevantes, conforme Armenio e Fiorotto (2001), Crowe *et al.* (2011) e Shalaby (2006).

Em relação à colisão entre partículas e uma parede estacionária, nesse caso parte da energia cinética da partícula se transforma e ocorre uma mudança na velocidade linear e velocidade angular dessa partícula. Essas velocidades após o impacto, para os casos com e sem deslizamento, respectivamente, podem ser calculadas a partir das Equações 28 e 29 e das Equações 30 e 31 (BREUER, ALLETTO e LANGFELDT, 2012), nas quais os sobrescritos + e - indicam, respectivamente, valores depois e antes da colisão.

$$\vec{u}_p^+ = \vec{u}_p^- - (1 + e)(\vec{u}_p^- \cdot \vec{n}) \left( \mu_d \frac{\vec{u}_p^-}{|\vec{u}_p^-|} + \vec{n} \right) \quad 28$$

$$\vec{\omega}_p^+ = \vec{\omega}_p^- - \frac{5}{d_p} (1 + e) (\vec{u}_p^- \cdot \vec{n}) \frac{\mu_d}{|\vec{u}_{pr}^-|} (\vec{n} \times \vec{u}_{pr}^-) \quad 29$$

$$\vec{u}_p^+ = \vec{u}_p^- - (1 + e_{par}) \frac{2}{7} \vec{u}_{pr}^- - (1 + e) (\vec{u}_p^- \cdot \vec{n}) \vec{n} \quad 30$$

$$\vec{\omega}_p^+ = \vec{\omega}_p^- - \frac{10}{7} \left( \frac{1 + e_{par}}{d_p} \right) (\vec{u}_p^- \cdot \vec{n}) (\vec{n} \times \vec{u}_{pr}^-) \quad 31$$

Nessas equações,  $e_{par}$  é o coeficiente de restituição paralelo,  $e$  é o coeficiente de restituição normal,  $\mu_d$  é o coeficiente de atrito dinâmico,  $\vec{n}$  é o vetor normal unitário cujo sentido aponta para fora da face do elemento que sofreu impacto e  $\vec{u}_{pr}$  é a velocidade relativa no ponto de contato, que pode ser definida segundo a Equação 32. Os modelos para os coeficientes de restituição utilizados serão apresentados na seção 3.3.

$$\vec{u}_{pr} = \vec{u}_p - (\vec{u}_p \cdot \vec{n}) \vec{n} + \frac{d_p}{2} (\omega_p \times \vec{n}) \quad 32$$

Além disso, como a razão entre as vazões mássicas da fase sólida e do fluido é menor que 0,1 para todos os casos estudados neste trabalho, o fluido influencia a trajetória das partículas devido ao arrasto, mas as partículas não afetam significativamente o escoamento, então optou-se por utilizar o acoplamento de uma via para representação dessa interação entre as fases.

Outro fator importante que influencia o movimento das partículas é a rugosidade da parede, então para a modelagem desse efeito foi implementado no código UNSCYFL3D o modelo proposto por Sommerfeld e Huber (1999), que modifica o ângulo de impacto da partícula com a parede para simulação dessa rugosidade. Assim, o ângulo de impacto efetivo,  $\alpha$ , dado pela Equação 33, será calculado pela soma do ângulo de impacto geométrico,  $\alpha_{geo}$ , com uma contribuição estocástica devido à rugosidade da parede, sendo essa contribuição baseada em uma distribuição Gaussiana cujo desvio padrão  $\Delta\gamma$  depende da rugosidade da parede e do tamanho da partícula.

$$\alpha = \alpha_{geo} + \xi \cdot \Delta\gamma \quad 33$$

Nessa equação, o valor do desvio padrão no modelo de rugosidade deve ser calibrado para que forneça uma boa concordância com resultados experimentais.

### 3.3 MODELAGEM DA EROSÃO

A taxa de erosão representa a massa removida do material que sofre erosão por unidade de área e por tempo e pode ser calculada de acordo com a Equação 34, na qual  $\dot{m}_\pi$  representa a vazão mássica de partículas e  $e_r$  a razão de erosão, que representa a razão entre a massa de material erodente e a de material que sofre erosão.

$$E_f = \frac{1}{A_f} \sum_{\pi(f)} \dot{m}_\pi e_r \quad 34$$

A razão de penetração representa a relação entre a espessura de material retirado da parede e a massa de sólido que é inserida. A erosão é formulada em termos da razão de penetração de acordo com a Equação 35.

$$\text{Razão de penetração} = \frac{E_f}{\dot{m}_p \rho} \quad 35$$

Para a modelagem numérica da erosão, diversos trabalhos, como de Duarte, de Souza, *et al.* (2017) e Duarte, Souza e Santos (2016), mostram que o modelo proposto por Oka, Okamura e Yoshida (2005) é o mais adequado para representação da taxa de erosão.

A Equação 36 fornece a estimativa da erosão de acordo com o modelo de Oka, Okamura e Yoshida (2005), sendo que  $g(\alpha)$  representa a dependência do ângulo de impacto, que é função do número da dureza Vickers inicial do material erodido (HV) e de duas funções trigonométricas, e pode ser calculada de acordo com a Equação 37. As funções trigonométricas possuem expoentes  $n_1$  e  $n_2$  que dependem das propriedades das partículas e da dureza do material que sofre erosão, além de outras condições de impacto como propriedades da partícula, incluindo seu formato.



$$E(\alpha) = g(\alpha)E_{90} \quad 36$$

$$g(\alpha) = (\text{sen}\alpha)^{n_1}(1 + Hv(1 - \text{sen}\alpha))^{n_2} \quad 37$$

A razão de erosão considerando-se um ângulo de 90° de impacto é denominada  $E_{90}$  e é dada pela Equação 38, que evidencia sua relação com a velocidade de impacto da partícula ( $u$ ), diâmetro da partícula ( $D_p$ ) e os valores de referência para a velocidade de impacto da partícula e seu diâmetro ( $u_{ref}$  e  $D_{ref}$ ) que foram utilizados nos experimentos realizados por Oka, Okamura e Yoshida (2005).

O primeiro termo da equação é significativamente dependente do tipo de partícula e da dureza Vickers do material que sofre a erosão. Já os expoentes  $k_1$  e  $k_3$  estão relacionados às propriedades das partículas,  $K$  é uma constante dependente das propriedades das partículas, como seu fator de forma (angularidade), e  $k_2$ , além de depender das propriedades das partículas, é função da dureza Vickers do material que sofre erosão, como mostra a Equação 39, que é válida para partículas de sílica.

$$E_{90} = K(\alpha Hv)^{k_1} \left( \frac{u_p}{u_{ref}} \right)^{k_2} \left( \frac{D_p}{D_{ref}} \right)^{k_3} \quad 38$$

$$k_2 = 2,3(Hv)^{0,038} \quad 39$$

Além disso, para modelagem da trajetória das partículas é importante considerar os coeficientes de restituição, que representam a perda de energia durante as colisões partícula-partícula ou partícula-parede, o que faz com que a velocidade das partículas após o impacto seja reduzida. De acordo com o modelo apresentado por Forder, Thew e Harrison (1998) os coeficientes de restituição normal e paralelo são dados pelas Equações 40 e 41, nas quais  $\alpha$  representa o ângulo de incidência da partícula.

$$e = 0,988 - 0,78\alpha + 0,19\alpha^2 - 0,024\alpha^3 + 0,0027\alpha^4 \quad 40$$

$$e_{par} = 1 - 0,78\alpha + 0,84\alpha^2 - 0,21\alpha^3 + 0,028\alpha^4 - 0,022\alpha^5 \quad 41$$

De acordo com Sommerfeld e Huber (1999), o coeficiente de restituição normal pode ser dado pela Equação 42 e a componente paralela pode ser considerada como 1, o que representa que não há perda de energia, devido à pequena contribuição dessa componente em relação à mudança de direcionamento das partículas após a colisão.

$$e = \max(1 - 0,013\alpha, 0,7) \quad 42$$

Já Grant e Tabakoff (1975) trabalharam com uma abordagem estatística para o movimento das partículas após a colisão, obtendo as Equações 43 e 44 para os coeficientes de restituição normal e paralelo a partir de experimentos realizados para areia e alumínio.

$$e = 0,993 - 1,76\alpha + 1,56\alpha^2 - 0,49\alpha^3 \quad 43$$

$$e_{par} = 0,998 - 1,55\alpha + 2,11\alpha^2 - 0,67\alpha^3 \quad 44$$

O código UNSCYFL3D utiliza a combinação dos modelos de Oka, Okamura e Yoshida (2005) para a razão de erosão e de Grant e Tabakoff (1975) para o coeficiente de restituição. Estudos como os de Pereira, Souza e Martins (2014) já comprovaram, dentre outras vantagens, que essa combinação está entre as mais recomendáveis para a predição de erosão em curvas de 90° em tubulações.

Além disso, para modelagem da interação entre as partículas e a parede, é importante considerar os efeitos devido ao atrito, visto que ele pode contribuir para que as partículas percam energia e, conseqüentemente, isso influencia na sua velocidade, o que altera a erosão. No UNSCYFL3D os coeficientes de atrito estático e dinâmico foram considerados iguais e o padrão é  $\mu_d = 0,25$ , mas pode-se utilizar o modelo empírico proposto Sommerfeld e Huber (1999), descrito pela Equação 45.

$$\mu_d = \max(0,5 - 0,175\alpha, 0,15) \quad 45$$

De acordo com trabalhos anteriores, não foi observada nenhuma diferença significativa ao considerar o coeficiente de atrito dinâmico inferior ao estático (DUARTE, 2015).

### 3.4 MALHA DINÂMICA

Neste trabalho utiliza-se malhas não estruturadas para representar o volume do domínio do problema de forma discreta, as quais são adequadas mesmo para geometrias complexas, além de permitirem o refinamento local onde for desejável e poderem ser geradas em softwares disponíveis no mercado. Foram utilizados elementos hexagonais, visto que eles geram menos difusão numérica que elementos tetragonais ou piramidais (SANTOS, 2018).

A modelagem numérica utilizada está implementada no código UNSCYFL3D, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab). Tal software utiliza a dinâmica dos fluidos computacional de forma robusta e é capaz de simular escoamentos multifásicos e geometrias com alto grau de complexidade. Basicamente, o software utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações que governam o movimento do fluido em um meio contínuo e possibilita a utilização de abordagem lagrangiana para modelagem das partículas.

O UNSCYFL3D permite a utilização de malhas não-estruturadas e a implementação de malhas móveis, as quais serão utilizadas para representar alterações nas geometrias de estudo devido à erosão (DUARTE e SOUZA, 2021). Além disso, o software possui modelo de erosão já validado em trabalhos anteriores, soluções em regime transiente, acoplamento pressão-velocidade utilizando o método SIMPLE e possibilidade de processamento serial ou paralelo.

O escoamento turbulento da fase contínua será modelado pelas equações de Navier-Stokes, energia e continuidade, além dos modelos de fechamento da turbulência, nos quais serão utilizadas equações de transporte (no modelamento através de média de Reynolds – URANS). Esses modelos estão implementados no UNSCYFL3D e foram validados em diversos trabalhos anteriores. Vários modelos de fechamento da turbulência estão disponíveis, como k-epsilon, SST, RSM e Smagorinsky.

A simulação da fase dispersa através da abordagem lagrangiana requer a solução das equações do movimento para cada partícula. Uma parcela computacional consiste na representação de determinado número de partículas reais que apresentam as mesmas propriedades. Tal consideração permite alcançar fluxo mássico correto de partículas com um número razoável de partículas rastreadas. Tais equações incluem forças de inércia, arrasto, gravidade, empuxo, sustentação devido ao cisalhamento e sustentação devida à rotação da partícula.

O método de movimentação de malha utilizado no código UNSCYFL3D baseia-se na movimentação dos vértices da superfície erodida, sendo que a penetração da erosão é calculada na simulação ao longo da superfície erodida e do tempo. Esse cálculo é realizado de acordo com a taxa de erosão do processo, que dependerá das colisões das partículas com a superfície e do modelo de erosão utilizado. Tanto o número total de células da malha quanto a conectividade entre elas são mantidos durante esse movimento, de forma que a penetração de erosão é calculada no centro das faces dessas células e interpolada para os vértices.

Nos casos de simulação de erosão, pode-se utilizar o método de suavização baseado em uma equação de difusão para todo o domínio a fim de se preservar a qualidade da malha e o tamanho médio das suas células. Para isso, a movimentação da malha é governada pela Equação 46, na qual  $u_{malha}$  representa a velocidade de deslocamento da malha e  $\gamma$  o coeficiente de difusão, que controla a intensidade do movimento relativo entre os nós da malha. Caso esse coeficiente não seja constante, nas regiões da malha onde a difusividade é maior os nós apresentarão uma tendência de se moverem com menor movimento relativo entre eles. No UNSCYFL3D, optou-se por considerar esse coeficiente como o inverso da distância entre a célula em questão e a fronteira que está em movimento, pois assim o movimento será menos intenso à medida que se afasta da superfície móvel.

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla u_{malha}) = 0$$

46

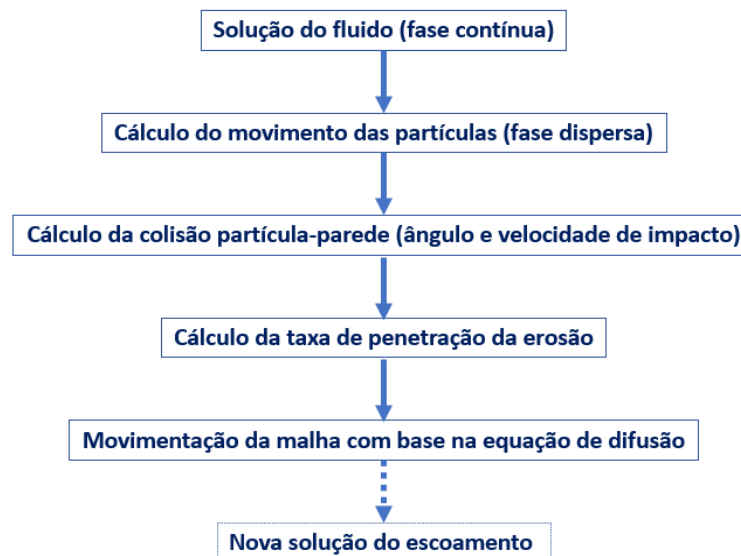
Dessa maneira, a cada passo de tempo as posições dos nós da malha são modificadas conforme a Equação 47. Sendo assim, a movimentação da fronteira onde ocorre a erosão, ao ser realizada e regida pela equação de difusão, faz com que o movimento seja propagado dessas fronteiras para o restante do domínio, evitando distorções significativas e células de baixa qualidade na malha.

$$\vec{x}^{n+1} = \vec{x}^n + \vec{u}\Delta t$$

47

Essa metodologia numérica para a movimentação da malha está esquematizada na Figura 11, sendo que o escoamento pode ou não ser resolvido novamente a cada passo de tempo para contabilizar as modificações do escoamento devido às cavidades resultantes do processo de erosão.

Figura 11 – Esquema da metodologia utilizada no algoritmo para movimentação da malha devido à erosão



Fonte: elaborado pela autora

Assim, utilizando o método de movimentação da malha associado ao de suavização baseado em uma equação de difusão, não é necessário que a malha seja gerada novamente diversas vezes

ao longo da simulação, visto que a malha apenas se movimenta nas regiões mais próximas de onde ocorre erosão, se rearranjando à medida que a geometria se altera, o que diminui os custos computacionais dessa metodologia para malhas dinâmicas.

Portanto, a implementação da malha dinâmica na simulação de escoamentos multifásicos com ocorrência de erosão é muito importante, já que representa as mudanças topológicas causadas pelo processo erosivo e as resultantes modificações no escoamento, além de diminuir custos e tempo relativos a testes experimentais. Essa metodologia numérica também amplia as possibilidades de um estudo que se aproxima do fenômeno observado experimentalmente até mesmo para geometrias de maiores dimensões e complexidade, as quais muitas vezes apresentam impedimentos físicos ou altos custos para análises experimentais.

Sendo assim, inicialmente, ao aplicar a dinâmica dos fluidos computacional para escoamentos multifásicos com erosão, pode-se utilizar a malha móvel para problemas relativamente mais simples e padronizados, para os quais se dispõe de maior riqueza de dados experimentais. Desse modo, pode-se validar a modelagem matemática e computacional no software utilizado para as simulações e amplia-se a sua aplicação para uma maior variedade de casos. Pode-se avaliar, de acordo com a magnitude da deformação em cada caso analisado, as vantagens apresentadas quando utiliza-se a malha móvel ou a malha estática, além da necessidade de uma nova solução para o escoamento a cada passo de tempo.

### **3.4.1 Implementação do novo método de *smoothing* na superfície**

Dependendo da aplicação, é necessário que haja regiões de refinamento local na malha computacional. Com isso, o impacto das partículas com a superfície nem sempre ocorre de maneira homogênea, pois as células da malha apresentarão faces com diferentes áreas e, conseqüentemente, probabilidades de número de impactos de partículas diferentes. Assim, algumas dessas células podem apresentar uma taxa de erosão bem maior que células vizinhas e, conseqüentemente, a movimentação dos vértices é maior nessas regiões, o que pode ocasionar células da malha muito distorcidas, prejudicando a qualidade da malha e distanciando o resultado do fenômeno físico real devido à introdução desse ruído não físico nos resultados.

Portanto, para amenizar esse tipo de problema nas simulações numéricas, o código pode empregar métodos de suavização (do inglês *smoothing method*), como mostrado por Matsushima, Murayama e Nakahashi (2002). Esse tipo de método é implementado para ajustar a malha nas regiões com movimentação e/ou deformação da fronteira do domínio computacional, de maneira que os nós internos da malha se movam enquanto a quantidade de nós e a conectividade entre eles permanece a mesma.

Em diversos casos simulados computacionalmente a diminuição da qualidade da malha ou outros fatores ao longo da solução podem dificultar a convergência de simulações ou produzir oscilações não físicas e indesejadas, resultando em superfícies irregulares e incoerentes com o resultado esperado. Em alguns casos de escoamentos multifásicos com erosão intensa isso pode ocorrer na superfície devido à alta distorção na malha computacional.

Como mostrado por Solnordal e Wong (2012), malhas móveis com interpolações mais simples podem fazer com que o modelo forneça previsões sobre o comportamento da erosão incompatíveis com a realidade, especialmente em regiões onde a curvatura é maior, limitando metodologias e demandando uma solução de maior custo computacional.

Dessa maneira, buscou-se uma solução para esse problema para que fosse realizada a implementação de um método de *smoothing* no UNSCYFL3D na superfície que sofre erosão e que pudesse ser aplicado a qualquer tipo de malha poliédrica. Para suprimir oscilações indesejadas, é necessário criar uma representação com gradientes suaves e para isso pode-se utilizar um campo de gradiente calculado a partir de um campo de gradiente inicial  $G$  por meio de uma equação de difusão, conforme Equação 48, onde  $\varepsilon$  é o coeficiente de *smoothing*, o qual define o grau de suavização do gradiente representado (ALEXIAS e DE VILLIERS).

$$\bar{G} - \varepsilon \nabla^2 \bar{G} = G$$

48

Com isso, gera-se uma variável livre para o problema de otimização e seu valor é escolhido de acordo com o caso estudado, podendo ser, por exemplo, o raio máximo de oscilação da superfície na qual o gradiente será suavizado. Para isso, pode-se resolver uma equação equivalente à função de Gauss com desvio padrão igual a  $\sqrt{2\pi}$  (ALEXIAS e DE VILLIERS). Essa otimização

na superfície aliada à suavização apresentada na Equação 46, que transmite o movimento para todo o domínio, permite que se conserve uma malha de ótima qualidade mesmo em casos de deformação mais extrema.

Nos casos com erosão, o UNSCYFL3D resolve essa equação de difusão na superfície erodida da malha para suavizar o gradiente existente nessa superfície, o que faz com que as sensibilidades se propaguem ao longo do domínio, evitando os ruídos não físicos. Para isso, calcula-se a distância aproximada até as faces que não são móveis e as sensibilidades até metade do raio de *smoothing* adotado são zeradas para garantir a continuidade entre as regiões de suavização do gradiente e as outras regiões do domínio, sendo que esse mesmo procedimento é realizado para a variável de perda de massa.

Essa metodologia tem como objetivo fazer com que não seja mais preciso injetar um alto número de parcelas, estratégia utilizada anteriormente para obter resultados mais suaves, visto que as faces da malha nas quais ocorrem menos impactos introduzem ruído não físico nos resultados de erosão e no deslocamento da malha, além de possibilitar uma movimentação mais uniforme da malha computacional, evitando o surgimento de volumes negativos e auxiliando a convergência das simulações numéricas.

### 3.5 UNSCYFL3D

Conforme mencionado anteriormente, o código UNSCYFL3D, desenvolvido por Souza (2018) e outros pesquisadores no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da Universidade Federal de Uberlândia, utiliza o método dos volumes finitos de Ferziger e Peric (2002) e malhas não estruturadas para resolver o campo de escoamento de acordo com a geometria do problema e suas condições de contorno.

As equações apresentadas para os escoamentos multifásicos com erosão, que são tratados a partir da abordagem euleriana-lagrangeana, na qual as equações médias ou filtradas de Navier-Stokes são aplicadas para a fase contínua enquanto a fase dispersa tem o movimento de suas partículas calculado a partir da segunda lei de Newton, foram discretizadas tanto no tempo quanto no espaço.



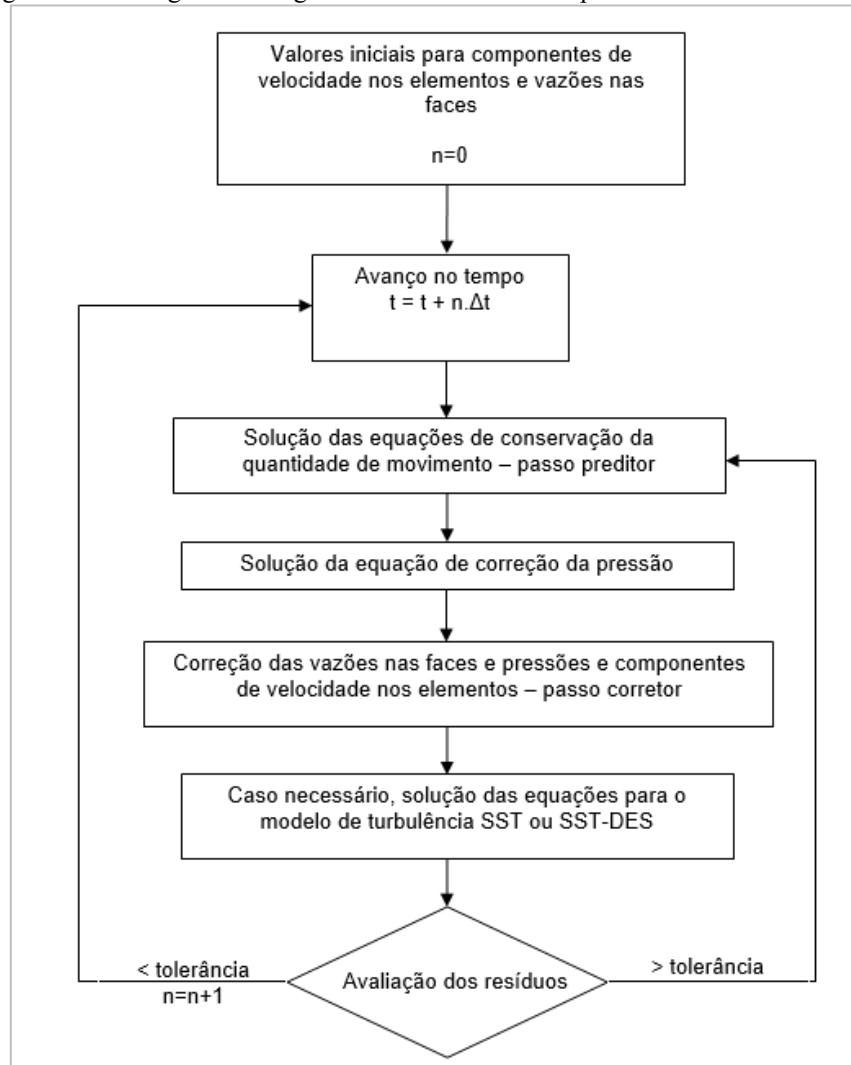
Como as equações médias ou filtradas de Navier-Stokes formam um sistema possível e determinado com quatro equações, sendo elas a da continuidade e quantidade de movimento nas 3 direções, e quatro incógnitas, que são as componentes de velocidade nas 3 direções e a pressão, essas componentes da velocidade podem ser determinadas de acordo com as equações de conservação tendo em vista a restrição imposta pela continuidade.

Porém, não há uma equação explícita para a pressão, fazendo com que seja necessária uma equação para ela. Para isso, utiliza-se o método SIMPLE (*Semi-Implicit Pressure-Linked Equations*), no qual cada variável é resolvida de forma independente e sequencial por meio de métodos de solução de sistemas lineares, sendo que diversas iterações podem ser necessárias para que se atinja a convergência de acordo com a tolerância desejada, processo que é detalhado por Ferziger e Peric (2002). Na Figura 12 o fluxograma representa a solução no UNSCYFL3D através do método SIMPLE, onde  $n$  é o índice de avanço no tempo.

No código, pode-se simular escoamentos tanto em regime permanente quanto transiente e como condições de contorno é possível utilizar: velocidade imposta (entrada de massa), pressão imposta, frequência, simetria, escoamento completamente desenvolvido na saída e parede sem deslizamento (SOUZA, 2018).

Em relação aos modelos de erosão, pode-se aplicar as correlações de Oka, Okamura e Yoshida (2005), Ahlert (1994), Neilson e Gilchrist (1968) e Zhang *et al.* (2007). Para os modelos de restituição é possível utilizar os modelos de Grant e Tabakoff (1975), Sommerfeld e Huber (1999) e Forder, Thew e Harrison (1998). O trabalho de Martins (2016) estuda a erosão utilizando o código UNSCYFL3D analisando a influência de diversos modelos físicos e apresenta detalhes em relação ao código e implementação desses modelos, que também são detalhados em Souza (2018).

Figura 12 - Fluxograma do algoritmo SIMPLE como implementado no UNSCYFL3D



Fonte: SOUZA (2018)

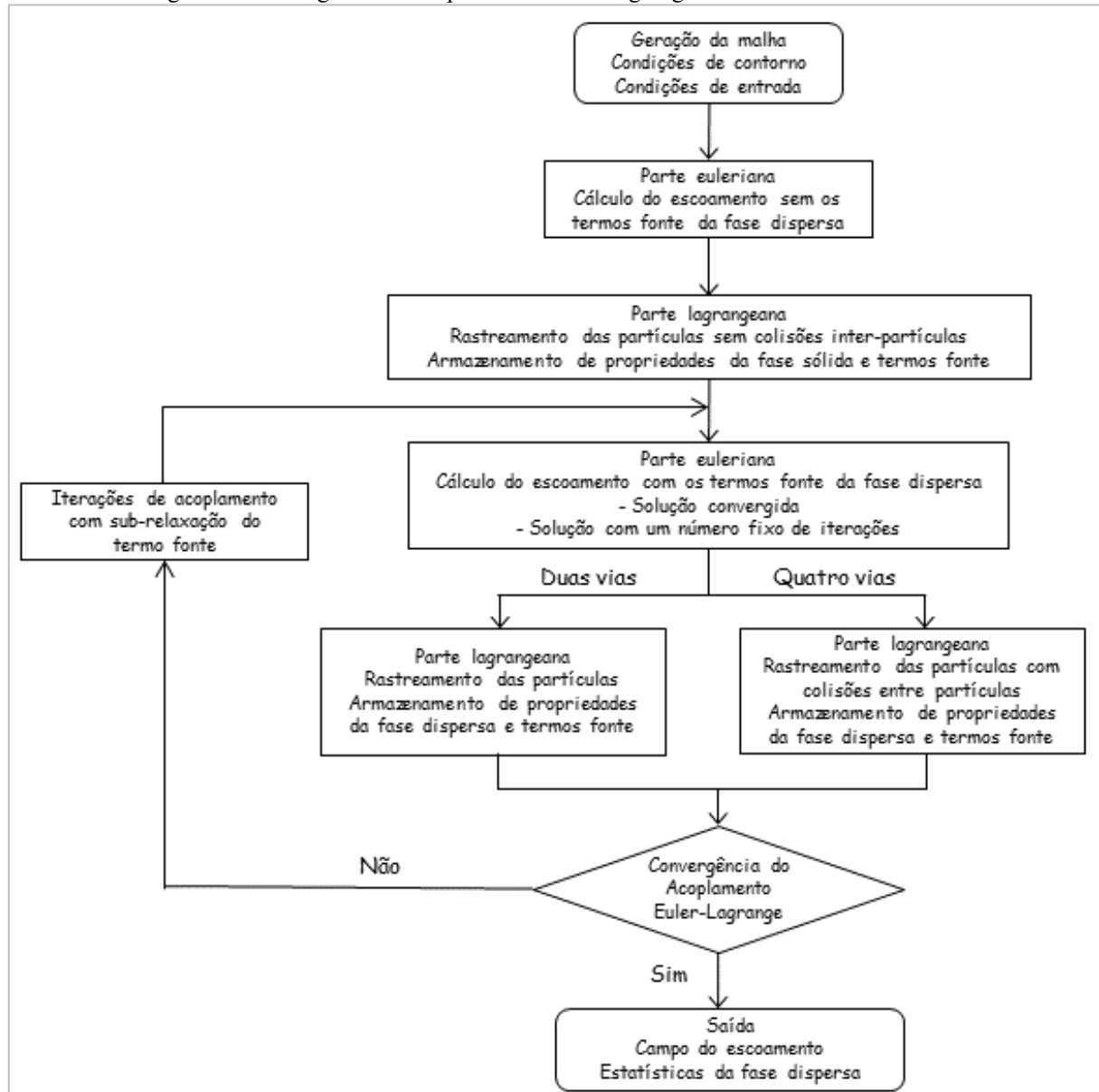
No UNSCYFL3D, o método para acoplamento da solução das fases contínua e dispersa é descrito em detalhes por Laín e Sommerfeld (2013) e envolve a solução permanente do fluido para posterior injeção das partículas a cada passo de tempo e seu rastreamento ao longo do domínio computacional. Para cada volume de controle são armazenadas: velocidades médias, RMS linear e angular, concentração de partículas e termo fonte para a equação de momentum do fluido.

A partir desse termo fonte, a cada passo de tempo tem-se a solução do fluido e esse processo é repetido até que haja uma solução convergida para as duas fases, sendo que é possível considerar as colisões entre partículas, o que não foi necessário no presente trabalho, como será apresentado posteriormente.

A Figura 13 ilustra o fluxograma que representa os cálculos realizados no método de acoplamento de fases utilizado e descrito por Laín e Sommerfeld (2013) e inclui as etapas do processo quando o acoplamento entre as fases é de duas vias (tanto a fase dispersa quanto a fase contínua afetam o escoamento) ou de quatro vias, quando além da interação mútua entre fases, existe o efeito da colisão entre partículas, de forma que pode haver transferência de energia e momentum entre elas.

Para o rastreamento das partículas no código utiliza-se o algoritmo de Haselbacher, Najjar e Ferry (2007), que permite que as partículas passem por mais de uma célula computacional em um único passo de tempo, é baseado em distâncias de interseção com as faces ao invés de tempos de interseção, além de ser mais rápido e eficiente que outros algoritmos disponíveis.

Figura 13 - Fluxograma do acoplamento Euler-Lagrange realizado no UNSCYFL3D



Fonte: adaptado de Lain e Sommerfeld (2013)

## 4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados resultados referentes a um estudo numérico do jato erosivo em placa plana, que envolve o estudo de diferentes variáveis na erosão, e de erosão em curvas de 90° em série. Além disso, serão mostradas as diferenças numéricas devido à utilização de malhas dinâmicas em simulações de escoamentos bifásicos com erosão, assim como as vantagens obtidas com a implementação do novo método de *smoothing* de superfície.

### 4.1 ESTUDO INICIAL DO JATO EROSIVO EM PLACA PLANA

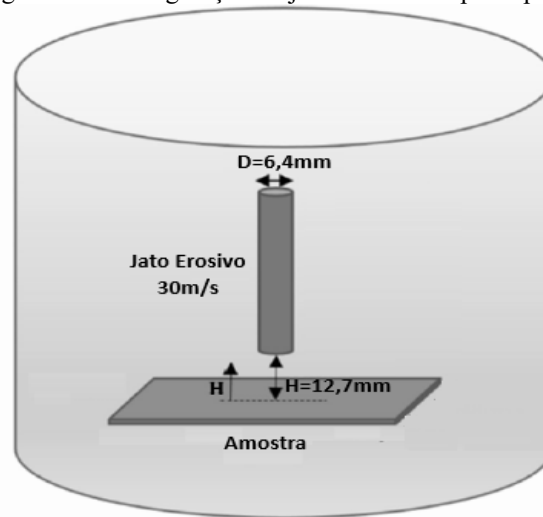
Uma das formas de verificar a eficácia da utilização de malhas móveis no processo de desgaste por erosão é por meio da simulação de casos relativamente mais simples e padronizados, para os quais se dispõe de maior riqueza de dados experimentais. Além disso, alguns desses experimentos já foram reproduzidos numericamente e esses resultados também podem ser utilizados para fins comparativos.

Um desses casos mais clássicos de escoamentos multifásicos nos quais ocorre erosão consiste no experimento de um jato erosivo impingente em placa plana (NGUYEN, *et al.*, 2014; NGUYEN, *et al.*, 2019). Nesse tipo de teste, uma amostra de determinado material é sujeita a um jato (normalmente de ar ou água) contendo partículas de material abrasivo, sob condições controladas e por determinado intervalo de tempo, além de velocidade e ângulo de impacto estabelecidos.

Inicialmente, optou-se então por estudar a erosão causada em uma placa plana por um jato erosivo. Existem diversos trabalhos experimentais e numéricos com essa configuração, o que facilita a reprodução numérica e, posteriormente, a validação das simulações.

Na configuração inicial, ilustrada na Figura 14 e baseada nos experimentos de Nguyen *et al.* (2014), o jato erosivo de areia a uma concentração de 0,5% em volume, incide em uma placa plana a um ângulo de 90° e a uma distância de 12,7mm. As dimensões da amostra de aço inoxidável AISI 304 submetida à erosão são de 25x25x5mm, o diâmetro do injetor é igual a 6,4mm e os testes experimentais foram feitos para diferentes intervalos de erosão.

Figura 14 - Configuração do jato erosivo em placa plana



Fonte: adaptado de Karimi, Shirazi e Mclaury (2016)

Neste trabalho, serão estudados os casos em que a amostra é erodida por 5, 15 e 30 minutos com velocidade do jato igual a 30m/s. As demais propriedades dos materiais e as principais condições de simulação são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de simulação para o estudo do jato erosivo em placa plana

<b>Fluido</b>	Água
<b>Densidade do fluido</b>	998 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade do fluido</b>	1,0 × 10 <sup>-3</sup> Pa.s
<b>Velocidade do fluido</b>	30 m/s
<b>Material da amostra erodida</b>	Aço Inoxidável AISI 304
<b>Densidade do material erodido</b>	7929 kg/m <sup>3</sup>
<b>Dureza Vickers do material erodido</b>	1,96 GPa
<b>Densidade das partículas</b>	3940 kg/m <sup>3</sup>
<b>Diâmetro médio das partículas</b>	150 µm
<b>Vazão mássica de sólido</b>	1,901 × 10 <sup>-2</sup> kg/s

Foram geradas três malhas computacionais hexaédricas, com números totais de elementos iguais a aproximadamente 300.000, 600.000 e 1.200.000. As condições experimentais foram reproduzidas nas simulações utilizando-se as três malhas diferentes geradas, sendo que como condição de contorno na entrada, o fluido foi injetado a 30m/s com uma intensidade turbulenta igual a 5%, assumindo a condição de não deslizamento nas paredes. A partir de um teste de sensibilidade de malha, verificou-se que para 600.000 elementos os resultados já não apresentavam variações significantes que justificassem um custo computacional mais alto com uma malha mais refinada. Portanto, essa foi a malha adotada para as simulações posteriores.

Para o rastreamento das partículas o passo de tempo é geralmente igual a  $10^{-5}$ s, mas para o fluido  $10^{-4}$ s foi suficiente para garantir resultados com precisão, sem que houvesse um aumento no tempo de simulação sem benefícios para os resultados, visto que o trabalho utiliza a metodologia RANS.

Para familiarização com o software e entendimento da influência de diferentes fatores nos resultados das simulações, foi realizado um estudo inicial relativo aos efeitos do tipo de acoplamento, número de parcelas e número de passos de tempo, a fim de se verificar o que é mais adequado para os casos que serão analisados neste trabalho. Como é um estudo introdutório, foi utilizada a malha estática para todas as simulações dessa etapa inicial.

#### **4.1.1 Influência do tipo de acoplamento**

É importante uma análise relativa à influência que o tipo de acoplamento entre fases utilizado na simulação tem nos resultados. No acoplamento de uma via, a influência das partículas sólidas (fase dispersa) no escoamento (fase contínua) não é contabilizada, então só há interação do fluido com a partícula. No caso de duas vias, tanto a fase dispersa quanto a fase contínua afetam o escoamento e no caso de acoplamento quatro vias, além dessa interação mútua entre fases, existe o efeito da colisão entre partículas, de forma que pode haver transferência de energia entre elas.

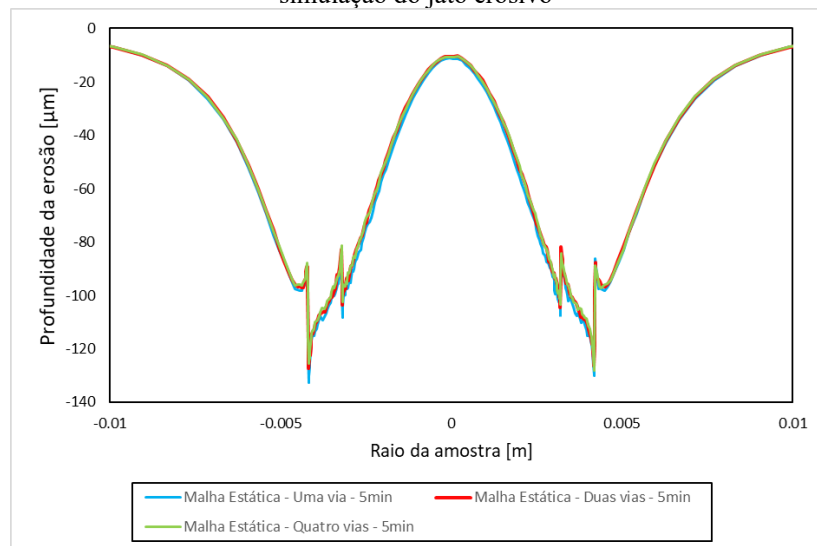
Dessa maneira, com a mesma malha e condições experimentais de Nguyen *et al.* (2014), fez-se a análise dos efeitos dos diferentes tipos de acoplamento para os tempos de 5, 15 e 30min de erosão. A Figura 15, a Figura 16 e a Figura 17 ilustram os resultados para 5, 15 e 30 minutos, respectivamente, e pode-se perceber que para esse caso do jato erosivo em placa plana não houve

nenhuma alteração significativa nos resultados de penetração de erosão, o que já era esperado, visto que não é um caso com altas concentrações de partículas.

Nesse estudo, a fração volumétrica de sólidos é igual a 0,5% e, conforme apresentado por Elghobashi (1991), escoamentos nos quais essa fração for maior que  $10^{-6}$  devem ser tratados com o acoplamento de duas vias e aqueles com fração volumétrica acima de  $10^{-3}$  deveriam ser tratados com o de quatro vias.

Porém, conforme Salvo (2013), apesar da recomendação teórica, muitas simulações numéricas com frações volumétricas que requereriam o acoplamento de duas ou quatro vias apresentam bons resultados com o acoplamento de uma via. Portanto, o custo computacional mais elevado de uma simulação com duas ou quatro vias não compensará para o caso de jato erosivo nas condições analisadas, então o acoplamento de uma via será adotado.

Figura 15 - Profundidade de erosão após 5 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo



Fonte: elaborado pela autora



Figura 16 - Profundidade de erosão após 15 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo

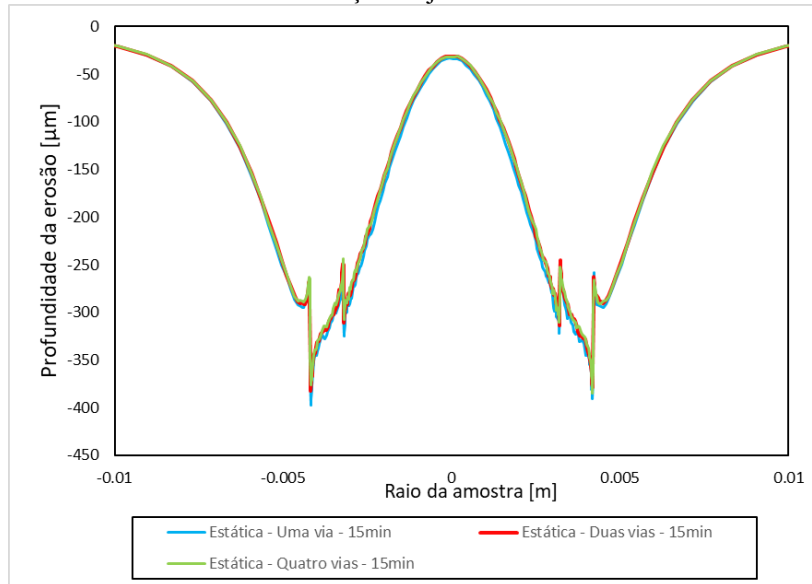
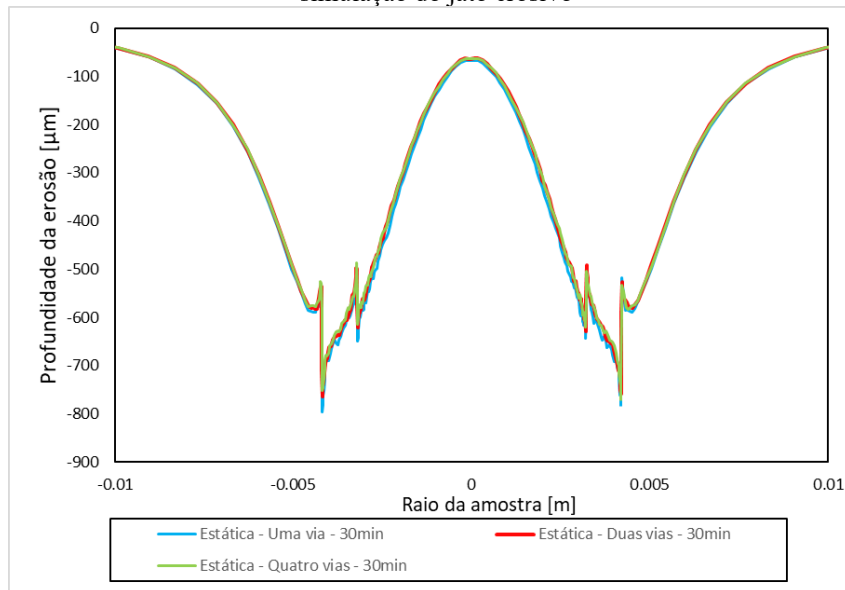


Figura 17 - Profundidade de erosão após 30 minutos utilizando-se acoplamento de uma, duas e quatro vias para simulação do jato erosivo



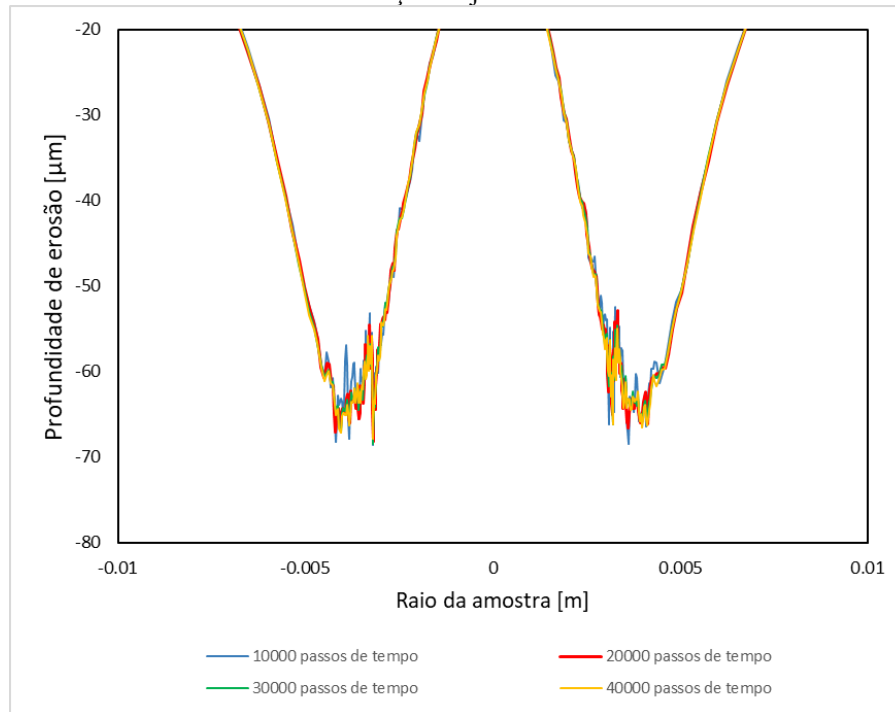
#### 4.1.2 Influência do número de passos de tempo

Após o estudo do tipo de acoplamento, adotou-se então o acoplamento de uma via para as próximas simulações e realizou-se uma análise para números totais de passos de tempo diferentes

da simulação com malha estática. Como sabe-se que a taxa de erosão tende a determinado valor, como mencionado na seção 2.3, a simulação deve ser realizada até que haja essa convergência. Ao atingir esse patamar da taxa de erosão, os valores de profundidade de erosão podem ser calculados de acordo com o tempo real de teste, vazão mássica de sólidos e velocidade de impacto das partículas.

Para essa análise, a Figura 18 ilustra as variações de profundidade de erosão nas regiões mais erodidas para melhor visualização das diferenças entre as simulações. Nota-se que apenas para 10.000 passos de tempo a diferença é um pouco maior, sendo esse resultado também mais ruidoso, então para garantir um resultado mais adequado adotou-se um número total de 30.000 passos de tempo para as simulações que utilizam a malha estática para o experimento estudado.

Figura 18 - Profundidade de erosão após 5 minutos utilizando-se diferentes números totais de passos de tempo para simulação do jato erosivo



Fonte: elaborado pela autora

### 4.1.3 Influência do número de parcelas

Também foi estudada a influência do número de parcelas nos resultados numéricos de erosão. As parcelas são utilizadas para rastreamento das partículas de sólido e cada parcela representa na simulação determinado grupo de partículas com as mesmas propriedades.

Números maiores de parcelas tendem a descrever melhor o comportamento da fase dispersa, porém, quanto maior o número de parcelas, maior será o esforço computacional e isso deve ser considerado para uma decisão em relação ao valor ideal a ser utilizado para boa representatividade sem custos desnecessários (BAUMGARTEN, 2006).

Nessa análise, para a malha estática, ao se utilizar 90, 180 e 360 parcelas injetadas a cada passo de tempo, verificou-se que o perfil de erosão era menos ruidoso quanto maior o número de parcelas, já que os erros estatísticos diminuem devido à uma maior homogeneidade quanto às células que são atingidas pelas parcelas. Adotou-se para este estudo um número de parcelas intermediário e igual a 180, visto que forneceu bons resultados e o ganho estatístico com 360 não justificou o maior custo computacional.

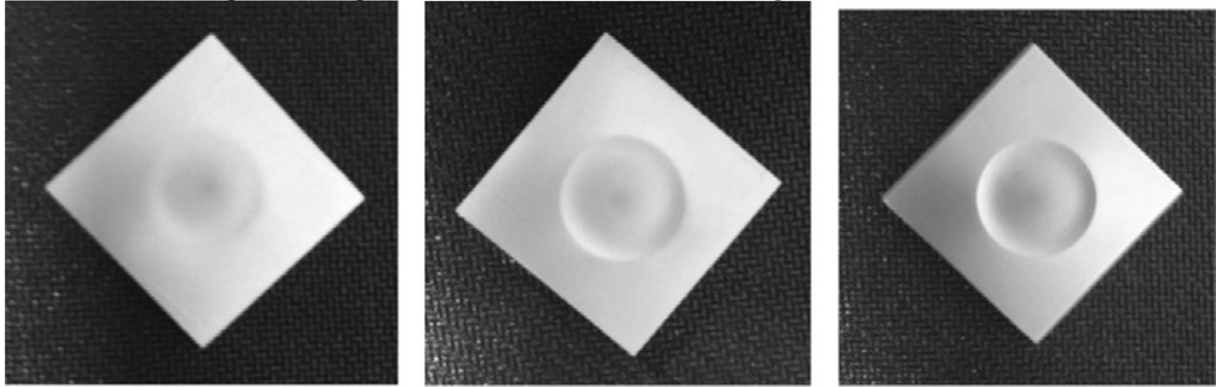
### 4.1.4 Validação das simulações

Nessa etapa, após os estudos iniciais, com as condições mais adequadas, fez-se a validação das simulações preliminares com a malha estática por meio de comparações com os resultados experimentais.

Sendo assim, deu-se continuidade ao estudo dos casos experimentais de Nguyen *et al.* (2014) com o jato de água-areia a uma velocidade de impacto com o aço igual a 30m/s por intervalos de 5, 15 e 30 minutos.

Utilizando um perfilômetro, foram obtidos os perfis 3D das superfícies das amostras erodidas (NGUYEN *et al.*, 2014). Com isso, tem-se os perfis de profundidade de erosão em função do raio das amostras, que serão utilizados nessa validação. Na Figura 19 estão ilustradas as superfícies das amostras erodidas nos experimentos.

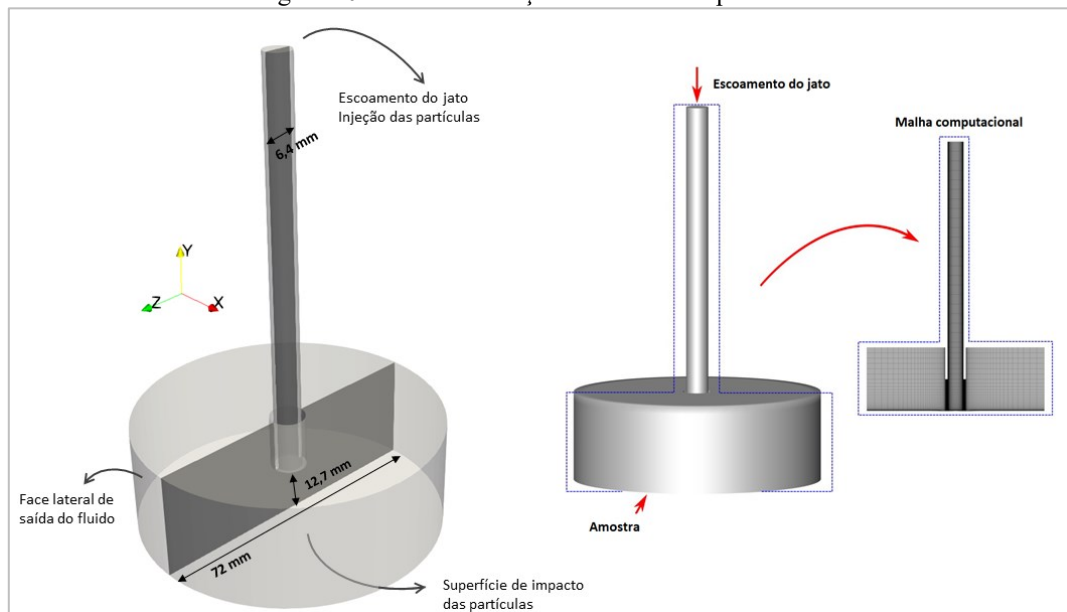
Figura 19 - Superfície das amostras erodidas a 30m/s por 5, 15 e 30 minutos.



Fonte: adaptado de Nguyen *et al.* (2014)

Em relação à geometria, a Figura 14 ilustrou a configuração experimental do jato e da amostra e a Figura 20 mostra o domínio e a malha computacional utilizada no UNSCYFL3D, com refinamento nas regiões apropriadas. O domínio computacional é simplificado o suficiente para uma boa representação do fenômeno, sendo que a face na qual ocorre erosão é bem maior que a amostra e o comprimento da tubulação suficiente para desenvolvimento do escoamento. Foi utilizado o modelo de Oka, Okamura e Yoshida (2005) para predição da erosão.

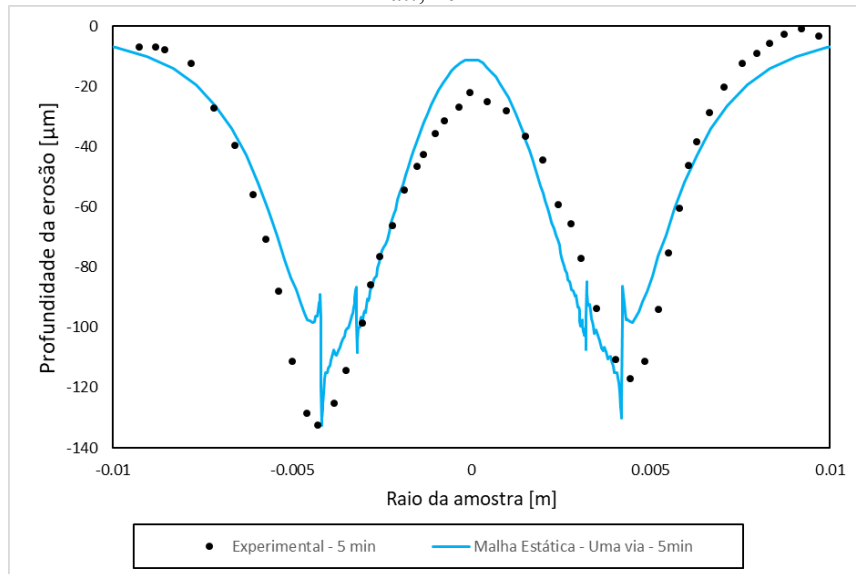
Figura 20 - Domínio e seção da malha computacional



Fonte: elaborado pela autora

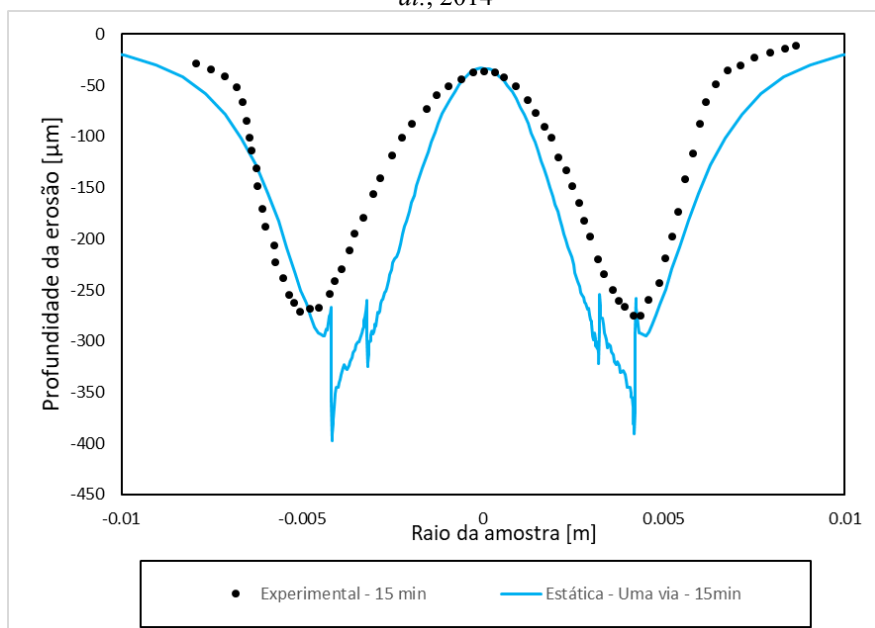
A Figura 21, Figura 22 e a Figura 23 representam os resultados obtidos com a malha estática para os tempos de erosão iguais a 5, 15 e 30 minutos, respectivamente, com o acoplamento de uma via, conforme verificado pelo estudo inicial ser o mais adequado para esse caso analisado.

Figura 21 - Comparação da simulação do jato erosivo para 5 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, *et al.*, 2014



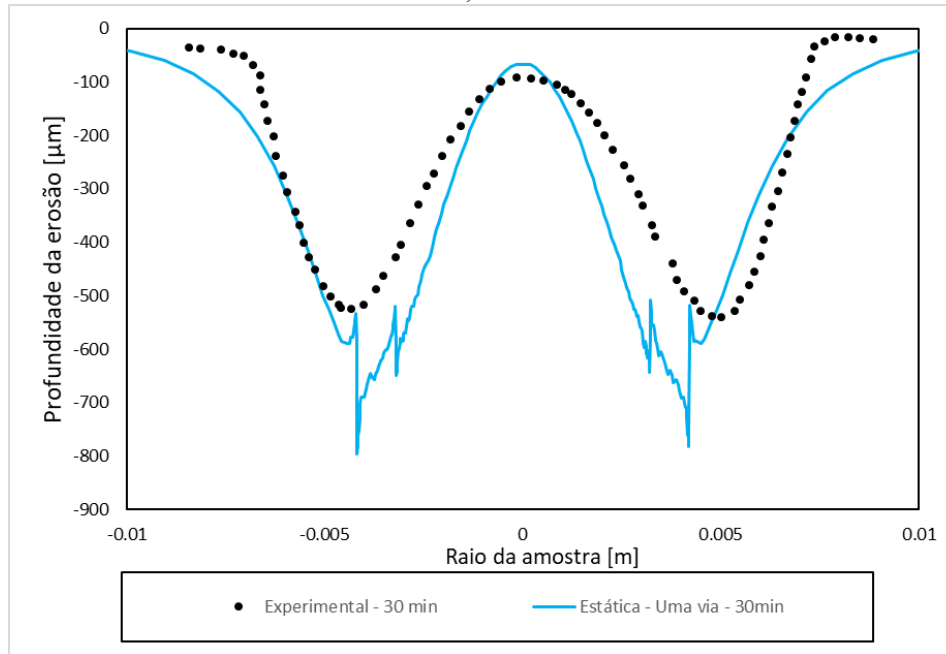
Fonte: elaborado pela autora

Figura 22 - Comparação da simulação do jato erosivo para 15 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, *et al.*, 2014



Fonte: elaborado pela autora

Figura 23 - Comparação da simulação do jato erosivo para 30 minutos com os dados experimentais de NGUYEN, *et al.*, 2014



Verifica-se que os resultados dos perfis de erosão para os tempos analisados foram satisfatórios para a malha estática quando comparados aos resultados experimentais obtidos por NGUYEN *et al.* (2014) e a metodologia para malha estática pode ser validada. Observa-se certo ruído nas regiões de maior profundidade de erosão, que, como mencionado anteriormente, podem ser diminuídos com um número maior de parcelas, pois ocorrem devido à estatística de colisões de partículas com as faces do domínio computacional da região erodida.

Sendo assim, será estudado posteriormente se a malha dinâmica pode ser uma alternativa para que esse ruído não afete a visualização dos resultados médios obtidos, visto que poucas células dentre milhares do domínio computacional com valores diferentes da erosão média que produzem esse resultado ruidoso.

#### 4.1.5 Comparação entre malha estática e dinâmica

Nessa etapa foi realizada a implementação de malhas móveis para o caso de estudo e fez-se uma comparação com os resultados em que se utilizou malha estática para verificar os benefícios

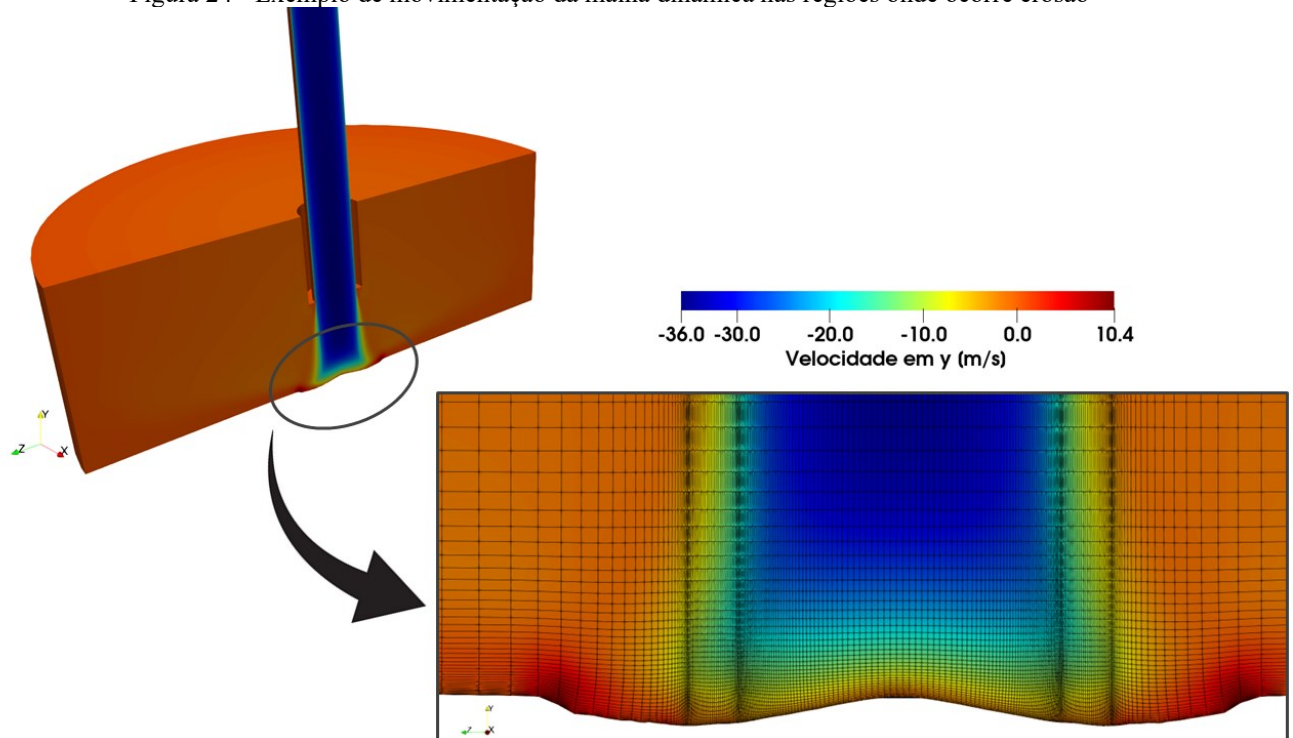
de cada metodologia em relação aos dados experimentais. Além disso, foi estudada a influência da velocidade do jato, do tamanho das partículas e da esfericidade dessas partículas na erosão.

As simulações numéricas foram realizadas novamente para os tempos de erosão iguais a 5, 15 e 30 minutos, mantendo as condições de contorno da Tabela 2, mas utilizando-se a malha dinâmica para comparação com os dados experimentais e com os resultados numéricos da malha estática já obtidos na etapa anterior.

Dessa maneira, a alteração na geometria da amostra devido à erosão ao longo do tempo é computada e pode-se analisar se a utilização da malha dinâmica faz com que os resultados se aproximem mais do fenômeno real observado experimentalmente, além de poder ser feita a validação da metodologia utilizada para malhas móveis.

Além disso, verificou-se também a influência de se recalcular o escoamento após cada movimentação da malha, verificando-se as mudanças ocasionadas no escoamento pelas cavidades formadas pela erosão na superfície para os três diferentes intervalos de tempo do teste experimental. A Figura 24 ilustra a modificação da malha em regiões de maior concentração de ocorrência de erosão na amostra.

Figura 24 - Exemplo de movimentação da malha dinâmica nas regiões onde ocorre erosão

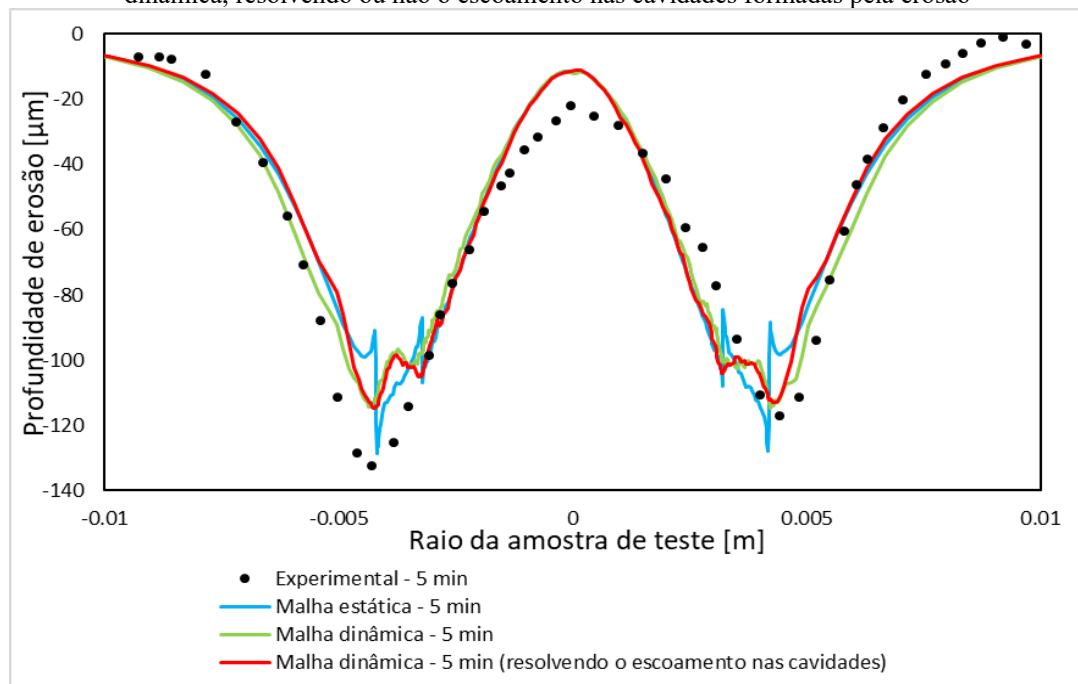


Fonte: elaborado pela autora

A Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27 apresentam os resultados obtidos de perfis de erosão para os tempos de teste iguais a, respectivamente, 5, 15 e 30 minutos. Os resultados experimentais foram comparados àqueles obtidos para a malha estática e a malha dinâmica. As simulações com a malha dinâmica foram realizadas com e sem a resolução do escoamento nas cavidades para estudo de sua influência nos resultados.

A partir da Figura 25, percebe-se que os resultados obtidos para erosão com as malhas estáticas e dinâmicas foram similares, tanto em relação ao comportamento da curva quanto à magnitude, porém a principal vantagem da malha dinâmica é o menor ruído presente na curva. Esse ruído, conforme mencionado anteriormente, foi ocasionado pelos refinamentos locais da malha e verificou-se que estava presente na malha estática mesmo com o aumento do número de parcelas até 3600 por passo de tempo (valor utilizado também para a simulação com a malha dinâmica), então o pós processamento desses dados da malha estática pode ser modificado para representar o comportamento médio sem o ruído, mas optou-se por mantê-lo dessa forma.

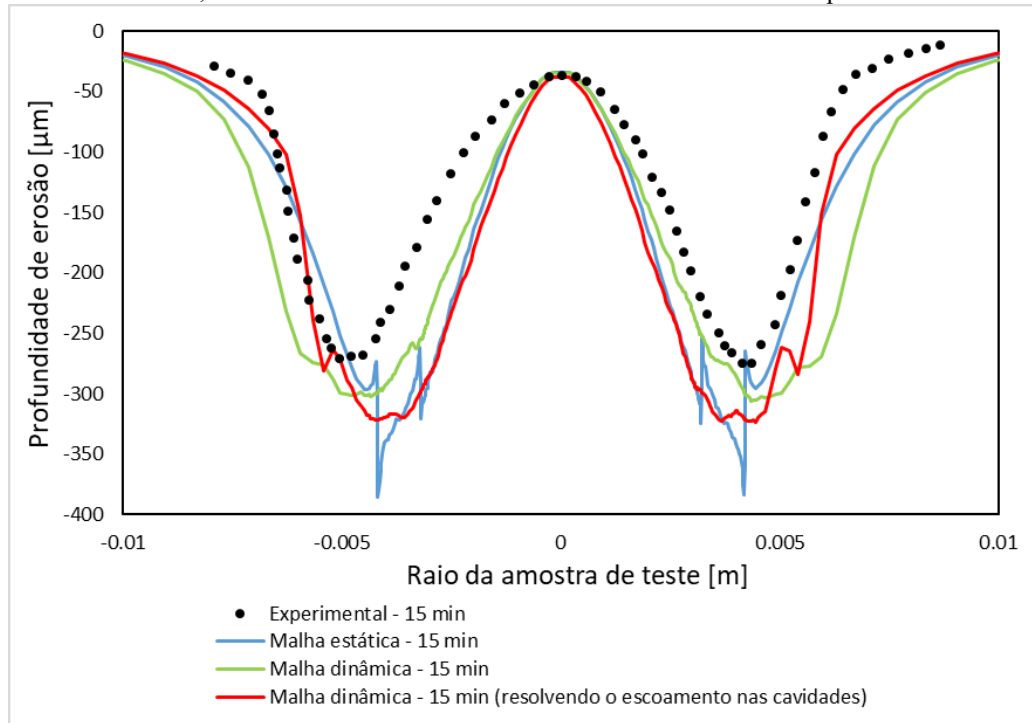
Figura 25 - Perfis de erosão após 5 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão



Fonte: elaborado pela autora

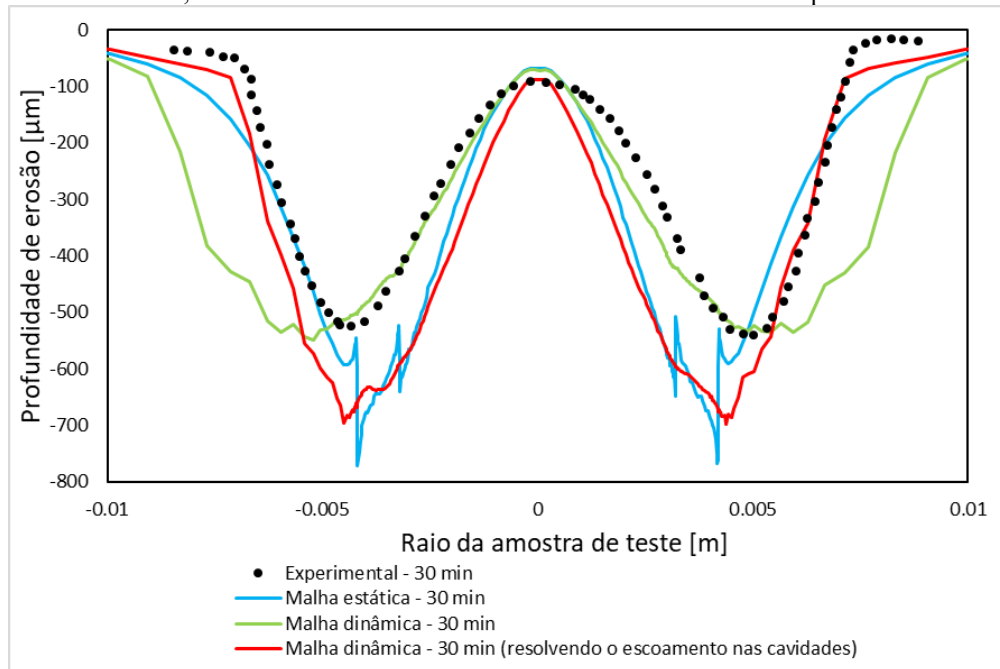


Figura 26 - Perfis de erosão após 15 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão



Fonte: elaborado pela autora

Figura 27 - Perfis de erosão após 30 minutos obtidos experimentalmente e numericamente com malha estática e dinâmica, resolvendo ou não o escoamento nas cavidades formadas pela erosão



Fonte: elaborado pela autora

A partir desses resultados percebe-se que com a utilização da malha dinâmica os elementos são modificados e isso faz com que os impactos das partículas nos elementos sejam ainda mais aleatórios, melhorando a estatística, enquanto na malha estática, mesmo que em uma malha ainda mais refinada, esse efeito ruidoso ainda pode estar presente.

Para o tempo de erosão igual a 5 minutos, conforme Figura 25, observa-se que, em relação à malha dinâmica, não há diferenças muito significativas ao resolver o escoamento nas cavidades formadas, o que é esperado, visto que é um tempo menor e a erosão ainda é baixa. Consequentemente, a profundidade das cavidades formadas pela erosão é menor, assim como sua influência no escoamento.

Já na Figura 26, para as simulações com 15 minutos de erosão, nota-se que resolver o escoamento nas cavidades formadas pela deformação da malha devido à erosão começa a ganhar importância, uma vez que esse método modifica o formato do perfil de erosão, aproximando melhor os resultados dos dados experimentais nas extremidades das cavidades formadas. Essa alteração no perfil ao resolver-se o escoamento nas cavidades ocorre pois quando o escoamento não é resolvido nessas regiões há uma tendência de espalhamento das partículas, o que faz com que o perfil de erosão se alargue, o que é ainda mais visível na Figura 27, para o maior tempo de erosão. Ao resolver o escoamento nas cavidades para 30 minutos de erosão, o perfil se adequa melhor ao esperado, aproximando-se dos dados experimentais.

Portanto, para tempos mais longos de exposição à erosão, percebe-se que a malha dinâmica ganha importância e o escoamento dentro das cavidades influencia significativamente no perfil de erosão. Já para tempos mais curtos, a malha estática e a malha dinâmica fornecem resultados semelhantes de perfis de erosão, inclusive para a magnitude da profundidade máxima. Conforme mencionado anteriormente, para esse caso do jato erosivo em placa plana, a principal vantagem das curvas obtidas por meio de malhas dinâmicas é o perfil menos ruidoso.

Esses resultados são muito importantes, pois se mostraram muito coerentes com os experimentos para as duas malhas utilizadas e fornecem informações sobre qual malha se adequa melhor para cada condição estudada. Isso é importante para planejamento de futuras simulações da erosão em aplicações diversas, como risers, em que pode-se desejar prever a alteração da geometria ou modelar intervalos de tempo maiores, quando a malha móvel ganha importância.

Além disso, os resultados validam a metodologia utilizada tanto para a malha estática quanto para a malha móvel.

Outros resultados de simulações numéricas que se baseiam no mesmo experimento feito por Nguyen *et al.* (2014), como o trabalho de Parsi *et al.* (2019), obtiveram perfis de erosão com malha estática que apresentaram magnitude até quatro vezes maior que a dos experimentos, ao contrário dos resultados fornecidos pelo UNSCYFL3D, que se mostra muito robusto tanto para simulações de erosão utilizando-se a malha estática quanto para aquelas com malha dinâmica, exibindo diferenças na magnitude bem menos significativas e perfis muito similares com os observados experimentalmente.

Inclusive, não se sabe os desvios relativos aos experimentos, que geralmente podem ser altos e, devido à reutilização das partículas de areia, podem apresentar diferenças do primeiro para o quinto ciclo de testes experimentais de até 300% em relação à taxa de erosão (NGUYEN, NGUYEN, *et al.*, 2019), pois as partículas ficam cada vez mais esféricas ao longo do processo. Nos testes experimentais utilizados para fins comparativos neste trabalho, a profundidade de erosão representou uma média entre três desses cinco diferentes ciclos de testes para cada condição analisada. Portanto, os resultados numéricos foram muito adequados nos casos analisados e a diferença em relação aos experimentos foi pouco significativa.

#### **4.1.6 Estudo da influência da velocidade do jato, do tamanho das partículas e da esfericidade na erosão**

Foram estudadas as influências da velocidade do jato, com malha estática e dinâmica, e do tamanho das partículas na erosão com base em resultados experimentais de Nguyen *et al.* (2014) e Nguyen *et al.* (2019). Após essa comparação, fez-se uma análise do efeito da modificação da esfericidade de partículas de diferentes tamanhos nos perfis de erosão.

##### **4.1.6.1 Velocidade do Jato**

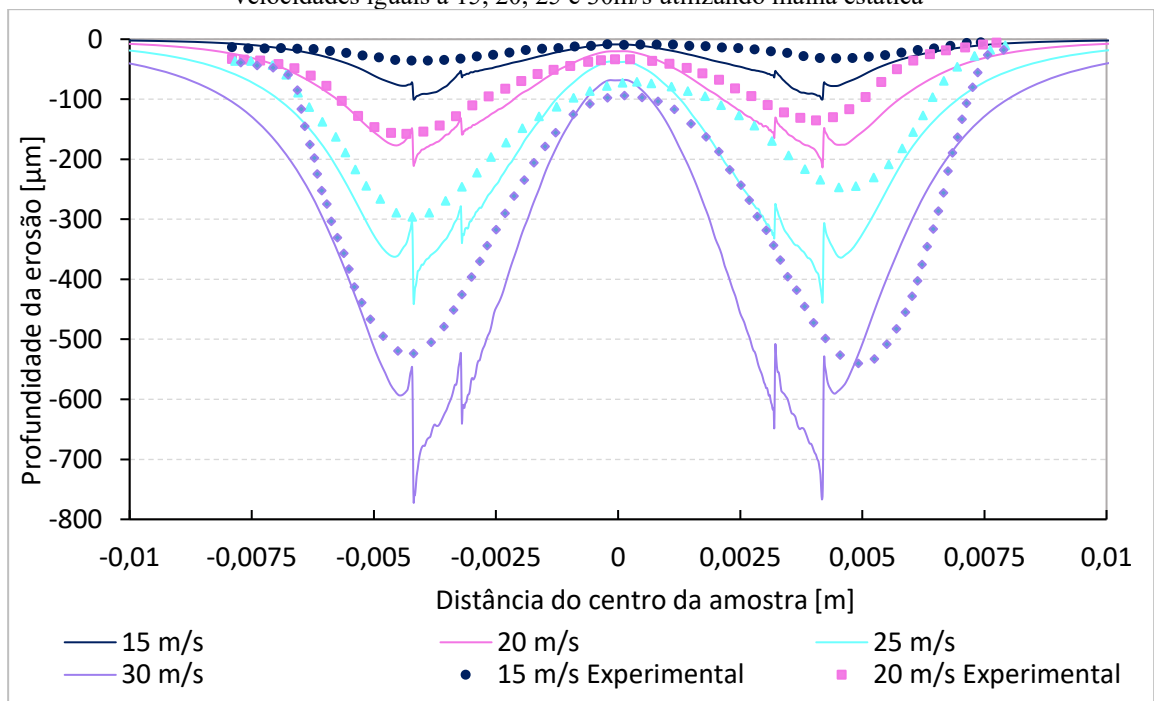
No estudo experimental de Nguyen *et al.* (2014) analisaram-se os perfis de erosão na mesma configuração dos testes apresentados anteriormente, com condições descritas na Tabela 2, durante

30 minutos, mas para velocidades do jato iguais a 15, 20, 25 e 30m/s. Sendo assim, as condições experimentais foram reproduzidas nas simulações. Os resultados obtidos utilizando-se a malha estática estão ilustrados na Figura 28.

Para os casos em que a velocidade é igual a 20, 25 e 30m/s, foram feitas simulações também com malha dinâmica, visto que nesses casos a magnitude da erosão é mais significativa, porém não foi resolvido o escoamento nas cavidades visando reduzir os custos computacionais dessa análise. A Figura 29 apresenta esses resultados obtidos com a malha móvel.

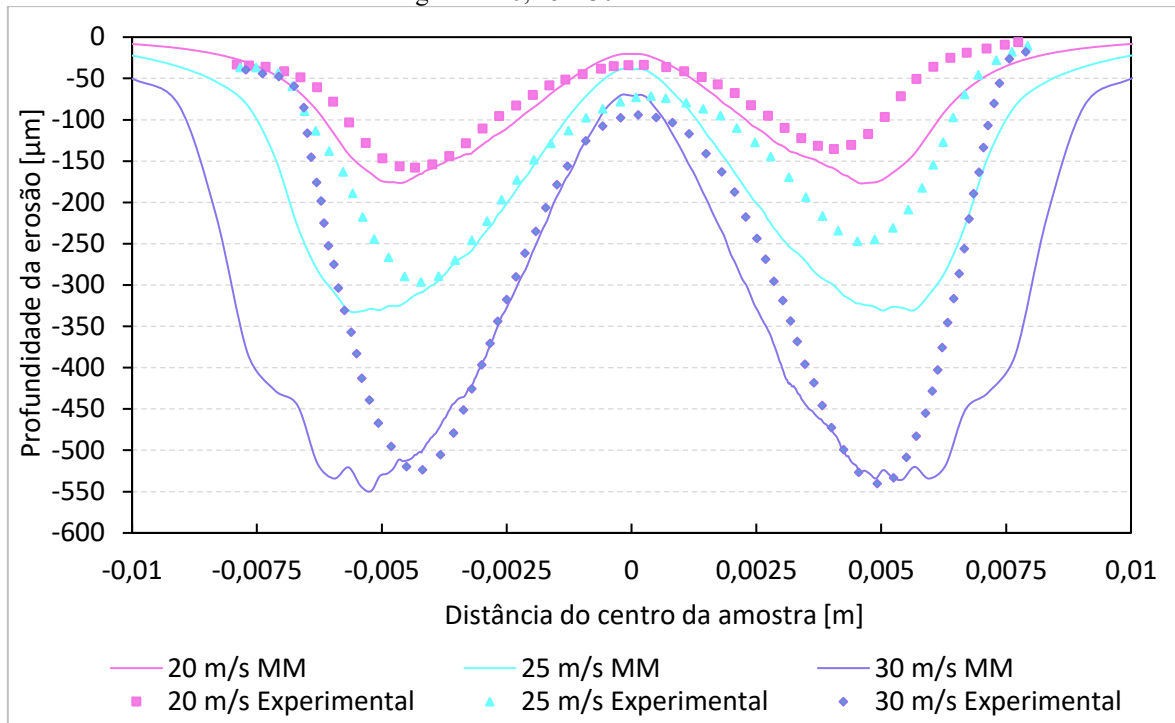
Observa-se novamente uma boa concordância entre resultados das simulações e dos experimentos, tanto para a malha estática quanto para a malha móvel. Assim como esperado e apresentado na seção 2.3.1, o aumento na velocidade do jato faz com que a velocidade de impacto das partículas aumente, o que ocasiona um aumento na magnitude da erosão. Nota-se também que, assim como nos casos já estudados, a malha móvel diminui o ruído observado nos resultados com a malha estática.

Figura 28 - Comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais para o perfil de erosão de jatos com velocidades iguais a 15, 20, 25 e 30m/s utilizando malha estática



Fonte: elaborado pela autora

Figura 29 - Comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais para o perfil de erosão de jatos com velocidades iguais a 20, 25 e 30m/s utilizando malha móvel



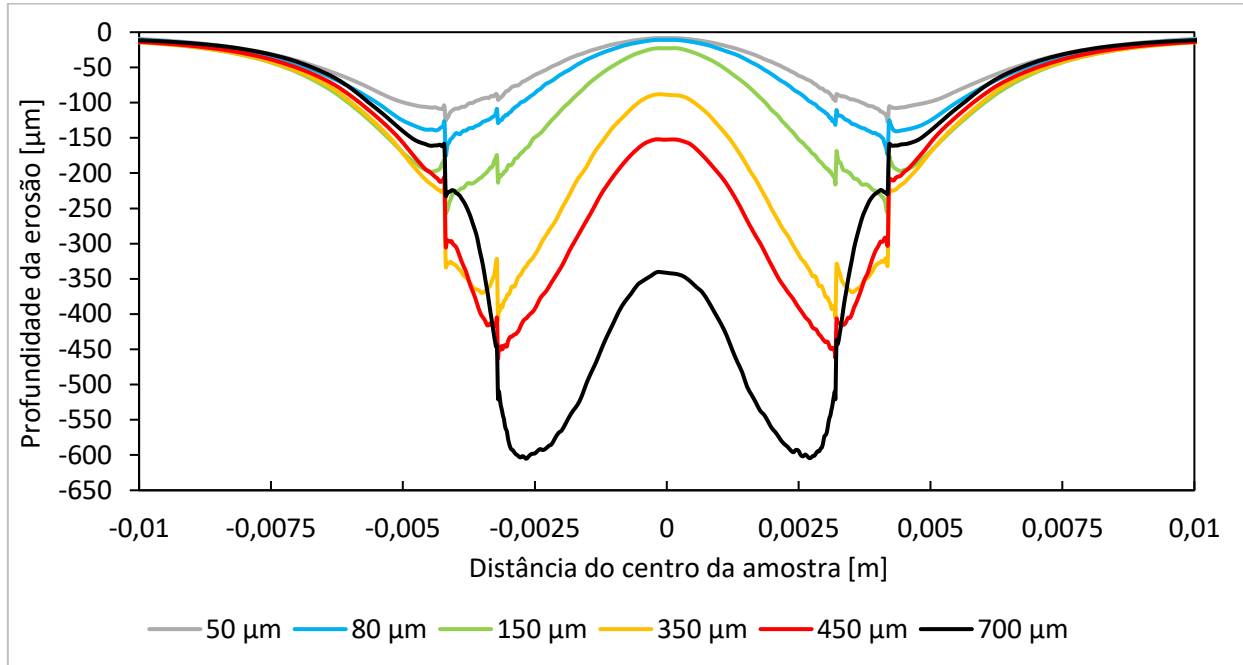
#### 4.1.6.2. Diâmetro das Partículas

Para o estudo do efeito da variação do diâmetro das partículas, as simulações foram feitas baseadas nos testes experimentais realizados por NGUYEN *et al.* (2019). Nesse caso, a velocidade do jato é igual a 30m/s, com ângulo de incidência igual a 90°, concentração volumétrica igual a 0,5% e tempo total de teste igual a 10 minutos. Foram utilizadas partículas de sílica de tamanhos médios iguais a 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu$ m incidentes em amostras de aço AISI 304 de dimensões 25x25x5mm, que foram testadas cinco vezes para cada diâmetro analisado. Ao final de cada ciclo de 5 testes, foram calculadas as taxas de erosão experimentais médias.

Utilizando a malha estática, as condições dos experimentos foram reproduzidas para cada um dos diâmetros estudados, para assim comparar os resultados das simulações com os experimentais.

A Figura 30 apresenta os resultados para profundidade de erosão nas amostras obtidos por meio das simulações e a Tabela 3 destaca os valores médios de profundidade e largura de erosão para cada diâmetro analisado obtidos nos experimentos.

Figura 30 - Resultados de perfis de erosão para os diâmetros de 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu\text{m}$  utilizando malha estática



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 3 - Resultados experimentais de erosão para os diâmetros de 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu\text{m}$

Diâmetro médio das partículas	50 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$	450 $\mu\text{m}$	700 $\mu\text{m}$
Número de partículas $\times 10^7$	$4423 \pm 5$	$1080 \pm 3$	$164 \pm 6$	$12 \pm 3$	$7 \pm 0,4$	$2 \pm 0,2$
Profundidade da erosão [ $\mu\text{m}$ ]	$21 \pm 2$	$88 \pm 3$	$150 \pm 5$	$210 \pm 7$	$214 \pm 4$	$225 \pm 6$
Largura da erosão [ $\mu\text{m}$ ]	$21,6 \pm 2$	$19,4 \pm 1,8$	$17,8 \pm 1,4$	$15,5 \pm 1,1$	$13,7 \pm 1,3$	$11,8 \pm 0,8$

Fonte: adaptado de Nguyen *et al.* (2019)

Ao comparar os resultados numéricos e experimentais, nota-se que os resultados de erosão obtidos com as simulações estão acima do esperado. Por exemplo, para 50 $\mu\text{m}$  os experimentos obtiveram uma profundidade de erosão igual a 21 $\mu\text{m}$  e para 350 $\mu\text{m}$  esse valor foi igual a 210 $\mu\text{m}$ . Já nas simulações, esses valores de profundidade foram de, respectivamente, 105 $\mu\text{m}$  e 350 $\mu\text{m}$ .

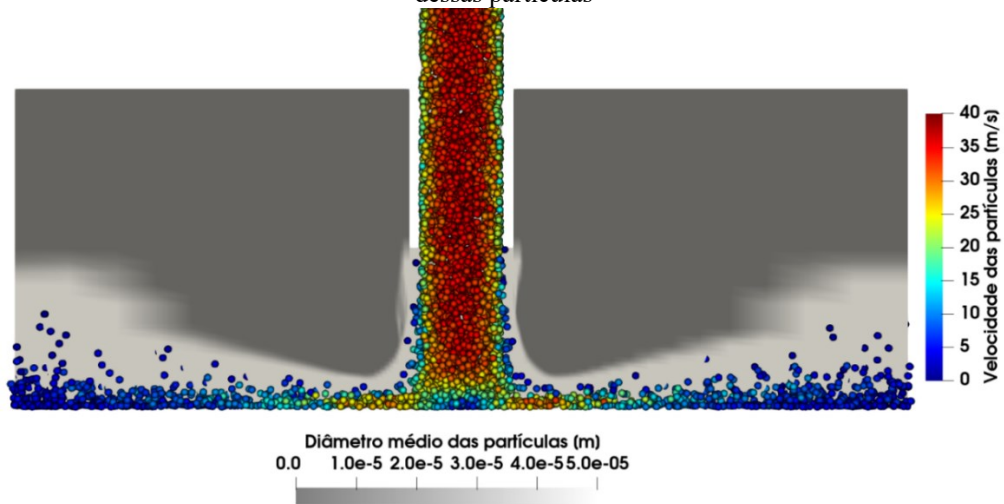
Porém, ao analisar a porcentagem de diferença à medida que o diâmetro das partículas aumenta, percebe-se que, quanto maior o diâmetro, maior é a proximidade entre simulação e experimentos. Sabe-se que a partir de um número de Stokes igual a 1, quanto maior é esse número, maior é a inércia daquela partícula. Para esses casos analisados, os números de Stokes para os diâmetros de 50, 80, 150, 350, 450 e 700 $\mu\text{m}$  são, respectivamente, iguais a 1,6, 4,0, 14,1, 76,6, 126,6 e 306,2. Portanto, verifica-se que quanto maior o diâmetro, maior é a inércia dessas partículas, maior é a energia de impacto e menor é sua tendência a seguir as linhas de corrente.

De fato, a Figura 30 reforça esse comportamento, visto que quanto maior o tamanho da partícula, maior é a profundidade e menor a largura do perfil de erosão, ou seja, o perfil de erosão diminui seu formato característico “em W” e se aproxima de um perfil “em U”, concordando com o observado experimentalmente por (NGUYEN *et al.*, 2019).

Além disso, na Figura 31 e na Figura 32 são apresentados os resultados de velocidade para as partículas de 50 $\mu\text{m}$  e 700 $\mu\text{m}$ , respectivamente. Nas imagens pode-se observar que realmente existe um espalhamento maior das partículas menores ao se aproximarem da amostra, enquanto as partículas maiores se concentram na região central do jato erosivo.

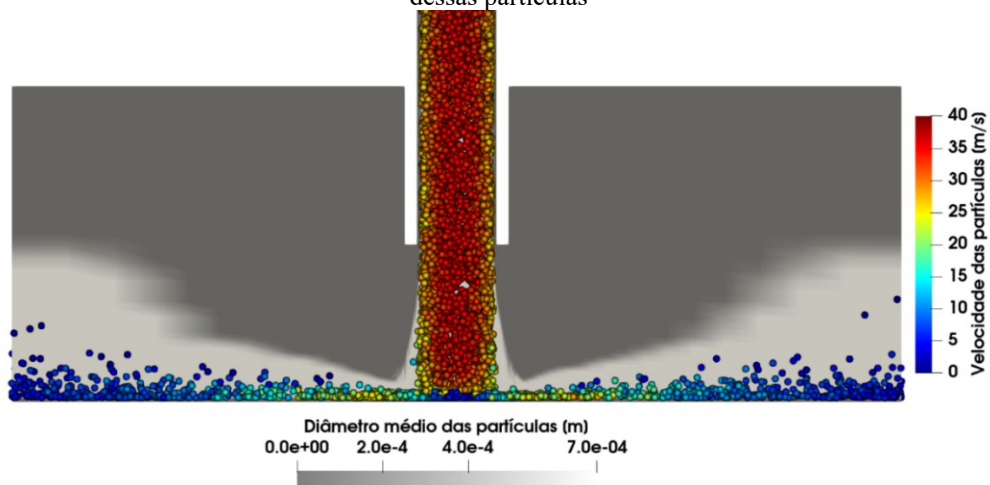
As zonas mais claras do fundo acinzentado da imagem indicam as regiões de maior ocorrência da presença das partículas, o que também reforça que as partículas de 700 $\mu\text{m}$  se concentram na região do jato, o que dá a origem ao perfil de erosão mais próximo daquele “em U”, com uma profundidade maior de erosão no centro da amostra. A concentração de impactos nessa região é ilustrada na Figura 33. Por outro lado, as partículas de 50 $\mu\text{m}$ , além de um maior espalhamento, apresentam nessa seção duas regiões mais evidentes de maior velocidade ao atingirem a amostra, o que dá origem ao característico perfil de erosão “em W”.

Figura 31 - Resultado de velocidade das partículas de diâmetro igual a  $50\mu\text{m}$  e regiões de ocorrência de presença dessas partículas



Fonte: elaborado pela autora

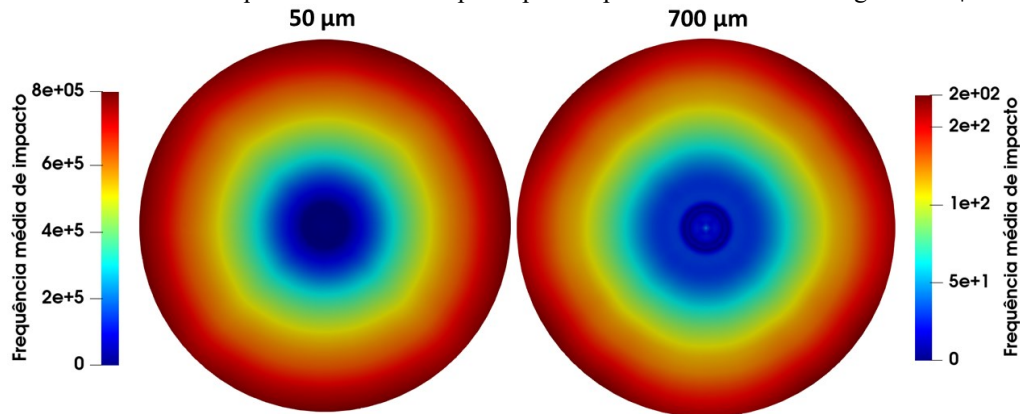
Figura 32 - Resultado de velocidade das partículas de diâmetro igual a  $700\mu\text{m}$  e regiões de ocorrência de presença dessas partículas



Fonte: elaborado pela autora



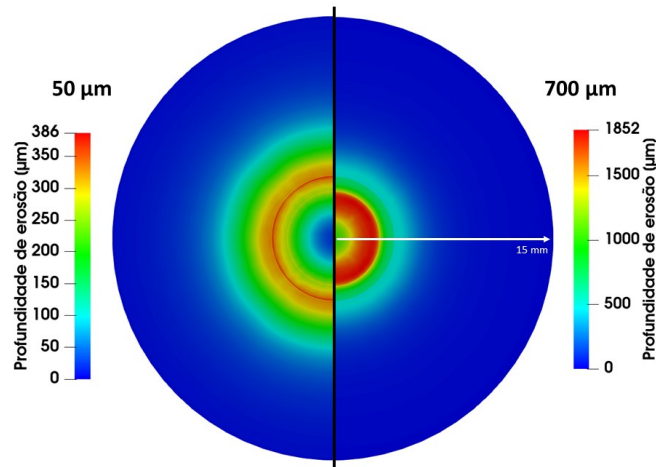
Figura 33 - Resultado de frequência média de impacto para as partículas de diâmetro igual a 50  $\mu\text{m}$  e 700 $\mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

No gráfico ilustrado na Figura 30 pode-se comparar os perfis de erosão para menores e maiores diâmetros e concluir que no caso das partículas de 50 $\mu\text{m}$  as regiões de maior profundidade de erosão estão deslocadas em relação ao caso com partículas de 700 $\mu\text{m}$ , sendo elas mais distantes do centro da amostra devido ao espalhamento maior das partículas menores. Esse fato está ilustrado na Figura 34, que reforça um perfil de erosão bem mais largo para partículas menores, enquanto a erosão devido às partículas maiores se concentra em uma região mais próxima ao centro da amostra. Na Figura 33 também pode-se verificar a diferença entre as regiões de impactos mais frequentes para os menores e maiores diâmetros de partícula.

Figura 34 - Resultado de profundidade de erosão ao longo da superfície da amostra para as partículas de diâmetro igual a 50  $\mu\text{m}$  e 700 $\mu\text{m}$

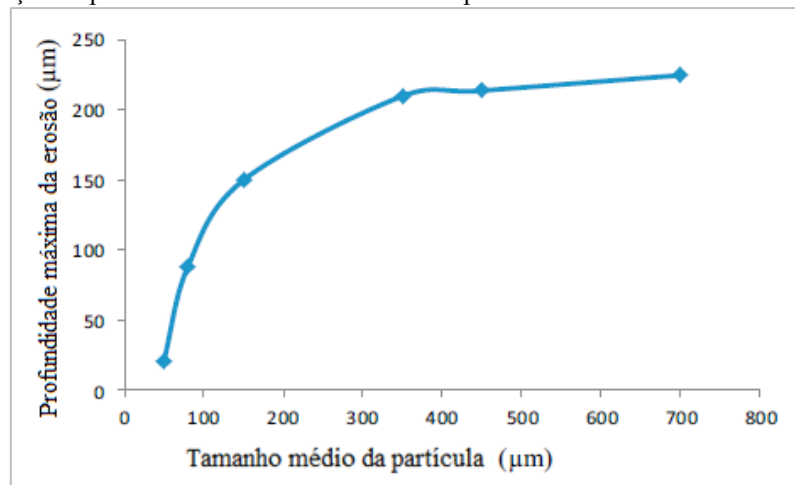


Fonte: elaborado pela autora

Além disso, Nguyen *et al.* (2019) apresentam uma correlação entre a taxa de erosão média e o tamanho das partículas. A partir de  $200\mu\text{m}$ , observa-se experimentalmente uma queda no aumento de penetração de erosão, conforme a Figura 35, sendo que as amostras possuem 5mm de profundidade. Esse comportamento está de acordo com o “*size effect*” (do inglês, efeito do tamanho), relatado na literatura.

De acordo com Finni (1995), partículas com tamanhos menores que  $100\mu\text{m}$  apresentam uma queda na eficiência do desgaste erosivo, que tende a ser bem mais similar para as partículas com diâmetros a partir de  $100\mu\text{m}$ . O autor relata que existem diversas explicações na literatura relacionadas à esse efeito do tamanho das partículas, mas que nenhuma delas foi provada, destacando que o ideal seria realizar experimentos utilizando partículas com uma distribuição de tamanhos mais restrita. Porém, isso é difícil com partículas angulares, pois geralmente se especifica esse tamanho a partir da mediana da distribuição de massa, mas, caso a distribuição fosse baseada no número de partículas, o tamanho médio seria aproximadamente metade do tamanho calculado com base na distribuição de massa.

Figura 35 - Relação da profundidade máxima de erosão experimental com o tamanho médio das partículas



Fonte: adaptado de Nguyen *et al.* (2019)

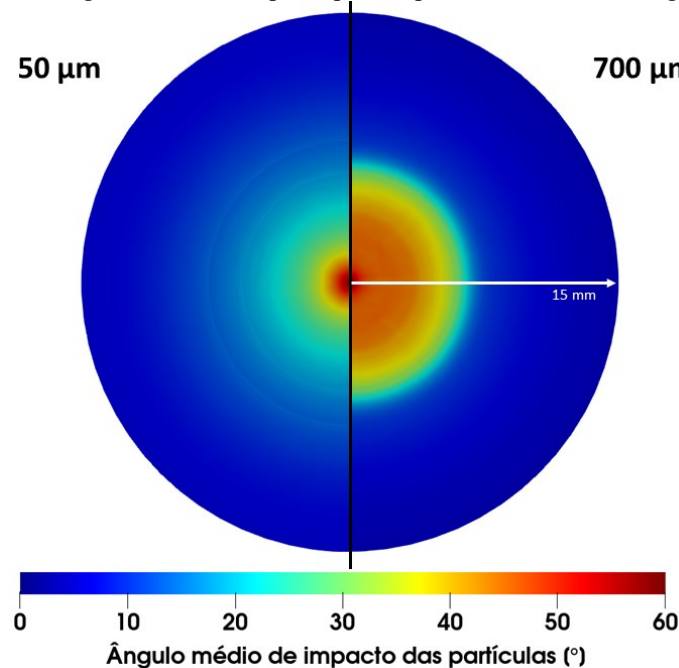
Como os modelos de erosão não incluem esse efeito do tamanho das partículas relatado na literatura, isso pode explicar parte dessa diferença verificada entre simulação e experimentos para diâmetros a partir de  $200\mu\text{m}$ . Portanto, seria importante estudar equações que pudessem ser acrescentadas ao modelo matemático e que limitassem esse aumento da erosão em casos que esse

efeito seja relevante, visto que isso não ocorre no momento e a taxa de erosão aumenta continuamente com o aumento do diâmetro das partículas.

Além disso, deve-se destacar que experimentalmente é difícil manter as condições de impacto para partículas de diferentes tamanhos, visto que suas velocidades de impacto diferem bastante, assim como o efeito do escoamento sobre elas (conforme ressaltado anteriormente ao se comparar os diferentes números de Stokes), a distribuição dos ângulos de impacto, entre outros fatores, o que trazem incertezas inerentes aos resultados.

Em relação ao ângulo de impacto, a Figura 36 apresenta a diferença do ângulo médio de impacto das partículas de  $50\mu\text{m}$  e  $700\mu\text{m}$  ao longo da superfície da amostra. Apesar das mesmas condições experimentais, como as partículas menores apresentam menor número de Stokes e desviam de sua trajetória inicial (ângulo inicial de incidência de  $90^\circ$  em relação à amostra), elas apresentam uma distribuição menos uniforme de ângulos de impacto na amostra, o que influencia a taxa de erosão como mostrado na Figura 7, e, conseqüentemente, o perfil de erosão. Esse resultado reforça as evidências da literatura citadas na seção 2.3.4 e que ressaltam a importância do efeito do ângulo de impacto no processo erosivo.

Figura 36 - Resultado de ângulo médio de impacto para as partículas de diâmetro igual a  $50\mu\text{m}$  e  $700\mu\text{m}$

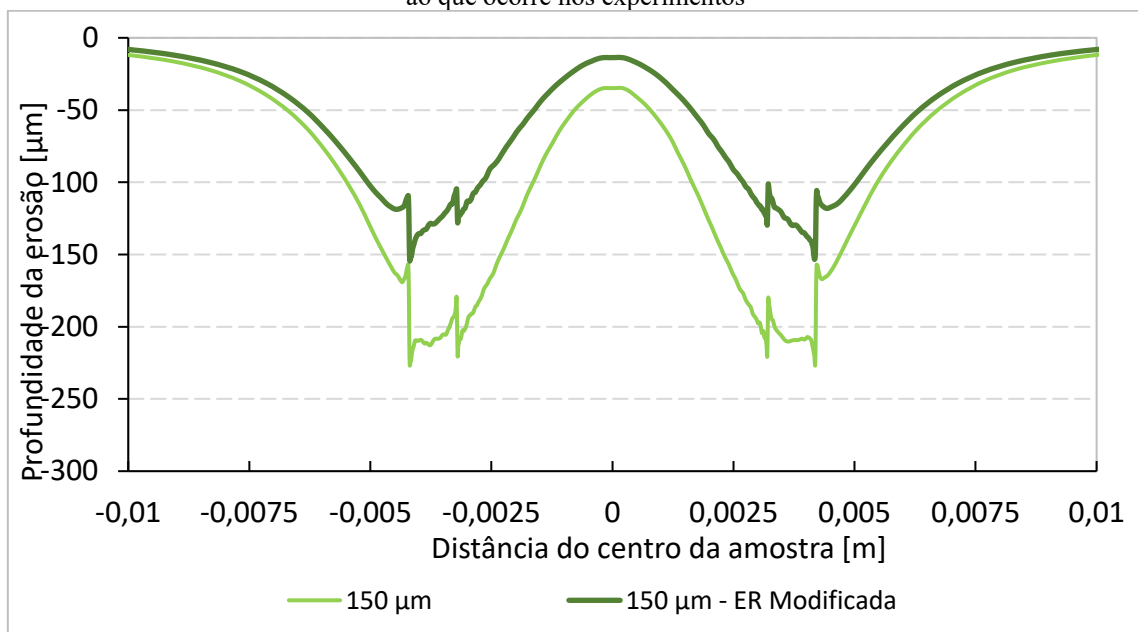


Fonte: elaborado pela autora

No estudo de diferentes tamanhos de partículas realizado por Nguyen *et al.* (2019) e reproduzido numericamente neste trabalho foi verificado que a taxa de erosão entre o primeiro e quinto ciclo de cada teste experimental variou até 300% devido à reutilização das partículas ao longo dos ciclos. Esse fato altera o fator de forma das partículas ao longo dos ciclos e, conseqüentemente, isso também pode contribuir para a diferença observada entre resultados numéricos e experimentais. Os resultados de profundidade máxima obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 3 em sua maioria mostram um desvio inferior a 10%, o que não condiz com essas variações de 300% na taxa de erosão e evidencia que outros fatores devem ser incluídos no cálculo desse desvio experimental.

Para exemplificar a diferença que essa variação da taxa de erosão pode apresentar, nos resultados numéricos com a taxa de erosão modificada fez-se um cálculo médio como se fossem simulados os 5 ciclos de testes experimentais, porém reduziu-se a taxa de erosão nos últimos ciclos de maneira análoga ao que ocorreu nos experimentos de Nguyen *et al.* (2019) devido à alteração no formato das partículas. O resultado médio com essa taxa de erosão modificada e reduzida em até 300% nos últimos ciclos do teste é exibido na Figura 37 para o tamanho médio de partículas igual a 150 $\mu\text{m}$  e foi comparado com o resultado da simulação original.

Figura 37 - Resultado da simulação para 150 $\mu\text{m}$  ao modificar a taxa de erosão nos últimos ciclos proporcionalmente ao que ocorre nos experimentos



Fonte: elaborado pela autora

Verifica-se que o resultado modificado se aproxima mais da penetração média de erosão dos experimentos, que é igual a  $150 \pm 5\mu\text{m}$ , conforme Tabela 3. Portanto, os resultados experimentais estão sujeitos a alguns tipos de incertezas que inicialmente não são presentes na simulação, visto que nela o fator de forma inicial é utilizado para todo o tempo de teste e esse é um fator que influencia significativamente a taxa de erosão. Devido a isso, fez-se um estudo sobre os efeitos da esfericidade das partículas na erosão.

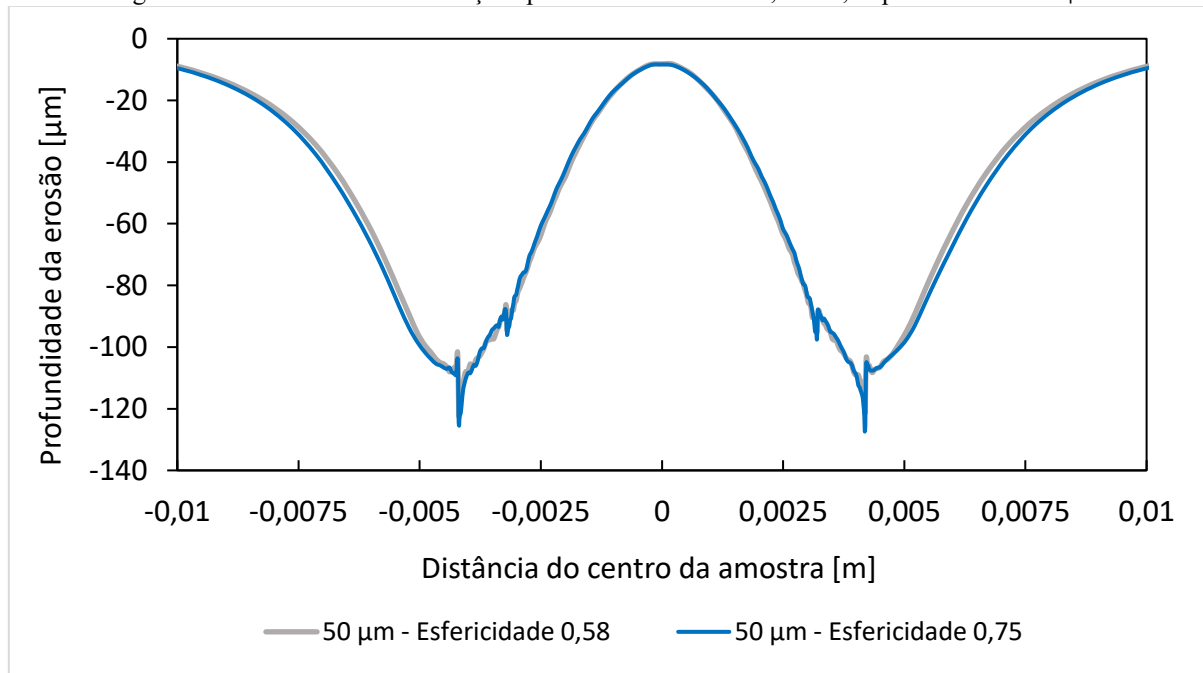
#### 4.1.6.3. Esfericidade das Partículas

A partir do estudo do efeito da variação do tamanho das partículas na erosão, como foi citado que experimentalmente existe uma variação da taxa de erosão entre ciclos de experimentos devido à modificação da esfericidade das partículas ao longo do tempo, visto que são reutilizadas, fez-se um estudo numérico da alteração desse valor de esfericidade nas simulações, o que também poderia ser uma estratégia para retratar a modificação da taxa de erosão nos experimentos observada por Nguyen *et al.* (2019).

Foi apresentado que o valor médio experimental de angularidade das partículas utilizadas nos testes de erosão é igual a 0,58 (NGUYEN *et al.*, 2019). Essa angularidade geralmente é medida repetidas vezes para as partículas em imagens 2D em posições aleatórias, então se aproxima da medida de esfericidade. Sendo assim, esse valor de 0,58 foi o valor de esfericidade utilizado em todas as simulações já apresentadas.

Dessa maneira, para verificar a influência da modificação dessa variável na erosão, para o caso do jato erosivo com partículas de sílica com diâmetro médio igual a  $50\mu\text{m}$  aumentou-se a esfericidade para 0,75. O resultado de profundidade de erosão para os dois valores de esfericidade é mostrado na Figura 38. Nesse caso, por ser um diâmetro muito pequeno, não foram observadas alterações significativas no perfil de erosão.

Figura 38 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,75 e 0,58 para o caso de 50 $\mu$ m

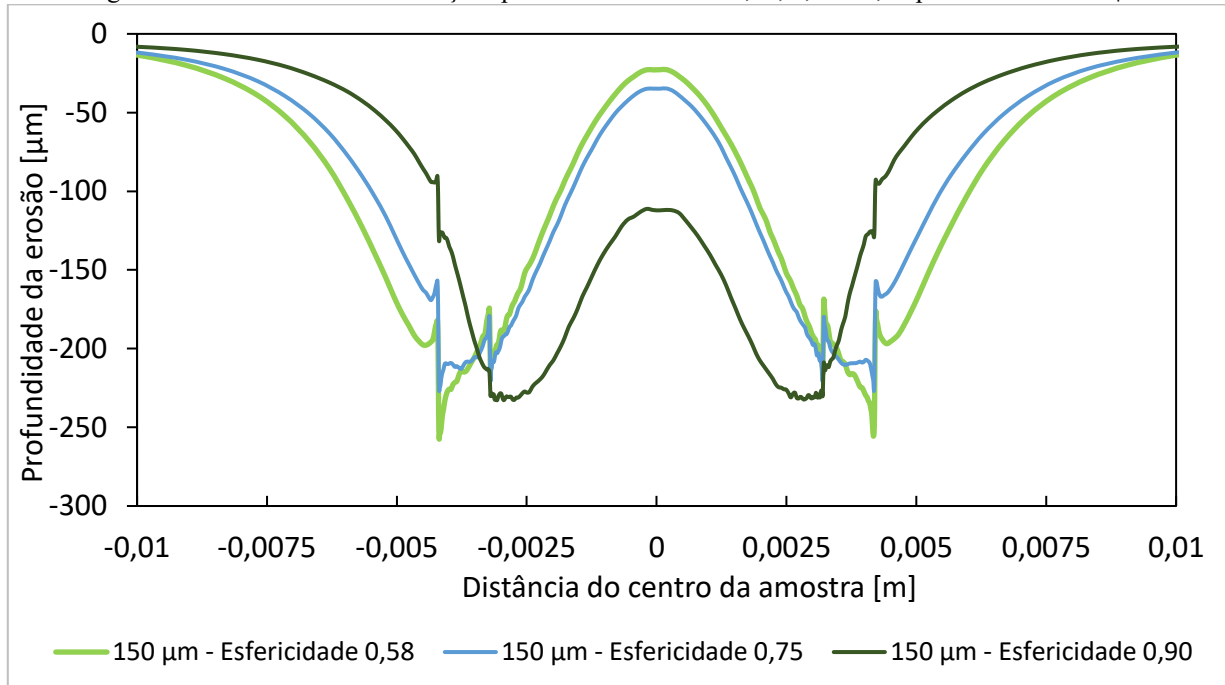


Já para o diâmetro igual a 150 $\mu$ m, por ser um valor médio entre os tamanhos estudados e que é amplamente utilizado em diversos estudos experimentais, aumentou-se a esfericidade para 0,75 e 0,90 a fim de se estudar o efeito dessa modificação nos resultados de erosão. A Figura 39 ilustra os resultados obtidos na simulação e os compara com a simulação inicial, na qual a esfericidade, conforme os experimentos, é igual a 0,58.

Nesse caso, para 150 $\mu$ m, o aumento da esfericidade de 0,58 para 0,75 diminuiu a magnitude máxima da profundidade de erosão em cerca de 10% e aumentou a profundidade na região central, enquanto o aumento para 0,90 diminuiu a magnitude máxima e modificou de maneira mais significativa o perfil de erosão.

Provavelmente, para o caso de esfericidade igual a 0,90 a correlação de arrasto diminuiu mais consideravelmente e esse foi o fator principal para essa modificação observada no perfil de erosão. Com a diminuição do arrasto, a velocidade de impacto das partículas aumentou, o que fez com que elas colidissem mais vezes e com maior energia na região central, resultando no aumento da profundidade erodida nessa região e modificação do perfil de erosão como um todo.

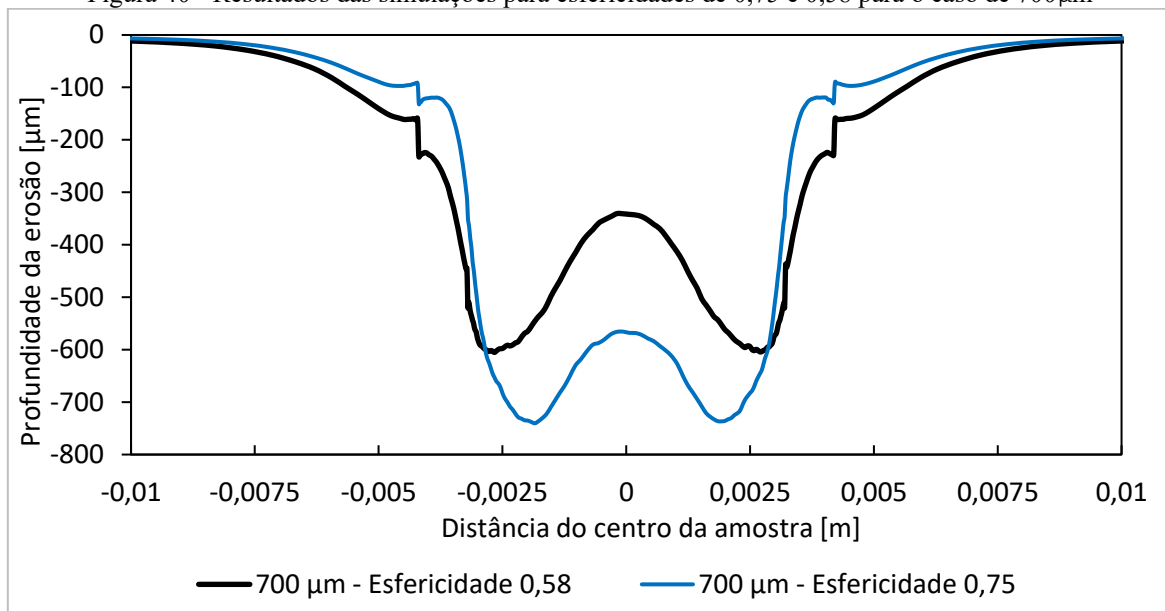
Figura 39 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,90, 0,75 e 0,58 para o caso de 150 $\mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

No caso das partículas com tamanho médio igual a 700 $\mu\text{m}$ , a esfericidade foi aumentada de 0,58 para 0,75 e os resultados são exibidos na Figura 40.

Figura 40 - Resultados das simulações para esfericidades de 0,75 e 0,58 para o caso de 700 $\mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

Conforme ilustra a Figura 40, como as partículas são maiores e apresentam maior inércia devido ao alto número de Stokes, o aumento da esfericidade de 0,58 para 0,75 já apresentou maior efeito que a mesma mudança de esfericidade para diâmetros menores, apresentada na Figura 38. Como as partículas de 700 $\mu\text{m}$  já possuem alta velocidade e energia de impacto, a diminuição da correlação de arrasto contribuiu para que a velocidade aumentasse ainda mais, o que fez com que a profundidade máxima de erosão aumentasse, assim como a profundidade erodida na região central da amostra.

Assim, conclui-se que quanto maior a esfericidade de maiores diâmetros, mais o perfil de erosão se aproxima do perfil “em U” e que o efeito da alteração da esfericidade é mais relevante à medida que se aumenta o diâmetro das partículas devido ao efeito mais significativo da correlação de arrasto. Vale ressaltar que a correlação de erosão foi utilizada com base no estudo de Oka, Okamura e Yoshida (2005) para partículas angulares, mas não há um valor médio exato da esfericidade das partículas desse trabalho.

Portanto, o efeito do aumento da esfericidade também pode alterar as constantes das equações utilizadas nas correlações de forma que a erosão diminua ou aumente menos que o previsto nas simulações, então é importante que sejam feitos experimentos que analisem o efeito da esfericidade, por exemplo, para melhores ajustes das constantes do modelo de acordo com as condições de teste analisadas. Além disso, é importante que condições como essa sejam mantidas em testes experimentais para que mudanças na forma das partículas não alterem os resultados, como no caso analisado em que houve 300% de variação na taxa de erosão entre os ciclos de testes, visto que essas características das partículas, como mostrado, modificam tanto a magnitude da erosão quanto o perfil de erosão na amostra.

## 4.2 CURVAS EM SÉRIE

### 4.2.1 Descrição da geometria e condições do caso experimental utilizado

Em um trabalho cujo objetivo era estudar o efeito da alteração da distância entre duas curvas em série na erosão que ocorre na segunda curva, Othayq *et al.* (2021) utilizaram um escoamento bifásico de ar-sílica com partículas de diâmetros iguais a 75 e 300 $\mu\text{m}$ . Uma tubulação de aço

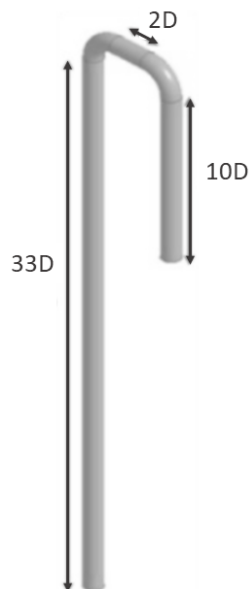


inoxidável de 76,2 mm com uma relação  $r/D$  igual a 1,5 foi utilizada com duas curvas de  $90^\circ$  em série, sendo que a distância entre essas curvas foi de  $2D$  ou  $12D$  e a velocidade do gás variou de 15 a 31m/s.

Os autores mediram a perda de massa nas paredes da tubulação por meio de uma técnica ultrassônica e realizaram um teste de remoção de tinta nas curvas usando acrílico transparente para investigar a localização de erosão máxima, sendo esse estudo considerado qualitativo visto que o material acrílico pode não representar o processo da erosão no aço.

Além dos experimentos, os autores fizeram simulações numéricas utilizando o Ansys Fluent 18.2 com malha estática, sendo que foi realizada uma simulação permanente do escoamento do ar para em um processo posterior injetar as partículas no domínio sem que o escoamento fosse recalculado, o que faz com que a velocidade das partículas seja igual à velocidade do fluido. O comprimento da tubulação de entrada foi definido como  $33D$  para que fosse suficiente para o desenvolvimento do escoamento, a malha adotada continha 989352 elementos, utilizou-se o modelo RSM para fechamento da turbulência e foram injetadas 100mil partículas no domínio (OTHAYQ *et al.*, 2021). Essa mesma geometria para a distância entre as curvas igual a  $2D$ , conforme ilustrado na Figura 47, foi reproduzida para as simulações realizadas no UNSCYFL3D.

Figura 41 – Geometria das simulações com curvas de  $90^\circ$  em série



Fonte: adaptado de Othayq, Haider, *et al.* (2021)

A geometria com a distância entre as curvas igual a 12D não foi estudada neste trabalho, pois o estudo experimental utilizado como base para as simulações concluiu que a distância entre curvas igual a 2D é mais vantajosa que a de 12D visto que ela diminuiu a erosão máxima na segunda curva, pois as partículas tiveram menos tempo para recuperação e aumento da sua energia cinética após os impactos na primeira curva (OTHAYQ *et al.*, 2021).

A malha computacional utilizada para as simulações no UNSCYFL3D foi hexaédrica, aliando uma boa precisão a um baixo custo computacional, e o número total de elementos da malha final após o teste de independência de malha foi de aproximadamente 800 mil elementos. As simulações foram realizadas com a malha estática para a velocidade do ar na entrada da tubulação igual a 31m/s tanto para o diâmetro das partículas igual a 300 $\mu$ m quanto para partículas com diâmetro igual a 75 $\mu$ m. O fluido foi então injetado na entrada a 31m/s com uma intensidade turbulenta igual a 5%, assumindo a condição de não deslizamento nas paredes e injetando 450 parcelas a cada passo de tempo. As demais condições das simulações são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições das simulações para o estudo da erosão nas curvas em série

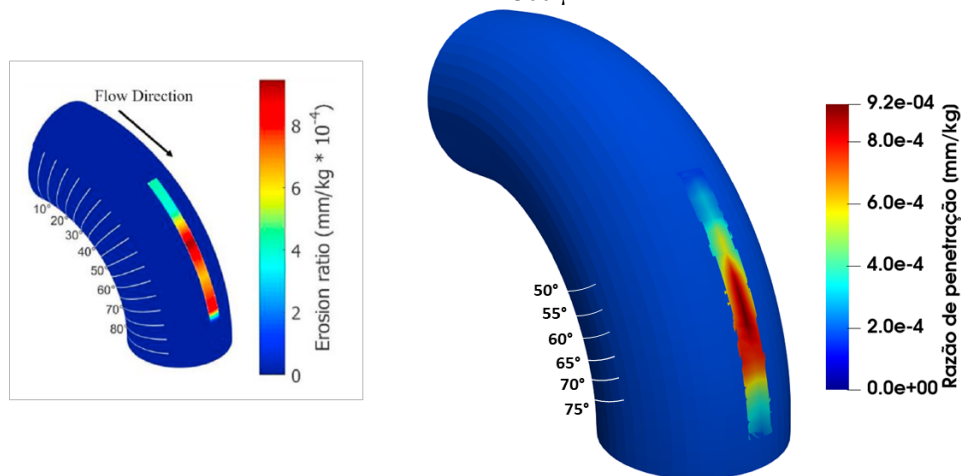
<b>Fluido</b>	Ar
<b>Densidade do fluido</b>	1,225 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade do fluido</b>	1,789 $\times 10^{-5}$ Pa.s
<b>Velocidade do fluido</b>	31 m/s
<b>Material das curvas</b>	Aço inox AISI 316
<b>Dureza do material (HV)</b>	1,83
<b>Densidade das partículas</b>	2650 kg/m <sup>3</sup>
<b>Diâmetro médio das partículas</b>	300 $\mu$ m e 75 $\mu$ m
<b>Vazão mássica de sólido</b>	1,60 $\times 10^{-2}$ kg/s

#### 4.2.2 Validação das simulações

No teste experimental de remoção de tinta devido à erosão na segunda curva de 90° da tubulação realizado por Othayq *et al.* (2021), foi verificado que para uma velocidade do ar igual a 31m/s e diâmetro de partículas igual a 300µm, a tinta começa a ser removida a 55° do início da curva. Já para 75µm, a remoção de tinta começa em uma região entre 50 e 65°.

Nas simulações, como ilustra a Figura 42, percebe-se que para partículas erodentes de 300µm, realmente a erosão começa a aumentar de forma significativa na região da curva entre 50 e 55°, o que está de acordo com a observação experimental. Além disso, nos experimentos de Othayq *et al.* (2021), o local de erosão máxima na segunda curva para partículas de diâmetro igual a 300µm foi a 55° do início da curva, onde a razão de penetração máxima foi igual a  $9,86 \cdot 10^{-4}$  mm/kg. Já na simulação numérica, esse valor máximo foi igual a  $9,2 \cdot 10^{-4}$  mm/kg, indicando uma diferença em relação ao experimento inferior a 6,7%, o que é um ótimo resultado, visto que a porcentagem mínima de erro na medição experimental dessa razão foi de 34% e a máxima 88% (OTHAYQ *et al.*, 2021).

Figura 42 - Razão de penetração experimental de Othayq et al. (2021) e numérica na segunda curva de 90° para diâmetros de 300 µm



Fonte: elaborado pela autora

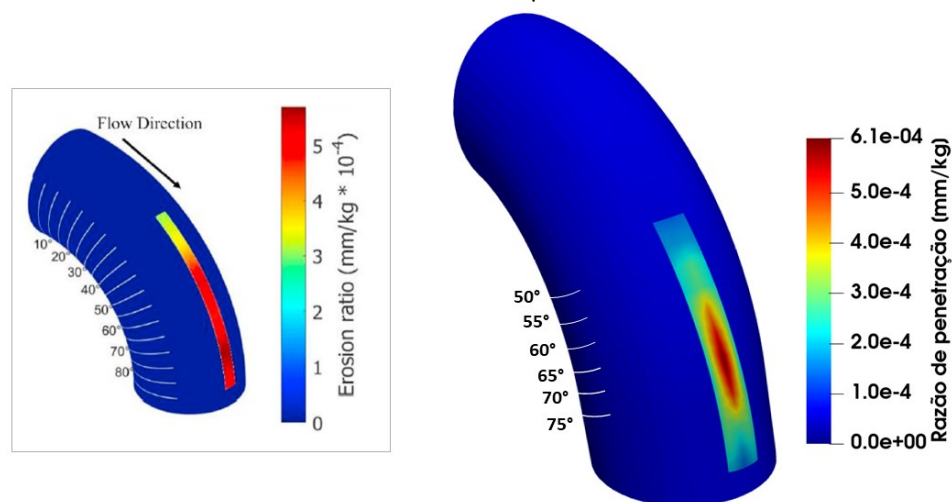
Para partículas de 75µm, nos experimentos a razão de penetração máxima foi igual a  $5,69 \cdot 10^{-4}$  mm/kg e essa medição foi verificada a 75°, enquanto a remoção de tinta começou em uma região entre 50 e 65° (OTHAYQ *et al.*, 2021). Nas simulações, conforme Figura 43, a erosão

começa a ser mais significativa entre 55 e 65°, o que está de acordo com as observações do experimento de tinta, mas a região de penetração máxima se encontra a cerca de 67° do início da curva, ou seja, um pouco acima do experimento, e esse valor foi igual a  $6,1 \cdot 10^{-4}$  mm/kg, o que representa uma diferença de cerca de 7,2%.

Ao contrário das simulações para diâmetros de 300 $\mu$ m, em relação às simulações para 75 $\mu$ m, nota-se uma sobrepredição dos resultados de erosão. Provavelmente isso ocorreu devido ao valor adotado para esfericidade, já que no trabalho experimental foi relatado que as partículas maiores eram angulares e as menores eram muito angulares, porém nos experimentos não foi realizada uma medição da esfericidade dessas partículas.

Conforme mencionado anteriormente nas seções 2.3.3 e 4.1.6.3 e ilustrado na Figura 6, a esfericidade influencia significativamente o processo erosivo, sendo que partículas angulares podem apresentar taxas de erosão cerca de 10 vezes maiores que uma partícula redonda (HUTCHINGS, 2017). Além disso, Karimi, Shirazi e Mclaury (2016) também observaram essa tendência de sobrepredição da erosão para partículas menores em curvas de 90° de forma ainda mais significativa e concluíram que elas são mais sensíveis à turbulência e que os modelos que eles utilizaram para colisão entre partículas e parede estavam inadequados para esse tipo de partícula, pois observavam inclusive um aumento da erosão quando experimentos indicavam o contrário.

Figura 43 - Razão de penetração experimental de Othayq et al. (2021) e numérica na segunda curva de 90° para diâmetros de 75  $\mu$ m

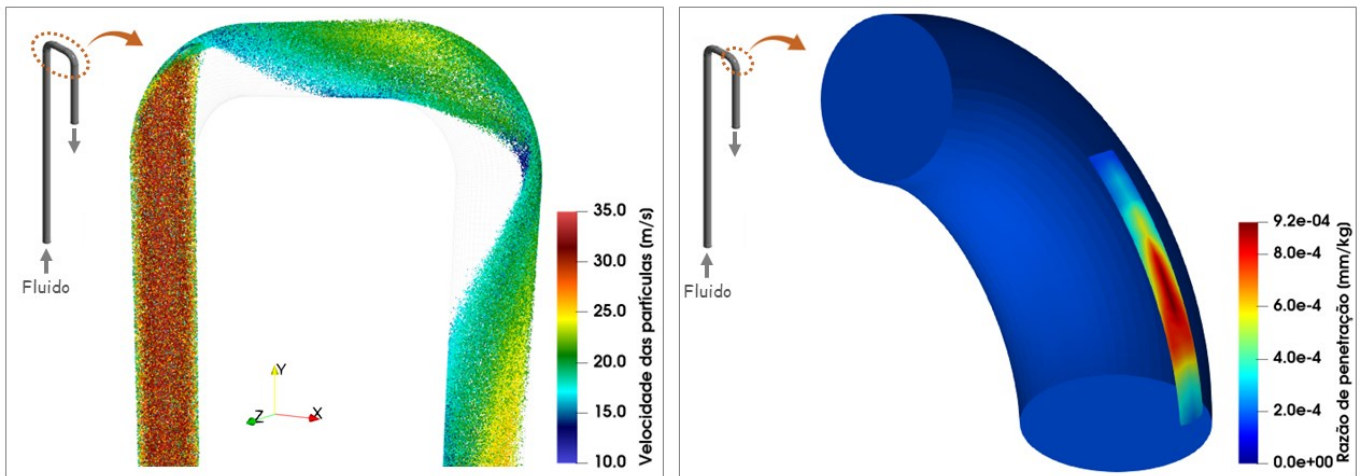


Fonte: elaborado pela autora

Como não havia uma medição experimental da esfericidade de acordo com o formato das partículas, utilizou-se 0,58 para as partículas menores (mais angulares) e 0,75 para as partículas maiores. Sendo assim, essa é uma fonte de incertezas nos resultados, visto que na seção 4.1.6.3 foi mostrado que quanto maior é o diâmetro da partícula, mais a variação da esfericidade afeta os resultados numéricos, especialmente o perfil de erosão. De acordo com a comparação apresentada na Figura 43, a erosão na simulação está mais concentrada em uma região do que o perfil experimental, que apresenta valores mais uniformes de razão de penetração a partir de  $45^\circ$  do início da segunda curva. Porém, o trabalho experimental indica uma porcentagem de erro na medição dessa razão maior que 50% para o caso em questão, então os resultados foram satisfatórios.

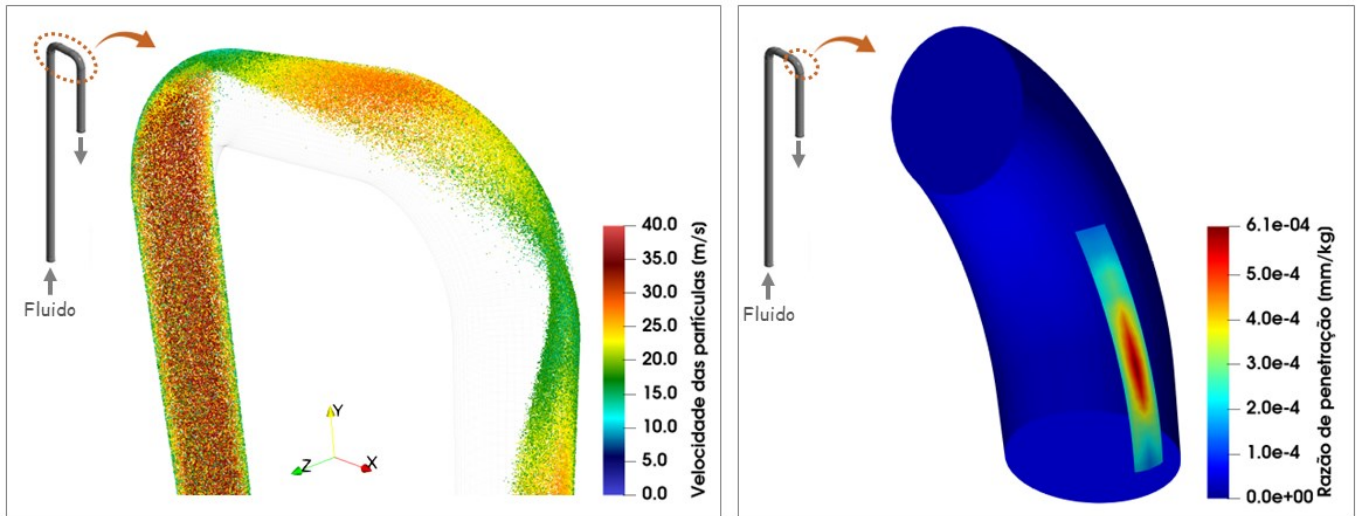
Na Figura 44 e na Figura 45, pode-se visualizar a relação entre os pontos de maior erosão e os pontos de concentração de partículas com velocidade mais baixa devido ao impacto com a parede para os dois casos analisados. O mesmo comportamento foi relatado por Othayq *et al.* (2021), que também observaram maiores velocidades de entrada na segunda curva para as partículas com diâmetros menores devido ao menor número de Stokes, o que é ilustrado na Figura 45.

Figura 44 - Velocidade das partículas nas curvas em série e razão de penetração na segunda curva de  $90^\circ$  para diâmetros de  $300\ \mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

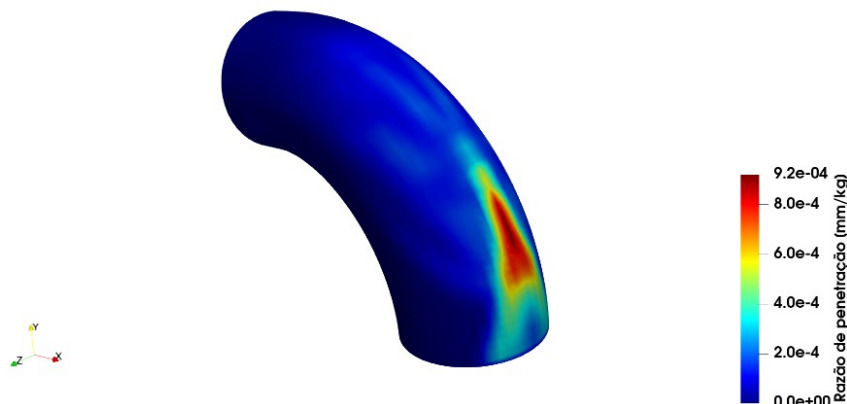
Figura 45 - Velocidade das partículas nas curvas em série e razão de penetração na segunda curva de 90° para diâmetros de 75  $\mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

Assim como nas simulações de Othayq *et al.* (2021), que estudaram o efeito da utilização de diferentes modelos de fechamento para a turbulência ( $k-\epsilon$ , RSM e  $k-\epsilon$  realizável) para esse mesmo estudo experimental, foi observado o formato característico da erosão “em V” na segunda curva, assim como em outros estudos numéricos da erosão em curvas de 90° (PEREIRA, SOUZA e MARTINS, 2014; KARIMI, SHIRAZI e MCLAURY, 2016; e UZI, BEN AMI e LEVY, 2017). A Figura 46 ilustra esse formato para a simulação de erosão na segunda curva com partículas de diâmetro médio igual a 300 $\mu\text{m}$ .

Figura 46 - Resultado do formato da erosão na segunda curva de 90° para diâmetros de 300  $\mu\text{m}$



Fonte: elaborado pela autora

Já no caso de partículas de  $75\mu\text{m}$ , conforme se observa na Figura 43, o formato da erosão na segunda curva observado nas simulações difere um pouco dos experimentos, onde a razão de erosão é alta para toda a faixa da curva entre  $50^\circ$  e  $90^\circ$ . No trabalho de Othayq *et al.* (2021) não se menciona sobre a rugosidade da parede, porém esse é um parâmetro que pode ser variado no código do UNSCYFL3D e sabe-se que ele pode ser importante no estudo de erosão, especialmente para partículas menores. O estudo de Adedeji e Duarte (2020) mostra uma tendência de maior aproximação para o formato da erosão observado experimentalmente por Othayq *et al.* (2021) à medida que se aumenta a rugosidade da parede, além da diminuição da erosão máxima, então essa pode ser a origem das diferenças observadas entre simulação e experimento nesse caso.

#### 4.3 MÉTODO DE *SMOOTHING* NA SUPERFÍCIE

Conforme apresentado em resultados anteriores, muitas simulações de erosão apresentaram resultados ruidosos e foi necessário utilizar um alto número de partículas injetadas no domínio computacional para reduzir esse ruído não físico.

A fim de reduzir esse problema e tornar a metodologia numérica de simulação de erosão mais robusta, buscou-se um método a fim de suavizar o gradiente na superfície erodida do domínio computacional, a qual se movimenta com a utilização da malha dinâmica. O método implementado foi descrito na seção 3.4.1 e para verificar sua eficiência, primeiro utilizou-se uma geometria mais simples para posteriores análises em casos mais clássicos apresentados anteriormente.

##### 4.3.1 Comparação de uma simulação simples de erosão com e sem o *smoothing*

Para um estudo inicial dos efeitos do novo método de *smoothing* na malha computacional e sua movimentação devido à erosão, optou-se por criar um caso cuja geometria fosse simples e houvesse erosão significativa, focando na análise da movimentação da malha e a qualidade de seus elementos. Após esse estudo inicial, é possível fazer novas análises utilizando casos experimentais mais clássicos e já estudados, como o jato erosivo em placa plana.

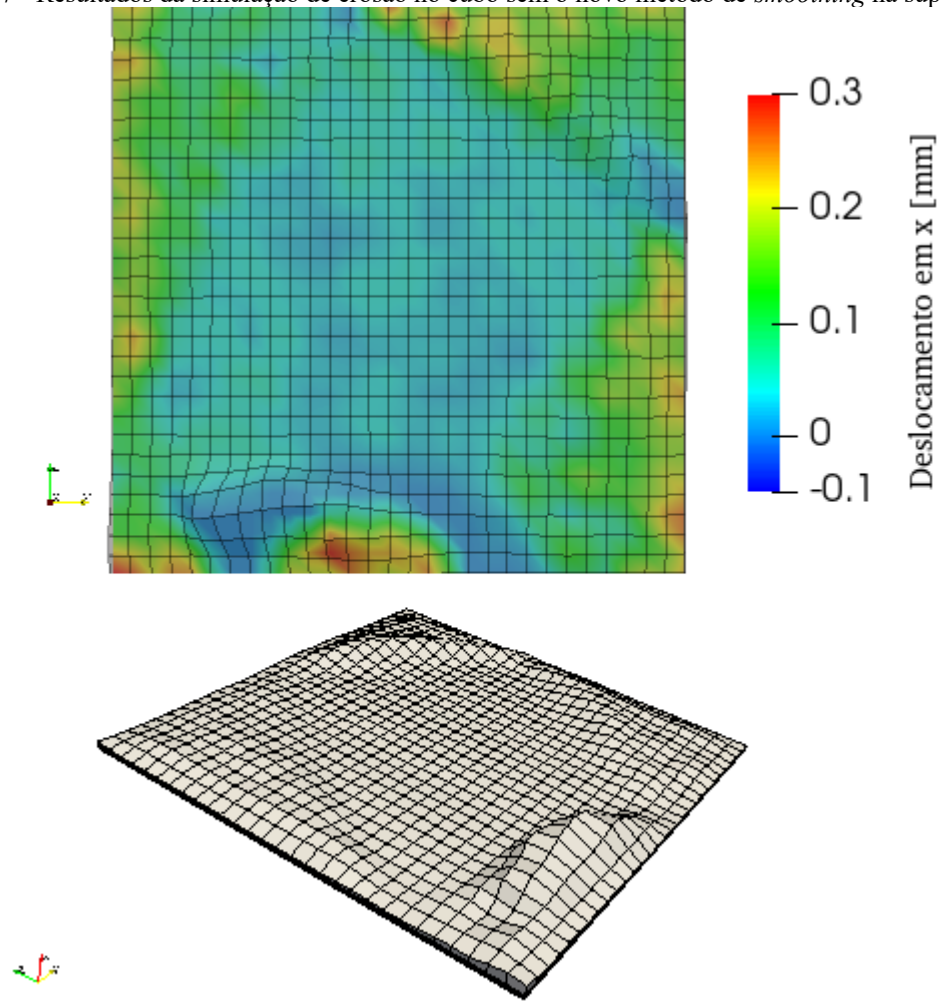
Dessa maneira, pode-se estudar os efeitos do método de *smoothing* não apenas na qualidade da malha, mas também nos resultados de erosão, para os quais verificava-se alguns efeitos não físicos e decorrentes da movimentação não uniforme da malha ou até mesmo dificuldade de convergência para alguns casos devido ao surgimento de volumes negativos em regiões nas quais ocorre uma movimentação mais significativa da malha.

Sendo assim, para iniciar essa análise com um caso simples, elaborou-se uma geometria cúbica de dimensões iguais a 1cm. Foi feita uma malha computacional e considerou-se a vazão mássica igual a 0,1kg/s, com velocidade de entrada igual a 20m/s, considerando como fluido a água e as partículas de sílica com diâmetro médio igual a 200 $\mu$ m. Essas variáveis foram variadas e testadas e esses foram os valores finais escolhidos por terem fornecido uma erosão significativa o suficiente para análise da modificação da malha após a implementação do método de suavização.

Inicialmente obteve-se a solução do escoamento em regime permanente para em seguida simular a injeção das partículas com a malha dinâmica associada ao método de *smoothing*. Optou-se por não contabilizar os efeitos da mudança do escoamento nessa simulação por não ser o foco dessa análise.

Como em algumas regiões da superfície erodida a profundidade de erosão era mais considerável, houve um deslocamento da malha mais relevante e a simulação sem a implementação do novo método de *smoothing* apresentou o resultado mostrado na Figura 47. É mostrada a superfície 3D da geometria após a movimentação da malha, assim como o perfil de deslocamento na mesma. Na sequência, começaram a surgir volumes negativos na simulação devido à qualidade da malha decair e algumas células apresentarem bem mais distorções que outras. Isso evidencia a dificuldade de convergência em casos com erosão intensa devido à alta movimentação da malha computacional.

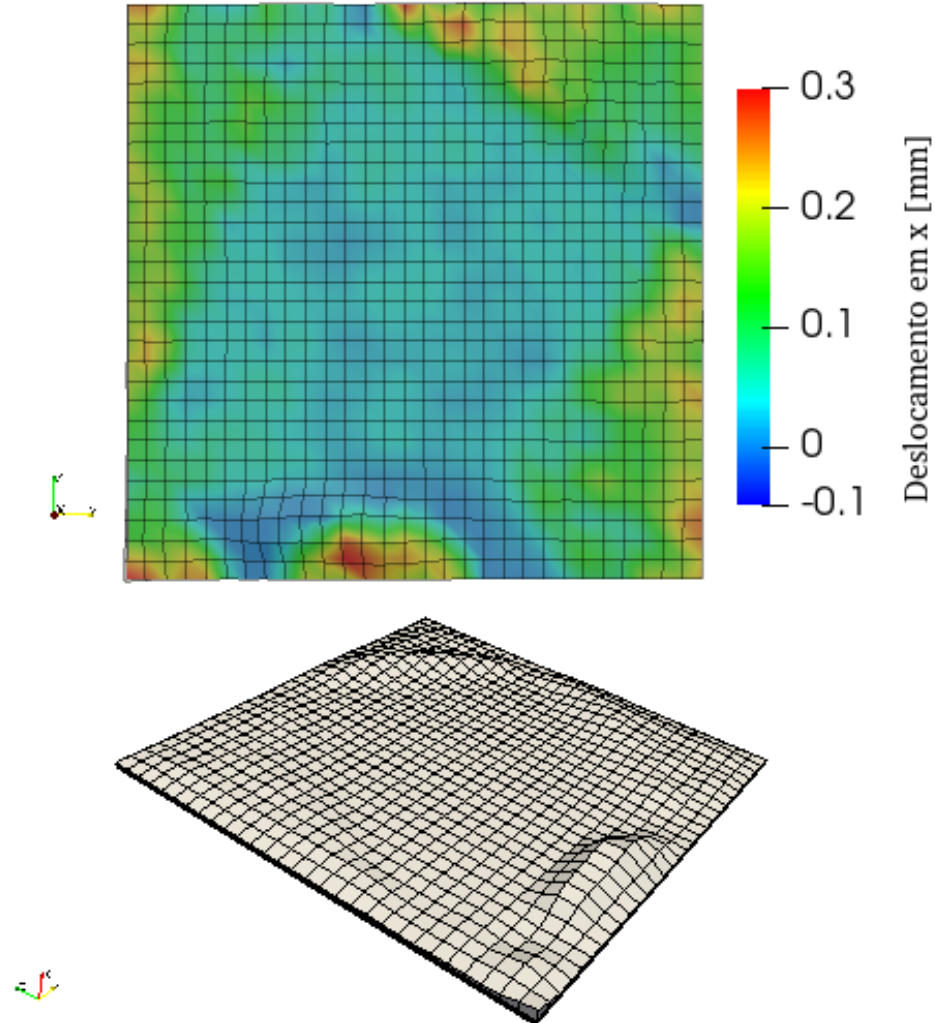


Figura 47 - Resultados da simulação de erosão no cubo sem o novo método de *smoothing* na superfície

Fonte: elaborado pela autora

Ao implementar o novo método de *smoothing*, o perfil de erosão se manteve, como pode-se visualizar na Figura 48, visto que as regiões mais erodidas (que apresentam maior deslocamento da malha) são as mesmas. Porém, a qualidade da malha melhorou mesmo com uma movimentação significativa, obtendo um gradiente suave conforme esperado, o que também proporcionou que a simulação rodasse por mais tempo que a anterior sem que houvesse o surgimento de células com volumes negativos.

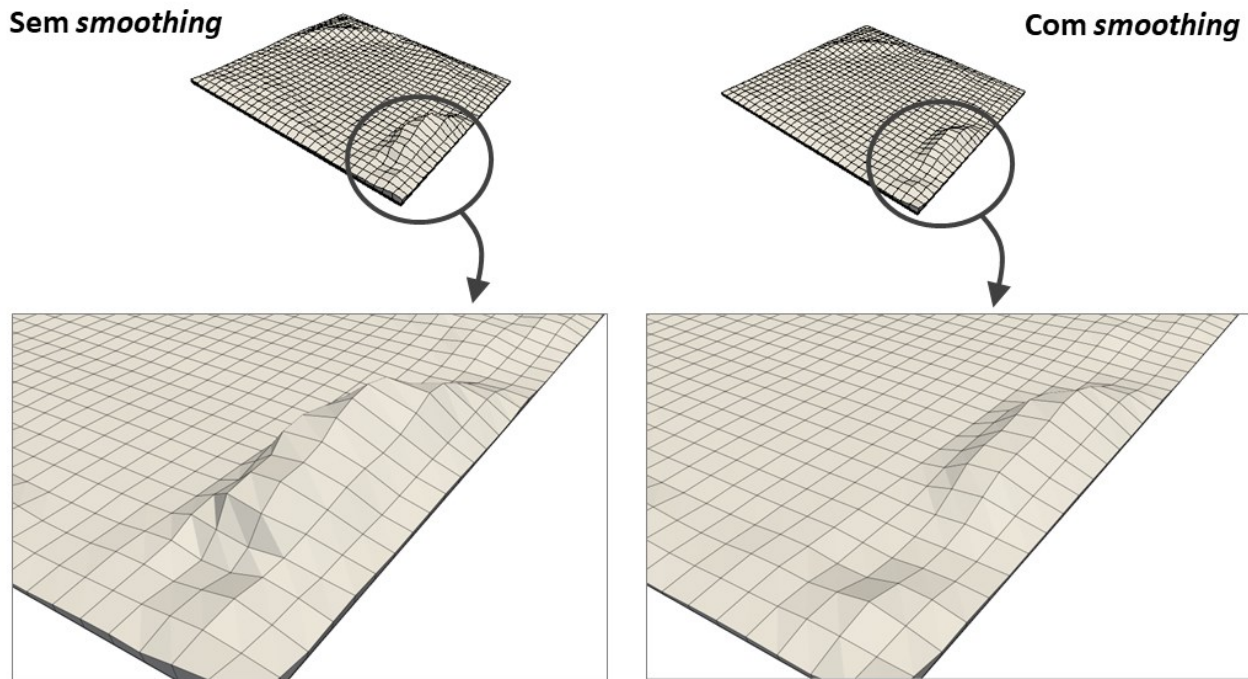
Figura 48 - Resultados da simulação de erosão no cubo com o novo método de *smoothing* na superfície



Fonte: elaborado pela autora

Para uma visualização melhor do efeito positivo da implementação do método que resulta em um gradiente suave na superfície, a Figura 49 realça a região da superfície onde a profundidade de erosão foi maior tanto para a simulação sem *smoothing* quanto para a simulação com a implementação do método, evidenciando a melhoria da qualidade da malha com a utilização do mesmo.

Figura 49 – Comparação da simulação de erosão no cubo sem e com o novo método de *smoothing* na superfície em regiões de erosão mais significativa



Fonte: elaborado pela autora

Sendo assim, como foi verificada a eficácia do método para suavização do gradiente na superfície da malha que se movimenta devido à erosão para a geometria cúbica, a metodologia foi expandida para outras geometrias, sendo a primeira delas a tubulação com duas curvas de 90° em série. Esse caso das curvas foi escolhido por não apresentar uma taxa de erosão tão significativa quanto a do jato erosivo, o que o torna mais adequado para um estudo intermediário.

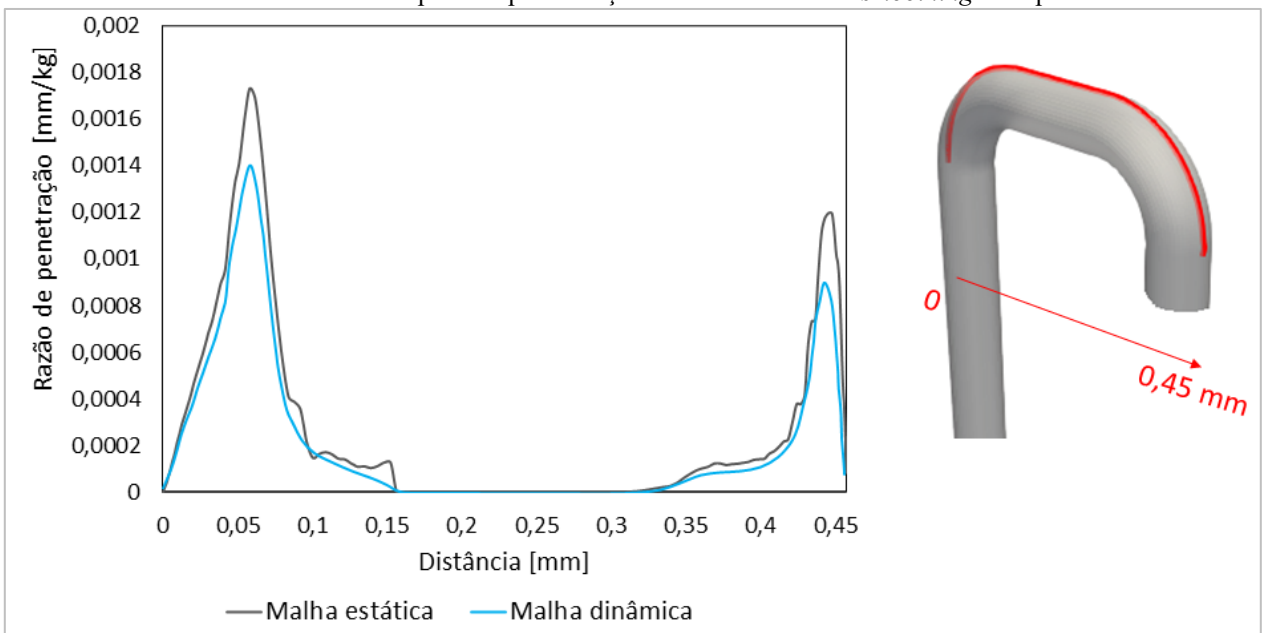
#### 4.3.2 Caso das curvas em série com e sem *smoothing*

Como o caso das curvas em série apresentado na seção 4.2 foi validado e verificou-se que a taxa da erosão não era tão alta quanto no caso do jato impingente em placa plana apresentado na seção 4.1.4, fez-se o estudo da influência da implementação do novo método de *smoothing* para essa geometria, que já é bem mais complexa que a geometria cúbica simples estudada inicialmente.

De acordo com a Figura 50, que compara a razão de penetração ao longo da tubulação com as duas curvas de 90° em série utilizando-se a malha estática e a malha dinâmica com o método de

*smoothing*, observa-se que com a nova metodologia houve uma diminuição do ruído dos resultados. Além disso, houve uma diminuição de aproximadamente 15% no valor máximo dessa razão de erosão ao se utilizar a malha dinâmica, mas essa redução também ocorre para outros casos, como do jato impingente (conforme mostrado na seção 4.1.5), e também é relatada na literatura (ADEDEJI e DUARTE, 2020).

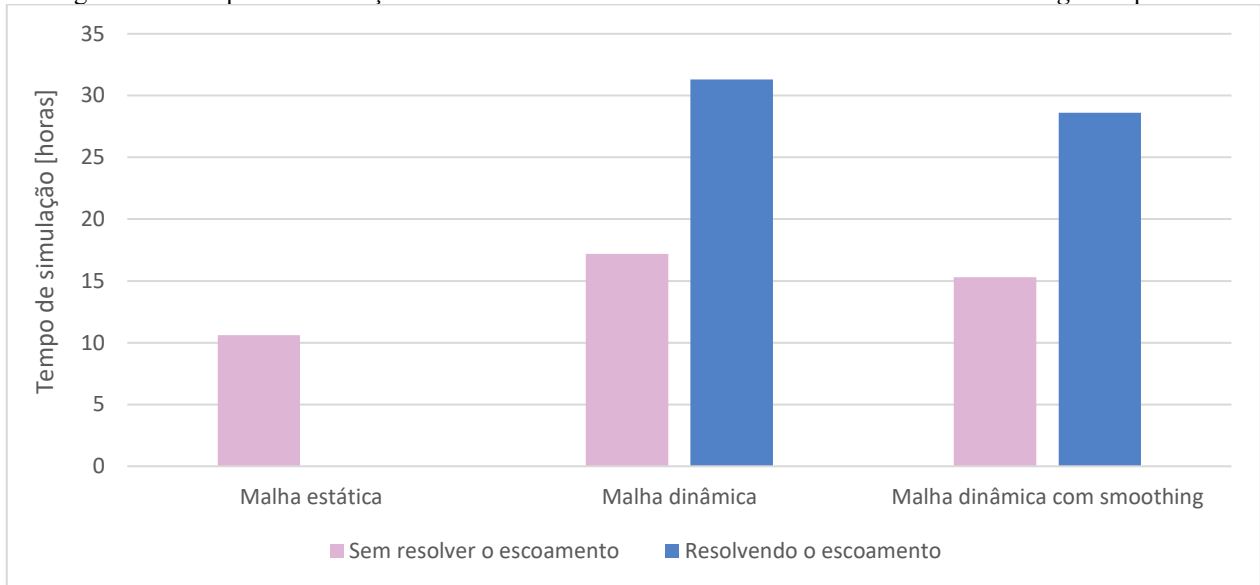
Figura 50 – Comparação da razão de penetração ao longo da tubulação para as curvas em série com a malha estática e com a malha dinâmica após a implementação do novo método de *smoothing* na superfície



Fonte: elaborado pela autora

Como a erosão nesse caso não é tão alta, não foi possível verificar visualmente as vantagens do método de *smoothing* assim como para o caso da geometria cúbica devido à pequena movimentação da malha. Porém, para esse caso a simulação com malha dinâmica antes da implementação do método de *smoothing* representava um aumento de 62% no tempo de simulação em relação à malha estática, o que, após a implementação do método, diminuiu para 44%, pois foi possível reduzir o número de parcelas injetadas, o que é ilustrado na Figura 51 e será mais detalhado na seção 4.3.3.

Figura 51 - Tempo das simulações das curvas em série com e sem o novo método de *smoothing* na superfície



Fonte: elaborado pela autora

### 4.3.3 Caso do jato erosivo em placa plana com e sem *smoothing*

Após a implementação do novo método de *smoothing* na geometria cúbica e das curvas em série, sendo esses, respectivamente, casos com alta erosão e geometria mais complexa, optou-se por analisar a eficácia do método para o caso clássico do jato erosivo em placa plana, para o qual foram realizados diversos estudos neste trabalho e na literatura.

Antes da implementação do novo método de *smoothing* para suavização do gradiente na superfície erodida da amostra, era necessário injetar um número alto de parcelas nas simulações para que o resultado fosse menos ruidoso, visto que nem todas as células da malha eram colididas por partículas de forma homogênea. Assim, ao injetar mais partículas, a estatística melhorava e isso suavizava resultados e evitava que surgissem volumes negativos com a movimentação da malha. Porém, injetar muitas parcelas aumenta o custo computacional das simulações e nem sempre é uma solução viável para obter bons resultados, o que limita essa estratégia.

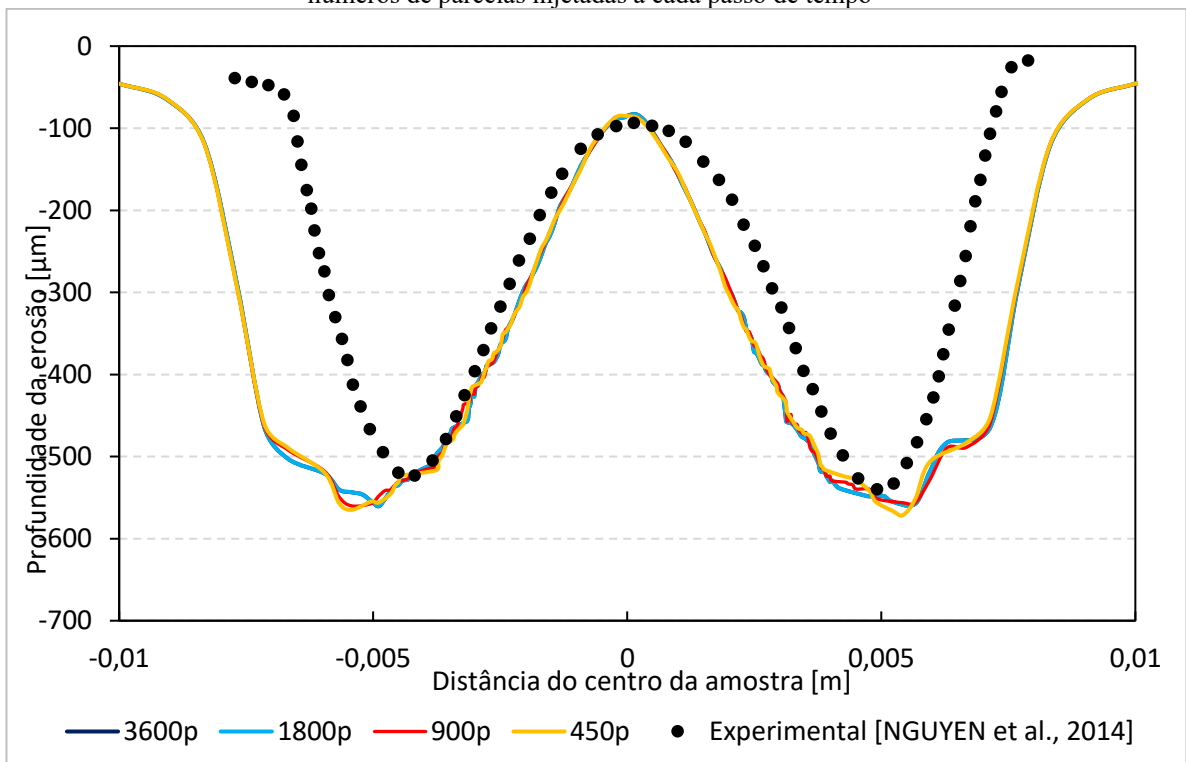
Para o caso do jato erosivo em placa plana, como mostrado, foram estudados casos com diferentes durações do teste de erosão, sendo elas de 5, 15 e 30 minutos. Como tempos mais longos produzem erosão mais significativa e, conseqüentemente, um maior deslocamento da malha, era necessário um número cada vez mais alto de parcelas injetadas. Para o caso de 30 minutos com a malha dinâmica foram necessárias 3600 parcelas injetadas a cada passo de tempo para a

convergência da simulação sem a implementação do novo método de *smoothing*. Além disso, tinha sido necessário o aumento da tolerância em relação à qualidade da malha devido à distorção dos seus elementos.

Porém, após a implementação do método de *smoothing* na superfície erodida, foi possível diminuir o número de parcelas injetadas a cada passo de tempo na simulação sem que houvesse prejuízos aos resultados de erosão.

A Figura 52 ilustra esses resultados com a implementação do método para o jato erosivo sem resolução do escoamento nas cavidades utilizando 3600, 1800, 900 e 450 parcelas. É possível visualizar que as curvas estão praticamente sobrepostas, sem diferenças significativas nos resultados e sem a presença de aumento de ruídos à medida que se diminui o número de parcelas, o que ocorria anteriormente sem a implementação do novo *smoothing*.

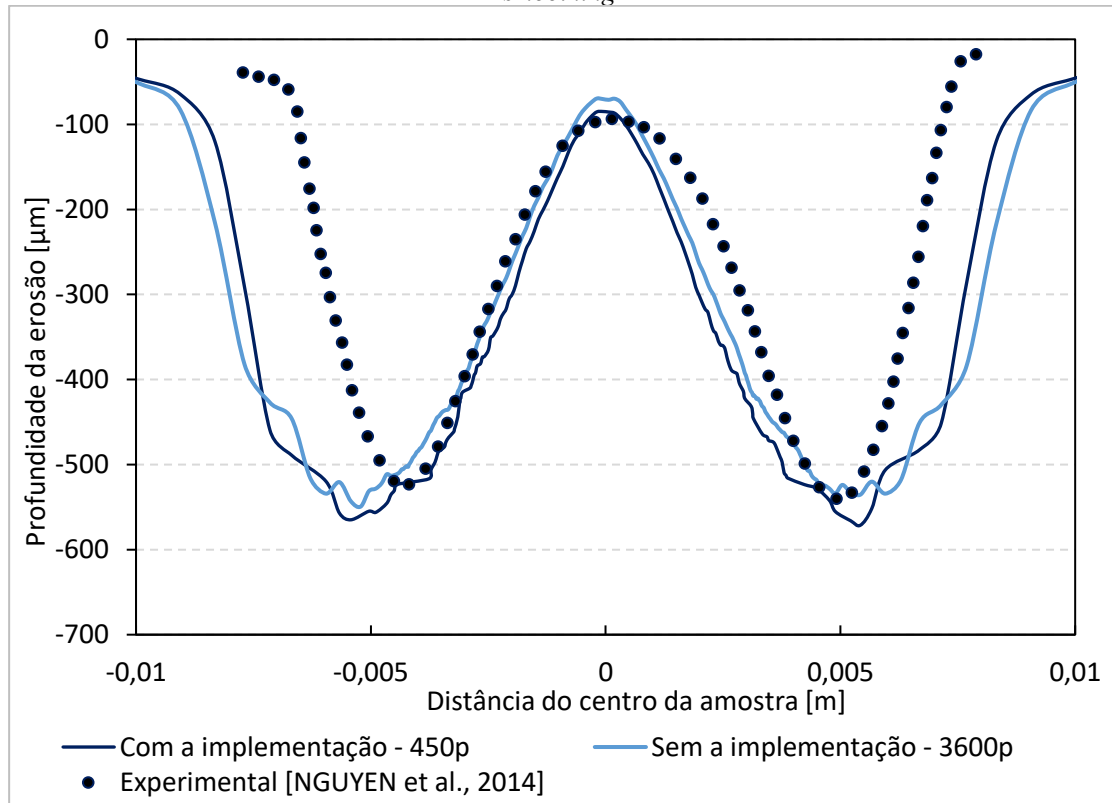
Figura 52 - Resultados das simulações do jato erosivo com o novo método de *smoothing* na superfície e diferentes números de parcelas injetadas a cada passo de tempo



Fonte: elaborado pela autora

Além disso, para garantir que o método não influencia o perfil de erosão de forma a prejudicar os resultados, comparou-se os resultados antes da implementação do método, quando se utilizava 3600 parcelas injetadas, e após a implementação do método utilizando-se 450 parcelas, como mostrado na Figura 53.

Figura 53 - Comparação do resultado para 30 minutos de erosão antes e depois da implementação do novo método de *smoothing*



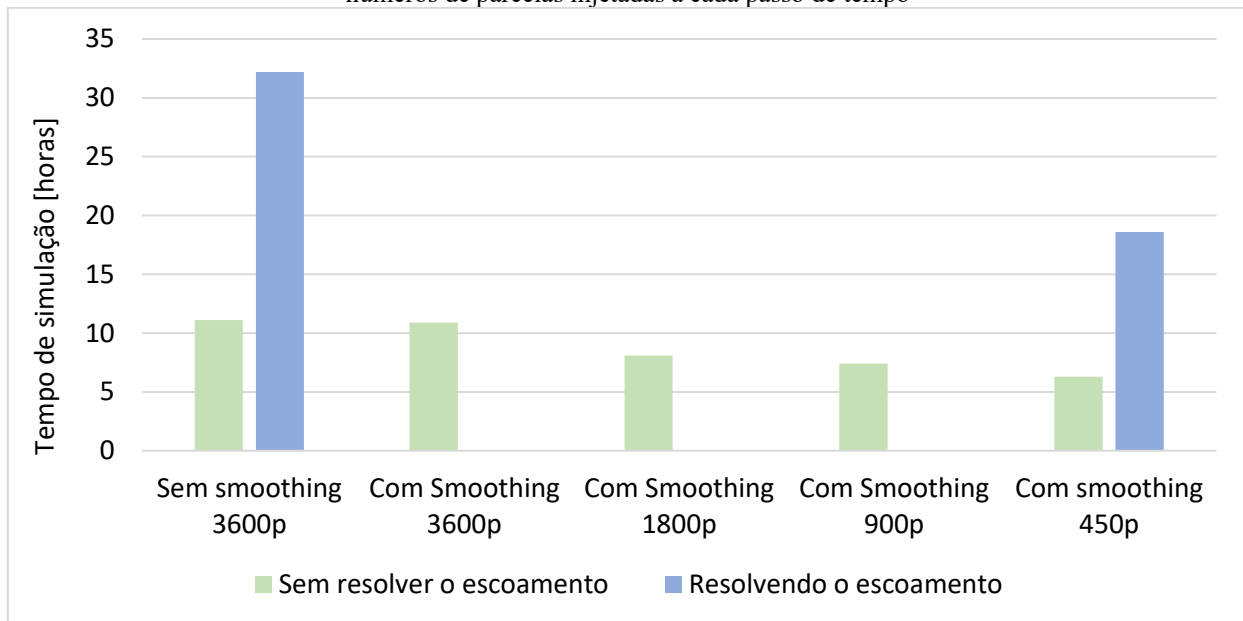
Fonte: elaborado pela autora

Portanto, a partir da Figura 52 conclui-se que a diminuição do número de parcelas não influenciou os resultados de erosão com o método de *smoothing*, além desse resultado ter sido satisfatório quando comparado aos dados experimentais de Nguyen et al. (2014) e ao resultado da simulação anterior à implementação do *smoothing* conforme mostrado na Figura 53.

Desse modo, foi possível manter a qualidade dos resultados e diminuir o número de parcelas injetadas, o que permite a obtenção de um ganho em relação ao tempo gasto para a simulação, o que é uma ótima vantagem, visto que quanto mais complexo é um problema, maior é o tempo

computacional necessário para solucioná-lo de modo adequado. Para fins comparativos, a Figura 54 apresenta os tempos de simulação para casos sem e com *smoothing*, sendo eles com ou sem a resolução do escoamento nas cavidades formadas pela erosão, assim como os casos com diferentes números de parcelas citados na Figura 52.

Figura 54 - Tempo das simulações do jato erosivo com e sem o novo método de *smoothing* na superfície e diferentes números de parcelas injetadas a cada passo de tempo



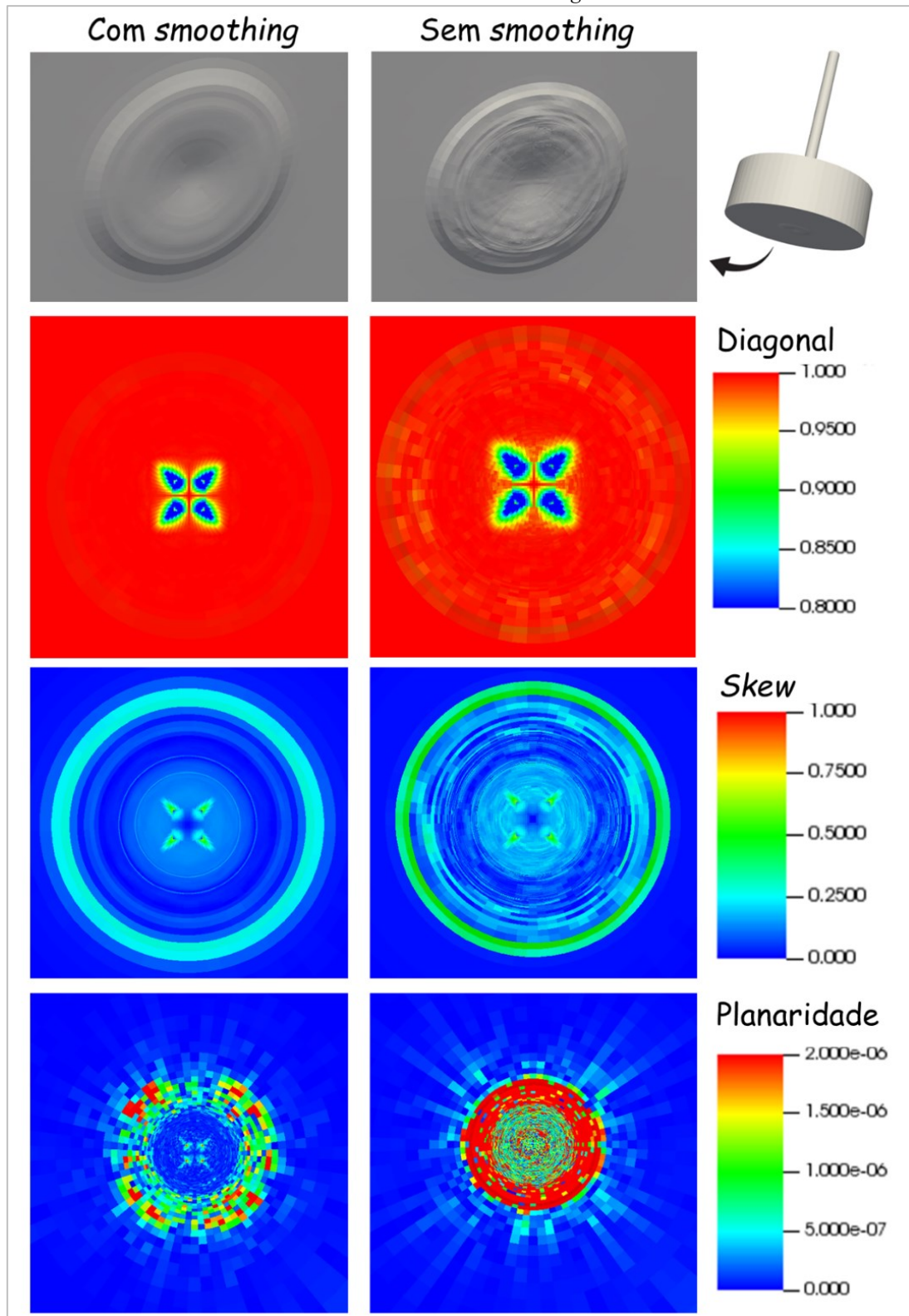
Fonte: elaborado pela autora

Pode-se perceber que ocorreram diferenças significativas entre os tempos de simulação devido à utilização do novo método de *smoothing* e, por consequência, a possibilidade de redução do número de parcelas, sendo que os tempos de simulação sem e com a resolução do escoamento nas cavidades, diminuíram 57% e 58%, respectivamente, visto que se utilizou 450 parcelas a cada passo de tempo ao invés de 3600. Em relação ao número de partículas representadas pelas parcelas, essa diminuição representa um aumento de aproximadamente 9 para 76 partículas por parcela.

As diferenças entre as simulações com e sem a implementação do método de *smoothing* podem ser evidenciadas também pela comparação visual das malhas dinâmicas ao longo do processo erosivo. Na Figura 55 são apresentadas lado a lado as superfícies finais das amostras sujeitas ao jato de partículas para ambas as simulações (com e sem *smoothing*), assim como uma comparação entre três parâmetros de malha distintos: diagonal, *skew* e planaridade.



Figura 55 - Comparação de parâmetros de malha para a simulação do jato erosivo com e sem a implementação do novo método de *smoothing*



Fonte: elaborado pela autora

Essas três grandezas analisadas estão entre alguns dos parâmetros de malha disponíveis nos programas de pós-processamento para avaliação da qualidade dos elementos da malha computacional. O parâmetro diagonal, por exemplo, representa uma razão entre o comprimento diagonal mínimo e o comprimento diagonal máximo das células hexaédricas avaliadas, de tal modo que valores mais próximos de 1 indicam melhores elementos (STIMPSON, ERNST, *et al.*, 2007). Pelas imagens da Figura 55 é possível notar células com melhor qualidade na simulação com *smoothing*, uma vez que a comparação dessa grandeza evidencia uma região central com regiões de valores menores que 0,95 mais expandida na simulação sem *smoothing*, além de elementos mais amarelados (parâmetro com valores entre 0,95 e 1) ao redor de toda a região erodida, indicando um maior distanciamento do valor unitário mesmo onde o deslocamento da malha é menos significativo.

De maneira semelhante, os parâmetros de *skewness* e planaridade também apontam para malhas dinâmicas melhores com a utilização do método de *smoothing*. A grandeza *skew* mede o grau de paralelismo entre os pares de vetores da célula hexaédrica por meio de seus produtos escalares, enquanto a planaridade representa uma medida do quão próximo de um plano estão os pontos que compõem as faces (CHILDS, BRUGGER, *et al.*, 2012; TAYLOR e FLANAGAN, 1989). Desse modo, valores menores de *skewness*, em especial abaixo de 0,5, e valores de planaridade mais próximos de zero indicam células com maior ortogonalidade e melhor formato. Para ambos os parâmetros, é possível visualizar nas imagens da Figura 55 valores menores na malha com aplicação de *smoothing*, sendo que nela a maior parte dos elementos apresentam *skewness* abaixo de 0,25 e valores de planaridade em geral 50% menores que sem a utilização do método de suavização de gradiente na superfície.

Portanto, os parâmetros que caracterizam o formato das células indicam que nas simulações sem *smoothing* a malha tende a apresentar mais distorções indesejáveis com o decorrer do processo erosivo e a consequente movimentação da superfície. As geometrias modificadas pela erosão na Figura 55 também reforçam essa análise quantitativa, uma vez que se pode observar superfícies com alterações de relevo mais suaves na simulação com *smoothing* e, conforme mostrado anteriormente, o método não prejudica os resultados de erosão.

Com isso, os riscos de dificuldade de convergência da simulação e comprometimento dos resultados diminuem com a aplicação do método, que minimiza o surgimento de volumes negativos

e melhora significativamente a qualidade da malha dinâmica, trazendo robustez para a metodologia de simulação de escoamentos bifásicos com erosão utilizando malhas dinâmicas e permitindo sua vasta aplicação a diferentes situações.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PERFIL DE EROÇÃO PARA O CASO DO JATO EROSIVO EM PLACA PLANA COM A METODOLOGIA ELABORADA NESTE TRABALHO E DE OUTROS AUTORES DA LITERATURA

Em relação à qualidade da malha computacional, outros autores não fizeram uma análise desses parâmetros, visto que a grande maioria dos trabalhos utilizam malhas estáticas para análise da erosão, então essa comparação não poderá ser mostrada.

Porém, serão apresentadas comparações entre os resultados obtidos para o perfil de erosão utilizando a metodologia deste trabalho e os resultados de outros autores que investigaram a erosão numericamente tanto com malhas estáticas quanto com malhas dinâmicas. Alguns autores utilizam o Ansys Fluent, que resolve o escoamento no regime permanente e depois injeta as partículas no domínio para movimentação da malha e outros utilizam códigos próprios desenvolvidos por eles para o cálculo da erosão.

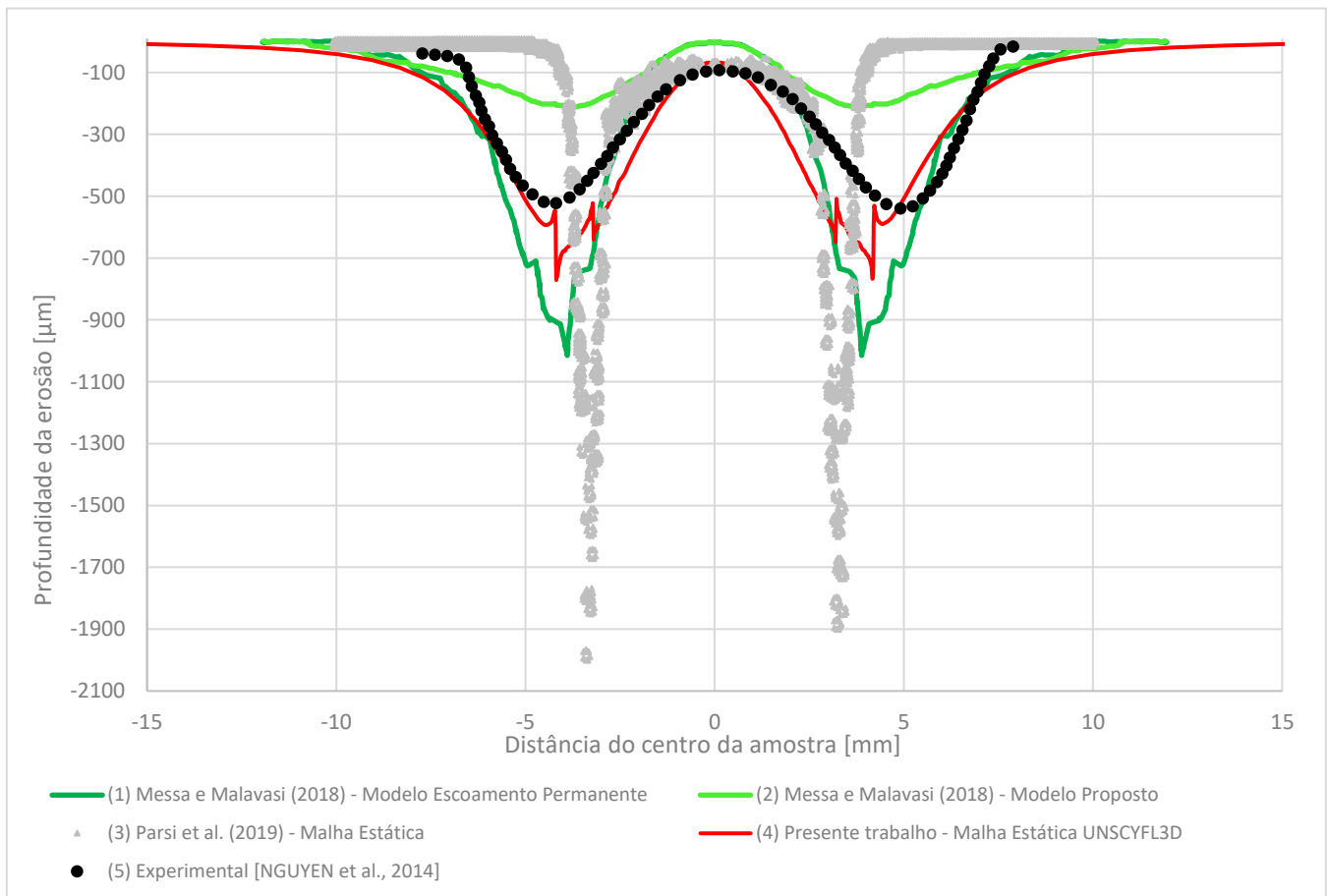
No trabalho de Nguyen et al. (2014), quando ganhou destaque a importância de se considerar os efeitos da modificação da geometria na erosão, perfis 3D experimentais foram obtidos e introduzidos nas simulações para representar os efeitos relativos à erosão que modificam a geometria, o que limita a reprodução dessa metodologia para diversas aplicações e implica em uma dependência entre simulação e experimentos.

Apesar de ter realizado as simulações utilizando essa metodologia de inserção dos perfis experimentais da amostra, o resultado numérico do perfil de erosão ao longo da amostra obtido por Nguyen et al. (2014) não foi apresentado e comparado àquele obtido experimentalmente. Apenas outros resultados numéricos foram apresentados, então por esse motivo apenas o perfil experimental será utilizado na comparação, visto que o mesmo também foi utilizado por outros autores para reprodução via simulações numéricas.

Na metodologia numérica proposta por Messa e Malavasi (2018), que obteve uma concordância razoável entre resultados experimentais e numéricos, as simulações realizadas foram bidimensionais e foi feita uma simplificação na qual se assumiu que velocidade e energia cinética nas cavidades produzidas pela erosão eram nulas.

No estudo de Parsi *et al.* (2019), que também reproduziram os experimentos de Nguyen *et al.* (2014), foram utilizadas malhas estáticas e dinâmicas, mas os resultados numéricos obtidos com a malha estática apresentaram valores de profundidade de erosão muito acima do esperado, com variações de até 400%, como mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Comparação dos perfis de erosão obtidos com a reprodução numérica dos experimentos de Nguyen *et al.* (2014) a partir da metodologia deste trabalho e de outros autores utilizando malha estática



Fonte: elaborado pela autora

Quando se compara a metodologia do presente trabalho com outros já publicados na literatura para a malha estática, como mostrado na Figura 56, ela é a que melhor descreve o perfil de erosão do caso estudado. O modelo proposto por Messa e Malavasi (2018), representado pela curva 2, apesar de ter um custo computacional menor, apresenta resultados com diferenças de cerca de 150% em relação à erosão máxima observada nos experimentos. Já o modelo Euleriano-Lagrangiano utilizado por Messa (2018), que se aproxima da metodologia para a malha estática deste trabalho, apresenta resultados mais satisfatórios, mas com uma diferença de até 100% na predição de erosão máxima, enquanto na metodologia utilizando o UNSCYFL3D essa diferença não chega a ser 40% incluindo os pontos ruidosos dos resultados.

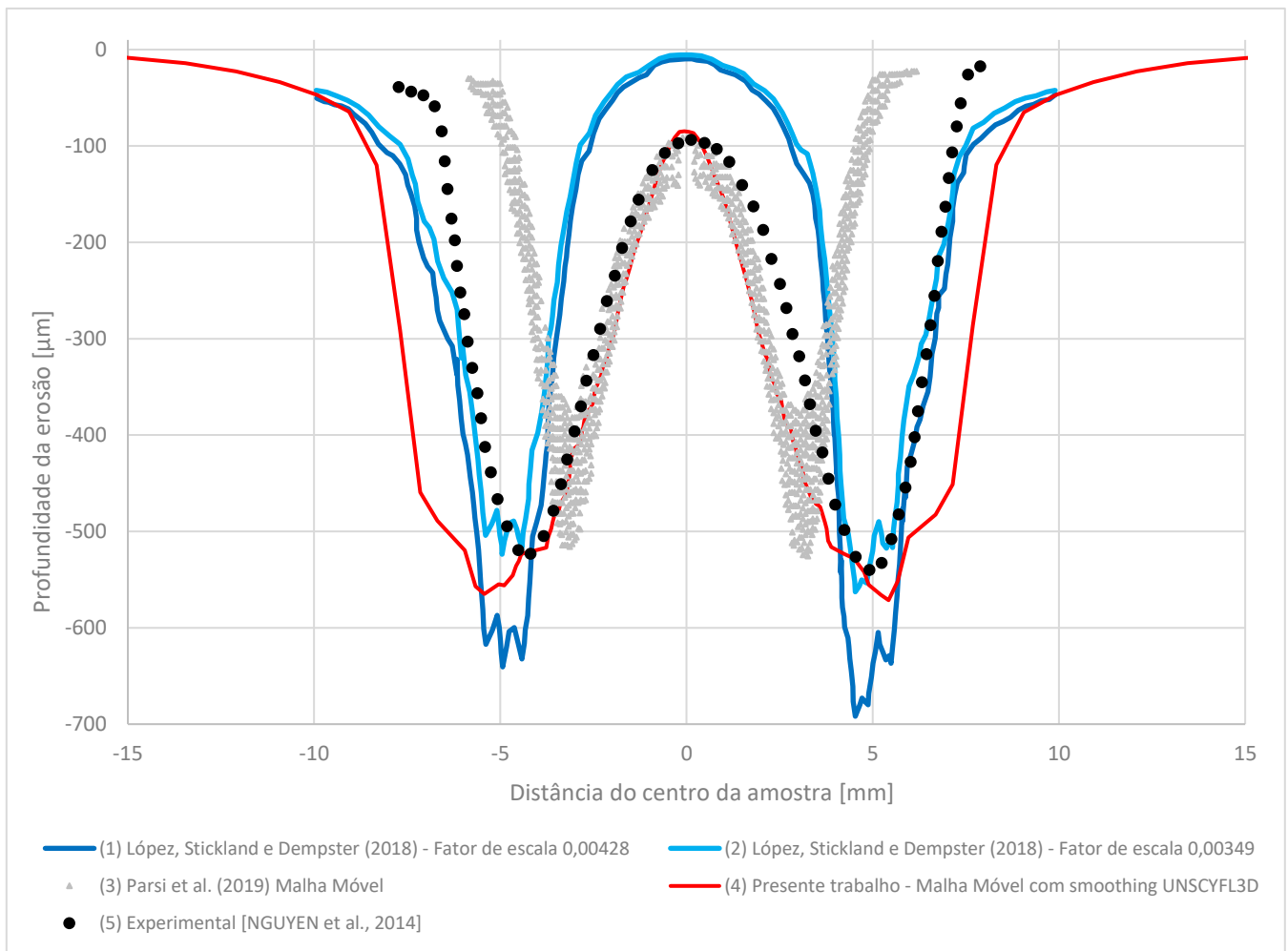
No trabalho de López, Stickland e Dempster (2018), que realizaram simulações tridimensionais utilizando o OpenFOAM, o perfil de erosão obtido é semelhante àquele observado experimentalmente, mas a magnitude da erosão obtida pelas simulações numéricas foi muito maior que nos experimentos, o que fez com que utilizassem um fator de escala para que os resultados numéricos se aproximassem dos experimentais. Nesse caso, não seria possível realizar boas predições para outros casos ou um estudo de condições em que um experimento não foi realizado, visto que o resultado numérico dependeria do experimental para ajuste através desse fator de escala, limitando a metodologia utilizada. Além de utilizar esses ajustes, nas cavidades os resultados indicam a presença um degrau que não foi observado nem em outros estudos numéricos nem no experimento base.

Para as simulações com a malha dinâmica, o perfil de erosão obtido por Parsi *et al.* (2019) apresenta boa concordância com os experimentos apenas no centro da amostra e difere muito em relação à largura da erosão, como ilustra a Figura 57. Por outro lado, os resultados apresentados por López, Stickland e Dempster (2018) concordam com os experimentos quanto à largura máxima da erosão na amostra, mas não representam bem a região central da cavidade formada devido à erosão.

Apesar do trabalho de López, Stickland e Dempster (2018) se aproximarem dos experimentos com o fator de escala de 0,00349, a utilização desse fator indica um ponto crítico da metodologia utilizada, que depende de resultados experimentais para ajuste dos resultados numéricos. Isso reduz as possibilidades de aplicação e, ainda com esses ajustes, apresenta falhas em relação à predição da erosão na região central da amostra.

A metodologia do presente trabalho com a utilização de malha dinâmica e implementação do método de *smoothing* melhorou a qualidade da malha, reduziu o ruído previamente observado nos resultados e diminuiu o custo computacional, além de fornecer uma boa previsão em relação ao perfil de erosão. Portanto, se mostra o mais vantajoso, pois tem robustez para ser aplicável a qualquer geometria, além de modelar o fenômeno da erosão de forma satisfatória, obtendo uma ótima aproximação em relação à profundidade de erosão experimental, com diferenças de aproximadamente 15% em relação ao experimento, e sem limitações impostas por metodologias utilizadas em outros trabalhos da literatura.

Figura 57 - Comparação dos perfis de erosão obtidos com a reprodução numérica dos experimentos de Nguyen *et al.* (2014) a partir da metodologia deste trabalho e de outros autores utilizando malha móvel com a implementação do método de *smoothing*



Fonte: elaborado pela autora

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a simulação numérica de erosão em escoamentos multifásicos utilizando malhas estáticas e malhas dinâmicas, para as quais foi implementado um novo método de *smoothing* na superfície erodida.

Para a malha estática, a metodologia utilizada para simulação numérica da erosão se mostrou adequada e foi validada para os casos estudados, apresentando resultados melhores que aqueles disponíveis na literatura para o caso do jato erosivo em placa plana, com um perfil de erosão próximo ao obtido nos experimentos realizados por Nguyen et al. (2014).

Apesar disso, conforme mencionado nas primeiras etapas do estudo, existia a presença de um ruído nos resultados de perfis de erosão, cuja origem não é física. Porém, com a implementação do novo método de *smoothing* na superfície, houve a suavização do gradiente, diminuindo significativamente esses ruídos sem impactar a qualidade dos resultados de erosão.

Além disso, essa metodologia possibilitou uma redução no tempo médio de simulação com a malha dinâmica, visto que tornou desnecessária a utilização de um alto número de parcelas injetadas a cada passo de tempo na simulação, o que era feito a fim de se obter resultados mais suaves, visto que, como a malha computacional não era uniforme ao longo do domínio, as faces onde ocorriam menos impactos introduziam o ruído não físico nos resultados de erosão e no deslocamento da malha, prejudicando sua qualidade.

Foi demonstrado com as malhas dinâmicas que a formação de cavidades devido à erosão altera o escoamento e o perfil de erosão, então as malhas dinâmicas são ferramentas importantes para esses casos em que há interesse na previsão de alterações geométricas ou do escoamento. Com a metodologia deste trabalho pode-se optar por simular a erosão utilizando malhas estáticas ou malhas dinâmicas, sendo que pode-se ou não recalculá-lo a cada passo de tempo. Essa escolha dependerá do tipo de aplicação, magnitude de erosão e importância da alteração da geometria ao longo do processo estudado, além do custo computacional mais vantajoso de acordo com os requisitos da análise.

Comprovou-se também que, além dos benefícios relativos à diminuição dos ruídos nos resultados de erosão e diminuição do tempo de simulação, a implementação do novo método de

*smoothing* contribuiu para a melhoria da qualidade da malha, o que pode ser uma ferramenta importante para diversos casos que apresentam dificuldade de convergência devido à uma erosão intensa e, conseqüentemente, alta modificação da geometria.

Com a validação das simulações, tanto utilizando a malha estática quanto a malha dinâmica, pode-se ampliar sua utilização para diversas aplicações. Em casos de aplicação industrial, muitas vezes é importante a inclusão desse efeito de modificação da geometria, pois é necessário, por exemplo, localizar regiões críticas de tubulações, componentes ou equipamentos e prever sua geometria ao longo do tempo. Com a utilização de malhas dinâmicas, é possível prever a mudança da geometria para propor modificações de regiões onde a profundidade de erosão seria muito alta ou prever o tempo de operação antes de uma possível falha ou acidente, por exemplo.

Quando se compara a metodologia deste trabalho com outras da literatura, verifica-se a escassez de trabalhos que estudam a erosão com malhas dinâmicas e percebe-se que muitos apresentam diferenças consideráveis em relação a experimentos ou requerem o uso de estratégias de ajuste de resultado final, limitando sua aplicação. Portanto, a robustez da metodologia apresentada será de grande importância para o estudo numérico da erosão e poderá ser aplicada a qualquer geometria, além de incluir os efeitos da mudança dessa geometria no fenômeno da erosão, que ainda é pouco investigada na literatura.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método de *smoothing* implementado no UNSCYFL3D apresentou resultados muito satisfatórios e pode ser utilizado para estudo numérico de outras aplicações nas quais a mudança topológica é essencial, como a microusinagem.

Estudos experimentais realizados com rigor e que correlacionem a esfericidade das partículas com a erosão podem ser importantes para analisar de forma mais precisa a influência desses fatores na erosão, especialmente quando se varia o diâmetro das partículas erodentes.

Para o caso em que foi estudada a variação dos diâmetros das partículas, pode-se analisar se, à medida que o diâmetro aumenta, o tipo do acoplamento entre fases, como o de quatro vias, pode diminuir as diferenças observadas entre simulação e experimentos. Além disso, pode-se estudar se a modelagem para escoamento denso pode justificar essas diferenças.

Pode-se também implementar modelos de corrosão no código utilizado para que seus efeitos sejam estudados simultaneamente com a erosão.

Como a influência da temperatura, por exemplo, ainda é pouco estudada em escoamentos multifásicos com erosão, um estudo que envolva termodinâmica pode ser realizado.

Além disso, pode-se fazer um estudo sobre a componente tangencial da erosão, o que pode ser incorporado ao método de movimentação da malha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEDEJI, O. E.; DUARTE, C. A. R. Prediction of thickness loss in a standard 90° elbow using erosion-coupled dynamic mesh. *Wear*, 203400, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203400>

AHLERT, K. R. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 Steel. University of Tulsa, 1994.

ALEXIAS, P. P.; DE VILLIERS, E. Gradient projection, constraints and surface regularization methods in adjoint shape optimization.

ARMENIO, V.; FIOROTTO, V. The importance of the forces acting on particles in turbulent flows. *Physics of Fluids*, 2001. 13(8), 2437-2440. <https://doi.org/10.1063/1.1385390>

BAUMGARTEN, C. Mixture formation in internal combustion engines. Germany: Springer, 2006.

BELLMAN, R.; LEVY, A. Erosion mechanism in ductile metals. *Wear*, 70(1), 1981. 1-27.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90268-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90268-4)

BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. Modelagem matemática no ensino. 5ª. ed. São Paulo: Contexto, 2009.

BREUER, M.; ALLETTO, M.; LANGFELDT, F. Sand grain roughness model for rough walls with in Eulerian-Lagrangian predictions of turbulent flows. *International Journal of Multiphase Flow*, julho 2012. 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.03.002>

CARTER, J.; DAWSON, P.; NIXON, R. Explosion at the CONOCO humber refinery-16th april 2001. *ICHEME J. LPB* 188, 2006. 14-20.

CHATTOPADHYAY, R. Surface wear: analysis, treatment, and prevention. ASM international, 2001.

CHILDS, H. et al. VisIt: An End-User Tool For Visualizing and Analyzing Very Large Data. *High Performance Visualization - Enabling Extreme-Scale Scientific Insight*. 1. Cap. 16. ed. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2012.

CLARK, H. M.; HARTWICH, R. B. A re-examination of the 'particle size effect' in slurry erosion. *Wear*, 2001. 147-161. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00556-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00556-1)

CROWE, C. T. et al. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. <https://doi.org/10.1201/b11103>

DENNIS, S. C. R.; SINGH, S. N.; INGHAM, D. B. The steady flow due to a rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980. 101(02), 257. <https://doi.org/10.1017/S0022112080001656>

DRIES, H.; MCAULEY, R. FCC cyclones-a vital element in profitability. *Petroleum Technology Quarterly*, 2001. 21-28.

DUARTE, C. A. R. Numerical investigation of the erosion reduction in elbows promoted by a vortex chamber. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

DUARTE, C. A. R. Simulation of a new pipe design for erosion reduction in curves. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

DUARTE, C. A. R. et al. The role of inter-particle collisions on elbow erosion. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017. 89, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001>

DUARTE, C. A. R. et al. A numerical assessment of two geometries for reducing elbow erosion. *Particuology*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.01.004>

DUARTE, C. A. R.; DE SOUZA, F. J.; DOS SANTOS, V. F. Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion. *Powder technology*, 2015. 283, 593-606. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.021>

DUARTE, C. A. R.; SOUZA, F. J. D. Innovative pipe wall design to mitigate elbow erosion: A CFD analysis. *Wear* 380 , 2017. 176-190. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.015>

DUARTE, C. A. R.; SOUZA, F. J. D. Dynamic mesh approaches for eroded shape predictions. *Wear*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203438>

DUARTE, C. A. R.; SOUZA, F. J. D.; SANTOS, V. F. D. Effects of surface roughness and interparticle collisions on elbow erosion. ICMF-2016 - 9th International Conference on Multiphase Flow, 2016. No. 0050. 2016. p. 1-6.

DUARTE, C. A. R.; SOUZA, F. J. D.; SANTOS, V. F. D. Mitigating elbow erosion with a vortex chamber. Powder Technology 288, 2016. 6-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.032>

ELGHOBASHI, S. On predicting particle-laden turbulent flows. Applied Scientific Research, Kluwer Academic Publishers, 1991. v. 52, n. 4, p. 309-329.  
<https://doi.org/10.1007/BF00936835>

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. Computational methods for fluid dynamics. [S.l.]: [s.n.], 2002.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>

FINNI, I. Some reflections on the past and future of erosion. Wear, 1995. 1-10.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07188-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07188-1)

FINNIE, L. Erosion of surfaces by solid particles. Wear, 1960. v.3, n.2, 87-103.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)

FORDER, A.; THEW, M.; HARRISON, D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oil\_eld control valves. Wear, Elsevier, 1998. v. 216, n. 2, p. 184-193.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00217-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00217-2)

GONÇALVES, L. R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Avaliação de erosão a quente de concretos refratários para calcinadores de leito fluidizado. Cerâmica 57.342, 2011. 193-198.  
<https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000200010>

GRANT, G.; TABAKOFF, W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. Journal of Aircraft, 1975. v. 12, n. 5, p. 471-478.  
<https://doi.org/10.2514/3.59826>

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. Powder Technology, 1989. 58, 63-70. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(89\)80008-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(89)80008-7)

HASELBACHER, A.; NAJJAR, F.; FERRY, J. An efficient and robust particle-localization algorithm for unstructured grids. *Journal of Computational Physics*, v. 225, n. 2, 2007. 2198-2213. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.03.018>

HUTCHINGS, I. Wear by hard particles. *Tribology International*, 22(6), 2017. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(89\)90076-5](https://doi.org/10.1016/0301-679X(89)90076-5)

JAFAR, R. H. M. et al. Erosion modeling in abrasive slurry jet micro-machining of brittle materials. *Journal of manufacturing processes*, 2015. 17, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.08.006>

KARIMI, S.; SHIRAZI, S. A.; MCLAURY, B. S. Predicting fine particle erosion utilizing computational fluid dynamics. *Wear*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.022>

KHAN, A. Corporate Social Responsibility and its Effects on Corporate-Community Relationships: A Case Study of Chevron's Richmond Refinery Fire in 2012. [S.l.]. 2013.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. *Stratigraphy and Sedimentation*. 2a. ed. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1963.

LAÍN, S.; SOMMERFELD, M. Characterisation of pneumatic conveying systems using the Euler/Lagrange approach. *Powder Technology*, 2013. v. 235. 764-782. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.029>

LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. *Journal of Fluid Mechanics* v. 68, 1975. 537-566. <https://doi.org/10.1017/S0022112075001814>

LEVY, A. V.; CHIK, P. The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel. *Wear*, 89(2), 1983. 151-162. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(83\)90240-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(83)90240-5)

LIEN, F. S.; LESCHZINER, M. A. Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure. *Computers and Fluids* , 1994. 983-1004, v. 23. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)90001-9)

LISA, M. W.; KEITH A, C. New ceramic feed distributor offers ultimate erosion protection. *HYDROCARBON PROCESSING*, 2010. 1-25.

LÓPEZ, A.; STICKLAND, M. T.; DEMPSTER, W. M. CFD study of fluid flow changes with erosion. *Computer Physics Communications*, 2018. 227:27-41. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.02.002>

LUN, C. K. K.; LIU, H. S. Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows in horizontal channels. *International Journal of Multiphase Flow*, 23(3), 1997. 575-605. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(96\)00087-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(96)00087-0)

MARTINS, D. A. D. M. Implementação e avaliação de modelos computacionais para a previsão da erosão em ciclones. Uberlândia: Tese (Doutorado em Engenharias). Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

MATSUMURA, M. A case study of a pipeline burst in the Mihama Nuclear Power Plant. *Materials and Corrosion* 57.11, 2006. 872-882. <https://doi.org/10.1002/maco.200503971>

MATSUSHIMA, K.; MURAYAMA, M.; NAKAHASHI, K. Unstructured dynamic mesh for large movement and deformation. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2002. <https://doi.org/10.2514/6.2002-122>

MAZUMDER, Q. H.; SHIRAZI, S. A.; MCLAURY, B. S. Prediction of solid particle erosive wear of elbows in multiphase annular ow-model development and experimental validations. *Journal of Energy Resources Technology*, 2008. 130. <https://doi.org/10.1115/1.2824284>

MEI, R. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite reynolds number. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992. 18(1), 145-147.. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(92\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(92)90012-6)

MESSA, G. V.; MALAVASI, S. A CFD-based method for slurry erosion prediction. *Wear*, 2018. 398-399:127-145. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.025>

NEILSON, J.; GILCHRIST, A. Erosion by a stream of solid particles. *Wear*, v. 11, n. 2, 1968. 111-122. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90591-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90591-7)

NGUYEN, Q. B. et al. Slurry erosion characteristics and erosion mechanisms of stainless steels. *Tribology International*, 2014. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.014>

NGUYEN, Q. B. et al. The role of abrasive particle size on erosion characteristics of stainless steels. *Engineering Failure Analysis*, 2019. 844-853.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.020>

NGUYEN, V. B. et al. A combined numerical-experimental study on the effect of surface evolution on the water-sand multiphase flow characteristics and the material erosion behaviour. *Wear*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.017>

NOURAEI, H. et al. Calibrated CFD erosion modeling of abrasive slurry jet micro-machining of channels in ductile materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016. 23, 90-101.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.007>

OGUNSESAN, O. A. CFD modelling of pipe erosion under multiphase flow regimes. Aberdeen: Robert Gordon University. PhD thesis, 2020.

OKA, Y. I.; OKAMURA, K.; YOSHIDA, T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 2005. v. 259, n. 1-6, p. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>

OTHAYQ, M. et al. Effect of distance between two elbows in series on erosion for gas dominated conditions. *Wear*, 476, 203618, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203618>.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203618>

PARSI, M. Sand Particle Erosion in Vertical Slug/Churn Flow. OK, USA: The University of Tulsa, 2015.

PARSI, M. et al. Effect of surface deformation on erosion prediction. *Wear*, 2019. 57-66.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.019>

PEREIRA, G. C.; SOUZA, F. J.; MARTINS, D. A. D. M. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows. *Powder Technology*, 2014. v. 261, p. 105-117.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.033>

RUBINOW, S. I.; KELLER, J. B. The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961. 11(03), 447.  
<https://doi.org/10.1017/S0022112061000640>

SADEGHBEIGI, R. Fluid catalytic cracking handbook: An expert guide to the practical operation, design, and optimization of FCC units. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2020.

SAFFMAN, P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965. 22(02), 385. <https://doi.org/10.1017/S0022112065000824>

SALVO, R. D. V. Application of the Eulerian-Lagrangian methodology to the analysis of the separation processes in cyclone separators. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SANTOS, V. F. D. Numerical analysis of the effects brought by a twisted tape insert in elbow erosion. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. 115f.

SCHILLER, L.; NAUMANN, A. A drag coefficient correlation. *Z. Ver. Deutsch*, 1935. 77-318.

SHALABY, H. H. On the Potential of Large Eddy Simulation to Simulate Cyclone Separators. Chemnitz, Germany: Tese de Doutorado. Chemnitz University of Technology, 2006.

SOLNORDAL, C. B.; WONG, C. Y. Predicting surface profile evolution caused by solid particle erosion. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, 2012.

SOMMERFELD, M. Numerical Methods for Dispersed Multiphase Flows. In: BODNÁR, T.; GALDI, G. P.; NECASOVÁ, S. *Particles in Flows*. USA: Springer, 2017. Cap. 6, p. 327-396. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60282-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60282-0_6)

SOMMERFELD, M.; HUBER, N. Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions. *International journal of multiphase flow*, Elsevier, 1999. v. 25, n. 6-7, p. 1457-1489. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(99\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00047-6)

SOORAJ, V. S.; RADHAKRISHNAN, V. Elastic Impact of Abrasives for Controlled Erosion in Fine Finishing of Surfaces. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(5), 2013. <https://doi.org/10.1115/1.4025338>

SOUZA, F. J. UNSCYFL3D Versão 2.0 - Manual Teórico. Uberlândia: MFLab UFU, 2018.



STIMPSON, C. et al. The verdict library reference manual. Sandia National Laboratories Technical Report, 2007. 1.

STONE, R.; BALL, J. K. Automotive Engineering Fundamentals. 1a. ed. [S.l.]: SAE International, 2004. <https://doi.org/10.4271/R-199>

TAYLOR, L. M.; FLANAGAN, D. P. Pronto3D - a three dimensional transient solid dynamics program. Technical Report SAND87-1912, Sandia National Laboratories. [S.l.]. 1989. <https://doi.org/10.2172/6212624>

UZI, A.; BEN AMI, Y.; LEVY, A. Erosion prediction of industrial conveying pipelines. Powder Technology, 309, 2017. 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.087>

VAIRO, TOMASO, ET AL. An oil pipeline catastrophic failure: Accident scenario modelling and emergency response development. Chemical Engineering 57, 2017.

VARAS, A. C.; PETERS, E.; KUIPERS, J. Experimental study of full field riser hydrodynamics by piv/dia coupling. Powder technology, 2017. v. 313, p. 402-416. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.055>

VOGT, E.; WECKHUYSEN, B. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. Chemical Society Reviews, Royal Society of Chemistry, 2015. v. 44, n. 20, p. 7342-7370. <https://doi.org/10.1039/C5CS00376H>

WIEDERHORN, S. M.; ROBERTS, D. E. A technique to investigate high temperature erosion of refractories. Am. Ceram. Soc. Bull. 55, 2, 1976. 185-189.

WONG, C. Y. et al. Predicting the material loss around a hole due to sand erosion. Wear, 2012. 276, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.11.005>

ZHANG, H. et al. Large Eddy Simulation of a dilute particle-laden turbulent flow over a backward-facing step. Science in China Series E: Technological Sciences, 51(11), 2008. 1957-1970. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0154-1>

ZHANG, J.; MCLAURY, B. S.; SHIRAZI, S. A. Application and experimental validation of a CFD based erosion prediction procedure for jet impingement geometry. *Wear*, 2018. 394, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.10.001>

ZHANG, Y. et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows. *Wear*, v. 263, n. 1-6, 2007. 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.048>