

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PAULO FRANCO DE LIMA

**ANÁLISE DE DESGASTE DO BICO PULVERIZADOR AGRÍCOLA JSF-110-02
POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

**Londrina
2025**

JOÃO PAULO FRANCO DE LIMA

**ANÁLISE DE DESGASTE DO BICO PULVERIZADOR AGRÍCOLA JSF-110-02
POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

**Wear analysis of the agricultural spray nozzle jsf-110-02 through computational
fluid dynamics**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ricardo De Vasconcelos Salvo.
Coorientadora: Profa. Dra. Janaina Fracaro De Souza
Goncalves.

LONDRINA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOAO PAULO FRANCO DE LIMA

**ANÁLISE DE DESGASTE DO BICO PULVERIZADOR AGRÍCOLA JSF-110-02
POR MEIO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/Novembro/2024

Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2025

AGRADECIMENTOS

É impossível alcançar qualquer êxito sem a ajuda de outras pessoas, sejam elas pais, amigos, tutores ou até mesmo desconhecidos. Durante minha graduação, isso não foi diferente; muitas pessoas contribuíram, cada uma à sua maneira, para a minha jornada. Seria impossível mencionar todas neste texto, mas gostaria de expressar minha gratidão especial a algumas delas.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Paulo e Alexsandra, os quais não mediram amor e esforço para me ajudar a chegar o mais longe possível, me dando apoio financeiro, emocional e principalmente o exemplo de como ser uma pessoa honesta e que sempre busca fazer a coisa certa.

Agradeço também à minha companheira, Helen, pelo carinho, paciência e incentivo constante ao longo desta jornada. Sua compreensão, suporte e amor foram essenciais nos momentos de desafios, incertezas e superação, sem sua ajuda não estaria onde estou.

Minha gratidão se estende aos meus professores. Embora todos tenham contribuído de alguma forma para minha formação, gostaria de agradecer especialmente aos professores Ricardo, Rafael, Ismael e Roger os quais desempenharam mais que apenas a função de professores, mas sim de amigos.

A todos, meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

A agricultura brasileira representa um dos pilares da economia nacional, destacando-se pela sua vasta produção de carnes, frutas e grãos para o consumo interno e exportação. Esse setor expressa uma grande parcela do PIB nacional e constitui um dos maiores índices de empregos e receita gerada. Nesse contexto, a fim de se manter uma alta produtividade e promover a proteção das plantações contra insetos, fungos, bactérias e plantas concorrentes, é notório a necessidade do uso de defensivos agrícolas. No entanto, sua utilização exacerbada acarreta em graves danos ambientais, para a saúde da população, e o aumento dos custos operacionais para o produtor. Perante esse cenário, este estudo visa analisar os desgastes causados pelas partículas presentes nos agroquímicos, em relação aos bicos pulverizadores agrícolas compostos por Poliacetato. Desse modo, para a realização desse estudo, foi adquirido um bico do modelo JSF-110-02 o qual, por intermédio de instrumentos de medição, foi possível obter seu dimensional, que posteriormente foi utilizado para o desenvolvimento do Desenho Assistido por Computador (CAD) e subsequente, empregado a técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) por intermédio do software ANSYS® Fluent®. Foram realizadas simulações para a fase contínua, que descrevem a passagem do fluido de trabalho sobre o bico pulverizador, permitindo obter a vazão, velocidade, pressão e linhas de corrente. Em seguida foram realizadas simulações para a fase discreta, as quais descrevem a inserção do particulado que promove a erosão dos bicos, promovendo a investigação dos efeitos da turbulência, desgaste máximo e médio perante algumas condições de operação dos maquinários agrícolas. Os resultados obtidos não podem ser comparados quantitativamente com trabalhos previamente publicados devido à falta de informações empíricas para o fechamento dos modelos de erosão, no entanto, fornecem base para uma análise qualitativa do fenômeno.

Palavras-chave: agricultura; desgaste; particulado; Dinâmica dos Fluidos Computacional.

ABSTRACT

Brazilian agriculture represents one of the pillars of the national economy, standing out for its vast production of meat, fruits, and grains for domestic consumption and export. This sector accounts for a significant portion of the national PIB and constitutes one of the highest rates of employment and revenue generation. In this context, to maintain high productivity and promote the protection of crops against insects, fungi, bacteria, and competing plants, the need for the use of pesticides is evident. However, their excessive use leads to severe environmental damage, public health issues, and increased operational costs for the producer. In light of this scenario, this study aims to analyze the wear caused by the particles present in agrochemicals on agricultural spray nozzles made of Polyacetal. When worn, these nozzles unnecessarily increase the flow rate of these pesticides, resulting in the aforementioned problems. For this study, a JSF-110-02 nozzle was acquired, and through measurement instruments, its dimensions were obtained, which were subsequently used to develop the Computer Aided Design (CAD) model. Following this, Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques were applied using the ANSYS® Fluent® software. Simulations were carried out for the continuous phase, which describe the passage of the working fluid over the spray nozzle, allowing the flow rate, velocity, pressure, and streamlines to be obtained. Subsequently, simulations were carried out for the discrete phase, which describe the insertion of particulates that promote nozzle erosion, investigating the effects of turbulence, maximum and average wear under certain operating conditions of agricultural machinery. The results obtained cannot be quantitatively compared with previously published works due to the lack of empirical information for closing the erosion models; however, they provide a basis for a qualitative analysis of the phenomenon.

Keywords: agriculture; wear; agricultural spray nozzle; computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação de desgaste entre bicos.....	17
Figura 2 - Modelos de erosão presentes no ANSYS® Fluent®	20
Figura 3 - Bico JSF-110-02.....	23
Figura 4 - Resina epoxi utilizada.....	24
Figura 5 - Processo de molde	24
Figura 6 - Geometrias internas.....	25
Figura 7 - Instrumentos de medição.....	25
Figura 8 - Desenho tridimensional do bico, desenvolvido no SolidWorks®.....	26
Figura 9 - Detalhamento do bico, desenvolvido no SolidWorks®	26
Figura 10 - Simplificação da geometria.....	27
Figura 11 - Primeira opção de modelo	28
Figura 12 - Caracterização do modelo.....	28
Figura 13 - Segunda opção de modelo.....	29
Figura 14 - Vista em corte do domínio computacional	29
Figura 15 - Propriedade Físicas do Glifosato	30
Figura 16 - Estudo sobre a malha Poly-Hexacore	31
Figura 17 - Primeira malha do primeiro modelo	32
Figura 18 - Segunda malha do primeiro modelo	33
Figura 19 - Terceira malha do primeiro modelo.....	33
Figura 20 - Locais de refino de malha	35
Figura 21 - Plano de simetria.....	35
Figura 22 - Primeira malha do segundo modelo.....	36
Figura 23 - Segunda malha do segundo modelo.....	36
Figura 24 - Vazão de catálogo	37
Figura 25 - Quantidade de particulados para cada iteração.....	40
Figura 26 - Velocidade e pressão para 2 bar.....	42
Figura 27 - Velocidade e pressão para 3 bar.....	42
Figura 28 - Velocidade e pressão para 4 bar.....	43
Figura 29 - Linhas de corrente para 2 bar	43
Figura 30 - Linhas de corrente para 3 bar	44
Figura 31 - Linhas de corrente para 4 bar	44
Figura 32 - Análise da influência da turbulência para partículas de 25 a 35 μm	46
Figura 33 - Análise da influência da turbulência para partículas de 2,49 a 6 μm	47
Figura 34 - Análise da influência da turbulência para partículas de 0,1 a 2 μm	48
Figura 35 - Demonstrativo para a visualização dos resultados	48
Figura 36 - Legenda para compreensão dos resultados	49
Figura 37 - Zona de desgaste na borda do bico	50
Figura 38 - Zona de desgaste na ponta do bico	50
Figura 39 - Desgaste máximo conforme a variação da pressão e distribuição de particulado.....	51
Figura 40 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 μm e 2,49 a 6 μm para pressão de 2 bar.....	52
Figura 41 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 μm para pressão de 2 bar.....	52
Figura 42 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 μm e 2,49 a 6 μm para pressão de 3 bar.....	53

Figura 43 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 µm para pressão de 3 bar.....	54
Figura 44 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 µm e 2,49 a 6 µm para pressão de 4 bar.....	55
Figura 45 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 µm para pressão de 4 bar.....	55
Figura 46 - Desgaste médio em kg/s conforme a variação da pressão e distribuição de particulado.....	56
Figura 47 - Comparação entre as distribuições de particulados para uma pressão de 3 bar.....	57
Figura 48 - Efeito físico do desgaste na ponta do bico pulverizador	57
Figura 49 - Comparativo entre representação gráfica do desgaste do fabricante com resultado obtido pela simulação	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados para as 3 malhas do primeiro modelo proposto	34
Tabela 2 – Variação Percentual.....	34
Tabela 3 - Resultados para as 2 malhas do segundo modelo proposto	37
Tabela 4 - Parâmetros para simulação da fase discreta	39
Tabela 5 - Diferença relativa entre os dois fluidos de trabalho.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENDA	Associação nacional das empresas de produtos fitossanitários
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DWR	Discrete Random Walk
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MPs	Microplásticos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

C(dp)	Função do diâmetro da partícula	--
α	Ângulo de impacto da partícula	--
f(α)	Função do ângulo de impacto	--
v	Velocidade da partícula	m/s
b(v)	Função da velocidade da partícula	--
A	Área da face da célula na parede	m ²
V	Volume removido da superfície	m ³
M	Massa da partícula em erosão	Kg
m	Massa individual da partícula	Kg
I	Momento de inércia da partícula	F
r	Raio médio da partícula	m
p	Componente horizontal da pressão de fluxo	Mpa
c	Fração de partículas idealizada	--
E	Taxa de erosão	Kg/s
E90	Taxa de erosão perpendicular à parede	Kg/s
Hv	Dureza Vickers	Kgf/mm ²
D	Diâmetro da partícula	m
v'	Velocidade de referência	m/s
D'	Diâmetro de referência	m
Bh	Dureza Brinell	N/mm ²
j1	Constante empírica do método de McLaury	--
j2	Constante empírica do método de McLaury	--
x	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
y	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
w	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
b	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
C	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
y _{lim}	Variável obtida experimentalmente para o método de McLaury	--
s ₁	Constante adimensional para o método de Oka	--
s ₂	Constante adimensional para o método de Oka	--
q ₂	Constante adimensional para o método de Oka	--
q ₁	Constante adimensional para o método de Oka	--
K	Constante adimensional para o método de Oka	--
k ₁	Constante adimensional para o método de Oka	--
k ₃	Constante adimensional para o método de Oka	--
n	Constante adimensional para o método DNV	--
k	Constante adimensional para o método DNV	--
ṁ	Taxa do fluxo	Kg/s
ṁ _f	Taxa do fluxo do fluido	Kg/s
ṁ _p	Taxa de fluxo do particulado	Kg/m ³
rho	Densidade do fluido	Kg/m ³
Te	Taxa de erosão	Kg/s
Ab	Área da superfície do bico	m ²
TA	Taxa de erosão para cada simulação	Kg/m ² *s

Dr	Diferença relativa	--
Va	Vazão da água	L/min
Vg	Vazão do glifosato	L/min

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	Justificativa.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Desgastes nos bicos pulverizadores.....	17
2.2	Consequências do desgaste nos bicos pulverizadores	18
2.2.1	Aspectos ambientais	18
2.2.2	Aspectos econômicos.....	18
2.3	Métodos de análise de desgastes.....	19
2.4	Software ANSYS® Fluent® na análise do desgaste	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	Levantamento da geometria do bico	23
3.1.1	Levantamento da geometria interna	23
3.1.2	Construção da geometria CAD	25
3.2	Construção do domínio computacional	27
3.3	Definições dos parâmetros para simulação da fase continua	29
3.4	Elaboração da malha numérica.....	30
3.4.1	Utilização da malha Poly-Hexacore.....	31
3.4.2	Primeira opção de modelo.....	32
3.4.3	Segunda opção de modelo.....	34
3.5	Definições dos parâmetros para simulação da fase discreta	37
3.5.1	Distribuição de particulado	38
3.5.2	Parâmetros para o desenvolvimento dos resultados.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Fase contínua	41
4.2	Fase discreta.....	44
4.2.1	Influência da turbulência.....	45
4.2.2	Compreensão das Figuras apresentadas.....	48
4.2.3	Análise do desgaste máximo.....	50
4.2.4	Análise do desgaste médio.	55
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A agropecuária desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo um dos setores mais importantes do país. Do ponto de vista econômico, a agropecuária representa uma das principais fontes de receita e emprego no Brasil. Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária em colaboração com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Produto Interno Bruto (PIB) relacionado à agropecuária totalizou R\$ 1,227 trilhões, um montante de 12,39% em relação ao PIB acumulado do país no ano de 2022, cerca de R\$ 9,9 trilhões. Dentro desse contexto econômico, destaca-se o cultivo da soja e do milho, os quais apresentaram, no mesmo ano supracitado, valores de produção de R\$ 345,4 milhões e R\$ 137,7 milhões respectivamente, cerca de 39,37% do segmento agropecuário.

Diante desse contexto, é essencial, o uso de defensivos agrícolas, para garantir uma alta produtividade das culturas, oferecendo proteção contra insetos, fungos, bactérias e plantas concorrentes. De acordo com o Atlas dos Agrotóxicos (2023, p. 10-15), no ano de 2021 o consumo de agrotóxicos chegou a 720.830 toneladas, dos quais mais da metade (54%) do volume total foram destinados para o cultivo da soja. Além disso, o autor destaca sua importância econômica, uma vez que o mercado global de agrotóxicos movimentou cerca de 84,5 bilhões de dólares em 2019, com previsão de alcançar 130,7 bilhões até 2023. No entanto, o uso inadequado desses produtos está associado a preocupações ambientais e de saúde pública, incluindo a contaminação do solo, da água e dos alimentos, bem como possíveis impactos adversos na saúde humana e na biodiversidade.

Parte desses problemas está associada ao desgaste dos bicos pulverizadores, dispositivos fabricados com polímeros, cerâmicas e metais, os quais fazem parte das máquinas agrícolas responsáveis por aplicar os agentes químicos nas plantações. Segundo o Blog Jacto (2017), os agroquímicos comercializados contêm formulações com uma alta concentração de partículas em suspensão, as quais possuem uma alta resistência. Desse modo, em conjunto com as condições de operação, como pressão e velocidade, contribuem diretamente por meio da abrasão e erosão para o desgaste dos bicos de pulverização. Assim, conforme indicado pela revista científica do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo (1976, p. 280), a vazão de pulverização está ligada ao desgaste dos bicos, ou seja, quanto maior o

desgaste, maior será o volume de líquido aplicado, o qual promove um maior custo de operação, aumentando também os riscos da poluição do meio ambiente.

Para avaliar o desgaste nos bicos pulverizadores, podem ser adotadas duas abordagens distintas: a análise empírica, que envolve a realização de testes físicos nos bicos em condições semelhantes às de trabalho, e os métodos numéricos, que fazem uso de softwares de simulação para estimar o desgaste. A abordagem empírica, mais comumente empregada, pode ser conduzida de diversas maneiras. Sob essa perspectiva destaca-se o experimento conduzido por Baio et al. (2020, p. 2-3), o qual consiste em bombear continuamente, nos bicos pulverizadores, uma solução diluída de silicato de alumínio em água, na proporção de 60g de silicato para cada litro de água, sob uma pressão constante de 275 kPa. Durante o experimento, é analisada a vazão nos intervalos de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 horas, para 3 tipos de materiais diferentes, polímeros, cerâmicas e metais, proporcionando uma compreensão detalhada do comportamento dos bicos em relação ao desgaste.

Outra forma de se analisar o desgaste dos bicos é por meio dos métodos numéricos, os quais utilizam softwares CAE (*Computer Aided Engineering*). Embora menos habitual por requerer informações de material e particulado provenientes de experimentos empíricos, possibilita uma facilidade na visualização dos resultados e uma redução da necessidade de testes físicos extensivos, pois elimina a necessidade da fabricação de protótipos e conduzir experimentos em larga escala. Além disso, possibilita a realização de uma variedade de testes, com condições operacionais e materiais de bicos distintas.

Nesse contexto, o presente estudo visa a análise do desgaste de um bico pulverizador constituído de Poliacetal, por intermédio da dinâmica de fluidos computacional utilizando o software ANSYS® Fluent® como apoio. O que pode ser descrito, por Versteeg e Malalasekera (2007), como uma técnica que abrange uma ampla gama de aplicações industriais e não industriais, permitindo a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos e fenômenos associados, combinando um conjunto de técnicas numéricas para resolver equações matemáticas que descrevem problemas específicos, fornecendo previsões físicas e físico-químicas em escoamentos.

1.1 Objetivos

Neste tópico são apresentados os objetivos geral e específicos referentes a esse estudo.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral consiste em uma análise acerca do desgaste de um bico de pulverização agrícola por meio da DFC.

1.1.2 Objetivos específicos

O propósito principal do estudo pode ser desmembrado em uma série de metas específicas, as quais podem ser listadas como:

- Realizar uma revisão bibliográfica relativa à utilização e ao desgaste de bicos pulverizadores agrícolas.
- Obter a geometria do bico pulverizador do modelo JSF-110-02.
- Realizar a modelagem CAD (*Computer Aided Design*) do bico através do software SolidWorks®.
- Construir um domínio computacional.
- Gerar uma malha numérica utilizando o software Fluent®Meshing, garantindo sua independência perante o estudo.
- Realizar simulações numéricas com o software ANSYS® Fluent®.
- Analisar o efeito da turbulência no desgaste dos bicos pulverizadores agrícolas.
- Avaliar as regiões de maior desgaste no bico de pulverização agrícola.

1.2 Justificativa

Perante as problemáticas referentes ao desgaste nos bicos pulverizadores agrícolas, as quais promovem um aumento acentuado da taxa de vazão dos agroquímicos, torna-se necessário o presente estudo, a fim de minimizar os impactos econômicos e ambientais consequentes. Considerando que, com a ampliação da vazão um volume maior de agrotóxicos é utilizado sem a devida necessidade, promovendo o aumento dos custos operacionais para o produtor, torna-se necessária a manutenção e trocas constantes dos bicos. Ademais, as ampliações do consumo

desses insumos proporcionam o aumento da contaminação do meio ambiente, uma vez que, esse material sobressalente pode penetrar no solo ou ser encaminhado para outras localidades, promovendo a morte prematura da fauna e flora da região.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

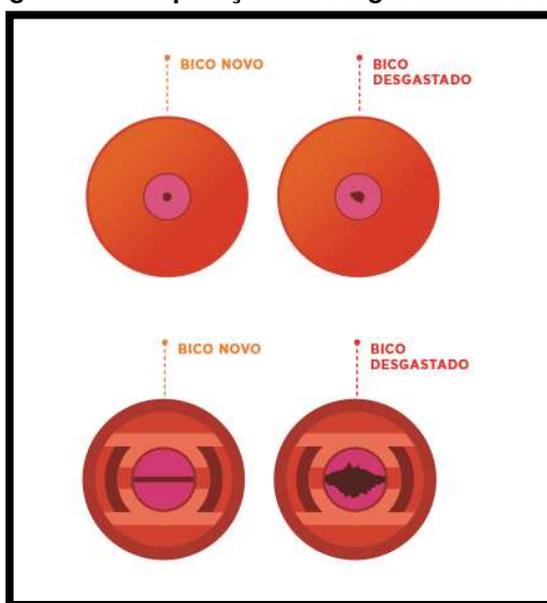
Neste capítulo, são apresentados estudos científicos referentes ao desgaste de bicos pulverizadores, seus impactos, e uma breve avaliação dos métodos numéricos encontrados para a realização das simulações propostas por este estudo.

2.1 Desgastes nos bicos pulverizadores

O desgaste dos bicos pulverizadores resulta de uma variedade de fatores, conforme destacado por Milanowski et al. (2022). Esses fatores incluem a pressão de pulverização, o material do bico, a abrasividade do líquido pulverizado e seus particulados. Em especial, agroquímicos que contêm partículas com alto grau de dureza, contribuem diretamente para o desgaste dos bicos. Sob a mesma perspectiva, a presença abundante de sílica na água pode provocar os mesmos efeitos prejudiciais. Além disso, operar fora das especificações máximas de pressão colaboram de forma direta para a redução da vida útil desses componentes.

De acordo com a Revista científica do instituto agrônomo do estado de São Paulo, Vol. 35 de 1976, os mecanismos de desgaste afetam principalmente a vazão do pulverizado, como representado na Figura 1, devido a ampliação do diâmetro médio das gotas.

Figura 1 - Comparação de desgaste entre bicos



Fonte: Jacto, 2017.

2.2 Consequências do desgaste nos bicos pulverizadores

A prática da pulverização contendo bicos em condições de desgaste supracitados, resultará no aumento dos custos operacionais, além de agravar os riscos ambientais e, em algumas situações, causar danos diretos às plantas, em virtude do aumento do uso dos produtos químicos.

2.2.1 Aspectos ambientais

Conforme a *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE, 2001), quando a vazão medida através do bico de pulverização em uso ultrapassa 10% do valor de um bico novo, é necessário efetuar a substituição do mesmo. Entretanto, devido à dificuldade na análise desses fatores, muitos usuários tendem a prolongar a utilização desses componentes. Conforme destacado por Biziuk et al. (2001), a utilização de bicos gastos proporcionam a fusão das gotas pulverizadas. Esse fenômeno resulta na dispersão das gotas para fora da superfície das plantas, permitindo que penetrem nas águas subterrâneas e, conseqüentemente, causem a contaminação do meio ambiente.

Outro aspecto de grande importância ambiental é a questão da contaminação do meio ambiente devido à presença de microplásticos (MPs). Visto que, grande parte dos bicos pulverizadores apresentam em sua composição diversos tipos de polímeros, e desse modo, ao sofrerem desgastes acabam depositando nas plantações uma grande quantidade de MPs. Nesse aspecto, uma pesquisa revelou que, na Alemanha, a aplicação de composto agrícola introduz uma quantidade significativa de microplásticos nos campos, variando de 35 milhões a até 2,2 bilhões de fragmentos (FEI et al., 2020).

2.2.2 Aspectos econômicos

A análise econômica também desempenha um papel significativo. Bicos com alto grau de desgaste não apenas produzem gotas de diâmetro maior, mas também consomem uma maior quantidade de líquido, resultando em um aumento dos custos (M. KOSZEKI, 2009). Além disso, o aumento da pista de queda do agente químico proporciona ineficiência na atuação do composto e, em casos mais severos, podem levar à morte prematura da cultura.

2.3 Métodos de análise de desgastes

Em virtude da dificuldade apresentada para a previsão dos mecanismos de desgaste erosivo, a busca por métodos numéricos, que permitam avaliar e minimizar os danos resultantes dos impactos das partículas sólidas, tornou-se uma prioridade no âmbito da análise de erosão. Neste contexto, a obra de Finnie (1960, p. 87-103) apresentou equações, experimentalmente validadas por meio de testes de erosão. Essas equações permitiram comparar e estimar a remoção de volume com base na energia cinética das partículas e na pressão do fluxo, destacando a dependência da velocidade na relação de retirada de materiais dúcteis e quebradiços.

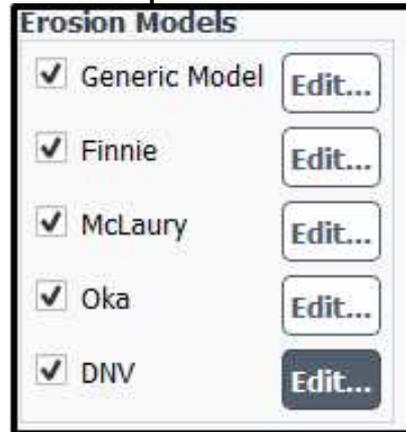
Além disso, McLaury (1993) contribuiu com um modelo detalhado de fluxo e uma abordagem de rastreamento de partículas, oferecendo um método simplificado destinado a aplicações práticas na indústria. Em complemento, Oka e Yoshida (2005, p. 102-109) propuseram um método abrangente para avaliar danos por erosão. Esse método aprofunda a compreensão da relação direta entre as propriedades mecânicas dos materiais e sua resistência ao desgaste, à medida que a velocidade de impacto aumenta.

Ademais, outro modelo substancial refere-se ao desenvolvido pela fundação norueguesa *Det Norske Veritas* (DNV), RP O501 (2007). Este modelo de erosão, intitulado DNV, contribui com métodos para analisar a erosão em tubulações causadas por partículas de areia, baseando-se em investigações experimentais. O estudo desenvolveu um modelo para baixas pressões e pequenos diâmetros, o qual foi posteriormente extrapolado para condições de alta pressão e grandes diâmetros.

2.4 Software ANSYS® Fluent® na análise do desgaste

No software ANSYS® Fluent®, são empregados alguns métodos para a realização das simulações referente ao desgaste dos materiais, por meio de formulações avaliadas empiricamente, como ilustrado na Figura 2. Dessa maneira é possível obter informações sobre o fluxo de massa desprendido. Assim, esta seção tem por objetivo elucidar os referidos métodos.

Figura 2 - Modelos de erosão presentes no ANSYS® Fluent®



Fonte: ANSYS® Fluent® 2023 R2.

De forma corriqueira os métodos utilizados, conforme evidenciado por Elyyan (2017), incorporam parâmetros comuns para correlações empíricas relacionadas à erosão, como ângulo e velocidade de impacto, diâmetro, massa das partículas e as frequências de colisões.

O primeiro modelo disponível para seleção, nomeado como *Generic Model*, o qual pode ser observado no guia teórico ANSYS FLUENT 12.0, descreve a taxa de erosão a partir da Equação 2.1.

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m} C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (2.1)$$

onde “C(dp)” é uma função do diâmetro da partícula, “α” é o ângulo de impacto da partícula com a parede, “f(α)” é uma função do ângulo de impacto, “v” é a velocidade relativa da partícula, “b(v)” é uma função da velocidade relativa da partícula e “A_{face}” é a área da face da célula na parede.

Em sequência é possível observar o modelo proposto por Finnie (1971, p. 83) o qual definiu o volume removido de uma superfície, de acordo com as Equações 2.2 e 2.3.

$$V = \frac{cMv^2}{4p\left(1+\frac{mr^2}{I}\right)} f(\alpha) \quad (2.2)$$

$$f(\alpha) \begin{cases} \cos^2(\alpha) & \tan(\alpha) > \frac{P}{2} \\ \frac{2}{P} [\sin(2\alpha) - \frac{2}{P} \sin^2(\alpha)] & \tan(\alpha) \leq \frac{P}{2} \end{cases} \quad (2.3)$$

onde “V” é o volume removido da superfície, “M” é a massa de partículas em erosão, “m” é a massa individual da partícula, “I” é o momento de inércia da partícula, “r” é o raio médio da partícula, “p” é o componente horizontal da pressão de fluxo e por fim “c” é a fração de partículas idealizada.

Posteriormente, o método intitulado como McLaury, desenvolvido por McLaury et al. (1997) é observável nas Equações 2.4 e 2.5, o qual tem como objetivo identificar a taxa de erosão com base em um modelo experimental de partículas de areia em movimento na água.

$$E = F \cdot (Bh)^{j_1} (v)^{j_2} f(y) \quad (2.4)$$

$$f(y) \begin{cases} by^2 + Cy & y \leq y_{lim} \\ x(\cos y)^2 \sin(wy) + y(\sin y)^2 + z & y > y_{lim} \end{cases} \quad (2.5)$$

onde “F”, “j₁” e “j₂” são constantes empíricas, “Bh” é a dureza Brinell e as variáveis “x”, “y”, “w”, “b”, “C” e “y_{lim}” são obtidas experimentalmente de acordo com os materiais em teste.

Já o modelo denominado Oka, elucidado por Oka et al. (2005, p. 2-3) estabelece o volume de material da superfície removido por unidade de massa incidente, de acordo com as equações 2.6, 2.7 e 2.8.

$$E = g(\alpha) E_{90} \quad (2.6)$$

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} \left[1 + \frac{Hv}{1[GPa]} (1 - \sin(\alpha)) \right]^{n_2} \quad (2.7)$$

$$E_{90} = \left(\frac{Hv}{1[GPa]} \right)^{k_1} \left(\frac{v}{v'} \right)^{k_2} \left(\frac{D}{D'} \right)^{k_3} \quad (2.8)$$

onde “E” é a taxa de erosão, “g(α)” é uma função de dependência do ângulo da partícula, descrita pela Equação 2.7, “E₉₀” é a taxa de erosão perpendicular à parede caracterizada pela Equação 2.8, na qual “Hv” é a dureza Vickers e “D” o diâmetro da partícula. As incógnitas “v” e “D” são respectivamente velocidade e diâmetro de referência. Além disso, as Equações 2.9, 2.10 e 2.11 concatenada mente, com as constantes “s₁”, “s₂”, “q₁”, “q₂”, “K”, “k₁” e “k₃” representam os parâmetros adimensionais.

$$n_1 = s_1 \left(\frac{Hv}{1[GP\alpha]} \right)^{q_1} \quad (2.9)$$

$$n_2 = s_2 \left(\frac{Hv}{1[GP\alpha]} \right)^{q_2} \quad (2.10)$$

$$k_2 = 2,3 \left(\frac{Hv}{1[GP\alpha]} \right)^{0,038} \quad (2.11)$$

Em conclusão, o método intitulado de DNV disponibilizado pelo guia teórico do software COMSOL Multiphysics 6.2, define a taxa de erosão em termos da razão entre a massa perdida pela superfície e a massa das partículas incidentes, de acordo com as Equações 2.12 e 2.13, onde “K” e “n” são constantes adimensionais dependentes do material da superfície.

$$E = K \left(\frac{v}{1[\frac{m}{s}]} \right)^{-n} f(\alpha) \quad (2.12)$$

$$f(\alpha) = 9,370\alpha - 42,295\alpha^2 + 110,864\alpha^3 - 175,804\alpha^4 + 170,137\alpha^5 - 98,398\alpha^6 + 31,211\alpha^7 - 4,170\alpha^8 \quad (2.13)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão abordados as técnicas e processos utilizados para se chegar aos resultados finais perante esse estudo.

3.1 Levantamento da geometria do bico

Esta seção tem como objetivo descrever as formas utilizadas para obter o desenho CAD do bico utilizado nas análises numéricas. Embora o catálogo do fabricante apresente algumas dimensões gerais, não é possível a reprodução do desenho CAD apenas com essas informações.

Dessa maneira, o bico do modelo JSF-110-02 foi adquirido em uma loja de implementos agrícolas na região de Londrina-PR, Figura 3. Em seguida, procedeu-se à verificação de suas medidas externas e internas, e posteriormente o desenho CAD foi elaborado.

Figura 3 - Bico JSF-110-02



Fonte: anglasa.com.br, 2024.

3.1.1 Levantamento da geometria interna

Com o bico em mãos, inicialmente, foi necessário obter a geometria interna do mesmo. Para isso, utilizou-se vaselina e resina epóxi, conforme mostrado na Figura 4, com o objetivo de moldar seu interior e determinar sua geometria.

Figura 4 - Resina epoxi utilizada

Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa maneira, uma fina camada de vaselina líquida foi empregada no interior do bico, e com o mesmo objetivo de facilitar o desmolde posteriormente, uma haste de arame foi inserida. Em seguida, o bico foi colocado dentro de uma tampa de garrafa e a mistura de resina epóxi foi aplicada, conforme mostrado na Figura 5. O procedimento foi replicado 2 vezes e deixado secar durante 5 dias.

Figura 5 - Processo de molde

Fonte: Autoria própria (2024).

Após transcorrido o tempo supracitado, foram obtidas as geometrias internas referente ao bico JSF-110-02, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Geometrias internas

Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.2 Construção da geometria CAD

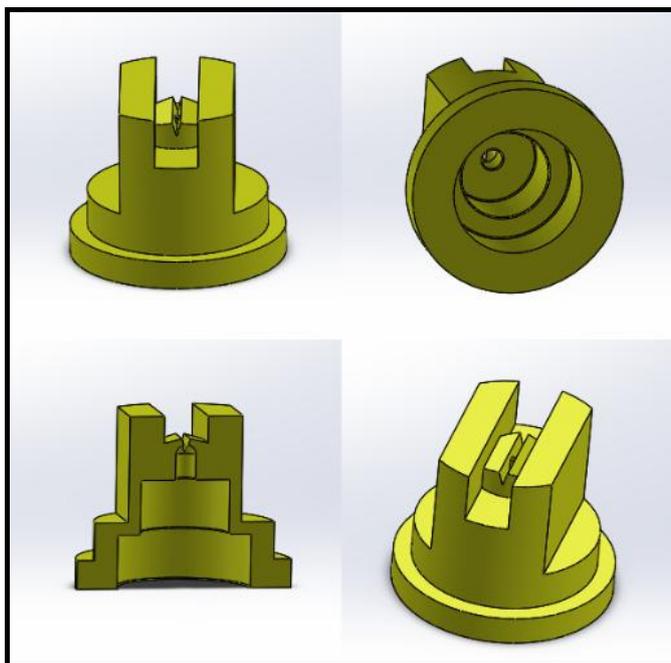
Em sequência, para averiguar as geometrias internas e externas do bico, foram utilizados um paquímetro e um micrômetro, os quais possuem resoluções de 0,05 mm e 0,01 mm, respectivamente. Os mesmos estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Instrumentos de medição

Fonte: Autoria própria (2024).

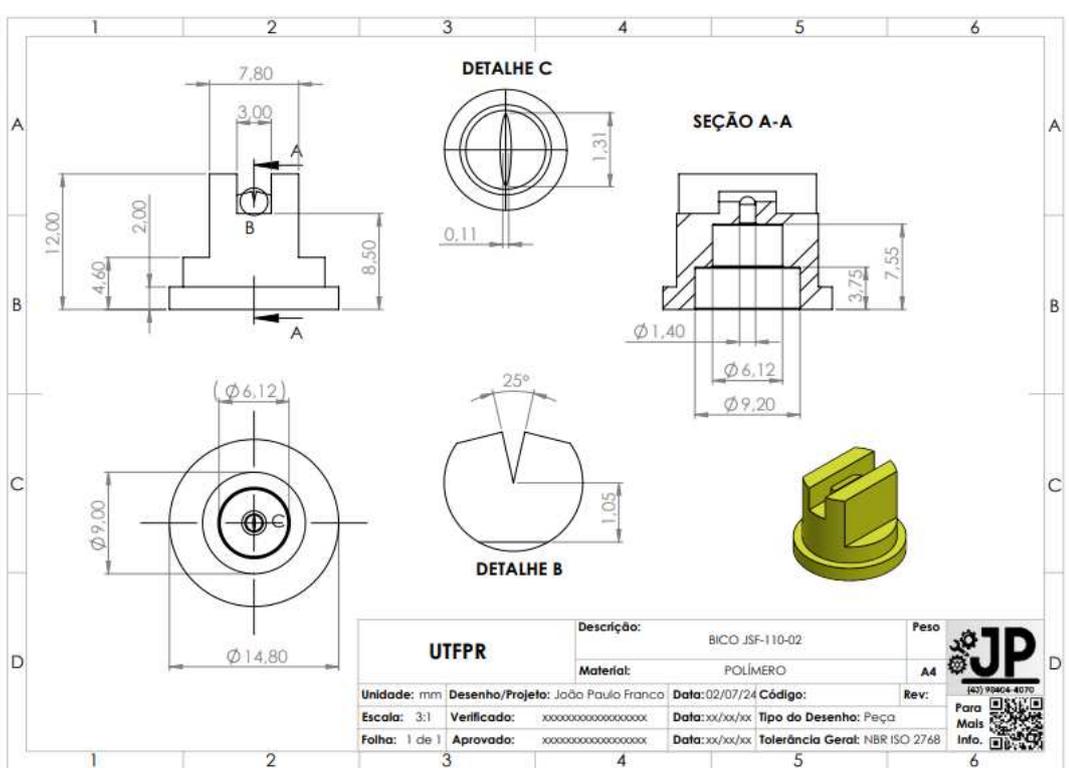
Com o advento das medias relativas a geometria do bico pulverizador, tornou-se possível o desenvolvimento do seu modelo CAD. Para isso, utilizou-se o software SolidWorks® para criar o desenho tridimensional, o qual está representado na Figura 8 e, em seguida, elaborado seu detalhamento, o qual pode ser observado na Figura 9.

Figura 8 - Desenho tridimensional do bico, desenvolvido no SolidWorks®



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 9 - Detalhamento do bico, desenvolvido no SolidWorks®

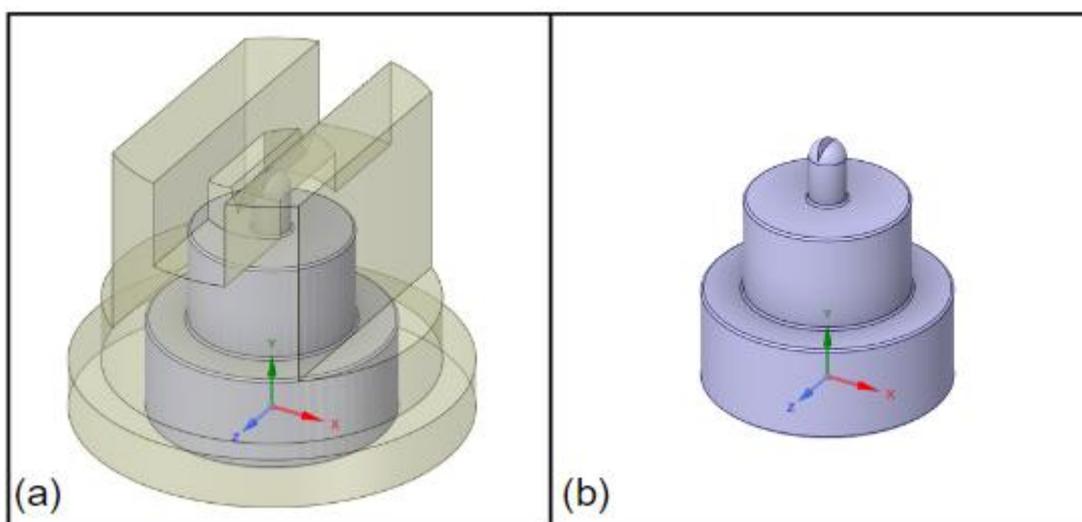


Fonte: Autoria própria (2024).

3.2 Construção do domínio computacional

Para a construção do domínio computacional e o desenvolvimento das simplificações necessárias para a simulação, utilizou-se o Software CAD SpaceClaim®. Desse modo, com o objetivo de minimizar o custo computacional, procedeu-se à simplificação da geometria previamente desenvolvida, Figura 10 (a), utilizando apenas a sua região interna, conforme demonstrado na Figura 10 (b).

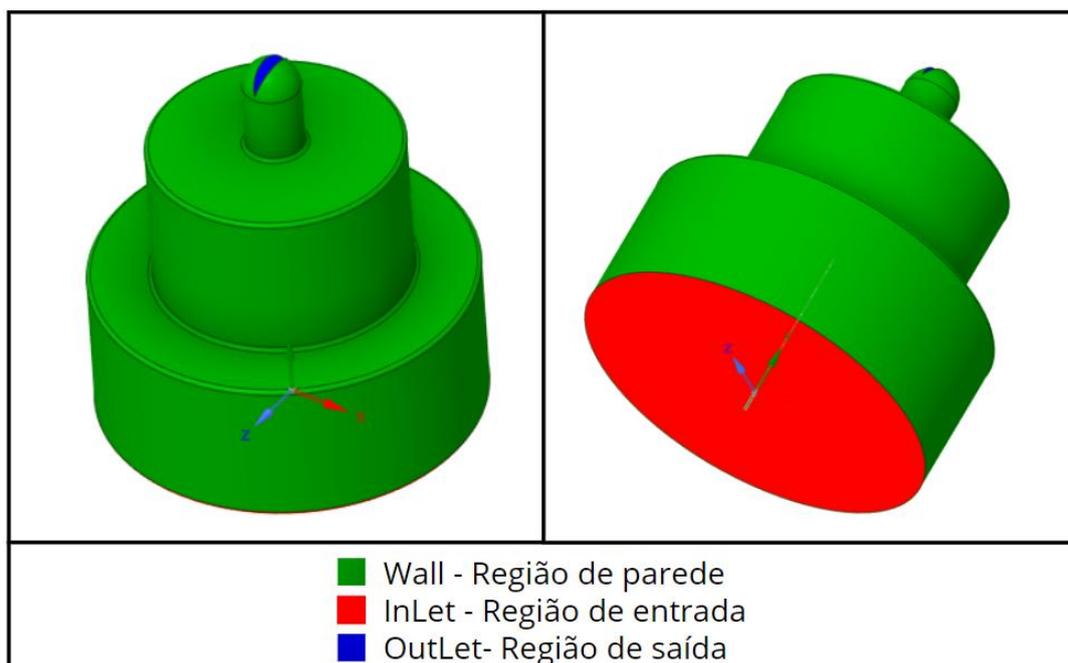
Figura 10 - Simplificação da geometria



Fonte: Autoria própria (2024).

Inicialmente, para a execução da simulação, utilizou-se o domínio computacional presente na Figura 11, o qual apresenta suas regiões para o fluxo do escoamento descritas na legenda como entrada, saída e parede.

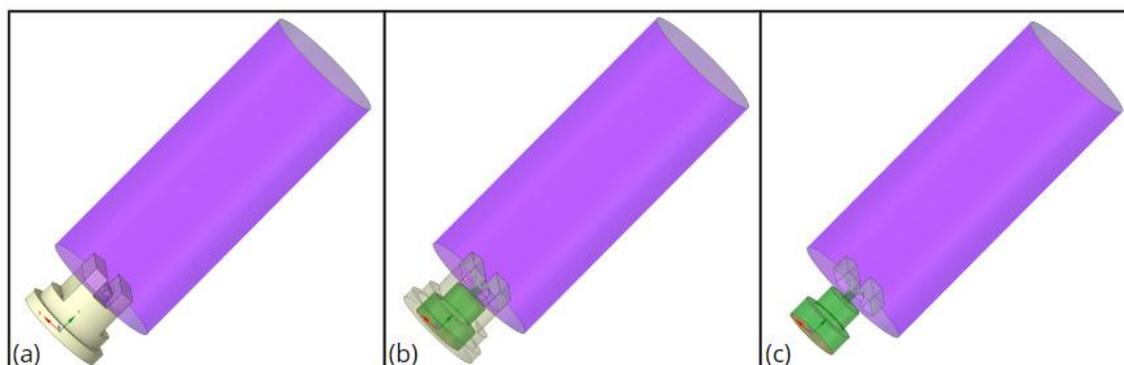
Figura 11 - Primeira opção de modelo



Fonte: Autoria própria (2024).

Posteriormente, foi desenvolvido um segundo modelo computacional, simplificado da geometria inicial, conforme evidenciado na Figura 12, onde a) representa a geometria com a inserção de uma região para o desenvolvimento do escoamento. Esse acréscimo tem por objetivo analisar e determinar se essa alteração terá algum impacto nos resultados obtidos. Já a Figura 12 b) representa a extração do volume interno do bico e, pôr fim, a Figura 12 c) nos fornece a simplificação final a qual será utilizada posteriormente nas simulações.

Figura 12 - Caracterização do modelo

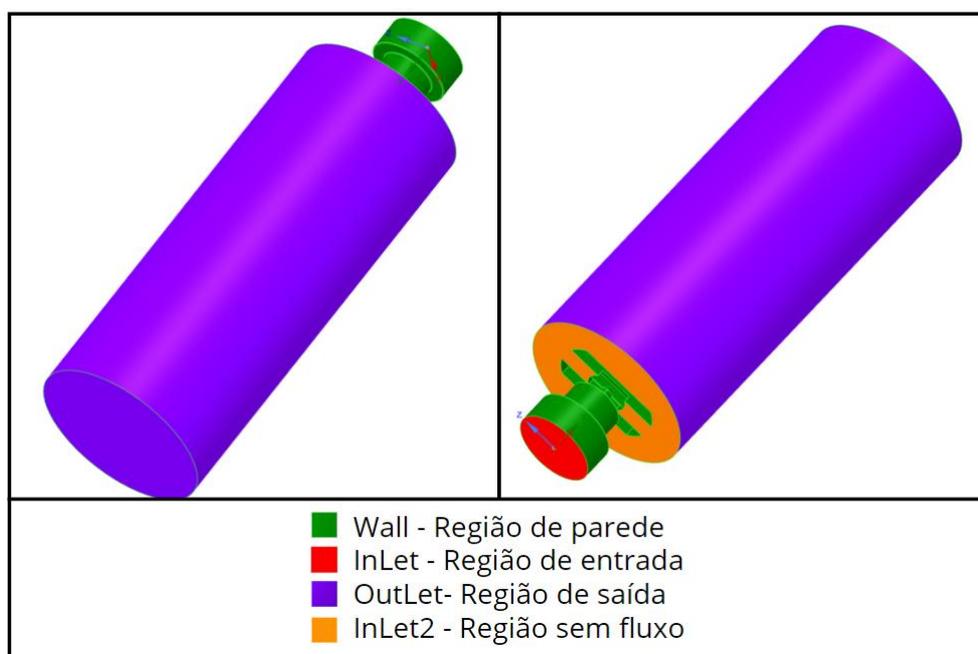


Fonte: Autoria própria (2024).

Desse modo, é possível observar na Figura 13, as regiões que compõem o domínio computacional para o segundo modelo, com destaque para a área designada

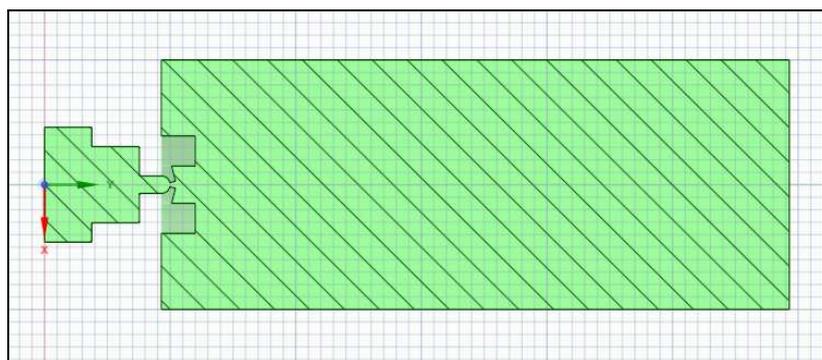
como 'InLet2', cuja função é evitar possíveis escoamentos reversos (*backflow*) caso fosse utilizada uma condição de saída nesta região. Além disso, na Figura 14 verificamos com maiores detalhes a região onde o fluxo do fluido estará presente.

Figura 13 - Segunda opção de modelo



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 14 - Vista em corte do domínio computacional



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3 Definições dos parâmetros para simulação da fase contínua

Nesta seção serão abordadas as definições e parâmetros utilizados para a realização da simulação, no software ANSYS® Fluent®, para a fase contínua, a qual representa o escoamento do fluido de trabalho no interior do domínio. Perante isso foi utilizado para as duas geometrias propostas o fluido denominado como Glifosato, o

qual representa, segundo a Associação nacional das empresas de produtos fitossanitários (AENDA), o defensivo agrícola mais utilizado no território nacional, apresentando características físicas presentes na Figura 15.

Figura 15 - Propriedade Físicas do Glifosato



9. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	
Aspecto (estado físico, forma e cor):	Líquido límpido de cor amarelo claro
Odor e limite de odor:	Característico.
pH:	5,0.
Ponto de fusão/ponto de congelamento:	Não atingiu o ponto de fusão até a temperatura máxima de 202,8°C, quando a substância teste se decompôs. (para o produto técnico)
Ponto de ebulição inicial e faixa de temperatura de ebulição:	100°C
Ponto de fulgor:	Acima de 80°C
Taxa de evaporação:	Não disponível.
Inflamabilidade (sólido; gás):	Não aplicável.
Limite inferior/superior de inflamabilidade ou explosividade:	Não disponível.
Pressão de vapor:	$1,55 \times 10^{-5}$ Pa (25°C). (para o produto técnico)
Densidade de vapor:	Não disponível.
Densidade relativa:	1,1612 g/cm ³ a 20°C.
Solubilidade (s):	Miscível em água nas dosagens máxima e mínima. (para o produto formulado) Água: 10,59 g/L (pH 2,01; 20°C) Acetona e metanol: < 0,0108 ng/μL (20°C) (para o produto técnico)
Coefficiente de partição – n-octanol/água:	Log kow < -4,649 (pH 1,195, 20,1°C) (para o produto técnico)
Temperatura de auto-ignição:	Não disponível.
Temperatura de decomposição:	Não disponível.
Viscosidade:	20,0 mPas à 20°C.
Outras informações:	Não aplicável.

Fonte: Autoria própria (2024).

Os parâmetros para a simulação da fase contínua apresentam-se a seguir: para os valores de entrada (*InLet*), foi utilizada a pressão como variável conhecida, a qual empregou-se valores de 2, 3 e 4 Bar. Além disso, foi considerado 5% de intensidade de turbulência, utilizando o modelo Kw-SST. Já para a região de saída (*OutLet*) foi empregado como parâmetro, a pressão atmosférica (pressão manométrica nula). E por fim para as regiões denominadas de parede (*Wall*) utilizou-se a condição de não deslizamento. Para o segundo modelo o qual apresenta duas regiões de entrada, como pode ser novamente observado na Figura 13, a região denominada como *InLet2*, foi definida com pressão manométrica nula, a fim de se evitar uma possível recirculação no local.

3.4 Elaboração da malha numérica

Para o desenvolvimento da simulação computacional, de antemão, fez-se necessário a criação de uma malha numérica, a qual sua influência nos resultados

apresentados pela simulação deve ser minimizada. Dessa maneira, nessa seção serão abordados os métodos utilizados para a criação das mesmas, para as quais foram utilizados os parâmetros da fase contínua, citados no capítulo anterior, sendo testadas 3 malhas diferentes a fim de analisar a independência perante a simulação.

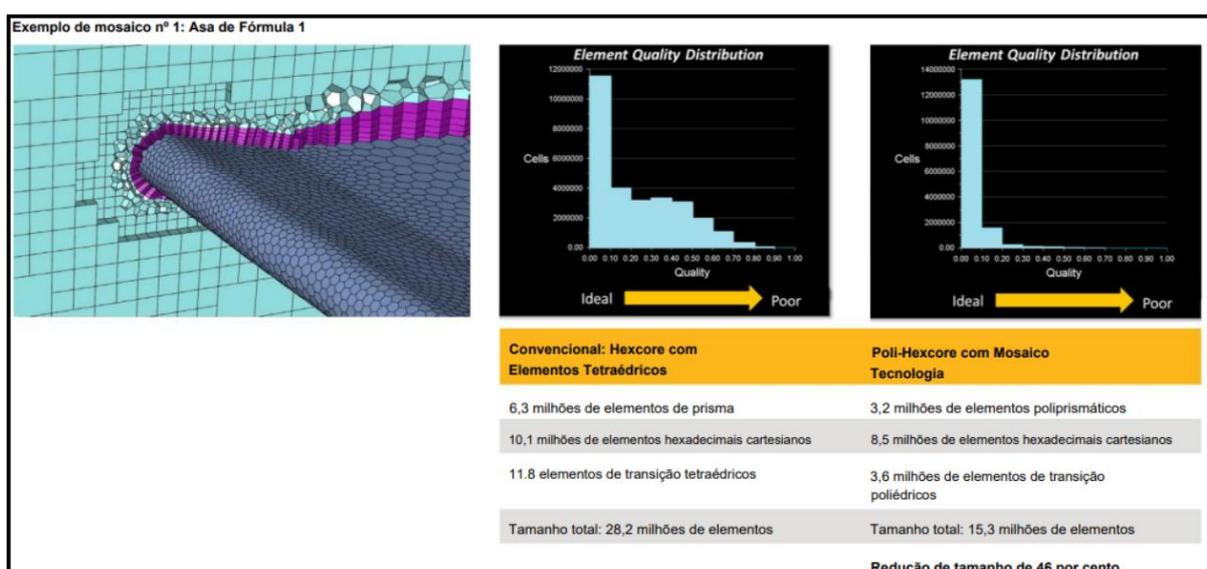
Para os dois modelos estabelecidos, foi utilizado o software Fluent®Meshing, empregando pressão de 2 bar na entrada como referência para todos os testes e o parâmetro de vazão volumétrica na região de saída (OutLet) para analisar a independência das malhas.

3.4.1 Utilização da malha Poly-Hexacore

Para o desenvolvimento das malhas nos modelos propostos, utilizou-se o método de malhagem "Poly-Hexacore". Este método consiste em preencher o volume com elementos hexágonos *octree* e poli prismas nas regiões de camada limite, conectando as duas geometrias com elementos poliédricos.

Dessa forma, empregou-se este modelo devido à sua eficiência, a qual é destacada pelo estudo realizado pela empresa Ansys (ANSYS 2020), que demonstra uma diminuição considerável no número de elementos necessários, resultando em uma redução no tempo de simulação e no consumo de memória RAM. Além disso, a qualidade dos elementos é aprimorada, conforme pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Estudo sobre a malha Poly-Hexacore

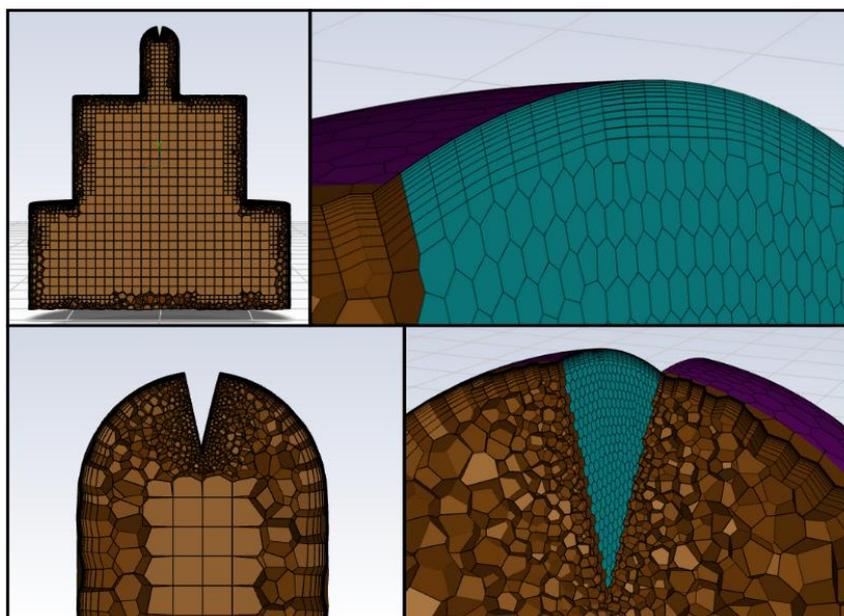


Fonte: ANSYS, inc (2020), tradução nossa.

3.4.2 Primeira opção de modelo

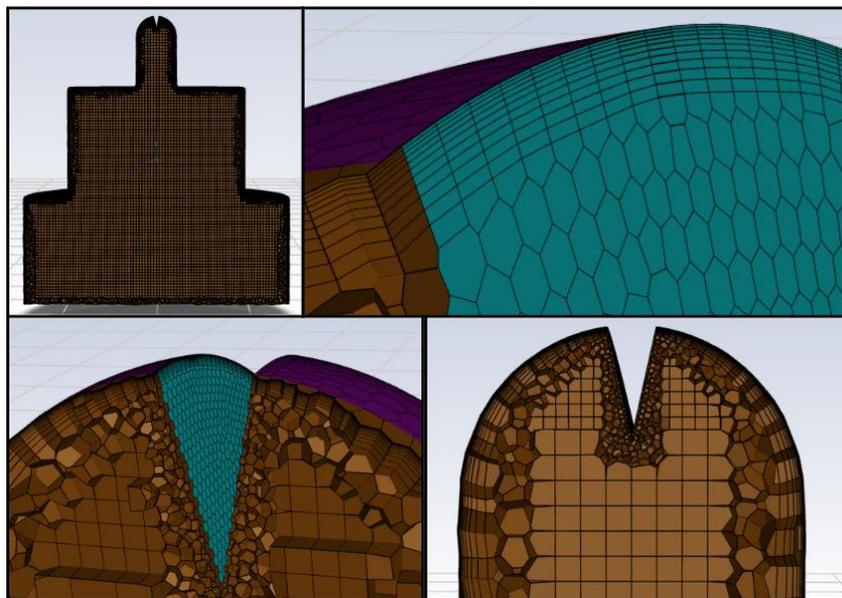
Para o primeiro modelo, representado na Figura 11, as configurações da malha seguiram a seguinte sequência: primeiramente, foi adicionado um refinamento de malha na região denominada *OutLet*, essa ação teve o objetivo de melhorar os resultados apresentados neste local, por ser a área de maior interesse perante a simulação. Em seguida, foi acrescentada uma malha de superfície que define a região da camada limite, a qual possui 10 sessões, buscando-se um valor para y^+ igual a 1. Posteriormente, foi definida uma malha de volume *Poly-hexacore* com características de hexaedros e que utiliza poliedros onde essa geometria não é possível. Por fim, foi aplicado um método do programa com o objetivo de melhorar a malha apresentada.

Figura 17 - Primeira malha do primeiro modelo



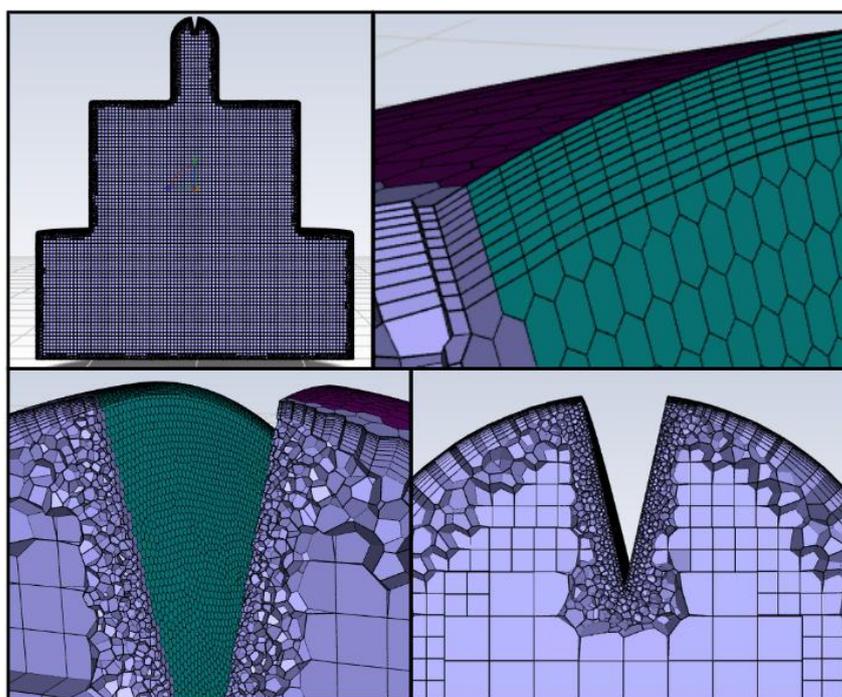
Fonte: Autoria própria (2024).

Para as 3 malhas propostas, foram utilizados os métodos supracitados. Sua diferenciação se obteve pela modificação dos valores numéricos apresentados nesses métodos. Dessa forma, a primeira malha, a qual pode ser observada detalhadamente na Figura 17, apresentou um total de 333.763 células, sendo o resultado do escoamento da vazão volumétrica na saída de 0,6594 L/min.

Figura 18 - Segunda malha do primeiro modelo

Fonte: Autoria própria (2024).

Para a segunda malha, a qual pode ser observada na Figura 18, os parâmetros dos métodos utilizados foram reduzidos parcialmente, totalizando um montante de 658.491 células e um valor de vazão volumétrica na saída de 0,6604 L/min.

Figura 19 - Terceira malha do primeiro modelo

Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, para a terceira malha, a qual pode ser observada na Figura 19, apresentou um total de 1.320.507 células e um valor de vazão volumétrica na saída de 0,6614 L/min.

Dessa maneira, como os resultados apresentaram valores aproximados, conforme Tabela 1 e 2, foi escolhido para a realização das simulações, a segunda opção de malha, por apresentar valor de célula intermediário com as demais.

Tabela 1 - Resultados para as 3 malhas do primeiro modelo proposto

Malhas	N° de células	Vazão (L/Min)
Malha 1	333.763	0,6594
Malha 2	658.491	0,6604
Malha 3	1.320.507	0,6614

Fonte: Autoria própria (2024).

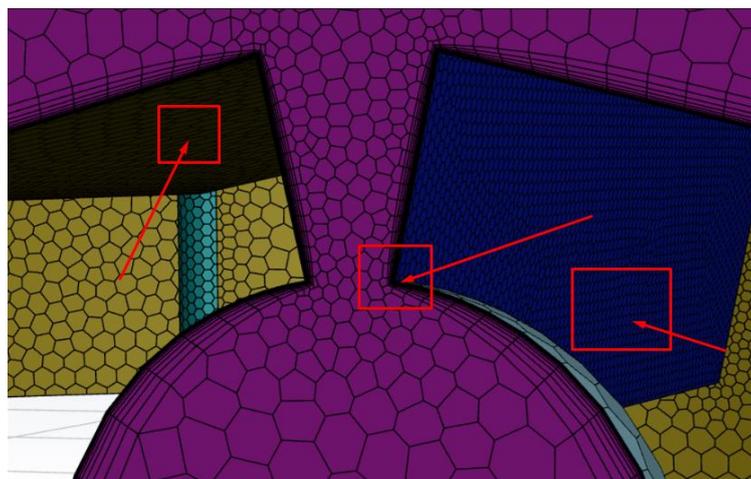
Tabela 2 – Variação Percentual

COMPARAÇÃO ENTRE AS MALHAS	VARIAÇÃO PERCENTUAL
Malha 1 para Malha 2	0,1514%
Malha 2 para Malha 3	0,1512%
Malha 1 para Malha 3	0,302%

Fonte: Autoria própria (2024).

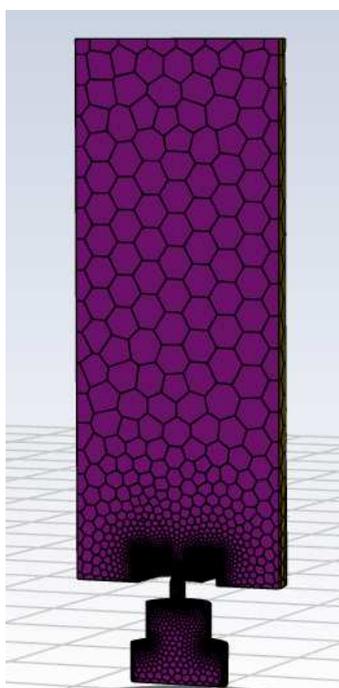
3.4.3 Segunda opção de modelo

Para o segundo modelo, o qual pode ser observado na Figura 13, os mesmos métodos aplicados no primeiro modelo foram utilizados para as novas malhas, com exceção da região de refino de malha, a qual foi alterada para as regiões destacadas na Figura 20, com o mesmo objetivo anterior de melhorar os resultados da simulação neste local.

Figura 20 - Locais de refino de malha

Fonte: Autoria própria (2024).

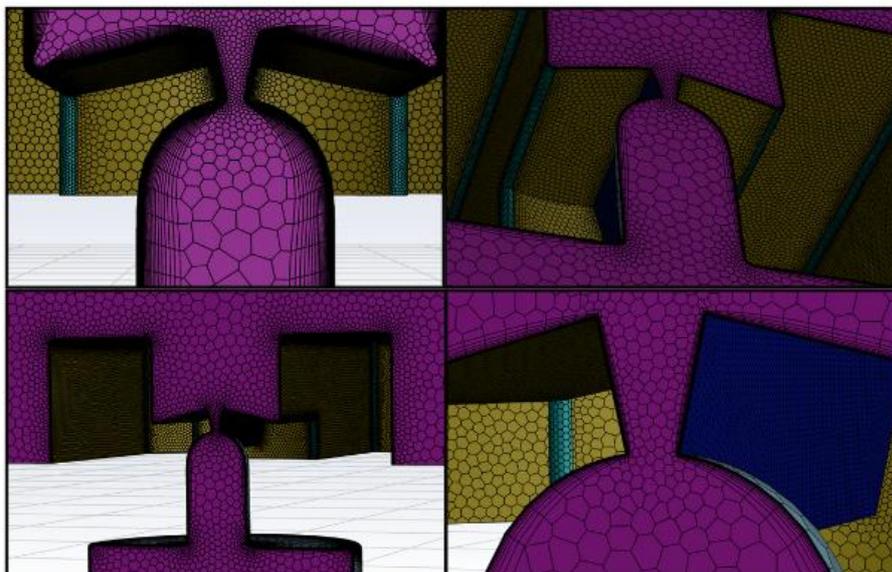
Para este modelo optou-se por utilizar apenas 2 malhas distintas. Além disso, para facilitar no processamento dos resultados, foi utilizado um plano de simetria, conforme ilustrado na Figura 21, o que possibilitou utilizar apenas metade da geometria proposta, diminuindo pela metade o número de elementos da mesma.

Figura 21 - Plano de simetria

Fonte: Autoria própria (2024).

Para a primeira malha, a qual pode ser observada com mais detalhes na Figura 22 abaixo, apresentou cerca de 1.060.764 células e um valor de vazão volumétrica na saída de 0,01921 L/min.

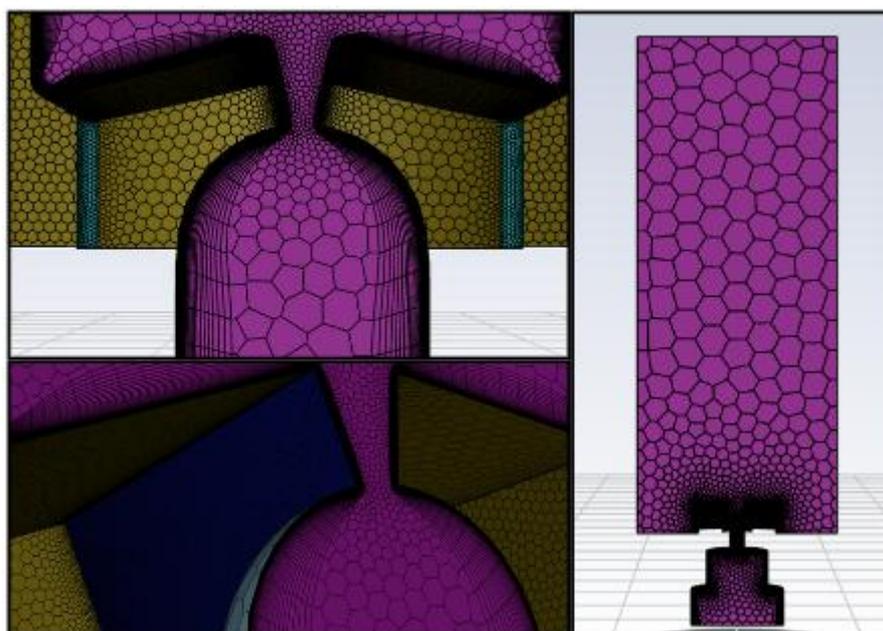
Figura 22 - Primeira malha do segundo modelo



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a segunda malha, que está ilustrada na Figura 23, foram reduzidos os valores dos métodos supracitados de malhagem utilizados, o qual proporcionou uma quantia de 3.699.279 células e vazão volumétrica na saída de 0,01993 L/min.

Figura 23 - Segunda malha do segundo modelo



Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos para a vazão volumétrica Tabela 3, a qual difere-se consideravelmente da vazão do primeiro modelo proposto,

como pode ser observado comparando as Tabelas 1 e 3, e para a vazão de catálogo esperada, a qual pode ser observada na Figura 24 abaixo, optou-se por descontinuar essa geometria do trabalho, dando continuidade apenas com o primeiro modelo de geometria da Figura 18.

Tabela 3 - Resultados para as 2 malhas do segundo modelo proposto

Malhas	Nº de células	Vazão (L/Min)
Malha 1	1.060.764	0,01921
Malha 2	3.699.279	0,01993

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 24 - Vazão de catálogo



02F80 & 02F110 L/ha - 50 cm Espaçamento

bar	Vazão L/min	TAXAS DE APLICAÇÃO (L/ha) a								
		4km/h	6km/h	8km/h	10km/h	12km/h	14km/h	16km/h	18km/h	20km/h
2.0	0.653	195.9	130.6	98.0	78.4	65.3	56.0	49.0	43.5	39.2
2.5	0.730	219.0	146.0	109.5	87.6	73.0	62.6	54.8	48.7	43.8
3.0	0.800	240.0	160.0	120.0	96.0	80.0	68.6	60.0	53.3	48.0
3.5	0.864	259.2	172.8	129.6	103.7	86.4	74.1	64.8	57.6	51.8
4.0	0.924	277.2	184.8	138.6	110.9	92.4	79.2	69.3	61.6	55.4

Fonte: Catálogo Hypro (2005).

Outros pontos que corroboram com essa decisão, foram a análise do campo de velocidade e pressão para essa geometria, os quais apresentaram valores irrealistas. Sob essa perspectiva, o fato das dimensões do bico, principalmente na região de saída do fluido, destacada na Figura 20, serem muito reduzidas, inferiores a 0,03mm, apresentou uma série de problemas para o desenvolvimento da malha e simulação, sendo uma possível causa deste problema, entretanto não foi possível determinar com exatidão a causa da discrepância nos resultados e dar continuidade do estudo com a referida geometria.

3.5 Definições dos parâmetros para simulação da fase discreta

Para a simulação da fase discreta, a qual representa a inserção de particulados e possibilita a análise do desgaste causado pelos mesmos, optou-se por utilizar o método DPM (*Discrete Phase Model*). Sendo realizada a simulação para

cada modelo proposto presente no Software Ansys, os quais podem ser observados na Figura 2.

Para a realização da simulação, foi tomado como base o artigo publicado por Nagy et al. (2014), que se refere a um estudo prático para análise do desgaste de alguns bicos pulverizadores. Desse modo, conforme as informações supracitadas, utilizou-se o particulado de caulim, um mineral composto por silicatos hidratados de alumínio, na concentração de 65,3 gramas de caulim para cada litro de água. Além de serem definidas algumas características físicas e químicas do mesmo, como sua dureza, a qual fica em torno de 50 a 70 Brinell, e sua densidade de 2,6 g/cm³.

Além disso, com o advento das informações presentes no estudo citado, realizou-se uma alteração no fluido de trabalho utilizado na fase contínua, que passou a ser água em vez de glifosato. Essa escolha foi motivada pela semelhança dos resultados encontrados em relação à vazão de ambos os fluidos, conforme mostrado na Tabela 5, e pela dificuldade na identificação da distribuição dos particulados presentes no glifosato.

3.5.1 Distribuição de particulado

Devido à dificuldade em encontrar valores das distribuições dos particulados presentes nos agrotóxicos atuais, optou-se por utilizar três variações diferentes para as simulações e analisar os efeitos das mesmas. Assim, para a primeira distribuição utilizada, tomou-se como base o trabalho desenvolvido por Yahaya et al., denominado 'Composição química e análise do tamanho de partículas do caulim', publicado na revista científica *Path of Science* em 2017, vol. 3, n.º 10. Este trabalho destaca que a distribuição de caulim se encontra na faixa de 25 a 35 µm.

Para a segunda distribuição proposta, utilizou-se o trabalho 'Determinação de tamanho de partículas de resíduos e separação por filtração na produção herbácea', publicado em 2018 na Universidade de Uberaba pelos autores Chaves e Finzer. Este trabalho relata que os particulados presentes em alguns agrotóxicos se encontram, em sua maioria, na faixa de 2,49 a 6 µm de diâmetro.

Por fim, para uma terceira distribuição, optou-se por utilizar uma variação de 0,1 a 2 µm de diâmetro, uma vez que algumas publicações identificaram que os particulados encontrados em agrotóxicos e na própria água apresentam tamanhos inferiores a 2 µm. Desse modo, na Tabela 4 é possível identificar os parâmetros

utilizados para a simulação da fase discreta para cada distribuição mencionada anteriormente.

Tabela 4 - Parâmetros para simulação da fase discreta

PARÂMETROS PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE PARTICULADOS			
	0,1 a 2 µm	2,49 a 6 µm	25 a 35 µm
TIPO DE INJEÇÃO	Superficial	Superficial	Superficial
TIPO DE PARTICULA	Inerte	Inerte	Inerte
MATERIAL DO PARTICULADO	Caulim	Caulim	Caulim
DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO	Rosin-rammler	Rosin-rammler	Rosin-rammler
VELOCIDADE	0,33 m/s	0,33 m/s	0,33 m/s
TAXA DO FLUXO	0,00081 kg/s	0,00099 kg/s	0,001153 kg/s
DIÂMETRO MÍNIMO	0,1 µm	2,49 µm	25 µm
DIÂMETRO MÁXIMO	2 µm	6 µm	35 µm
DIÂMETRO MÉDIO	1 µm	4,5 µm	20 µm
Nº DE DIÂMETROS	10	10	10

Fonte: Autoria própria (2024).

A variável velocidade do particulado foi identificada por meio da simulação para a fase contínua, considerando a região de entrada como base. Além disso, a taxa de fluxo foi obtida através da utilização da Equação 3.1, onde “ \dot{m} ” é a taxa do fluxo em kg/s, “ \dot{m}_p ” é a taxa de fluxo do particulado em kg/m³, “ \dot{m}_f ” é a taxa do fluxo do fluido em Kg/s e “rho” é a densidade do fluido em kg/m³.

$$\dot{m} = \dot{m}_p \left(\frac{\dot{m}_f}{rho} \right) \quad (3.1)$$

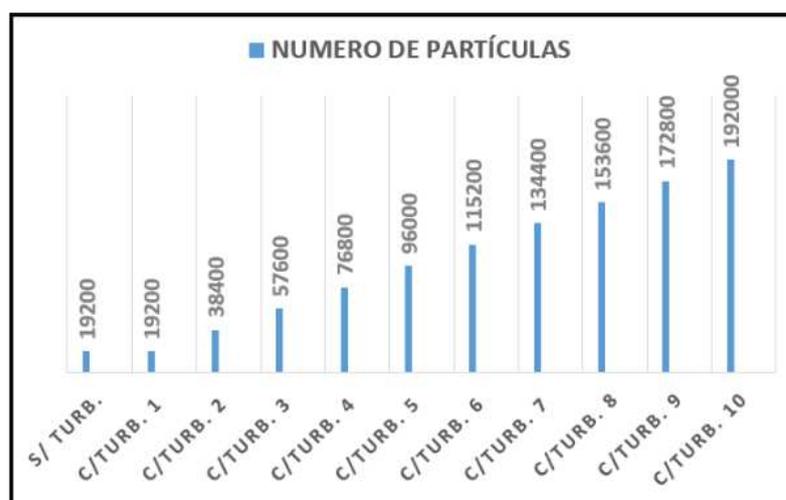
3.5.2 Parâmetros para o desenvolvimento dos resultados.

Para analisar o efeito da turbulência no desgaste de bicos pulverizadores, utilizou-se o método de *Discrete Random Walk* (DRW), o qual proporciona a emulação dos efeitos da turbulência nas trajetórias percorridas pelo particulado ao longo do domínio computacional. Foram realizadas 11 análises diferentes para cada distribuição de particulado, simulando os efeitos do desgaste no bico pulverizador a uma pressão de operação de 3 bar, tanto para situações sem a consideração da turbulência sobre a fase discreta quanto com o incremento da turbulência, aplicando-se de 1 a 10 iterações de partículas para cada caso.

As iterações das partículas, também chamadas de tentativas pelo software Fluent, são o processo que simula a passagem das partículas em um valor pré-

determinado, somando o total de partículas que passam pelo fluxo, como pode ser observado na Figura 25. Esse efeito melhora os resultados encontrados; entretanto, proporciona um aumento no custo computacional a cada tentativa.

Figura 25 – Quantidade de particulados para cada iteração.



Fonte: Autoria própria (2024).

Sendo na Figura 25 a legenda S/TURB. a simulação sem a utilização do DRW e C/TURB 1, 2,... as simulações com a utilização do DRW e o respectivo número de tentativas. Com os valores obtidos com a utilização da turbulência, optou-se por utilizar para os cálculos do desgaste máximo e médio o valor referente a 4 iterações de partículas.

A análise do desgaste máximo para os quatro métodos utilizados procedeu-se com a aplicação das três pressões de operação em conjunto das três distribuições de particulados, totalizando um total de 36 simulações, as quais estão presentes no capítulo 4.

Para a análise do desgaste médio e a obtenção dos resultados referentes a cada método, pressão de operação e distribuição de particulados, foi utilizada a Equação 3.2. Nessa equação, 'Te' expressa o valor da taxa de erosão em Kg/s, 'Ab' representa a área da superfície do bico, com valor de 0,00002533 m², e 'TA' descreve o valor da taxa de erosão para cada simulação, dado em Kg/m²*s, determinado após as simulações no software Fluent.

$$Te = Ab \cdot TA \quad (3.2)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, são apresentados os resultados das análises realizadas para a fase contínua e discreta da dinâmica de fluidos computacional, referente ao desgaste do bico pulverizador agrícola JSF-110-02

4.1 Fase contínua

Para a fase contínua, a qual representa apenas a passagem do fluido pela geometria do bico, foi realizada a análise para quatro parâmetros, referentes a cada pressão de operação proposta, 2, 3 e 4 bares. Esses estudos se referem à vazão volumétrica da saída do bico, velocidade, pressão e linhas de corrente.

A vazão volumétrica foi analisada para dois fluidos distintos, glifosato e água, conforme descrito no capítulo anterior. Os resultados dessas análises podem ser observados na Tabela 5. Como a densidade dos dois fluidos de trabalho é semelhante, os resultados obtidos apresentaram valores muito próximos, o que pode ser verificado pela diferença relativa apresentada na Equação 4.1. Nessa equação, 'Dr' é a diferença relativa, 'Va' é a vazão da água em L/min, e 'Vg' é a vazão do glifosato em L/min. Diante disso, as análises subsequentes utilizaram a água como fluido de trabalho. Além disso, é possível observar os valores obtidos para as três pressões de operação, que, quando comparados com o catálogo do fornecedor do bico, Figura 24, apresentam valores correspondentes.

Tabela 5 - Diferença relativa entre os dois fluidos de trabalho

VAZÃO EM L/min			
	ÁGUA	GLIFOSATO	VARIAÇÃO
2 BAR	0,6584	0,6594	0,16%
3 BAR	0,8110	0,8161	0,63%
4 BAR	0,9440	0,9497	0,60%

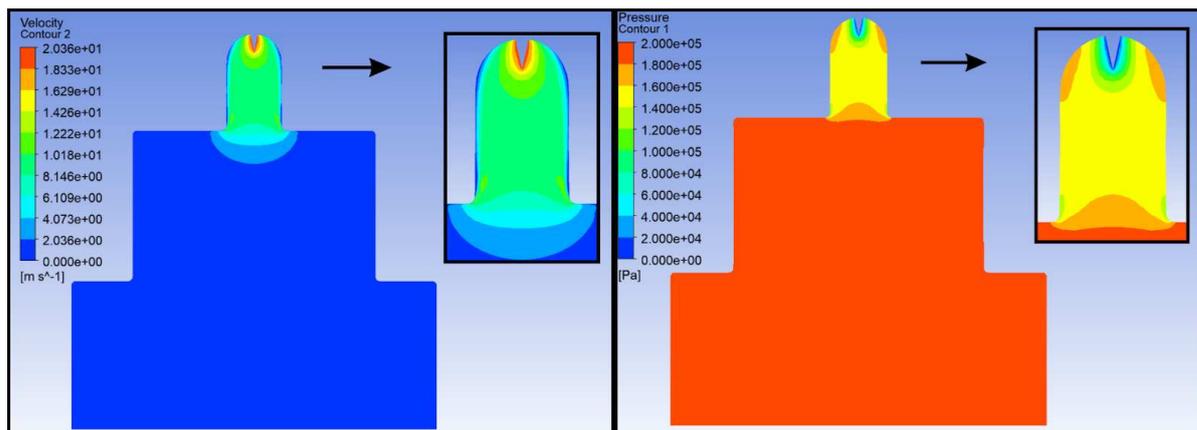
Fonte: Autoria própria (2024).

$$Dr = \left(1 - \frac{Va}{Vg}\right) 100 \quad (4.1)$$

Em sequência, foram analisadas a velocidade, a pressão e as linhas de corrente para cada pressão de operação. Ao observar as Figuras 26, 27 e 28, é evidente a semelhança dos mapas de cores apresentados, que se diferenciam apenas pela magnitude dos resultados. Estes referem-se à velocidade e à pressão dos

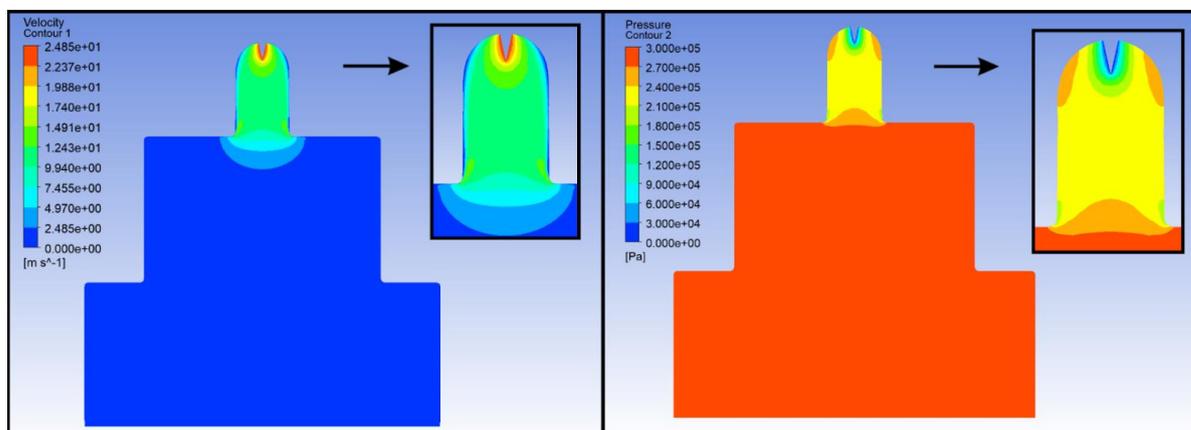
modelos. Assim, é possível identificar o aumento da velocidade à medida que o fluxo se desloca da entrada, região com maior diâmetro, até a extremidade do bico. Em contrapartida, a pressão tende a diminuir, passando dos valores da pressão de operação até a pressão ambiente nessa mesma direção.

Figura 26 - Velocidade e pressão para 2 bar



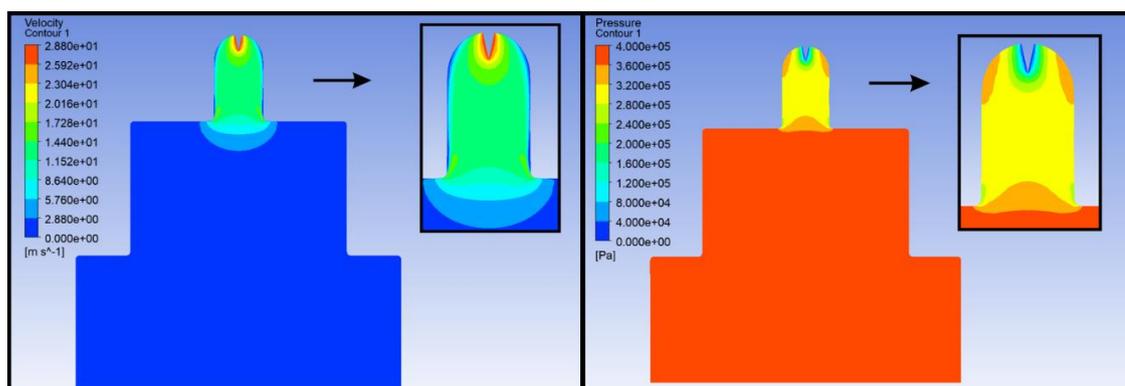
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 27 - Velocidade e pressão para 3 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

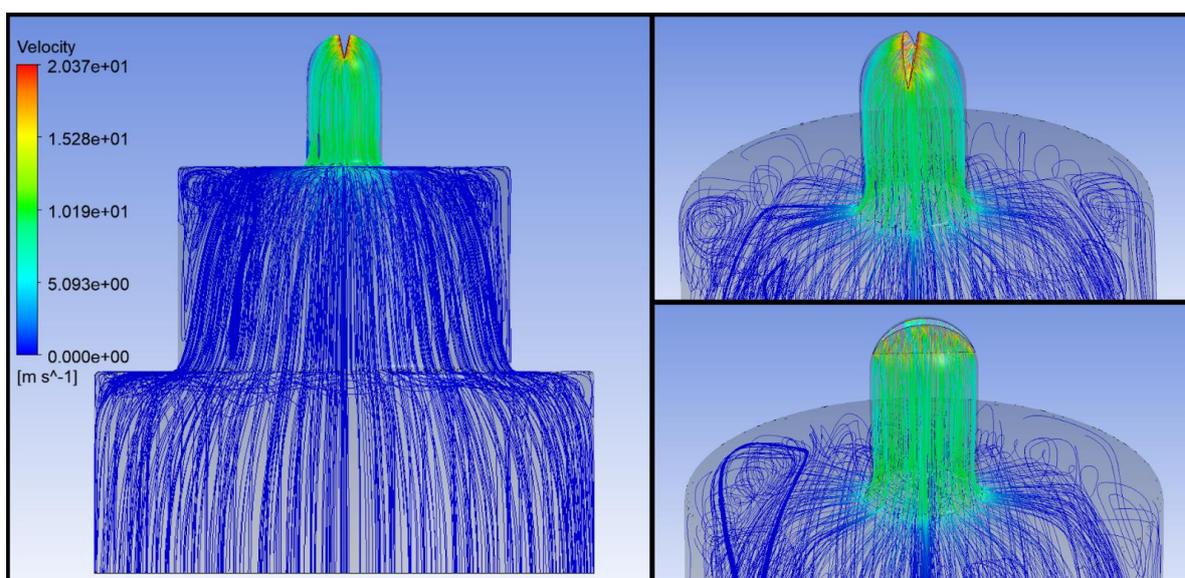
Figura 28 - Velocidade e pressão para 4 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

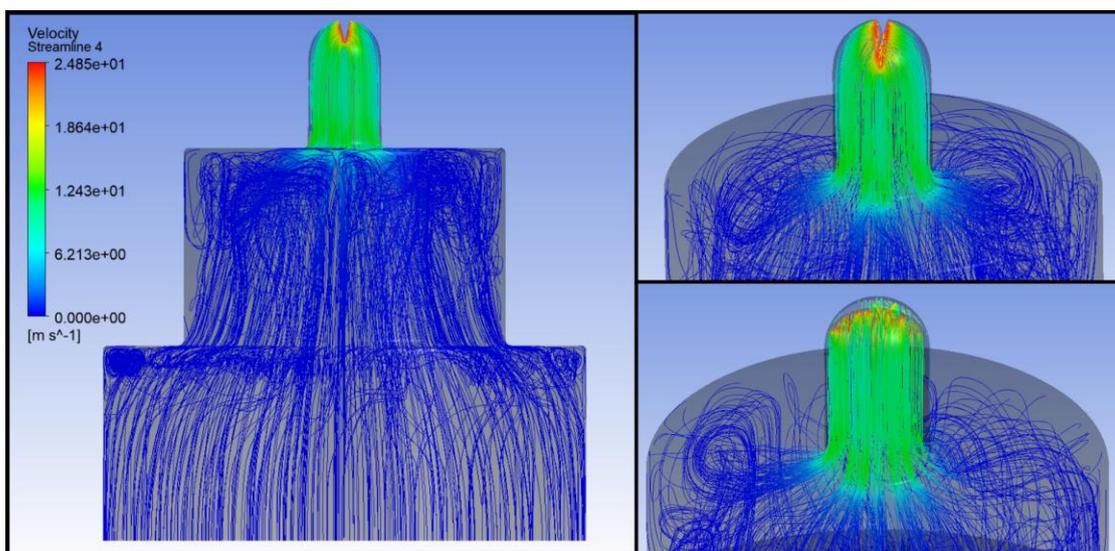
Outra análise de suma importância refere-se às linhas de corrente do fluido, que permitem observar o caminho percorrido pelo mesmo e, posteriormente, pelo particulado adicionado. Ao observar as Figuras 29, 30 e 31, que novamente apresentam muita similaridade, é possível identificar o aumento da velocidade do fluido, bem como algumas zonas de recirculação, concentradas nas regiões com variação do diâmetro do bico. Principalmente, como representado à direita das figuras, nas regiões superiores do bico.

Figura 29 - Linhas de corrente para 2 bar.



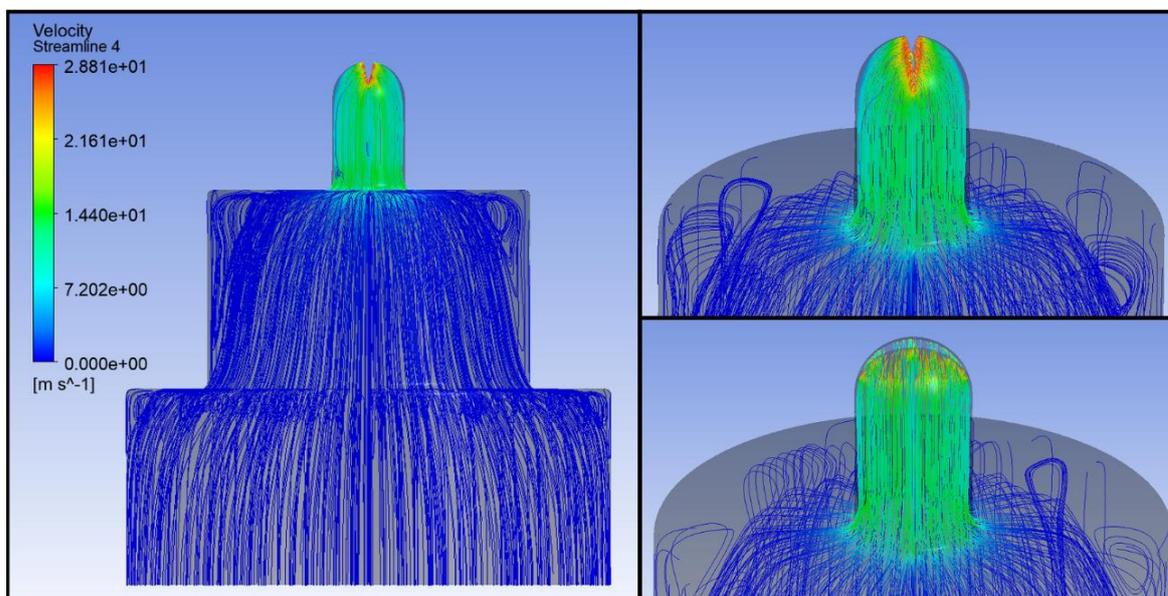
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 - Linhas de corrente para 3 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 31 - Linhas de corrente para 4 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Fase discreta

Na fase discreta, que representa a inserção do particulado na simulação e que causa o desgaste dos bicos pulverizadores, foram analisados três parâmetros distintos: a influência do modelo de turbulência proposto, o desgaste máximo do bico,

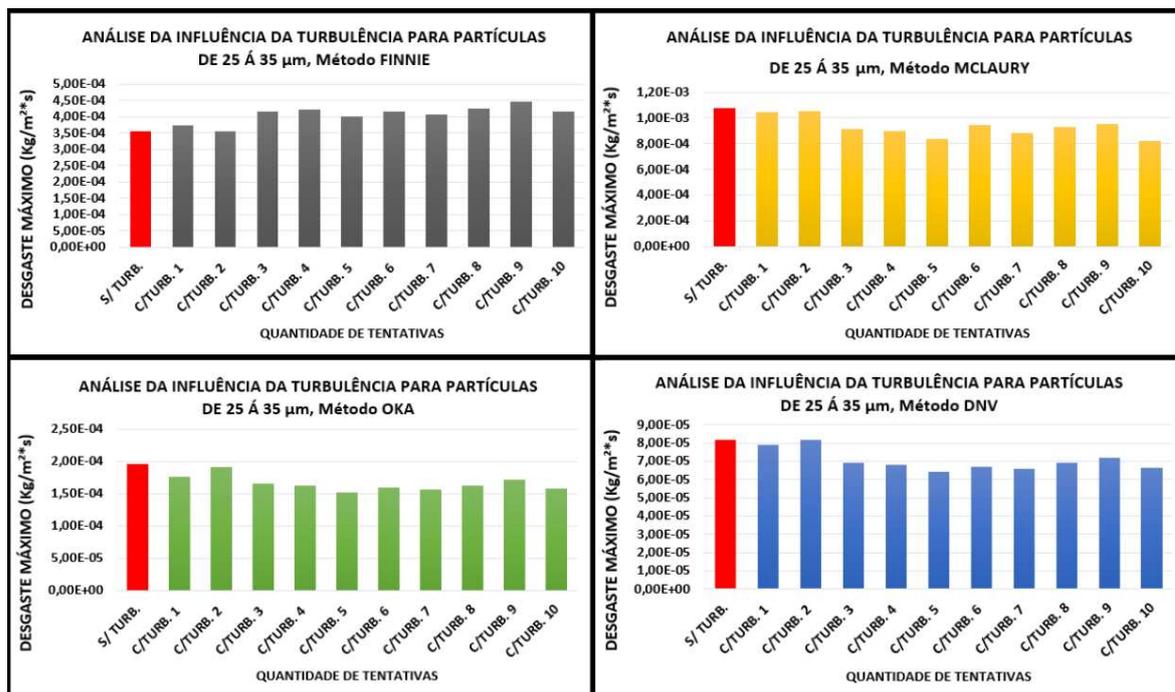
em $\text{kg/m}^2\text{s}$, e o desgaste médio, em kg/s de material erodido. Para isso, foram utilizados quatro modelos previstos na literatura, Finnie, Mclaury, Oka e DNV, que estão disponíveis no software utilizado, como descrito nos capítulos anteriores.

4.2.1 Influência da turbulência

O estudo da influência da turbulência foi necessário para compreender seu impacto no comportamento das partículas e, conseqüentemente, no desgaste ao longo do bico pulverizador. Na simulação da fase discreta, utilizou-se o modelo de turbulência DRW, que adiciona flutuações de velocidade à velocidade média obtida para a fase contínua com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Esse modelo emula as flutuações instantâneas causadas pela turbulência ao somá-las ao campo médio de velocidades. Dessa forma, foram analisados os efeitos da turbulência para três faixas de distribuição de partículas definidas anteriormente: 25 a 35 μm , 2,49 a 6 μm e 0,1 a 2 μm , todas testadas sob pressão de 3 bar.

Primeiramente, foi analisado o efeito da turbulência para a distribuição de 25 a 35 μm , como pode ser observado na Figura 32. Nessa análise, é possível perceber que a utilização do modelo de turbulência para a fase discreta não proporciona grande variação no desgaste do bico, independentemente do modelo de erosão utilizado. Esse fato ocorre devido à inércia das partículas na distribuição; partículas maiores possuem mais inércia, sendo assim, menos suscetíveis a pequenas flutuações impostas à velocidade média do escoamento (fase contínua). Portanto, elas tendem a seguir o fluxo médio do escoamento, dessa forma, o desgaste apresenta valores similares para todas as iterações e para o teste sem o efeito da turbulência na fase discreta.

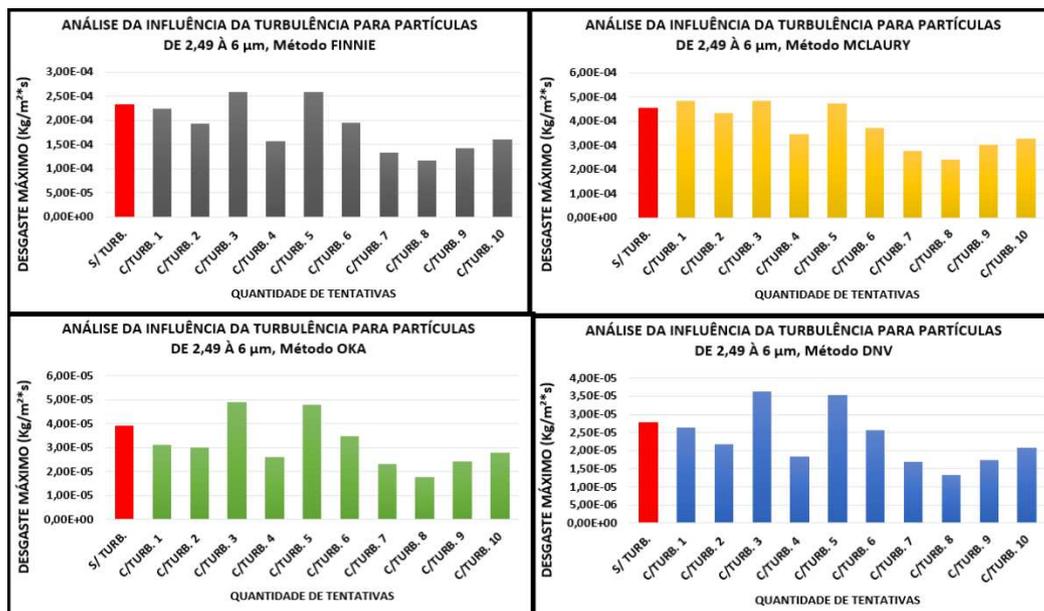
Figura 32 - Análise da influência da turbulência para partículas de 25 a 35 µm



Fonte: Autoria própria (2024).

Em sequência, é possível observar na Figura 33 a influência da turbulência nas partículas de 2,49 a 6 μm , que apresentam uma tendência de redução do desgaste à medida que o número de iterações aumenta. Isso ocorre devido à redução do diâmetro em comparação com o particulado anteriormente citado, aumentando assim a influência da trajetória instantânea do fluxo, emulada pelo DRW. Isso promove um aumento na dispersão do particulado, aumentando a área de contato partículas/parede, reduzindo, conseqüentemente, o desgaste máximo.

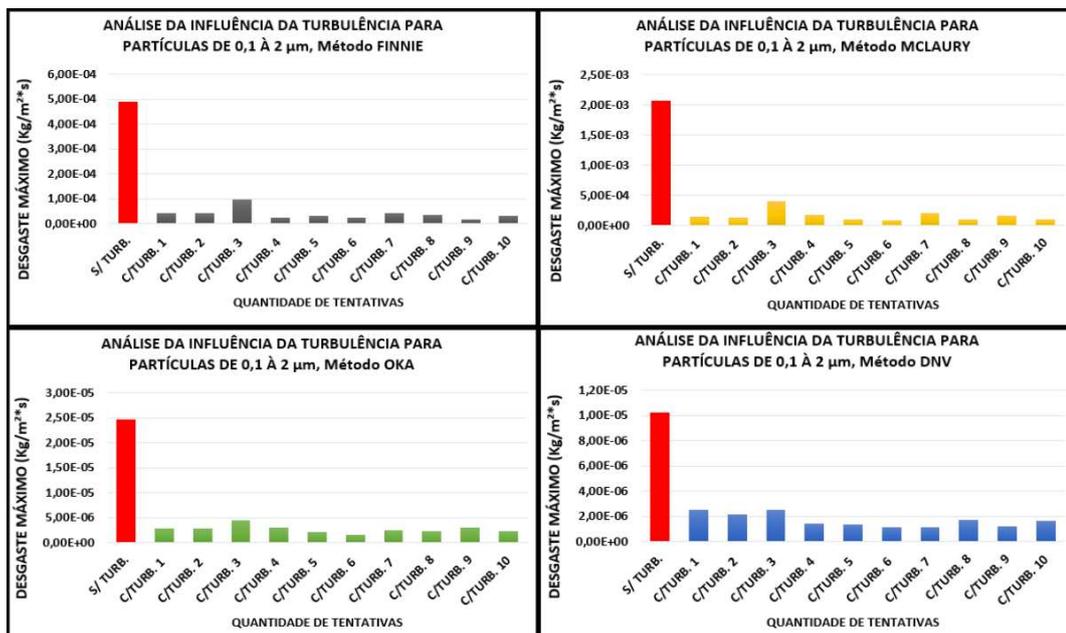
Figura 33 - Análise da influência da turbulência para partículas de 2,49 a 6 µm



Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, ao observar a Figura 34, que representa a influência da turbulência nas partículas com diâmetros entre 0,1 e 2 μm , torna-se evidente o efeito da turbulência na fase dispersa para partículas de pequeno diâmetro, resultando em uma redução significativa do desgaste máximo no bico em comparação com um modelo sem turbulência. Esse efeito ocorre devido à baixa inércia das partículas, que seguem as flutuações instantâneas do campo de velocidade. Em outras palavras, partículas pequenas tendem a acompanhar as flutuações do escoamento da fase contínua, dada sua baixa inércia. Além disso, como mostrado na Figura 30, diversas zonas de recirculação dificultam o contato das partículas com a parede do bico, reduzindo o desgaste.

Figura 34 - Análise da influência da turbulência para partículas de 0,1 a 2 µm

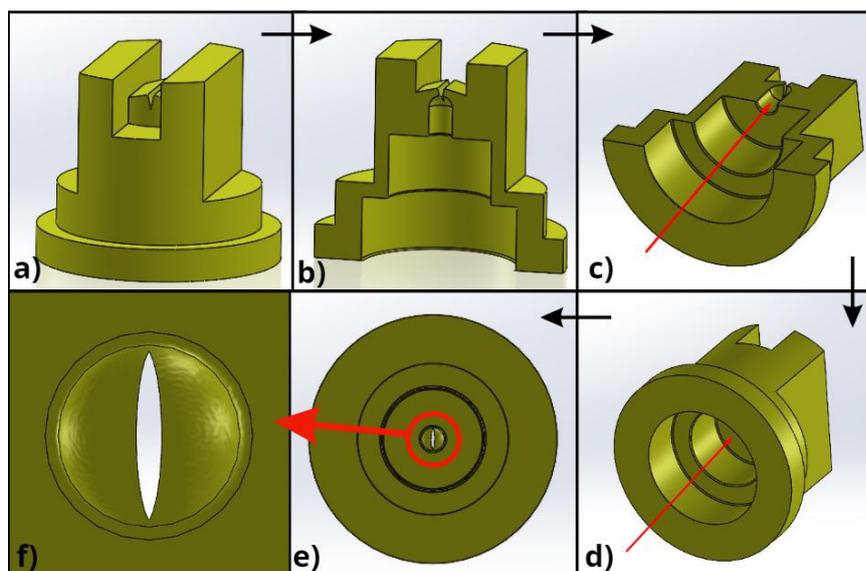


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Compreensão das Figuras apresentadas

Este tópico pretende facilitar a compreensão da representação gráfica das imagens subsequentes. A Figura 35 a) e b) evidencia o bico pulverizador e seu plano de corte; a Figura 35 c) e d) indica a direção de observação pretendida; e, por fim, a Figura 35 e) e f) representa como as figuras com os resultados serão exibidas.

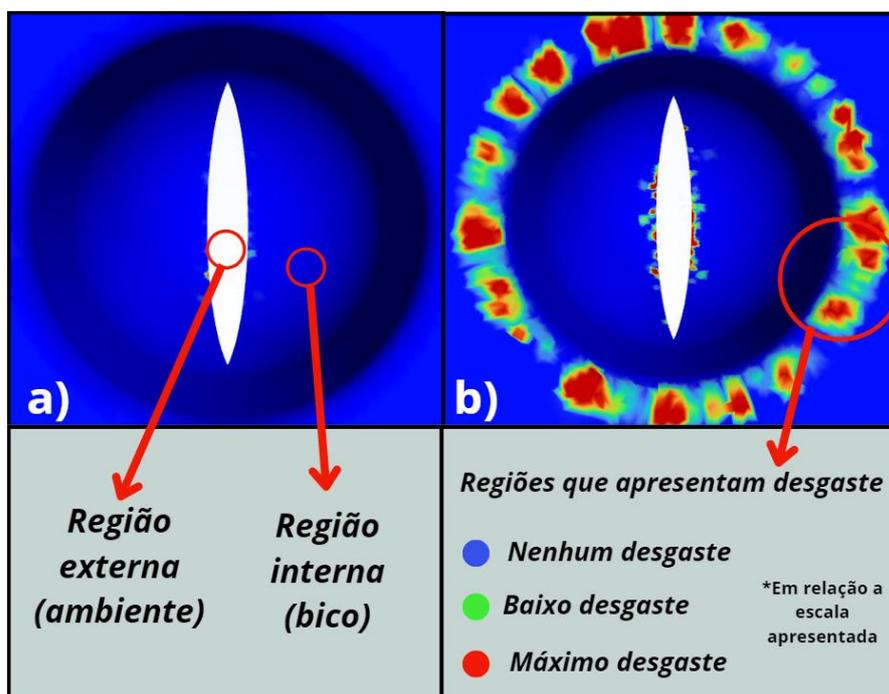
Figura 35 - Demonstrativo para a visualização dos resultados



Fonte: Autoria própria (2024).

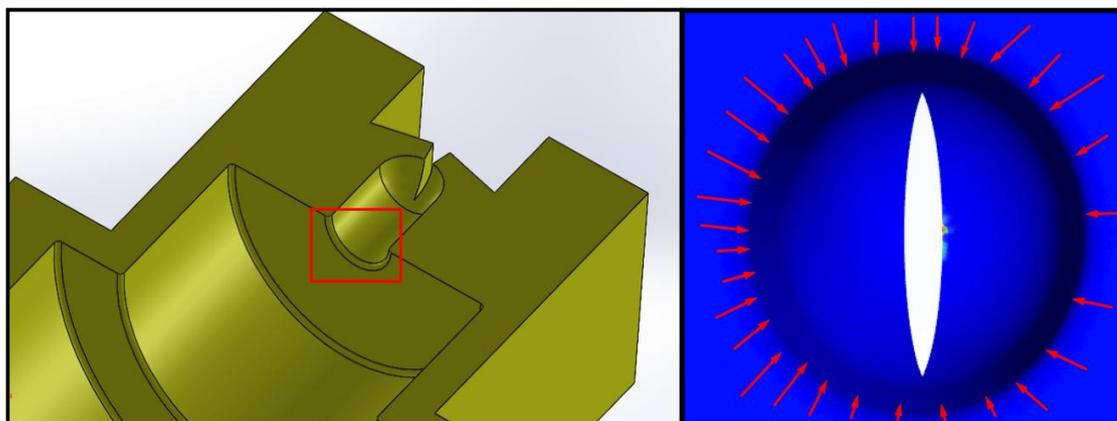
Ademais, na Figura 36 a), é possível observar as regiões presentes na simulação: a região externa, de coloração branca, onde o fluido de trabalho e o particulado sairão; e a região interna, de coloração azulada, que representa a parede que sofrerá o desgaste. Já na Figura 36 b), é retratada a representação do desgaste e suas colorações, evidenciando a magnitude do mesmo, onde as cores frias indicam um baixo teor de desgaste e as cores quentes indicam um alto teor.

Figura 36 - Legenda para compreensão dos resultados

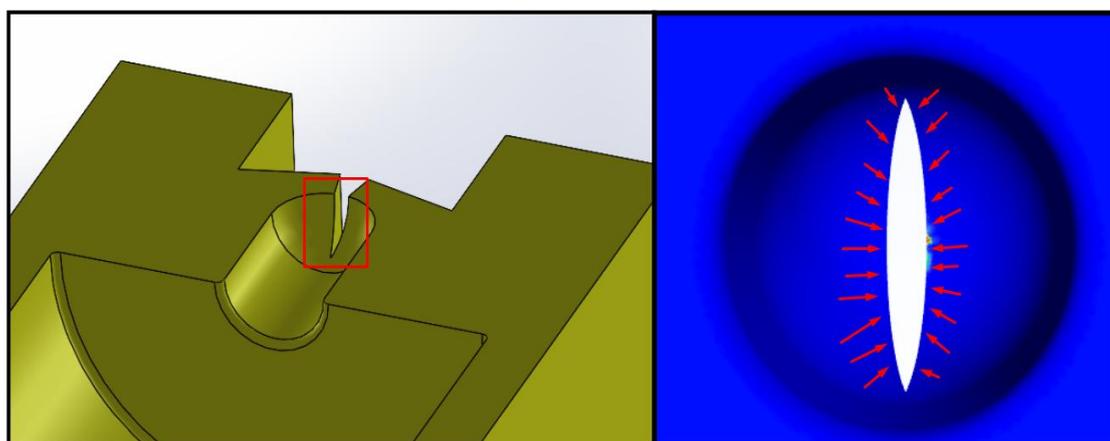


Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, presente nas Figuras 37 e 38, estão destacadas, em vermelho, as regiões no bico pulverizador agrícola nas quais as distribuições de desgaste estarão mais presentes, e que serão abordadas ao longo dos próximos tópicos.

Figura 37 - Zona de desgaste na borda do bico

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 38 - Zona de desgaste na ponta do bico

Fonte: Autoria própria (2024).

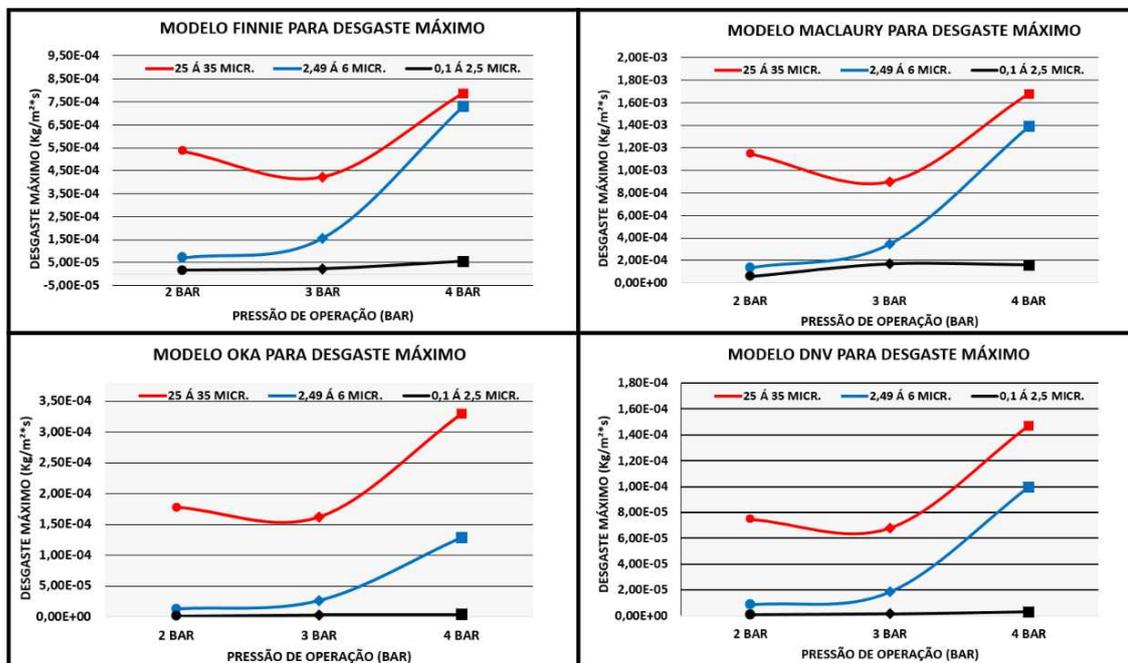
4.2.3 Análise do desgaste máximo.

Neste tópico, serão apresentados os valores de desgaste máximo, em $\text{kg/m}^2\text{-s}$, para cada método numérico e para as pressões de operação utilizadas. Além disso, para cada caso, foram utilizadas representações gráficas que demonstram a magnitude e a localização espacial onde ocorreram os desgastes mencionados. Em seguida, é possível observar na Figura 39 gráficos que representam as informações supracitadas para os quatro modelos presentes na literatura. Dessa forma, torna-se evidente a semelhança entre os modelos, que apresentam comportamentos físicos muito semelhantes, mas com magnitudes distintas.

Ademais, é notória a relação entre o diâmetro das partículas e a variável do desgaste, onde quanto maior for a partícula, maior é o desgaste observado. De forma análoga, o mesmo ocorre com o aumento da pressão de operação; conforme a

pressão aumenta, maior é o desgaste avaliado. Exceto pela distribuição de 25 a 35 μm , que para pressões de 3 bar apresenta uma variação nesta lógica.

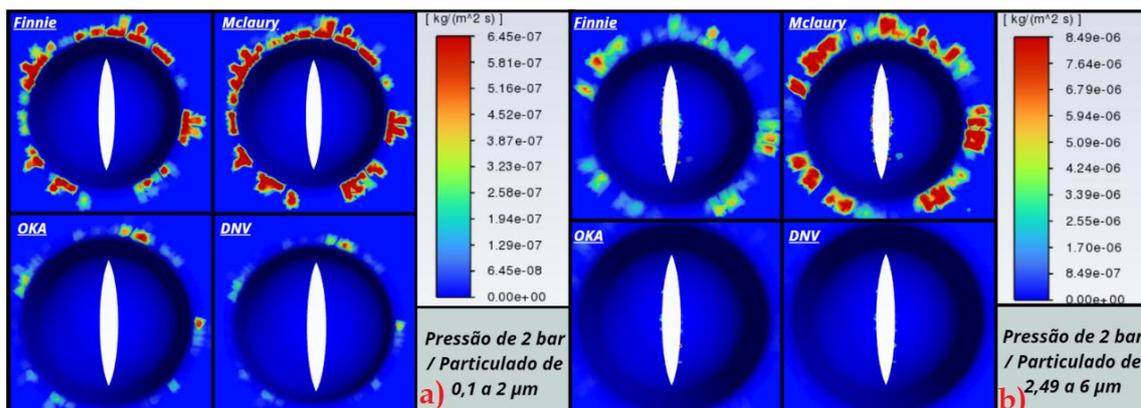
Figura 39 - Desgaste máximo conforme a variação da pressão e distribuição de particulado



Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme a Figura 40 a), que representa o desgaste máximo para uma pressão de operação de 2 bar e uma distribuição de particulado de 0,1 a 2 μm , é possível observar que o método de Mclaury contabiliza a maior distribuição de valores de desgaste, concentrados na região destacada pela Figura 37. Em sequência, ao observar a Figura 40 b), que representa a simulação para uma distribuição de particulado de 2,49 a 6 μm , é possível identificar, de maneira análoga à análise anterior, que as maiores concentrações de desgaste ocorrem para o método de Mclaury e estão presentes nas regiões de borda, conforme destacado pela Figura 37. No entanto, é possível observar a presença de algumas zonas de desgaste na ponta do bico, região também evidenciada pela Figura 38.

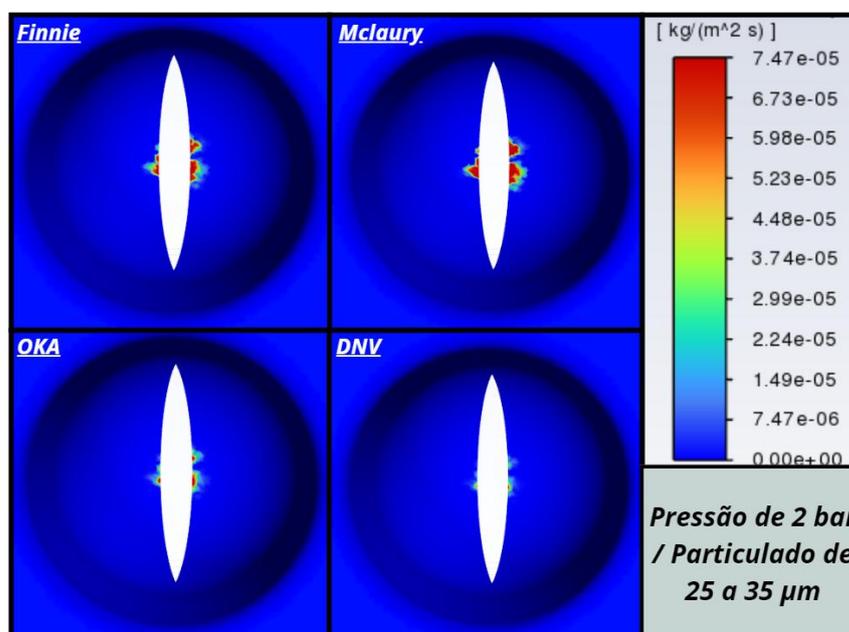
Figura 40 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 µm e 2,49 a 6 µm para pressão de 2 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

Em sequência, dando continuidade a análise do desgaste máximo para pressão de operação de 2 bar, é possível observar na Figura 41, os valores presentes para a distribuição de particulado de 25 a 35 µm, os quais apresentam uma concentração majoritária na região da ponta do bico, destacada pela Figura 38.

Figura 41 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 µm para pressão de 2 bar



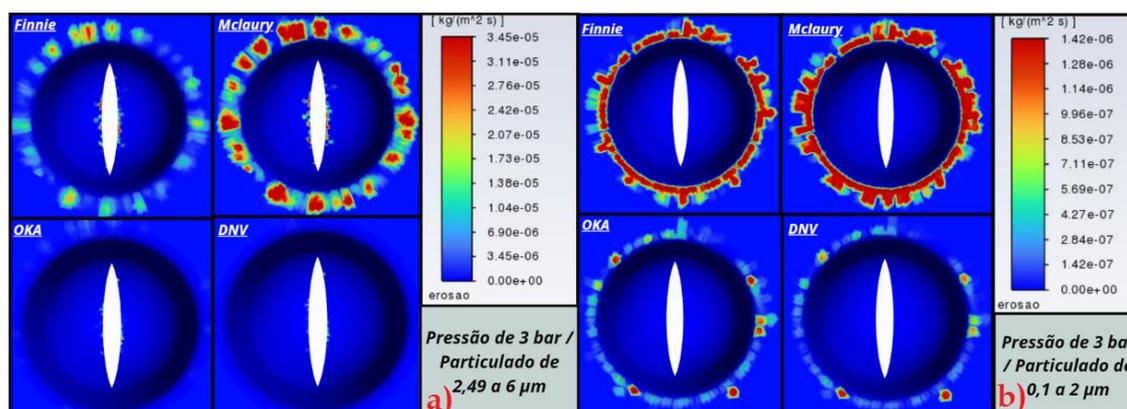
Fonte: Autoria própria (2024).

Presente nas Figuras 42 e 43, é possível identificar os valores de desgaste máximo para a simulação realizada com pressão de operação de 3 bar. Sendo que,

representado na Figura 42 a), estão contidos os resultados para a distribuição de 2,49 a 6 μm , e na Figura 42 b), os resultados para a distribuição de 0,1 a 2 μm . As mesmas apresentaram sua maior concentração de desgaste nas regiões da borda do bico, destacada pela Figura 37. Contudo, para a distribuição de maior diâmetro, é notória a presença de algumas zonas de desgaste presentes na região da ponta do bico, elucidada pela Figura 38.

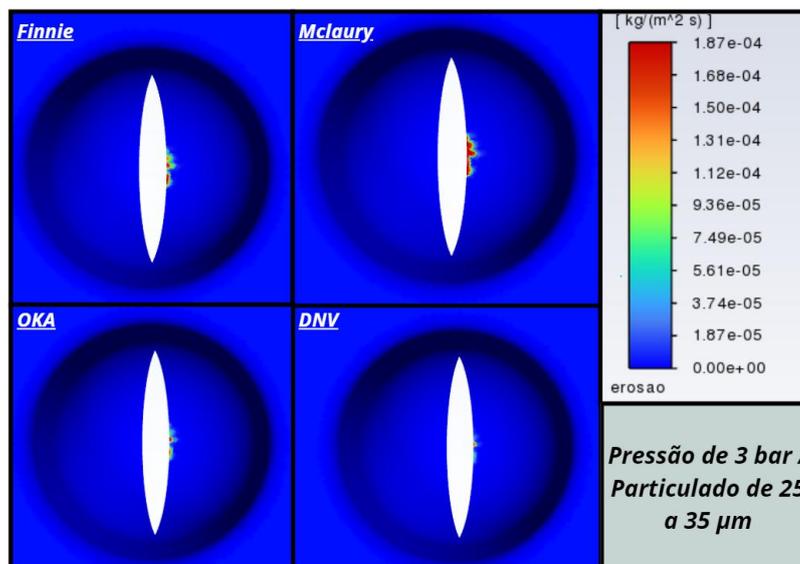
Já na Figura 43, é possível observar os resultados para a distribuição de 25 a 35 μm , os quais apresentam sua concentração espacial predominantemente na região da ponta do bico, destacada pela Figura 38, sendo, novamente, o método de McLaury o que apresenta a maior magnitude de valor.

Figura 42 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 μm e 2,49 a 6 μm para pressão de 3 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 43 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 μm para pressão de 3 bar

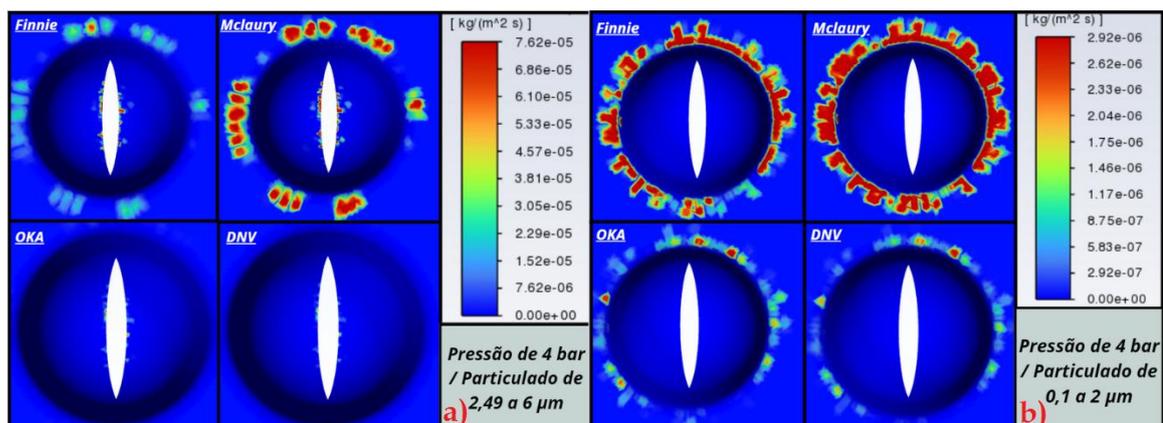


Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, presente nas Figuras 44 e 45, estão contidos os resultados para a simulação na qual utilizou a pressão de operação de 4 bar. As mesmas apresentam similaridade com as imagens anteriormente apresentadas, de 2 e 3 bares, onde para a distribuição de 2,49 a $6\mu\text{m}$, presente na Figura 44 a), a região de concentração do desgaste prevaleceu nas regiões da borda do bico, assim como na distribuição de 0,1 a $2\mu\text{m}$. Já para a distribuição de 25 a $35\mu\text{m}$, o acúmulo de desgaste máximo ocorreu predominantemente na região da ponta do bico.

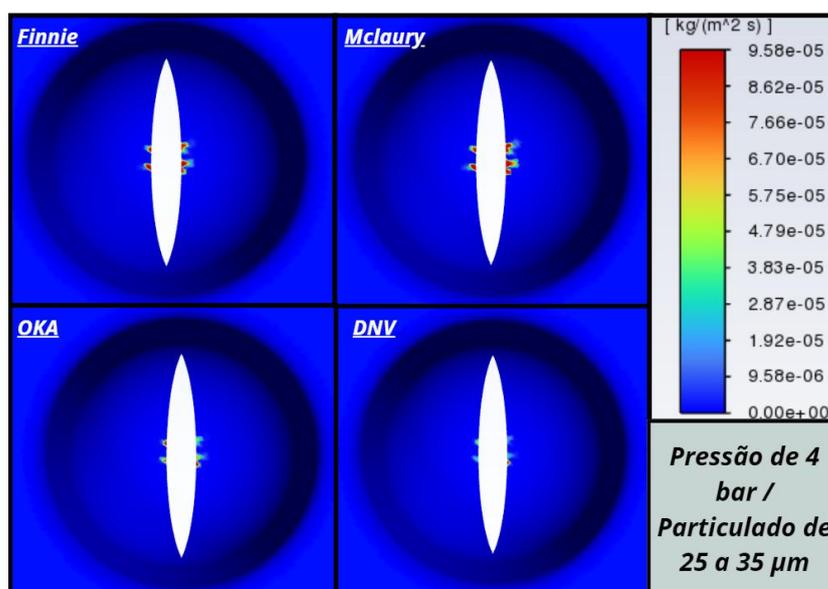
Esse efeito, presente nas três pressões de operação, ocorre devido à influência da inércia das partículas, conforme descrito anteriormente. Partículas de menores diâmetros tendem a se chocar com maior facilidade nas regiões da parede do bico, destacadas pela Figura 37, por sofrerem com a turbulência descrita anteriormente. À medida que o diâmetro aumenta, a concentração espacial do desgaste começa a ocorrer na região da ponta do bico, como elucidado na Figura 38.

Figura 44 - Desgaste máximo para partículas de 0,1 a 2 µm e 2,49 a 6 µm para pressão de 4 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 45 - Desgaste máximo para partículas de 25 a 35 µm para pressão de 4 bar

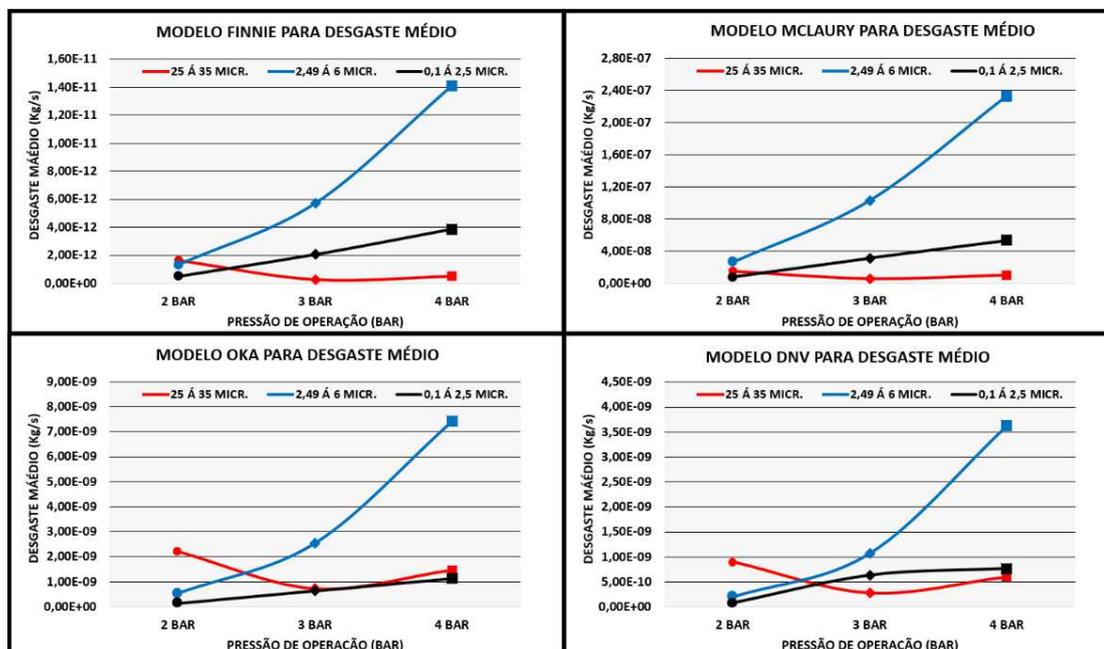


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.4 Análise do desgaste médio.

Neste tópico, são apresentados os valores obtidos por meio da simulação computacional referentes ao desgaste médio da área da parede do bico pulverizador. Estes valores são expressos em kg/s, indicando a quantidade de massa removida do bico devido à erosão causada pelos particulados a cada segundo de operação do maquinário agrícola. Os dados foram obtidos correlacionando as três pressões de operação e as distribuições de partículas mencionadas anteriormente, utilizando a Equação 3.2, presente no capítulo anterior.

Figura 46 - Desgaste médio em kg/s conforme a variação da pressão e distribuição de particulado

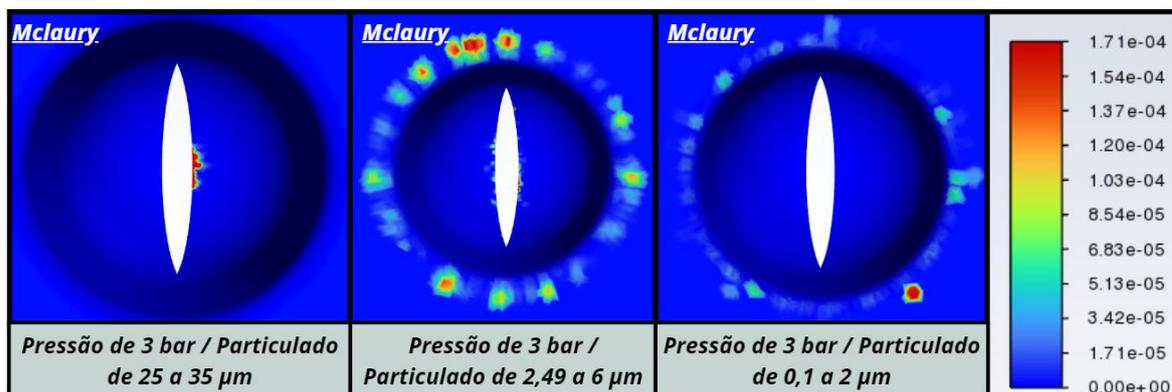


Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 46, é possível observar a tendência do aumento do desgaste da parede do bico, onde, quando elevamos a pressão de operação, majoritariamente, a mesma tende a aumentar, fato este também verificado nas análises dos capítulos anteriores.

De maneira análoga, o aumento do diâmetro da distribuição de particulado proporciona o incremento do desgaste na parede do bico, como é possível observar nas linhas que representam as distribuições de 0,1 a 2 μm e de 2,49 a 6 μm . Entretanto, quando relacionamos o efeito do desgaste à distribuição de 25 a 35 μm , esta lógica se altera, apresentando valores inferiores às demais distribuições na maioria dos métodos. Este fato ocorre devido à alta concentração de desgaste em poucos pontos da parede do bico, como pode ser observado na Figura 47, que relaciona as três distribuições de particulado a uma pressão de operação de 3 bar, com a mesma legenda de valores.

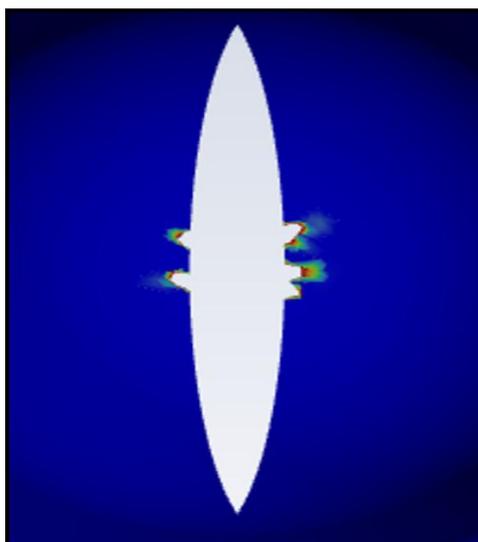
Figura 47 - Comparação entre as distribuições de particulados para uma pressão de 3 bar



Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa forma, ao utilizar a área total da parede do bico e a área desgastada como variáveis para a Equação 3.2, é levado em consideração o desgaste pontual ocorrido. Além disso, com essa forma de análise, é possível identificar a influência da distribuição do particulado na variação da geometria do bico ao ser desgastado. Para partículas maiores, como no caso da distribuição de 25 a 35 μm , observa-se um acúmulo de desgaste em poucas regiões da ponta do bico, aumentando o desgaste volumétrico neste local. Assim, como ilustrado na Figura 48, a geometria seria alterada, aumentando a vazão e ocasionando os problemas citados nos capítulos anteriores.

Figura 48 - Efeito físico do desgaste na ponta do bico pulverizador



Fonte: Autoria própria (2024).

Ademais, ao comparar a Figura 49 a), disponibilizada pelo fabricante Máquinas Agrícolas Jacto S/A, a qual representa o desgaste nos bicos pulverizadores agrícolas devido à presença de particulados nos agrotóxicos, com a Figura 49 b), que mostra o desgaste em um bico pulverizador, obtido por meio das simulações realizadas neste estudo, é possível identificar a semelhança entre o comportamento de ambos perante a erosão. Essa observação qualitativa dos efeitos mencionados corrobora com os resultados aqui apresentados, os quais descrevem, com certa aproximação, os efeitos dos particulados em relação aos bicos de pulverização agrícola.

Figura 49 - Comparativo entre representação gráfica do desgaste do fabricante com resultado obtido pela simulação



Fonte: Autoria própria (2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a análise do desgaste em um bico pulverizador agrícola do modelo JSF-110-02, por meio da dinâmica de fluidos computacional, para compreender o comportamento do mesmo, diferenciando-se dos métodos analíticos convencionais. Além disso, proporcionar uma contribuição indireta, para a redução dos impactos ambientais e sociais, causados pelo consumo desregulado, resultante do aumento da vazão dos agrotóxicos.

Os resultados obtidos ao longo das análises apresentaram coerência física, sendo corroborados por aspectos como: o aumento da pressão de operação e/ou o aumento do diâmetro das distribuições de partículas, os quais proporcionaram o incremento do desgaste nos bicos pulverizadores. Além disso, os objetivos anteriormente elencados foram alcançados, tornando possível o desenvolvimento de uma simulação CAE, desde a obtenção da geometria do problema, desenvolvimento de uma malha numérica independente até a obtenção de informações sobre a influência da turbulência e o desgaste a partir de determinadas condições de operação e insumos de trabalho.

Entretanto, devido a uma escassez de informações na literatura sobre o par Poliacetal-caulim, utilizado no desenvolvimento das pesquisas presentes nesse estudo, bem como em trabalhos relacionados ao desgaste utilizando CAE, os resultados não podem ser comparados de forma quantitativa com estudos realizados por outros autores, como no caso do trabalho publicado por Nagy et al. (2014), descrito anteriormente. Em contrapartida, qualitativamente, os resultados descrevem que as simulações empregadas apresentaram similaridade com os trabalhos experimentais publicados, além de uma coerência física.

Outro ponto relevante referente aos resultados atingidos com esse trabalho, passa a ser o comportamento físico geométrico observado nos resultados para o desgaste do bico de pulverização agrícola, onde ao observar a Figura 49 b) é possível identificar as zonas que apresentaram os maiores índices de desgastes, as quais apresentam similaridade em comparação com a representação gráfica a qual o fabricante descreve como o desgaste que ocorre nos bicos, Figura 49 a).

Dessa forma, para futuros trabalhos, é de suma importância o desenvolvimento de pesquisas empíricas que forneçam os valores dos coeficientes solicitados pelos métodos presentes no software Ansys, em conjunto com as práticas

aqui empregadas. Assim, será possível obter resultados mais precisos perante a Dinâmica de Fluidos Computacional.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide**. Disponível em: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm. Acesso em: 02 de abril de 2024.
- ANSYS. **ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast. Accurate Flow Resolution**. Ansys, Inc. Canonsburg, Pensilvânia (U.S.A), 2020.
- B. S. McLaury. et al. **Solid Particle Erosion in Long Radius Elbows and Straight Pipes**. SPE Paper 38842, Annual Technical Conference and Exhibition, II Production Operations and Engineering/General, San Antonio, Texas, October 1997.
- BAIO, F. H. R. **Spray nozzle wear effects on droplet population**. Scientific Paper. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2022.
- Biziuk M. et al. **Pesticides. Appear, Mark and neutralize**. Scientific-Technology Publishing. Warsaw, Polish, 2002.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Agropecuária Brasileira em Números – 2022**: [Brasília]: [MAPA], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-04-2022.pdf/view>. Acesso em: 17 fev. 2024.
- Chaves, Finzer. **Determinação do tamanho de partícula de resíduos e separação por filtração na produção**. Universidade de Uberaba, Minas Gerais, 2018.
- COMSOL. **Erosion theory**. Disponível em: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.particle/particle Ug fluid flow.08.49.html>. Acesso em: 02 de abril de 2024.
- CORRÊA, H.G., Lorena Neto, B. Desgaste de bicos de pulverização pelo uso de formulações cúpricas. **Revista Científica do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**, Campinas, v. 35, n. 25, p. 280, set. 1976.
- ELYYAN, Mohammad. **Better Particle Erosion Fluid Dynamics Modeling in Ansys Fluent 18: Better Particle Erosion Fluid Dynamics Modeling in Ansys Fluent**. 2017. Disponível em: <https://www.ansys.com/blog/erosion-fluid-dynamics-modeling>. Acesso em: 10 fev. 2024
- I. Finnie. **Erosion of Surfaces by Solid Particles**. Shell Development Company, Emeryville, California (U.S.A.), v. 3, p. 87-103, 1960.
- I. Finnie. **Some observations on the erosion of ductile metals**. University of California, Berkeley, California (U.S.A.), 1971.
- IBGE. **Valor da produção agropecuária (2022)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 17 de março de 2024.
- IBGE. **Valor do PIB de 2022**. Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/36371-pib-cresce-2-9-em-2022-e-fecha-o-ano-em-r-9-9-trilhoes#:~:text=Em%202022%2C%20o%20PIB%20\(Produto,Agropecu%C3%A1ria%20\(%2D1%2C7%25\).&text=O%20PIB%20totalizou%20R%24%209%2C9%20trilh%C3%B5es%20em%202022](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/36371-pib-cresce-2-9-em-2022-e-fecha-o-ano-em-r-9-9-trilhoes#:~:text=Em%202022%2C%20o%20PIB%20(Produto,Agropecu%C3%A1ria%20(%2D1%2C7%25).&text=O%20PIB%20totalizou%20R%24%209%2C9%20trilh%C3%B5es%20em%202022). Acesso em: 17 de março de 2024.

JACTO. **Bicos desgastados trazem prejuízo financeiro.** 26 jun. 2017. Disponível em:<https://blog.jacto.com.br/bicos-desgastados-trazem-prejuizos-financeiros/>. Acesso em: 19 mar. 2024.

JACTO. **Bicos desgastados trazem prejuízo financeiro.** 26 jun. 2017. Disponível em:<https://blog.jacto.com.br/bicos-desgastados-trazem-prejuizos-financeiros/>. Acesso em: 19 mar. 2024.

Milanowski M, Subr A, Parafiniuk S. Evaluation of Different Internal Designs of Hydraulic Nozzles under an Accelerated Wear Test. **Applied Sciences**. INDIA, 12 de abril de 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12020889>, p. 1-10

Mohan, K., & Lakshmanan, V. R. **A critical review of the recent trends in source tracing of microplastics in the environment.** Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, 2023.

TYGEL ALAN. et al. **Atlas dos Agrotóxicos:** Fatos e dados do uso dessas substâncias na agricultura em 2023. Rio de Janeiro. 10-15, dez. 2023.

VERSTEEG AND MALALASEKERA. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics:** The finite volume method. 2. ed. London, 2007.

Yahaya. Et al. **Chemical Composition and Particle Size Analysis of Kaolin,** Path of Science. 2017. Vol. 3, No 10.

Y.I. Oka , T. Yoshida. **Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact.** Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation.

Department of Chemical Engineering, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, 2005.

Y.I. Oka , T. Yoshida. **Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact.** Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with.

Department of Chemical Engineering, Hiroshima University, Hiroshima, Japan, 2005.