

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Joao Gabriel Amaral Aguiar

**Avaliação Experimental e Computacional da Eficiência de Separadores
Ciclônicos Aplicados na Coleta e Concentração do Minério de Ferro
proveniente de Secagem Convectiva**

São Carlos – SP

Fevereiro de 2023

Joao Gabriel Amaral Aguiar

**Avaliação Experimental e Computacional da Eficiência de Separadores
Ciclônicos Aplicados na Coleta e Concentração do Minério de Ferro
proveniente de Secagem Convectiva**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química

Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Béttega

São Carlos – SP

Fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Joao Gabriel Amaral Aguiar, realizada em 24/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Rodrigo Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Gabriel Henrique Justi (UNIPAMPA)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dificilmente creditado apenas a uma pessoa, sendo fruto da ação conjunta de diversas pessoas. Neste sentido, aproveito este momento para agradecer profundamente ao professor Rodrigo Béttega, pela sua orientação em meu trabalho, além de toda a paciência, empatia e boas conversas que teve para com minha pessoa, comprovando ser não apenas um excelente profissional em sua área, mas também um grande ser humano. Estendo meus agradecimentos à professora Vádila Guerra, pelas contribuições que ofereceu para meu trabalho e, ainda, por aceitar compor minha banca examinadora.

Em segunda instância, não poderia deixar de expressar minha gratidão aos estudantes da pós-graduação ligados ao LABSEM, entre eles Amarílis, Letícia e Alexandre, pelo seu apoio e instrução em diversas atividades relacionadas ao mestrado. Em especial, destaco o auxílio da querida Luana, que teve papel de destaque na execução de meu trabalho, sendo minha mentora principal no que tange ao início das atividades experimentais, ajudando a pavimentar o caminho pelo qual trilhei durante a realização do projeto.

Além dos já citados, ressalto a importância de todo o corpo administrativo e técnico do DEQ, pelas diversas contribuições e instruções, sem as quais nada seria possível. Neste contexto, ressalto os nomes do técnico Edilson, Raquel, a secretária da pós-graduação e Samuel, funcionário na oficina mecânica do departamento, pelas incontáveis ajudas prestadas. Finalmente, expresso minha profunda gratidão à própria UFSCAR e toda sua infraestrutura, que fora indispensável para a realização deste trabalho.

Aproveito, ainda, para agradecer aos técnicos do departamento responsáveis pela execução das análises mineralógicas, relacionadas ao equipamento *Mastersizer*, pelo seu inquestionável suporte. E, não poderia deixar de citar o LCT da Escola Politécnica de São Paulo, em especial a senhora Juliana, pela contribuição na execução das outras análises químicas pertinentes ao trabalho que, por sua vez, foram de fundamental importância.

Por fim, sobretudo e todos, agradeço a minha família, Eliana, Francisco e Franciana que, mesmo não tendo participação ativa na execução do mestrado, foram meu pilar emocional e psicológico durante estes quase dois anos, muito me auxiliando nos momentos mais difíceis, me incentivando e nunca deixando de me apoiar mesmo em seus próprios momentos de dificuldade. Dedico este trabalho para e por todos vocês, meus queridos(as)!

RESUMO

O ferro está intimamente relacionado ao desenvolvimento de um país, sendo elemento chave na produção de diversos bens de uso diário. Uma das etapas fundamentais de seu beneficiamento é a adequação de seu conteúdo de umidade. Neste sentido, a secagem convectiva do minério de ferro acarreta o arraste de parte do material particulado, gerando a necessidade de sua recuperação. Além disso, a composição química do minério de ferro também é um fator importante, principalmente visando a etapa de redução nos alto-fornos, ligada à produção do aço. Os ciclones são equipamentos de separação gás-sólido com princípio de ação apoiado na força centrífuga gerada pelo escoamento do gás, induzindo as partículas maiores a serem coletadas no *underflow* e liberando o gás pelo *overflow*, contendo uma fração do material mais leve. Desta maneira, este estudo buscou avaliar a eficiência de diferentes configurações de separadores ciclônicos, atuando como classificadores, buscando avaliar a coleta do minério bem como sua variação de composição. Dados experimentais de caracterização do minério de ferro, testes de separação realizados em unidade reduzida e modelos de performance de ciclones presentes na literatura foram utilizados para avaliação de três separadores ciclônicos em nove condições operacionais. Além disso, foram realizadas simulações CFD – *Computational Fluid Dynamics* – para amparar o estudo. Neste sentido, foram realizadas simulações seguindo a metodologia RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes* – acoplando o modelo RSM – *Reynolds Stress Model* – para turbulência da fase gasosa, em conjunto com o modelo DPM – *Discrete Phase Model* – para inserção do sólido, tratando-se de uma formulação Euleriana-Lagrangeana com vasta citação na literatura. As simulações estacionárias foram realizadas no *software Fluent*, pertencente ao pacote *ANSYS Student 2022 R1*. Os resultados indicaram boa concordância dos parâmetros dinâmicos do escoamento gasoso oriundos das simulações CFD e modelos da literatura. Além disso, houve certo grau de adesão dos resultados de eficiência de coleta simulados com os obtidos pelas correlações, indicando recuperação do material na ordem de 90%, dentro das condições operacionais avaliadas, ainda que com desvios expressivos de 14% a 44% com relação ao experimental. O efeito da velocidade de alimentação e da geometria do equipamento na performance do separador foi majoritariamente comprovado. A classificação mineral também foi investigada através da CFD, porém com desvios em relação aos dados experimentais. Em suma, constatou-se forte tendência de recuperação do minério de ferro e contundente atuação dos ciclones como dispositivos classificadores.

Palavras-chave: CFD; Ciclones; Classificação Mineral; Eficiência de Coleta; Minério de ferro; Secagem convectiva.

ABSTRACT

Iron is closely related to the development of a country, being a key element in the production of various goods for daily use. One of the fundamental stages in its processing is the moisture content control. In this sense, the convective drying of iron ore generates the dragging of part of the particulate material, making necessary its recovery. In addition, the chemical composition of the iron ore is also an important factor, mainly associated to the reduction stage in the blast furnaces, linked to steel production. Cyclones are gas-solid separation equipment whose principle of action is based on the centrifugal force generated by the gas flow, inducing larger particles to be collected in the underflow and releasing the gas through the overflow, containing a fraction of the lighter material. In this way, this study sought to evaluate the efficiency of different configurations of cyclonic separators, acting as classifiers, seeking to evaluate the ore collection as well as its composition variation. Experimental data from iron ore characterization, separation tests carried out in a pilot unit and cyclone performance models found in the literature were used to evaluate three cyclonic separators in nine operational conditions. In addition, CFD – *Computational Fluid Dynamics* – simulations were carried out to support the study. In this sense, simulations were carried out following the RANS methodology – *Reynolds Average Navier-Stokes* – coupling the RSM – *Reynolds Stress Model* – for the gaseous phase turbulence, together with the DPM – *Discrete Phase Model* – for insertion of the solid, being an Eulerian-Lagrangian formulation with extensive citation in the literature. Stationary simulations were performed using the *Fluent* software, belonging to the *ANSYS Student 2022 R1* package. The results indicated good agreement of the dynamic parameters of the gaseous flow from CFD simulations and literature models. In addition, there was a certain degree of adhesion between the simulated collection efficiency results and those obtained through the correlations, indicating recovery of the material in the order of 90%, within the operational conditions evaluated, although with significant deviations of 14% to 44% in relation to experimental data. The effect of the inlet velocity and equipment geometry on the separator performance has been majorly proven. The mineral classification was also investigated through CFD, but with considerably deviations to the experimental results. In short, there was a strong tendency of iron ore recovery and a noticeable performance of the cyclones as classifying devices.

Keywords: CFD; Cyclones; Collection Efficiency; Convective Drying; Iron ore; Mineral Classification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas iniciais do processo de beneficiamento do minério de ferro.....	22
Figura 2 - Fluxograma geral do processo de produção de aço.....	24
Figura 3 - Ilustração do funcionamento de um separador ciclônico convencional.....	28
Figura 4 - Cotas geométricas de destaque no estudo de ciclones.....	28
Figura 5 - Curva de eficiência típica da operação de ciclones.....	30
Figura 6 - Perfil típico de velocidade tangencial da fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família Stairmand.....	33
Figura 7 - Perfil típico de velocidade axial da fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família Stairmand.....	34
Figura 8 - Perfil típico de pressão estática na fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família Stairmand.....	34
Figura 9 - Modificação do perfil de velocidade axial da fase gasosa na operação de ciclone devido à redução do diâmetro do bocal de exaustão.....	36
Figura 10 - Ilustração do procedimento de aquisição da fração fina do minério de ferro.....	38
Figura 11 - Ilustração do procedimento de quarteamento de amostra e quarteadores mecânicos.....	40
Figura 12 - Ilustração da unidade experimental utilizada nos ensaios de separação do minério de ferro.....	41
Figura 13 - Comparação de perfis de velocidade em regime laminar e turbulento em um tubo.....	42
Figura 14 - Esquema ilustrativo da proporção geométrica entre os ciclones.....	44
Figura 15 - Domínios computacionais criados para a simulação CFD dos três ciclones analisados.....	49
Figura 16 - Metodologia de decomposição em blocos empregada na criação das geometrias dos ciclones.....	50
Figura 17 - Padrão de refino utilizado na criação das malhas computacionais empregadas na simulação dos ciclones.....	51
Figura 18 - Forma de elementos tri e quadrilaterais com valores baixos e elevados de aspect ratio.....	53
Figura 19 - Regiões de contorno delimitadas para simulação dos ciclones.....	55
Figura 20 - Contornos empregados ao material sólido no âmbito da simulação CFD.....	60

Figura 21 – Ilustrativo da linha de análise para obtenção dos perfis de escoamento gasoso. .62	62
Figura 22 - Distribuição granulométrica do minério de ferro estudado. 75	75
Figura 23 - Ajuste RRB linearizado aplicado à distribuição granulométrica do minério de ferro. 78	78
Figura 24 - Linearização dos modelos GGS e Sigmóide aplicada aos dados de granulometria do minério de ferro. 78	78
Figura 25 - Comparação dos dados de distribuição granulométrica obtidos pelo Mastersizer e ajuste RRB. 79	79
Figura 26 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C ₁ , na condição operacional de 0,34611 g/s, para as três velocidades avaliadas. 88	88
Figura 27 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos ciclones C ₂ e C ₃ , na condição operacional de 0,34611 g/s, para as três velocidades avaliadas. 89	89
Figura 28 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C ₁ , na condição operacional de 9,64 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas. 89	89
Figura 29 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C ₂ , na condição operacional de 3,21 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas. 90	90
Figura 30 - Frequência de tamanhos de partículas no materiais coletados do ciclone C ₃ , na condição operacional de 6,42 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas. 91	91
Figura 31 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos três ciclones, nas condições operacionais extremas de velocidade e vazão mássica. 91	91
Figura 32 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos três ciclones, nas condições operacionais centrais de velocidade e vazão mássica. 92	92
Figura 33 - Perfis de velocidade axial obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial Z = 0,17. 96	96
Figura 34 - Perfis de velocidade tangencial obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial Z = 0,17. 97	97
Figura 35 - Perfis de pressão estática obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial Z = 0,17. 99	99
Figura 36 - Ilustração vetorial do fluxo rotativo do gás para os três ciclones, destacando a formação do vórtex gasoso interno, na condição operacional de 3,21 m/s. 106	106

Figura 37 - Percurso das partículas no interior dos separadores ciclônicos, na condição operacional de 9,64 m/s.	109
Figura 38 - Percurso das partículas no interior do ciclone C ₁ , indicando o comportamento das partículas consideradas escapadas do mecanismo de separação na condição de 3,21 m/s. ...	110
Figura 39 - Curvas de eficiência geradas pelos modelo de Barth para os três ciclones nas três condições operacionais de velocidade estudadas, no intervalo entre 0 e 10 µm.....	114
Figura 40 - Comparativo das curvas de eficiência de Barth para os três ciclones na condição operacional de 3,21 m/s.	115
Figura 41 - Curvas de eficiência de Barth, Leith e Licht e Iozia e Leith, geradas para o ciclone C ₁ na condição operacional de 3,21 m/s.	116
Figura 42 - Ajustes lineares dos dados granulométricos dos componentes da amostra de minério de ferro através do modelo RRB.	117
Figura 43 - Distribuições granulométricas dos componentes avaliados através do ajuste RRB.	118
Figura 44 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 9,64 m/s.	139
Figura 45 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 9,64 m/s.....	139
Figura 46 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 6,42 m/s.	140
Figura 47 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 6,42 m/s.....	140
Figura 48 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 3,21 m/s.	140
Figura 49 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 3,21 m/s.....	141
Figura 50 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C ₁	142
Figura 51 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C ₁	142
Figura 52 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C ₁	143
Figura 53 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C ₂	143
Figura 54 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C ₂	143
Figura 55 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C ₂	144
Figura 56 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C ₃	144
Figura 57 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C ₃	144
Figura 58 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C ₃	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais materiais portadores de Ferro encontrados na natureza.	21
Tabela 2 - Relações geométricas de algumas famílias relevantes no estudo de ciclones.	29
Tabela 3 - Cotas geométricas dos três ciclones avaliados.	43
Tabela 4 - Condições operacionais avaliadas no estudo dos ciclones.	44
Tabela 5 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de separação global do minério de ferro.	46
Tabela 6 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de separação global do minério de ferro.	47
Tabela 7 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ na eficiência de separação global do minério de ferro.	47
Tabela 8 - Padrão de refinamento utilizado para criação das malhas computacionais.	51
Tabela 9 - Valores do fator de skewness e qualidade do elemento.	53
Tabela 10 - Estatística da qualidade dos elementos das malhas utilizadas nas simulações. ...	54
Tabela 11 - Formulação numérica utilizada na simulação dos separadores ciclônicos.	57
Tabela 12 - Propriedades dinâmicas do ar utilizadas nas simulações CFD.	58
Tabela 13 - Condições de contorno utilizadas na formulação numérica das simulações.	59
Tabela 14 - Dados de composição química da amostra de minério de ferro da VALE, destacada para 10 intervalos de granulometria analisados.	65
Tabela 15 - Dados utilizados para obtenção das distribuição granulométrica dos componentes individuais.	66
Tabela 16 - Resultados da técnica de picnometria aplicada ao minério de ferro.	76
Tabela 17 - Composição química do minério de ferro.	76
Tabela 18 - Resultados de queda de pressão experimental e teórica dos ciclones avaliados. .	80
Tabela 19 - Resultados de eficiência de coleta experimental do minério de ferro para os três ciclones avaliados.	82
Tabela 20 - Resultados do teste t Student para avaliação estatística da influência da velocidade de alimentação do ar no fator de eficiência dos ciclones.	84
Tabela 21 - Resultados do teste t Student para avaliação estatística da influência da vazão de alimentação de sólidos no fator de eficiência dos ciclones.	85
Tabela 22 - Resultados do testes t Student para avaliação estatística da influência da altura do corpo cilíndrico dos ciclones na coleta do minério de ferro.	86

Tabela 23 - Composição química dos materiais coletados no underflow dos três ciclones, nas condições extremas de velocidade e vazão mássica estudadas.	93
Tabela 24 - Avaliação das respostas numéricas frente aos valores experimentais de ΔP e teóricos de $V_{t,max}$ na condição operacional de 9,64 m/s.	100
Tabela 25 - Comparação das relações geométricas obtidas experimentalmente com as de SCARPA (2000).	102
Tabela 26 - Resultados de incertezas das respostas numéricas obtidas para condição operacional de 9,64 m/s através do método GCI.	103
Tabela 27 - Resultados numéricos para as condições operacionais de 3,21 e 6,42 m/s, obtidos através da simulação da malhas 5 dos três ciclones.	105
Tabela 28 - Comparativo dos resultado de eficiências de coleta globais obtidos pelas simulações numéricas e correlações presentes na literatura.	108
Tabela 29 - Comparativo dos resultados de eficiência de coleta obtidos numericamente frente ao modelo de Leith e Licht e valores experimentais.	112
Tabela 30 - Valores dos parâmetros do modelo RRB para as distribuições dos cinco componentes avaliados.	117
Tabela 31 - Resultados numéricos da eficiência de coleta dos componentes individuais do minério de ferro na condição de 3,21 m/s.	119
Tabela 32 - Resultados numéricos da eficiência de coleta dos componentes individuais do minério de ferro na condição de 9,64 m/s.	121

NOMENCLATURA

Abreviaturas e Siglas

<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>DPM</i>	<i>Discrete Phase Model</i>
<i>FRX</i>	Fluorescência de Raios X
<i>GCI</i>	<i>Grid Convergence Index</i>
<i>GGs</i>	<i>Gates-Gaudin-Schumann</i>
<i>IMO</i>	<i>International Maritime Organization</i>
<i>ITV</i>	Instituto Tecnológico Vale
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulation</i>
<i>ONU</i>	Organização das Nações Unidas
<i>RANS</i>	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
<i>RNG</i>	<i>Re-normalization Group</i>
<i>RRB</i>	<i>Rosin-Rammler-Bennet</i>
<i>RSM</i>	<i>Reynolds Stress Model</i>
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
<i>TML</i>	<i>Transportable Moisture Limit</i>
<i>UDS</i>	<i>Upwind Differencing Scheme</i>

Variáveis e Símbolos

a	Comprimento do bocal de alimentação do ciclone [m]
b	Largura do bocal de alimentação do ciclone [m]
a_1, a_2, a_3	Constantes do modelo de Morsi e Alexander para coeficiente de arraste [-]
B	Diâmetro do bocal de coleta de material sólido [m]
C_D	Coefficiente de Arraste [-]
d_c	Diâmetro do eixo central [m]
D	Diferencial substantivo
$D', D_{63,2}$	Parâmetro do ajuste <i>RRB</i> [m]
D_c	Diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone [m]
D_e	Diâmetro do bocal de exaustão do gás [m]
D_i	Diâmetro da i -ésima partícula [m]
D_{50}	Diâmetro de corte (eficiência de coleta de 50%) [m]
E_u	Número de Euler [-]

F_D	Coeficiente de transferência de momento entre o fluido e as partículas [s^{-1}]
g	Aceleração da gravidade [$m.s^{-2}$]
G	Parâmetro geométrico do modelo de Leith e Licht [-]
GCI_i	Incerteza numérica da malha i [%]
h	Tamanho representativo da malha
h_{cc}	Altura do corpo cilíndrico do ciclone [m]
h^m	Altura do eixo central [m]
H_t	Altura total do ciclone [m]
k	Parâmetro do ajuste GGS [m]
k	Energia cinética turbulenta [$m^2.s^{-2}$]
m	Expoente do ajuste GGS [-]
\dot{M}_s	Vazão mássica de sólidos [$kg.s^{-1}$]
n	Expoente do ajuste RRB [-]
p	Expoente do ajuste Sigmóide [-]
p	Ordem do método de discretização [-]
Q	Vazão volumétrica de gás [$m^3.s^{-1}$]
r	Fator de refino entre as malhas [-]
R^2	Coeficiente de correlação [-]
Re	Número de Reynolds [-]
S	Profundidade do bocal de exaustão do ciclone [m]
SD	Desvio padrão [-]
T	Temperatura do gás [$^{\circ}C$]
v	Velocidade [$m.s^{-1}$]
v_c	Velocidade do gás na seção cilíndrica do ciclone [$m.s^{-1}$]
v_e	Velocidade do gás na seção de exaustão [$m.s^{-1}$]
v_i	Velocidade do ar no bocal de entrada do ciclone [$m.s^{-1}$]
v_{ts}	Velocidade terminal da partícula [$m.s^{-1}$]
v_{ts}^m	Velocidade terminal da partícula de corte [$m.s^{-1}$]
v_x, v_y, v_z	Componentes do vetor velocidade nas direções cartesianas x , y e z [$m.s^{-1}$]
v_0	Velocidade do ar no local de aferição [$m.s^{-1}$]
V_A	Velocidade axial do gás [$m.s^{-1}$]
$V_{nl,H}$	Volume anelar do ciclone [m^3]
V_t	Velocidade tangencial do gás [$m.s^{-1}$]

$V_{t,máx}$	Velocidade tangencial máxima do gás [$m.s^{-1}$]
x	Fração discreta (frequência) de material acumulado [-]
X	Fração acumulada de material passante [-]
Z_c	Comprimento natural do vórtice [m]
β	Expoente do modelo de Iozia e Leith [-]
δ	Desvio relativo [%]
ΔH	Parâmetro adimensional relacionado à geometria do ciclone [-]
ΔP	Queda de pressão [$Pa - kg.m^{-1}.s^{-2}$]
ε	Dissipação turbulenta [$m^2.s^{-3}$]
η	Eficiência de coleta global [-]
η_i	Eficiência de coleta fracionária da i -ésima partícula [-]
μ	Viscosidade dinâmica do gás [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
ρ	Massa específica do gás [$kg.m^{-3}$]
ρ_s	Massa específica do sólido [$kg.m^{-3}$]
∇	Gradiente
$\nabla.$	Divergente
∂	Derivada parcial
τ_i	Tempo de residência da i -ésima partícula [s]
α	Parâmetro do modelo de Barth [-]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Contextualização.....	18
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. O Minério de Ferro	21
2.1.1. Informações Gerais	21
2.1.2. O Beneficiamento do Minério.....	22
2.2. Separadores Ciclônicos.....	27
2.2.1. Performance do Separador	29
2.2.2. Estudos Relacionados.....	31
2.2.3. Perfis de Escoamento	32
2.3. O CFD Aplicado no Estudo de Ciclones	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. Amostras de Minério de Ferro	38
3.1.1. Caracterização do Minério	38
3.1.2. Preparação das Amostras	40
3.2. A Unidade Experimental.....	41
3.2.1. Um Panorama Geral	41
3.2.2. Ciclones Avaliados.....	43
3.2.3. Procedimento Experimental	44
3.3. Tratamento Estatístico dos Dados.....	45
3.4. Simulação CFD.....	48
3.4.1. Pré-Processamento	48

3.4.1.1. Domínio computacional	48
3.4.1.2. Malhas numéricas e regiões de contorno.....	50
3.4.1.3. Métodos numéricos, contornos e critérios de convergência.....	56
3.4.2. Processamento	61
3.4.3. Pós-Processamento.....	61
3.4.3.1. Verificação do modelo.....	62
3.4.3.2. Análise de convergência de malha	66
4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	69
4.1. Modelagem da Fase Gasosa.....	69
4.1.1. Equação da Continuidade.....	69
4.1.2. Equação do Movimento	70
4.2. Equações de Fechamento.....	71
4.2.1. Modelo <i>Standard k-ε</i>	72
4.2.2. Modelo RNG <i>k-ε</i>	72
4.2.3. Modelo Reynolds Stress Model	72
4.3. Modelagem da Fase Dispersa	73
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1. Caracterização do Minério de Ferro	75
5.1.1. Ajuste Matemático da Distribuição.....	77
5.2. Resultados Experimentais.....	79
5.2.1. Performance dos Ciclones.....	79
5.2.1.1. Queda de pressão	79
5.2.1.2. Eficiência de separação global	81
5.2.1.3. Comportamento estatístico dos dados	84
5.2.1.4. Eficiência de separação fracionária	87
5.2.1.5. Composição química dos coletados.....	92
5.3. Resultados Numéricos	95

5.3.1. Comportamento Dinâmico das Malhas	95
5.3.1.1. Perfis de escoamento da fase gasosa	95
5.3.1.2. Queda de pressão e velocidade tangencial máxima.....	99
5.3.2. Convergência da Solução Numérica e Escolha das Malhas.....	102
5.3.3. Resultados Simulados	104
5.3.3.1. Propriedades dinâmicas do escoamento gasoso	104
5.3.3.2. Eficiência de Coleta Global - Comparativo.....	107
5.4. Análise das Curvas de Eficiência.....	113
5.5. Avaliação Numérica da Classificação Mineral.....	116
6. CONCLUSÃO.....	123
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
APÊNDICE A – Modelos de Ajuste para Distribuição Granulométrica	131
A.1. Ajuste de Rosin-Rammler-Bennet (RRB)	131
A.2. Ajuste de Gates-Gaudin-Shumann (GGS).....	131
A.3. Ajuste Sigmóide.....	131
APÊNDICE B – Modelos de Eficiência de Coleta para Ciclones.....	132
B.1. Modelo de Barth.....	132
B.2. Modelo de Leith e Licht	133
B.3. Modelo de Iozia e Leith	134
B.4. Modelo de Massarani	136
APÊNDICE C – Modelos de Turbulência.....	137
C.1. Modelo RNG $k-\varepsilon$	137
C.2. Modelo das Tensões de Reynolds (RSM – <i>Reynolds Stress Model</i>)	138
APÊNDICE D – Contornos de Pressão e Velocidade Tangencial.....	139
APÊNDICE E – Perfis de Escoamento do Gás ao longo do Eixo Axial.....	142

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A mineração em conjunto com a indústria siderúrgica constitui uma das atividades essenciais no desenvolvimento do mundo contemporâneo. Nesse contexto, o Brasil, por sua diversidade mineral e extensão territorial detém posição de destaque competitivo no cenário mundial no que tange à reservas e produção de bens minerais. Destacam-se os bens metálicos, que correspondem a mais de 91% das exportações minerais do país, sendo o ferro e o ouro os mais importantes em termos econômicos (SALOMÃO, 2015).

Do ponto de vista metalúrgico, o minério de ferro pode ser dividido em três categorias, de acordo com sua granulometria: granulado (*lump ore*), finos para sínter (*sínter feed*) e finos para pelotas (*pellet feed*). O minério granulado compreende a faixa granulométrica entre 200 mm e 12,5 mm, enquanto os finos para sínter, entre 12,5 e 0,15 mm e, os finos para pelotas compreendem a fração de minério de dimensão inferior à 0,15 mm (CARVALHO, 2014).

O consumo interno do minério de ferro está concentrado principalmente na produção de ferro-gusa e na produção de pelotas (DNPM, 2010). Para produção de ferro-gusa o minério deve passar por um processo de redução, normalmente realizado no alto-forno. Entretanto, para adentrar à operação, o minério deve atender certos requisitos, entre eles a sua dimensão. Assim sendo, frações diminutas do minério, como o *sínter* e o *pellet feed* devem passar por etapas prévias de aglomeração conhecidas, respectivamente, como sinterização e pelotização (MOURÃO, 2008). Além disso, no caso do sinterizado, por exemplo, para adentrar os fornos de redução, deseja-se um material com boa redutibilidade, elevado teor de ferro, resistente à altas temperaturas, forças e pressões (baixo índice de desintegração) e baixos teores de enxofre e fósforo (MORAIS, 2015). Assim sendo, a composição química do minério também é um fator de destaque para sua utilização nos processos de beneficiamento.

Outra etapa de importância fundamental no processo de beneficiamento e transporte do minério de ferro é seu conteúdo de umidade. Neste sentido, a Organização Marítima Internacional (IMO) como sendo o componente da Organização das Nações Unidas (ONU) que regulamenta o transporte marítimo, estabeleceu em 1965 o chamado Limite de Umidade Transportável (TML). Este limite se configura como o valor máximo de umidade com a qual a carga sólida pode ser transportada com segurança por vias marítimas, prevenindo fenômenos de liquefação da carga (FERREIRA *et al.*, 2016) durante o percurso, o que poderia gerar o tombamento do navio.

Recentemente, pesquisadores do Instituto Tecnológico Vale (ITV) investigam a utilização de um chute de transferência¹ como aparato de secagem convectiva, introduzindo uma corrente de ar quente no equipamento, com objetivo de retirada de 1 a 1,8% da umidade do material (ITV, 2016), o que representaria um ganho muito positivo na adequação do produto final frente à *TML*. Contudo, a passagem do ar no interior do equipamento acarreta arraste de parte do particulado, sobretudo as frações mais finas, gerando uma suspensão que deve ser separada, a fim de possibilitar o aproveitamento do material e evitar sua emissão ao ambiente.

Um equipamento largamente utilizado para limpeza de gases são os separadores ciclônicos, em virtude de sua simples construção, manutenção e capacidade de operação em condições abrangentes de temperatura, pressão e vazão (COURY *et al.* 2004). Contudo, devido a sua baixa eficiência para remoção de partículas de dimensão inferior à 10 μm , normalmente se busca otimizar os separadores ciclônicos através do estudo de suas condições operacionais e geométricas, buscando potencializar sua performance.

Com os avanços na área computacional das últimas décadas, a fluidodinâmica computacional (*CFD*) se mostra cada vez mais recorrente no estudo de escoamentos multifásicos, como no caso do ciclone. Desta maneira, a *CFD* se destaca como uma ferramenta poderosa, barata, confiável e capaz de prever o complexo perfil de escoamento do gás e das partículas dentro de um ciclone (HOFFMAN e STEIN, 2002), podendo ser utilizado para previsão da influência de variáveis relacionadas à geometria e operação do equipamento, de modo a minimizar o gasto energético e potencializar a recuperação do material sólido.

Neste contexto, se insere o cerne de interesse deste trabalho. Utilizando dados experimentais e teóricos, amparados pela metodologia *CFD*, este estudo objetivou analisar a viabilidade técnica do uso de separadores ciclônicos para recuperação do minério de ferro proveniente da operação de secagem no chute de transferência. Paralelamente, foi avaliada a possibilidade do uso do ciclone como aparato de classificação mineral, buscando-se avaliar a capacidade de separação de parte dos componentes não desejados do minério e, desta forma, enriquecendo o conteúdo férrico do material.

¹ Chute de transferência: equipamento comumente empregado em plantas mineradoras, responsável pela mudança de direção das correias transportadoras que carregam o minério no interior das instalações.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de separadores ciclônicos aplicados na recuperação e classificação do minério de ferro proveniente da operação de secagem convectiva realizada em chute de transferência.

1.2.2. Objetivos Específicos

Buscando atingir o objetivo central deste trabalho em sua plenitude, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação da influência da velocidade de alimentação da suspensão na eficiência de separação e concentração do minério de ferro promovida pelos ciclones avaliados;
- Avaliação da influência da concentração de sólidos da corrente de tratamento na eficiência de separação e concentração do minério de ferro promovida pelos ciclones avaliados;
- Averiguação da influência de aspectos geométricos dos ciclones avaliados na recuperação e concentração do minério de ferro;
- Realização de simulações *CFD* para a análise da performance dos ciclones frente à recuperação do minério de ferro;
- Verificação dos resultados simulados, comparando-os com dados experimentais obtidos em unidade reduzida e modelos teóricos de avaliação de performance de ciclones presentes na literatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O Minério de Ferro

2.1.1. Informações Gerais

Dentre os oito elementos químicos mais abundantes da crosta terrestre, o ferro se configura em quarta posição, com cerca de 5% em massa. Entre os outros elementos de destaque tem-se o oxigênio (46,6%), silício (26,72%), alumínio (8,13%), cálcio (3,63%), sódio (2,83%), potássio (2,59%) e magnésio (2,09%) (DUARTE, 2019).

O ferro, especificamente, se encontra comumente na natureza na forma de óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Entretanto, no que tange à rentabilidade econômica, apenas os óxidos são de fato interessantes para a exploração do elemento (CARVALHO, 2014). Os principais materiais portadores de ferro e seus respectivos teores médios são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais materiais portadores de Ferro encontrados na natureza.

Mineral	Fórmula Química	% Teórica de Ferro
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonia	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	FeTiO_3	36,8
Siderita	FeCO_3	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

Fonte: CARVALHO (2014).

Inicialmente, cabe destacar que, no geral, os diferentes minérios de ferro explorados comercialmente no Brasil, possuem teores elevados de ferro e quantidades relativamente pequenas de elementos indesejados nos processos siderúrgicos, como o enxofre (*S*), o alumínio (*Al*), o silício (*Si*), o fósforo (*P*) e os carbonatos, portanto, sendo materiais de elevada qualidade. Na região do Carajás, por exemplo, a hematita é a mais comumente encontrada fonte de ferro, sendo um dos óxidos com mais fração teórica do componente, conforme destacado na Tabela 1.

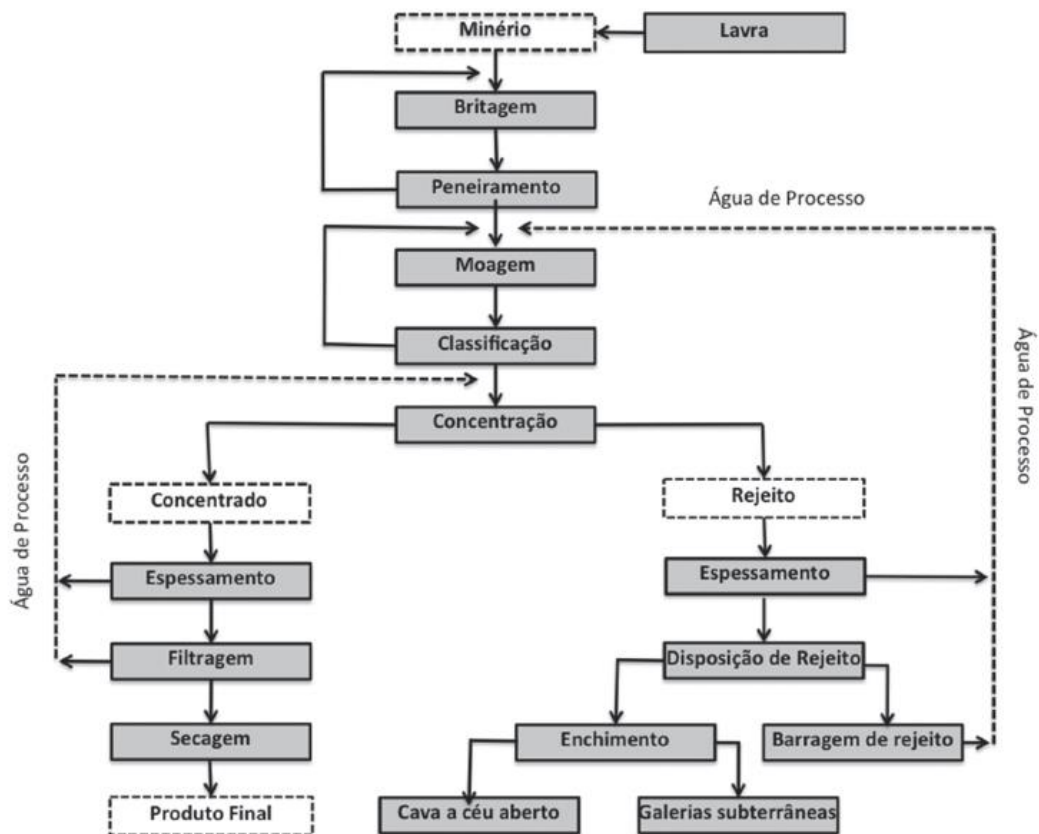
Ainda no âmbito nacional, existem duas principais regiões de destaque no contexto de produção do minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero e a Província Mineral de Carajás,

situados nos estados de Minas Gerais e Pará, respectivamente. Neste contexto, as principais empresas exploradoras do mineral brasileiro são a VALE S/A (MG, MS, PA), CSN-MINERAÇÃO (MG), Anglo American Minério de Ferro Brasil S/A (MG), Gerdau Açominas S/A (MG) e Itaminas Comércio de Minérios S/A (MG). No que tange ao consumo interno do minério de ferro, o país se destaca na produção de ferro-gusa e pelotas (JESUS, 2018).

2.1.2. O Beneficiamento do Minério

O fluxograma relacionado ao processo de beneficiamento do minério de ferro variará de acordo com as características físicas, químicas e mineralógicas do minério (COELHO, 1984). Todavia, é possível generalizar o início do tratamento do minério conforme visto na Figura 1.

Figura 1 - Etapas iniciais do processo de beneficiamento do minério de ferro.



Fonte: DUARTE, 2019.

Após sua captação nas minas, o minério conhecido como *Run of mine* (ROM) deve passar por um processo inicial de britagem no qual, através de um elevado gasto energético, é realizada a fragmentação do material. Depois, este material de ampla distribuição granulométrica deve passar por uma operação de classificação, que pode ser feita através de peneiramento, bateria de ciclones ou hidrociclones. Em relação à granulometria do minério, existem três categorias principais (CARVALHO, 2014):

- Granulado ou *Lump Ore*: minério de maior dimensão, comumente entre 200 e 12,5 mm, usado diretamente nos altos-fornos de usinas siderúrgicas para produção de ferro-gusa;
- *Sínter Feed*: minério mais fino, normalmente entre 12,5 e 0,15 mm, que deve passar por um processo de aglomeração (sinterização) para permitir sua utilização nos altos-fornos;
- *Pellet Feed*: a porção mais fina do minério, com dimensão inferior à 0,15 mm, obtido normalmente após o processo de flotação e separação magnética. Pode ser misturado ao sínter ou diretamente no processo de sinterização ou, ainda, ser usado para alimentar o processo de pelotização, responsável por transformar o pó fino em pelotas que serão utilizadas na siderurgia.

Em sequência, o minério passa por um processo de concentração, no qual é separado o mineral desejado, de valor econômico, gerando o concentrado e a ganga (materiais de baixo valor agregado que se encontram no minério de ferro, normalmente composto por silicatos), que irá constituir o rejeito. Entre as principais operações de concentração estão a separação gravítica (ou gravimétrica, baseada na diferença de densidade, tamanho e forma das partículas, sendo realizada em jigues, mesas vibratórias, espirais e cones), separação magnética, flotação e seleção mecanizada, realizada através de dispositivos automatizados de identificação e separação (DUARTE, 2019).

Após obtido o concentrado, é realizada a seção de desaguamento, que envolve a decantação, espessamento e filtragem do material e recuperação da água para o processo. A disposição dos rejeitos é realizada em barragens próprias para tal finalidade, cavas de mina ou galerias subterrâneas, sendo uma etapa crítica para minimizar os impactos e riscos ambientais. Além disso, o material deve passar pela etapa de secagem, buscando controlar o teor de umidade presente no minério (DUARTE, 2019).

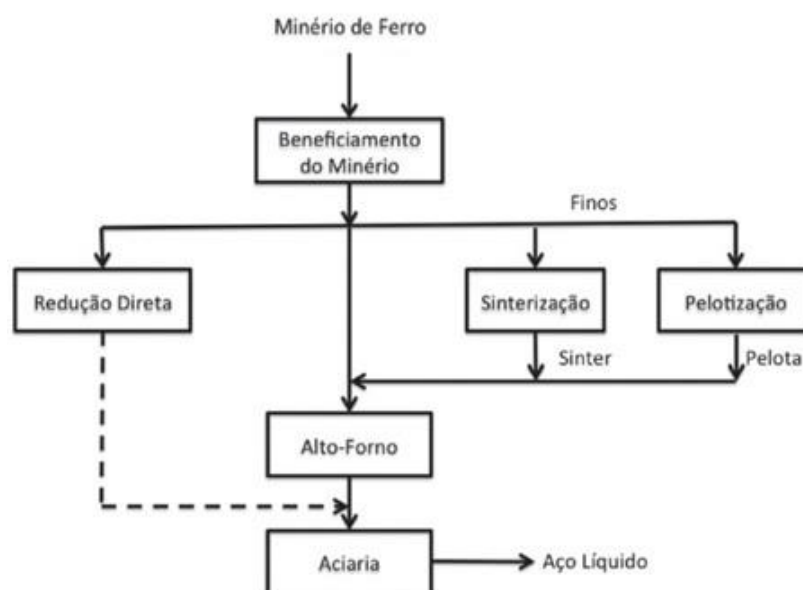
O teor de umidade do minério de ferro apresenta controles internacionais com base no parâmetro conhecido como Limite de Umidade Transportável (do inglês, *TML*). A *TML*, por sua vez, expressa o limite máximo permissível de umidade presente no minério para que seja possível seu transporte naval seguro (MUNRO e MOHAJERANI, 2015). Valores de umidade acima deste limite podem trazer danos às embarcações podendo, em situações extremas, causar o tombamento do navio. O Brasil apresenta pequenas diferenças no valor da *TML*, variando

conforme a região, porém a maior magnitude deste parâmetro se encontra com valor médio de 10,45% (PINTO *et al.*, 2015).

Pelo método convencional, é possível utilizar secadores industriais para controle de umidade do minério. Porém, devido aos grandes volumes de minério exportados, o método convencional não se mostrou economicamente viável. Neste sentido, desde 2014 vem havendo grande interesse na adaptação de um chute de transferência de minério de ferro como câmara de secagem, no intuito de reduzir de 1 a 1,8% o conteúdo de umidade do minério. O chute de transferência, por sua vez, são equipamentos fechados onde é realizada a mudança de direção das correias transportadoras, que carregam o minério do pátio para os navios e no interior das instalações industriais. O equipamento adaptado apresenta injeção de ar quente seco em sua base, bem como desumidificadores e aquecedores para adequação do ar atmosférico (ITV, 2016).

Após obtido, o concentrado pode ser diretamente comercializado como uma *commodity* ou ser empregado em processos de valorização onde será matéria-prima para constituição de produtos refinados. Neste sentido, o mercado de minério de ferro é fortemente ligado à produção do aço, que representa mais de 90% da demanda pelo minério em termos globais (CARVALHO, 2014). Dada sua importância, a produção do aço também será abordada nesta revisão, iniciando pela Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma geral do processo de produção de aço.



Fonte: DUARTE, 2019.

Como destacado pela Figura 2, a operação central no processo de produção do aço é a redução química que ocorre no alto-forno. Contudo, para adentrar à operação, deseja-se um material sólido na faixa de 8 a 18 mm, com características físico-químicas apropriadas (MOURÃO, 2008). Assim sendo, as frações de particulado mais fino, o *sínter* e o *pellet feed*, devem passar por um processo de aglomeração prévia.

O processo de sinterização, por exemplo, é uma atividade empregada no setor metalúrgico para transformar finos de minério em um produto denominado *sínter*, através da aglomeração à quente junto com outras matérias-primas. No Brasil, o *sínter* é a principal fonte metálica empregada nos altos-fornos, tendo o coque (combustível), calcário (fundente) e rejeitos externos ou interno (*sínter* de retorno, fora das especificações granulométricas adequadas) como principais matérias-primas, além do próprio minério de ferro (TALLES *et al.*, 2013). O processo de aglomeração é necessário para melhorar a permeabilidade da carga ao mecanismo de redução empregado nos fornos, possibilitando aumento do contato sólido-gás reductor, diminuição do consumo de combustível, aumento da velocidade de redução e diminuição da geração de poeiras (MORAIS, 2015).

A qualidade da matéria-prima é também um parâmetro de grande importância para o processo de sinterização, pois o alto-forno necessita de um *sínter* com boa redutibilidade e elevado teor de ferro, resistente a altas temperaturas, forças e pressões internas sem amolecer ou decrepitar, além de se buscar baixos teores de enxofre e fósforo. Além disso, elevados teores de alumina (Al_2O_3) no material se relacionam com aumento do Índice De Degradação à Redução (RDI), gerando aumento na geração de coque no alto-forno e conseqüente diminuição da produtividade do *sínter* (MORAIS *et al.*, 2015). Além disso, evita-se a utilização de minérios que possuam concentrações de sílica (SiO_2) nas frações mais grossas pois, neste caso, nem toda a sílica participa das reações, diminuindo o volume de escória e tornando o *sínter* mais frágil (ISHIKAWA, 1982).

A pelletização, por sua vez, é o processo de aglomeração destinado à fração mais fina do minério, o *pellet feed*, gerando pelotas esféricas com tamanhos entre 8 a 18 mm, ideais para sua utilização no alto-forno. Neste processo são necessários outros insumos além do minério, para melhor formação e definição das características das pelotas. No geral, a bentonita é o aglomerante mais empregado no processo de pelletização (CASSOLA e CHAVES, 1998). Sua estrutura de silicato lamelar se dispersa na matriz do minério, aumentando a viscosidade da fase líquida no interior da estrutura capilar do sólido, mantendo a integridade das pelotas.

Seja diretamente na forma de material granulado ou em aglomerados, como no caso do sinter e das pelotas, o minério de ferro com teores médios de 65% de ferro, sílica e alumínio em torno de 3% cada e baixos teores de fósforo, pode ser utilizado nos altos-fornos para produção de ferro-gusa e nos fornos de redução direta para produção de ferro-esponja (QUARESMA, 2001). Caso a matéria-prima não esteja dentro das especificações sugeridas, os processos de concentração anteriormente comentados entram em cena, possibilitando melhor adequação química do mineral.

Já no alto-forno, a carga metálica é reduzida para liberação do ferro, utilizando o carvão como agente redutor, eliminando o oxigênio presente. Para isto, é fornecida uma grande quantidade de calor, proveniente da queima do carvão. O ferro, já no estado líquido, se acumula no fundo do alto-forno. Para eliminação da ganga, junta-se o fundente (pedra de cal ou magnésio), gerando assim a escória que, por ser mais leve, se acumula sobre o ferro. No geral, a operação do alto-forno segue a seguinte cadeia de processos: introdução da carga, composta por minério de ferro, coque e fundente; entre 300 °C e 350 °C ocorre a dessecação, onde o vapor de água contido na carga é liberado; entre 350 °C e 750 °C tem-se a redução, onde óxido de ferro perde oxigênio; entre 750 °C e 1150 °C ocorre a carburação, onde o ferro se combina com o carbono, formando o ferro-gusa; entre 1150 °C e 1800 °C a gusa funde, passando para o estado líquido; e, em torno de 1600°C a liquefação acontece, separando a gusa da escória pela diferença de densidade (CHIAVERINI, 1977).

O ferro-gusa é a matéria-prima fundamental para constituição da aciaria onde, por meio da redução dos teores de carbono e outras impurezas, é transformado em aço. A remoção das impurezas é feita principalmente através da injeção de oxigênio na gusa líquida, conhecido como processo de Linz-Donawitz (LD) levando à oxidação controlada das impurezas e sua remoção para a escória. O aço líquido é, então, conduzido para a operação de lingotamento, que consiste em sua solidificação em lingotes que serão destinados a diversas aplicações específicas (DUARTE, 2019).

Conforme descrito nesta seção, o controle da composição do minério de ferro é bastante relevante para seu beneficiamento, sobretudo visando a produção do aço. Neste sentido, a atuação de separadores ciclônicos como equipamentos classificadores (ou pré-concentradores), sendo capaz de separar certa fração dos componentes de ganga e enriquecer o conteúdo férrico do mineral seria de grande interesse técnico-econômico, contribuindo para a aquisição de um concentrado de ferro de maior qualidade para alimentação dos alto-fornos ou, ainda, diminuição da quantidade de matérias-primas associadas aos processos de concentração tradicionais.

2.2. Separadores Ciclônicos

Ciclones são dispositivos de separação gás-sólido extensivamente utilizados no cenário industrial. Ainda que diversas geometrias e adaptações sejam empregadas, a configuração que predomina é a cônica-cilíndrica de fluxo reverso (COURY *et al.*, 2004), sendo assim aquela em que será concentrado o detalhamento destacado nesta seção. Cabe destacar, que a aplicação de ciclones no meio industrial é vasta, se inserindo desde a engenharia ambiental para remoção de material particulado poluente de efluente gasoso, evitando sua emissão à atmosfera; engenharia química, provendo a separação/reciclo de partículas de produtos comercialmente valiosos; engenharia de segurança, separando e controlando poeiras no ambiente de trabalho; área de fármacos e alimentos, para separação/classificação de substâncias utilizadas em seus processos produtivos; processamento da madeira, unidades de moagem, plantas de fertilizantes e cimentos etc. Além disso, ciclones também podem ser utilizados como reatores químicos e trocadores de calor, na secagem de materiais granulares e combustão de óleo (LACERDA, 2007).

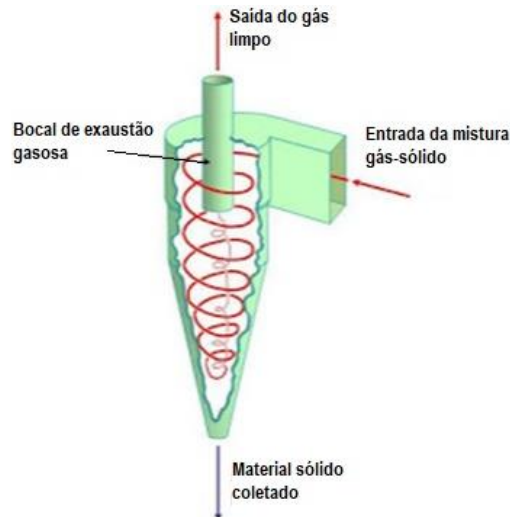
O mecanismo de separação que ocorre nos ciclones é alicerçado pela intensa força centrífuga que atua sobre o material particulado, devido ao movimento altamente rotativo da fase gasosa. Para que ocorra este fenômeno, a alimentação da mistura deve ser feita de forma tangencial à seção cilíndrica do ciclone, criando assim um perfil helicoidal descendente. A força centrífuga oriunda deste escoamento é responsável por empurrar as partículas em direção às paredes do ciclone. Tal efeito em conjunto com a gravidade são responsáveis por carrear o material para baixo, sendo este coletado no bocal inferior – *underflow* – do equipamento (OGAWA, 1984).

Ao adentrar na parte cônica do ciclone, devido à redução da área de escoamento, ocorre a aceleração das fases. Além disso, em virtude do escoamento concentrado nas regiões rentes à parede, forma-se uma região de baixa pressão no centro axial do equipamento, gerando a inversão do sentido do fluxo ao final da seção cônica, tornando-o helicoidal ascendente, provocando a exaustão do gás tratado pelo bocal superior – *overflow* – do ciclone, junto com partículas de menor dimensão que porventura não forem coletadas (HOFFMANN e STEIN, 2002). O mecanismo de funcionamento descrito pode ser melhor observado na Figura 3.

Se comparado com outros equipamentos comumente empregados para limpeza de gases, como filtros manga, lavadores Venturi e precipitadores eletrostáticos, separadores ciclônicos possuem vantagens e desvantagens. Como pontos favoráveis, destacam-se seu baixo custo de construção e manutenção e capacidade de operação em condições extremas de temperatura,

pressão e vazão de tratamento, esta última geralmente variando entre 50 e 50000 m³/h. Contudo, para particulado de dimensão inferior a 10 µm, o fator de eficiência cai consideravelmente. Além disso, o equipamento não pode ser utilizado no processamento de partículas pegajosas ou sólidos com elevado conteúdo de umidade, podendo ocorrer fixação do material em sua parede e entupimentos (COURY *et al.*, 2004).

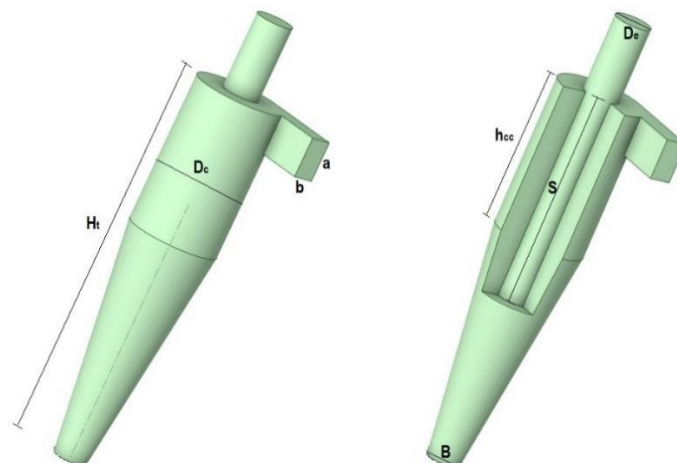
Figura 3 - Ilustração do funcionamento de um separador ciclônico convencional.



Fonte: COELHO, 2012.

No geral, ciclones contam com oito dimensões geométricas fundamentais para seu projeto, conforme destacado na Figura 4. Sendo elas, o diâmetro da seção cilíndrica (D_c), a altura do corpo cilíndrico (h_{cc}), a altura total do ciclone (H_t), o diâmetro do bocal de exaustão (D_e), o diâmetro do bocal inferior (B), a profundidade do bocal superior (S), e o comprimento e largura do bocal de alimentação, respectivamente, a e b .

Figura 4 - Cotas geométricas de destaque no estudo de ciclones.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do conhecimento dos parâmetros geométricos do ciclone, pode-se apresentar as principais famílias deste equipamento, conforme destacado na Tabela 2.

Tabela 2 - Relações geométricas de algumas famílias relevantes no estudo de ciclones.

Dimensão	Alta Eficiência		Uso Geral		Alta Capacidade	
	<i>Stairmand</i>	<i>Swift</i>	<i>Lapple</i>	<i>Swift</i>	<i>Stairmand</i>	<i>Swift</i>
D_e/D_c	0,50	0,40	0,50	0,50	0,75	0,75
a/D_c	0,50	0,44	0,50	0,50	0,75	0,80
b/D_c	0,20	0,21	0,25	0,25	0,38	0,35
S/D_c	0,50	0,50	0,62	0,60	0,88	0,85
H_i/D_c	4,00	3,90	4,00	3,75	4,00	3,70
h_{cc}/D_c	1,50	1,40	2,00	1,75	1,50	1,70
B/D_c	0,38	0,40	0,25	0,40	0,38	0,40

Fonte: Adaptado de LEITH e JONES, 1997.

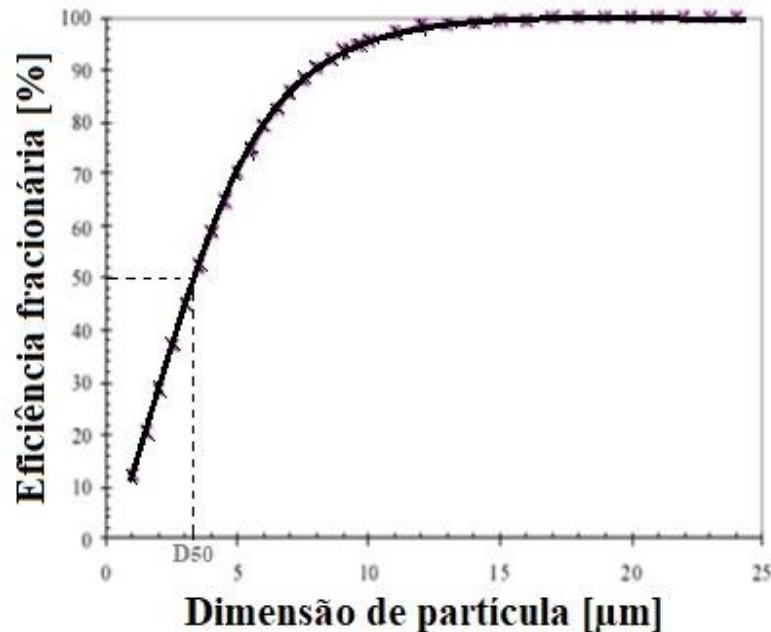
Conforme visto na Tabela 2, as famílias de ciclones são vinculadas às proporções entre as dimensões do equipamento com seu diâmetro de seção cilíndrica e também de acordo com o objetivo de sua utilização, entre ciclones de uso geral, alta eficiência e alta capacidade. Dentre as configurações de ciclones apresentadas, os pertencentes à família *Stairmand* estão entre os mais utilizados no contexto industrial, por oferecerem uma boa relação entre dispêndio energético e recuperação do material sólido.

2.2.1. Performance do Separador

A performance de um separador ciclônico é normalmente indicada pela queda de pressão operacional e a eficiência de separação do material sólido contido na corrente de tratamento. Neste sentido, a literatura apresenta diversos modelos matemáticos para o projeto e predição da performance de ciclones. Estes modelos são divididos dentro de três categorias: teóricos, semi-empíricos, estatísticos e modelos computacionais baseados em CFD (ZHAO, 2009).

Outro parâmetro recorrente no contexto de performance de ciclones é o diâmetro de corte (D_{50}). Este parâmetro é função das propriedades do sólido e do gás, das dimensões do ciclone e das condições operacionais do mesmo, se caracterizando como o tamanho da partícula que é coletada com 50% de eficiência (MASSARANI, 2002). Neste sentido, se inserem as curvas de eficiência dos ciclones, que relacionam o diâmetro da *i-ésima* partícula com sua eficiência de coleta individual, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Curva de eficiência típica da operação de ciclones



Fonte: Adaptado de RAMIREZ, 2009.

Barth (1956), como um dos pioneiros no estudo de ciclones, propôs um conjunto de equações para estimar a eficiência de coleta em ciclones a partir da análise da velocidade terminal das partículas. Mais tarde, o modelo de Barth foi complementado pelo estudo de Muschelknautz (1972), que incluiu os efeitos de concentração do particulado e atrito com as paredes do equipamento.

Leith e Licht (1972) propuseram um modelo para avaliação da performance de separador ciclônico baseado no balanço de forças que agem sobre a partícula que deverá ser coletada. Ainda que não apresente os resultados mais precisos, quando comparado com outros modelos da literatura (ALTMAYER *et al.*, 2004), o modelo proposto por Leith e Licht configura-se como um procedimento de cálculo simples que pode ser utilizado para uma rápida avaliação do separador.

Ainda nos anos 70, Koch e Licht (1977) apresentaram uma abordagem sistemática para projeto de ciclones, propondo as sete razões geométricas de destaque, especificadas em termos do diâmetro da seção cilíndrica do separador. Neste contexto, os autores destacaram que as razões adimensionais não podem ser escolhidas arbitrariamente para um projeto viável de separador ciclônico.

Mais tarde, no ano de 1990, Iozia e Leith (1990) conceberam uma nova metodologia para avaliação de ciclones. Este modelo parte da mesma premissa de Barth (1956), baseando-

se no diâmetro de Stokes da partícula esférica que detém a mesma velocidade terminal da partícula sólida em tratamento no separador ciclônico. A modelagem partiu de 26 análises experimentais em ciclones realizadas em temperatura ambiente.

Nas proximidades do século 21, Lidén e Gudmundsson (1997) apresentaram sua metodologia para mensuração da eficiência de separadores ciclônicos. Sua metodologia se mostrou válida para uma vasta gama de ciclones, dentre os quais está o ciclone da família *Stairmand*, com diâmetro do corpo cilíndrico entre 0,203 e 0,252 m, operando com valores de Reynolds no intervalo de 5000 a 500000.

No início dos anos 2000, Massarani (2002) relacionou expressões empíricas para determinação da eficiência individual de coleta da partícula i com os ajustes de distribuição granulométrica do material particulado. Desta forma, o autor equacionou a eficiência de coleta global, por exemplo, apresentando a equação integrada para o caso de um ciclone *Stairmand* e distribuição ajustada pelo modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB). Além disso, Massarani apresentou uma metodologia para avaliação da queda de pressão para diferentes famílias de ciclones.

Em relação à queda de pressão na operação de um separador ciclônico isento de material particulado, foi proposto uma equação que levaria em conta a massa específica da fase fluida, sua velocidade de alimentação e as dimensões geométricas do separador ciclônico, resumidas na forma do parâmetro adimensional ΔH . Durante os anos, vários autores como Shepherd e Lapple (1940), Casal e Benet (1983) e Ramachandran (1991) buscaram quantificar de forma mais precisa o valor do parâmetro ΔH para avaliação da queda de pressão livre em ciclones.

O equacionamento relativo aos modelos que serão utilizados para avaliação dos ciclones, presentes no escopo deste trabalho, estão detalhados no APÊNDICE B.

2.2.2. Estudos Relacionados

Nos estudos tradicionais ligados à otimização de separadores ciclônicos, destacam-se a análise de variáveis operacionais e geométricas do equipamento, buscando minimizar a queda de pressão e potencializar os fatores de coleta do material particulado. Além disso, entender como estas variáveis se relacionam no mecanismo de funcionamento de ciclones é de fundamental importância para o escopo deste trabalho. Assim sendo, esta seção destacará alguns estudos relevantes para a análise de interdependência entre as variáveis de destaque na operação desta classe de equipamentos.

Gimbun *et al.* (2004) examinaram os efeitos de diversas variáveis tais como temperatura, densidade do material sólido e velocidade de entrada na eficiência de separação do ciclone, utilizando dados experimentais e quatro modelos de eficiência disponíveis na literatura. Em suma, foram obtidos melhores fatores de coleta conforme aumentava-se a velocidade de alimentação (ZHU e LEE, 1999) da mistura e massa específica do particulado. Em contrapartida, elevados valores de temperatura se relacionaram à diminuição da performance da separação, devido ao aumento da viscosidade da fase gasosa.

Morin *et al.* (2020) investigaram os efeitos da concentração de sólidos na corrente de alimentação e da razão de aspecto do bocal de entrada na eficiência de coleta do ciclone, através de simulações fluidodinâmicas. Foi constatado que o aumento da concentração de sólidos influenciou positivamente na separação global do ciclone. Além disso, foi demonstrado que a separação do sólido é altamente favorecida conforme o incremento da razão de aspecto do bocal de entrada. Em seus estudos, Wasilewski (2016) também apontou o incremento do fator de eficiência influenciado pelo aumento da concentração de sólidos na corrente de tratamento.

Com relação às dimensões geométricas do ciclone, o estudo de Brar *et al.* (2015) através da metodologia CFD demonstrou que a altura do corpo cilíndrico do ciclone afeta intimamente a queda de pressão, gerando sua redução conforme se aumenta a altura cilíndrica. Por outro lado, o aumento de altura da parte cônica também se relaciona a um incremento considerável na eficiência de coleta do ciclone. Conclusões análogas foram obtidas por Brar e Shastri (2020).

Por outro lado, GAO *et al.* (2012) estudaram os efeitos das dimensões do bocal de entrada e do comprimento de penetração do bocal do *overflow* no ciclone, através de simulações CFD. O grupo constatou que quando o comprimento do bocal de exaustão encontra a seção cônica do ciclone, a eficiência de separação global tende a diminuir. Além disso, a diminuição das dimensões do bocal de entrada também acarretou diminuição do fator de eficiência.

2.2.3. Perfis de Escoamento

Uma vez entendido como as variáveis de processo afetam a operação de separadores ciclônicos, é importante destacar o comportamento dos perfis internos de escoamento formados no interior do equipamento. Para tal, será utilizado como exemplo o ciclone da família *Stairmand* de alta eficiência, por ser um dos mais utilizados no meio industrial e por serem da mesma categoria dos equipamentos avaliados neste trabalho.

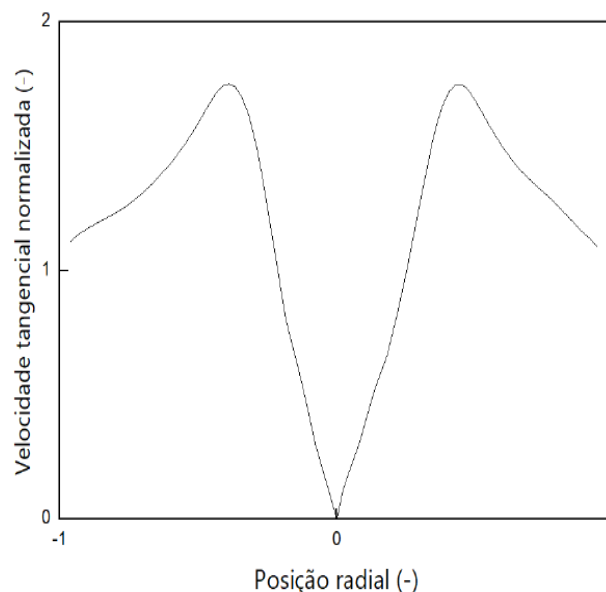
O escoamento altamente rotativo no interior dos ciclones é definido através do vórtice de Rankine. Este modelo se refere ao comportamento de um fluxo circular no qual a região

central, próxima à origem, está em estado de rotação sólida, enquanto a região externa é livre de vorticidade, fazendo com que a velocidade seja inversamente proporcional à distância da origem do sistema coordenado (GIAIOTTI, 2006).

Em resposta ao vórtice de Rankine, ao se realizar a adimensionalização dos perfis de velocidade axial, velocidade tangencial, pressão estática e posição radial, são obtidos perfis de escoamento típicos da família de ciclones analisada, neste caso, de um *Stairmand* de alta eficiência. Tal comportamento específico contribui para validação de modelos utilizados para análise do escoamento em ciclones (OLIVEIRA, 2019).

Em relação ao perfil de velocidade tangencial de um *Stairmand* de alta eficiência padrão, é esperado um comportamento linear crescente conforme se afasta do centro do equipamento ao longo da posição radial, isto na região mais central do equipamento, onde o escoamento é altamente rotativo. Afastando-se ainda mais do centro do equipamento, a velocidade tangencial assume um valor máximo e, então, passa a escoar em uma região livre de vorticidade, fazendo com que a velocidade tangencial caia de forma diretamente proporcional à distância do centro do equipamento (OLIVEIRA, 2019). O comportamento descrito é ilustrado na Figura 6.

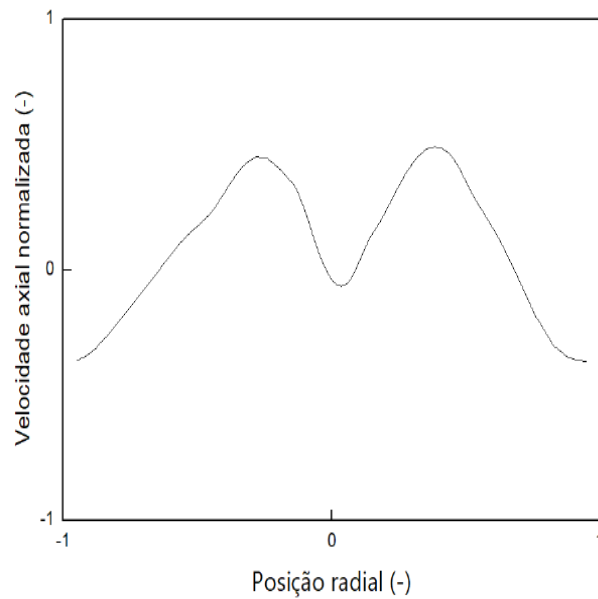
Figura 6 - Perfil típico de velocidade tangencial da fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família *Stairmand*.



Fonte: OLIVEIRA, 2019.

Já o perfil de velocidade axial da fase gasosa deve apresentar seu comportamento na forma da letra “M”, também referenciado na literatura como “W invertido” (HOFFMANN e STEIN, 2002), em virtude do acentuado gradiente radial de pressão gerado pela vorticidade do gás, como pode ser observado na Figura 7.

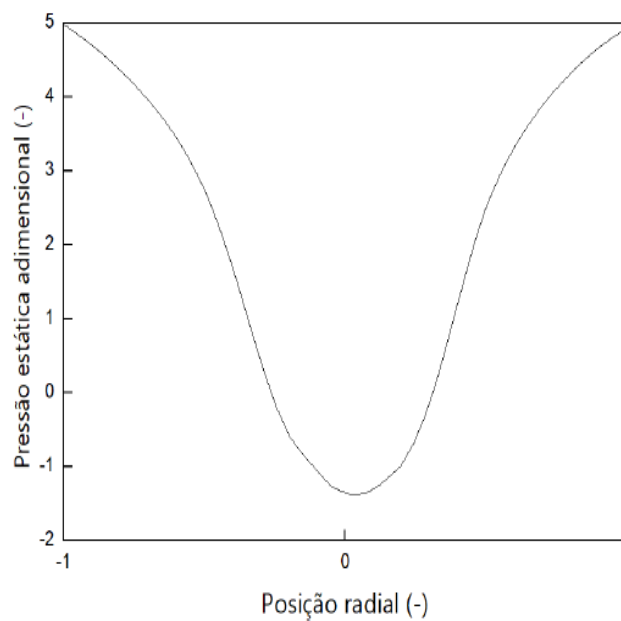
Figura 7 - Perfil típico de velocidade axial da fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família *Stairmand*.



Fonte: OLIVEIRA, 2019.

Considerando ainda o forte gradiente de pressão presente no ciclone, é esperado do perfil de pressão estática no eixo radial do equipamento o comportamento visualizado na Figura 8. Em outras palavras, espera-se observar maiores valores de pressão estática nas regiões próximas à parede do ciclone e, pressões menores, em direção ao centro do equipamento, devido ao fluxo gasoso concentrar-se nas regiões mais próximas da parede.

Figura 8 - Perfil típico de pressão estática na fase gasosa encontrado na operação de ciclones da família *Stairmand*.



Fonte: OLIVEIRA, 2019.

No processo de adimensionalização dos perfis, cabe destacar que as medidas de velocidades são transcritas em uma variável adimensional através da velocidade de alimentação do gás no ciclone. Por outro lado, a adimensionalização da queda de pressão é realizada através do uso do número de Euler, conforme pode ser observado na Equação 1.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\left(\frac{1}{2} \rho v_i^2\right)} \quad (1)$$

2.3. O CFD Aplicado no Estudo de Ciclones

Uma vez inserida no contexto de análise de operações e equipamentos industriais, a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) vem sendo notoriamente utilizada na análise de separadores ciclônicos. Observa-se que estas aplicações seguiram tanto as diretrizes tradicionais da área, envolvendo a avaliação de condições operacionais e geométricas do equipamento, mas também na concepção de novas geometrias e formas de operação de ciclones, como será visto a seguir.

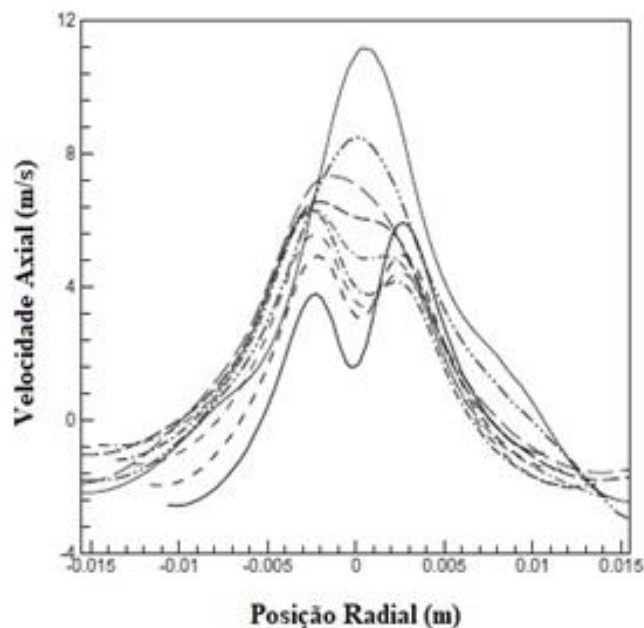
Ramirez (2009) apresentou uma formulação estacionária para análise de nove ciclones com dimensões diversificadas. Fazendo uso do modelo de turbulência RNG (*Re-normalization Group*) $k-\varepsilon$ para modelagem da fase gasosa e da função DPM – *Discrete Phase Model* – para inserção da fase dispersa, a autora observou considerável congruência entre os resultados experimentais e numéricos relacionados às propriedades dinâmicas do escoamento. Porém, consideráveis desvios da eficiência de coleta foram obtidos.

Saputro *et al.* (2018) lançaram mão da ferramenta CFD na investigação dos efeitos fluidodinâmicos observados a partir da inserção de um dispositivo cônico na base do ciclone, justamente no bocal que direciona o material sólido para a coleta. Neste sentido, utilizou-se uma formulação estacionária amparada pelos modelos das Tensões de Reynolds (*RSM*) e DPM para modelagem das fases contínua e dispersa, respectivamente. Por meio das simulações numéricas, os autores observaram melhora na separação do material sólido através da inserção do novo dispositivo.

Utilizando uma concepção transiente composta pelo modelo de turbulência *LES* – *Large Eddy Simulation* – e o DPM para introdução da fase sólida no escoamento, Elsayed *et al.* (2012) avaliaram numericamente os efeitos das dimensões do bocal de exaustão gasosa na performance e comportamento de separador ciclônico. Foi constatado que a diminuição do diâmetro do bocal

gerou aumento da queda de pressão do equipamento. Além disso esta mudança provocou uma mudança gradual no perfil de velocidade axial do ciclone, desde sua base até o topo, convertendo o comportamento característico do “W invertido” para o formato da letra “V”, conforme pode ser visto na Figura 9. Esta mudança de comportamento é associada ao aumento do atrito do fluido com as paredes do bocal de exaustão.

Figura 9 - Modificação do perfil de velocidade axial da fase gasosa na operação de ciclone devido à redução do diâmetro do bocal de exaustão.



Fonte: Adaptado de Elsayed *et al.* (2012).

Outra investigação foi realizada por Balestrin *et al.* (2017), que propuseram a análise da influência da constrição de área do bocal de saída superior (*overflow*) na eficiência de separação em unidade ciclônica. A pesquisa foi apoiada por resultados experimentais complementados pela simulação fluidodinâmica do equipamento. A simulação numérica foi conduzida pela metodologia RANS utilizando o modelo RSM para resolução da turbulência do escoamento, tratando-se de uma perspectiva Euleriana-Lagrangeana, utilizando o modelo DPM para inserção da fase sólida. Os autores conseguiram um ganho de eficiência na casa de 5 a 20% para coleta de particulado fino com a mudança geométrica no ciclone.

Hiraiwa *et al.* (2013) também fizeram uso da metodologia CFD buscando aprimorar a eficiência de coleta de particulado em separador ciclônico através da utilização de alimentações de ar puro secundárias. Desta forma, intensificando a velocidade de rotação do gás na seção cilíndrica do equipamento, os pesquisadores foram capazes de diminuir o diâmetro de corte,

mantendo praticamente inalterada a queda de pressão em relação à operação de um ciclone padrão, operando em condições semelhantes.

Chetiwal *et al.* (2017) apresentaram um estudo numérico da variação do diâmetro do bocal de exaustão gasoso e suas consequências na operação de separadores ciclônicos, a partir da metodologia *CFD*, partindo de uma formulação estacionária com emprego do modelo das tensões de Reynolds para incorporação da turbulência do escoamento e do modelo *DPM* para inserção do material particulado. Inicialmente, o autor destacou a inversão no comportamento do perfil de velocidade axial do gás através da diminuição do diâmetro do bocal, conforme já relatado por Elsayed *et al.* (2012). Além disso, constatou-se uma diminuição da queda de pressão do equipamento a partir do aumento do diâmetro do bocal, porém, acompanhada por uma diminuição considerável do fator de eficiência de coleta.

Oliveira (2019) utilizou a metodologia *CFD* para análise do escoamento em um ciclone adaptado com bicos aspersores de água, buscando aumentar a recuperação do material sólido. Neste contexto, foi utilizado um modelo híbrido baseado em *CFD* e no modelo de coagulação cinemática para computar as iterações lagrangeanas, partindo de uma formulação euleriana transiente para modelagem da fase gasosa. O autor reportou aumento considerável da recuperação do material sólido através da introdução da fase úmida, por volta de 11%, em conjunto com redução substancial de aproximadamente 55% no diâmetro de corte.

Conforme destacado nesta seção, o estudo de separadores ciclônicos sob a ótica da fluidodinâmica computacional concentra-se na exploração de condições operacionais, modificação de parâmetros geométricos e formas de operação alternativas para potencialização da performance do equipamento. Porém, percebe-se uma notável falta de conteúdo no que tange a utilização de ciclones como dispositivos classificadores, avaliando o mecanismo de separação frente a uma mistura sólida multicomponente. Neste sentido, se insere o tema deste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostras de Minério de Ferro

O material alvo de estudo deste trabalho foi cedido pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV), sendo proveniente da região do Carajás (PA), sendo assim um minério rico em conteúdo férrico, típico dos depósitos de hematita característicos desta região. Tal característica provê ao mineral uma elevada massa específica, com média de $4,5542 \text{ g/cm}^3$, obtida através de ensaio em picnômetro de volume (referencial) de 25 mL e utilizando o xileno como solvente. Maior detalhamento dos ensaios de picnometria podem ser observados na seção 3.1.1.

Buscando utilizar como material de trabalho apenas a fração mais fina do minério de ferro, sendo aquela que majoritariamente será carregada devido a passagem do ar na operação de secagem convectiva, o minério de ferro foi inicialmente seco em estufa por um período de 24 horas à 105°C e, então, submetido a tratamento em um sistema de peneiras sobre agitação. Para tal, foram utilizadas peneiras da série Tyler, retirando a fração mais fina ($< 500 \mu\text{m}$) para realização dos experimentos de separação. O procedimento é ilustrado na Figura 1.

Figura 10 - Ilustração do procedimento de aquisição da fração fina do minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1. Caracterização do Minério

A caracterização do material partiu do ensaio de picnometria, para averiguação de sua massa específica. O teste foi realizado em triplicata após a operação de peneiramento, usando para cada repetição aproximadamente 1 grama do material fino peneirado. A calibração do picnômetro foi feita com água destilada, para aferição de seu volume. Em sequência, o picnômetro era preenchido com o solvente (xileno) para confirmação de sua densidade. E,

então, era realizada a medição com o sólido. Os resultados dos ensaios de picnometria são apresentados no Capítulo 5.

Para avaliar a capacidade de separação e classificação dos ciclones, o minério de ferro preparado pela metodologia destacada no início deste capítulo foi avaliado mediante duas análises de caracterização físico-químicas: *Mastersizer* e Fluorescência de Raios-X (FRX). Cabe destacar que as análises foram realizadas para o material de alimentação dos ensaios, obtido pelo procedimento já comentado, e para amostras obtidas das coletas dos experimentos de separação, ou seja, os materiais obtidos no *underflow* dos ciclones.

O equipamento *Mastersizer* foi utilizado para definição das frações de distribuição de tamanhos das partículas presentes na amostra de minério de ferro. Seu princípio de funcionamento se apoia na difração de raios laser, medindo a intensidade da luz espalhada à medida que o feixe laser interage com as partículas dispersas na amostra, determinando assim as frequências de tamanhos.

A avaliação das distribuições granulométricas dos materiais de alimentação e coletados permite a averiguação do grau de separação para cada tamanho de partícula. Além disso, esta análise permite verificar graficamente a influência das condições operacionais do ciclone na separação do minério de ferro.

A técnica FRX é uma metodologia não destrutiva baseada na medida da intensidade dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos constituintes da amostra. Através desta técnica pôde ser realizada uma verificação qualitativa e quantitativa sobre a constituição das amostras. Desta forma, analisando as diferentes composições entre o minério de ferro original e as amostras coletadas, pode-se averiguar a capacidade de concentração do conteúdo férrico do material, bem como avaliar a influência das condições operacionais nesta operação de classificação. Ressalta-se aqui que as análises FRX foram realizadas com o apoio do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), vinculado ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, localizada na cidade de São Paulo.

Uma vez obtidas a distribuição de tamanhos da amostra de minério de ferro, os dados foram ajustados conforme os modelos de distribuição granulométrica apresentados no APÊNDICE A. A partir do modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, no caso o modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB), foi obtida a expressão que relaciona a fração de material (X) com os diâmetros das partículas (D_i) presentes na amostra, relação fundamental

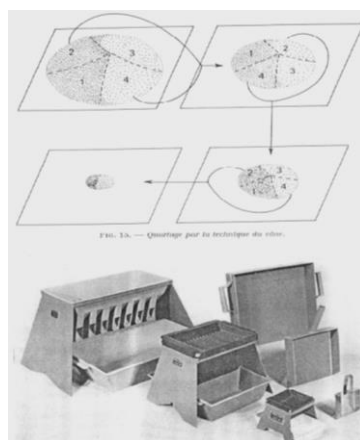
para determinação dos fatores de eficiência de separação teóricos e alimentação do modelo numérico adotado na simulação dos ciclones.

3.1.2. Preparação das Amostras

Para encaminhamento das amostras de minério de ferro para as análises de caracterização citadas na seção anterior, foi utilizado o método de quartejamento para adequação da amostra. A metodologia foi usada para preparação de todas as amostras de material coletado no *underflow* dos ciclones, como também para o material alimentado original. O quartejamento é um processo de redução de amostra a pequenas porções representativas da amostra original. É importante destacar que antes de se proceder com o quartejamento da amostra, ela deve ser convenientemente homogeneizada (BRISOLA, 2008). O método pode proceder de forma manual ou mecânica. De forma manual, o procedimento, também destacado na Figura 11, é como se segue:

- Em uma superfície devidamente higienizada, a amostra inicial deve ser disposta na forma de um cone;
- Com o auxílio de espátula, deve-se proceder realizando uma pressão no vértice do cone, buscando obter um tronco de cone;
- Divisão do cone truncado em partes iguais, sendo usual a divisão em 4, 8 ou outro número par de partes;
- Retirar metade das partes obtidas, de forma intercalada, misturando-as e iniciando novamente o processo até reduzir a amostra original à massa desejada.

Figura 11 - Ilustração do procedimento de *quartejamento* de amostra e quartecedores mecânicos.



Fonte: BRISOLA (2008).

O quartejamento do minério de ferro original, utilizado para alimentação dos ciclones, foi realizado da forma destacada na descrição do método, utilizando uma divisão em 4 partes,

de modo a obter-se ao fim duas amostras de aproximadamente 25 gramas, sendo uma enviada para a análise de caracterização granulométrica e, a outra, para o FRX.

Para a preparação das amostras de minério coletado, todas as réplicas do material obtidas pelos ensaios de separação em determinada condição experimental foram submetidas ao mesmo processo de quarteamento. Porém, de modo a garantir a representatividade de todas as réplicas na amostra quarteada, foram misturadas as partes da última operação de quarteamento de todas as réplicas. Cabe destacar que certa porção do material das réplicas originais foram mantidos devidamente separados, na forma de amostral arquivo. Ao final do procedimento, eram obtidas duas amostras finais, sendo a primeira contendo entre 28 e 35 gramas destinada ao FRX e, a segunda, entre 14 e 18 gramas sendo destinada ao *Mastersizer*. Cabe destacar que a quantidade de amostra final se relacionava com a condição experimental utilizada nos experimentos de separação, pois, para cada uma, era obtido menor ou maior quantidade de material coletado.

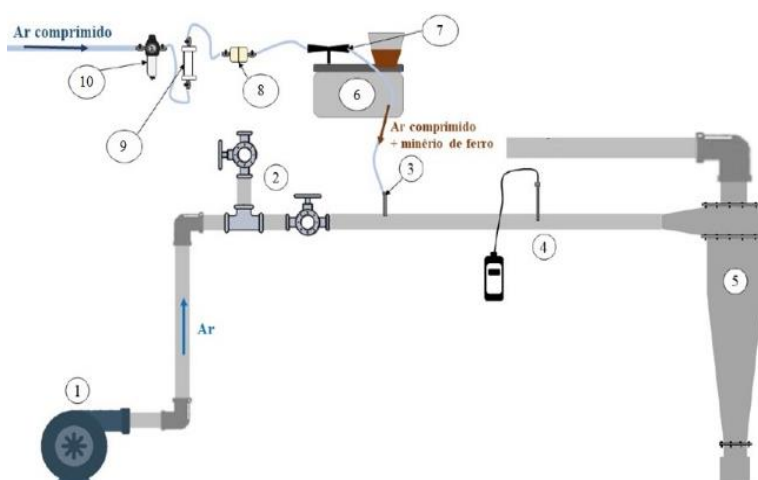
3.2. A Unidade Experimental

Esta seção é dedicada à apresentação da unidade experimental utilizada para viabilizar os ensaios de coleta do minério de ferro. Além disso, serão detalhados os equipamentos avaliados bem como o procedimento de aquisição dos dados experimentais. A unidade em questão está localizada no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

3.2.1. Um Panorama Geral

Na Figura 12 é apresentado um esquema representativo da unidade experimental usada nos experimentos de separação.

Figura 12 - Ilustração da unidade experimental utilizada nos ensaios de separação do minério de ferro.

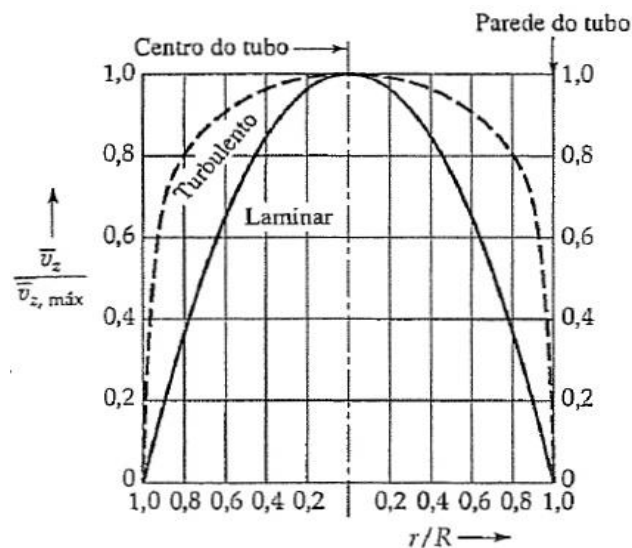


Fonte: elaborado pelo autor.

O ar é alimentado no sistema através de um soprador radial de 7 HP (1). Sua vazão é então regulada para entrada no ciclone através do conjunto de válvulas globo (2) e de um anemômetro de fio quente AKSO utilizado na posição 4, posicionado no centro radial da tubulação de diâmetro de 4,86 cm. Ressalta-se aqui também a divisão da alimentação do ar em duas correntes, uma de tratamento e outra secundária (*by-pass*), contribuindo para a segurança e regulagem da unidade. A alimentação do minério é então realizada no ponto 3 da linha, através de um alimentador (6) composto por um disco rotativo, que opera com ar comprimido e um Venturi à pressão padronizada de 2 kgf/cm².

A utilização da velocidade radial central, também tida como a velocidade máxima do fluxo gasoso, como a média, torna-se, em certo grau, uma medida consistente em virtude do comportamento do escoamento sob regime turbulento, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Comparação de perfis de velocidade em regime laminar e turbulento em um tubo.



Fonte: BIRD et al., 2ª Ed, 2004.

Conforme visto na Figura 13, diferentemente do escoamento laminar em que o fluxo gasoso apresenta um perfil de velocidades parabólico com uma significativa diferença entre a velocidade máxima e a média do escoamento, no regime turbulento ocorre um alargamento do perfil, no qual os efeitos de parede são pronunciados em menor grau para regiões não-rentes às paredes da tubulação, fazendo com que a velocidade média do sistema se aproxime consideravelmente da velocidade máxima, sendo esta medida na posição radial central.

No sistema de alimentação de sólido em questão, o ar comprimido passa por um regulador de pressão (10), permeando então um meio poroso (9) constituído de partículas de sílica para remoção de sua umidade residual. Em sequência, o ar escoava através de uma

membrana porosa (8) responsável por remover as partículas sólidas contaminantes, como a poeira. Então, ao escoar pelo eixo horizontal do Venturi (7), o ar promove uma região de baixa pressão no eixo vertical do aparato, responsável por aspirar as partículas minerais presentes no desnível do disco rotativo. A mistura ar-minério é então alimentada na linha de tratamento.

As condições operacionais do ar, como velocidade e temperatura, são aferidas então no ponto 4. No *underflow* do ciclone, a caixa coletora revestida internamente por um saco coletor, é utilizada para contenção do material particulado coletado. Além disso, para determinação da queda de pressão dos ciclones, procedeu-se com um micro-manômetro para medição da diferença de pressão entre as seções de entrada e exaustão gasosa. As mangueiras do aparato foram conectadas a tubos de Pitot localizados nos bocais, igualmente espaçados com relação ao corpo do ciclone (aproximadamente 10 cm). Vale destacar que a medida fora feita em sistema aberto, ou seja, sem a tubulação de conexão do bocal de exaustão, conforme sugerido por Hoffmann e Stein (2002).

3.2.2. Ciclones Avaliados

Neste trabalho, foram utilizados três separadores ciclônicos modificados da família Stairmand, de modo a verificar a influência da razão $[h_{cc}/D_c]$. Assim sendo, todas as cotas geométricas dos três ciclones são idênticas, com exceção da altura do corpo cilíndrico (h_{cc}) e, conseqüentemente, da altura do corpo cônico. Cabe destacar que as modificações mais expressivas dos ciclones de trabalho com relação a um *Stairmand* padrão estão na proporção das alturas do corpo cilíndrico e cônico e na profundidade do bocal do *overflow* (S). As cotas geométricas de destaque dos três ciclones podem ser observadas na Tabela 3. Adicionalmente, é inserida a Figura 14, para melhor demonstrar a proporção geométrica entre os ciclones.

Tabela 3 - Cotas geométricas dos três ciclones avaliados.

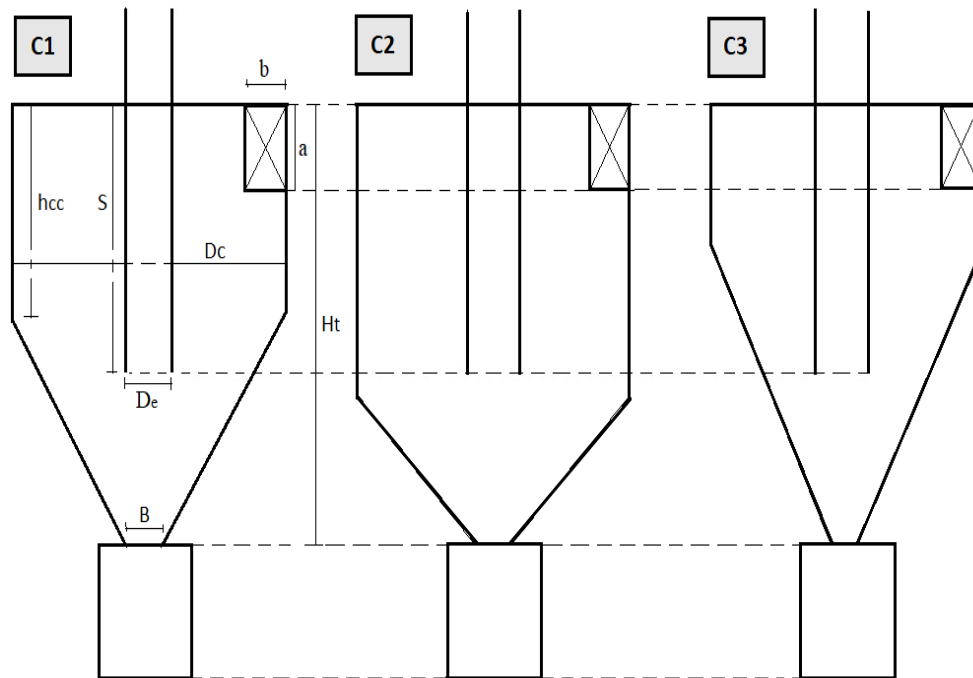
Cota / Ciclone	a [cm]	b [cm]	D_c [cm]	H_t [cm]	h_{cc} [cm]	D_e [cm]	S [cm]	B [cm]
C ₁	10,5	5,5	24,6	102,8	40,5	10,0	57,8	9,0
C ₂	10,5	5,5	24,6	102,8	65,0	10,0	57,8	9,0
C ₃	10,5	5,5	24,6	102,8	15,5	10,0	57,8	9,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando como base os valores expressos na Tabela 3, sabe-se que as razões (h_{cc}/D_c) são **1,65**, **2,64** e **0,63**, respectivamente para os ciclones C₁, C₂ e C₃. Além das cotas já apresentadas, cabe destacar algumas medidas complementares dos ciclones, relevantes para

definição das geometrias de análise no âmbito das simulações CFD, o bocal de alimentação possui uma extensão próxima de 20 cm e, a seção externa do bocal de exaustão, por volta de 10 cm (considerando o local de aferição da queda de pressão). Vale destacar que as dimensões da caixa coletora são 15x20 cm

Figura 14 - Esquema ilustrativo da proporção geométrica entre os ciclones.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3. Procedimento Experimental

Inicialmente, após realizada a calibração da unidade, o sistema era deixado ligado por um período de aproximadamente 30 minutos, para que alcançasse o regime permanente. Depois, os parâmetros operacionais como velocidade e temperatura eram novamente tomados, realizando pequenos ajustes, caso necessário. As condições de operação gerais podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições operacionais avaliadas no estudo dos ciclones.

	Velocidade do Ar		Vazão de Sólidos	
	[m/s]		[g/s]	
v	v_0	v_i	\dot{M}_s	
V_1	10	3,21	$\dot{M}_{s,1}$	0,11296
V_2	20	6,42	$\dot{M}_{s,2}$	0,23206
V_3	30	9,64	$\dot{M}_{s,3}$	0,34611

Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento se iniciava com o preenchimento do disco do alimentador de sólidos, utilizando para tal uma massa padronizada ao redor de 14 g de material. Posteriormente, era realizado o ajuste das condições operacionais da unidade, conforme apresentado na Tabela 4. Desta maneira, foram avaliadas 9 condições experimentais para cada ciclone, considerando as combinações das variáveis apresentadas. Cabe destacar que, devido a mudança da área transversal de escoamento entre o local de aferição 4 da unidade experimental e a entrada do ciclone, os valores de velocidade foram corrigidos mediante a relação entre as áreas circular e retangular, sendo v_0 e v_i as velocidades medida e ajustada, respectivamente.

Cabe ressaltar que a vazão de sólidos de referência estipulada na Tabela 4 foi determinada através do tempo de rotação do disco alimentador, ou seja, do tempo que levaria para se realizar uma volta completa do disco, permitindo a sucção de todo o material nele presente. Além disso, as vazões sólidas foram determinadas de maneira que ficassem no geral igualmente espaçadas e, ainda, levando em conta a limitação do próprio sistema de alimentação, cujas condições extremas já são próximas das vazões mássicas $\dot{M}_{s,1}$ e $\dot{M}_{s,3}$.

Uma vez preparada a unidade e acoplada a caixa coletora ao ciclone, o sistema era deixado ligado por um período de 30 minutos, para que entrasse em regime permanente e, posteriormente, o ensaio era iniciado, cronometrando-se o tempo de alimentação, para devida aferição da vazão de alimentação do minério. Terminado o ensaio, a massa coletada na caixa era então pesada e, desta forma, determinada a eficiência de separação global (η) do ensaio. Cabe destacar que para cada condição operacional, foram realizadas seis réplicas experimentais.

3.3. Tratamento Estatístico dos Dados

Para verificar a tendência estatística dos resultados de eficiência de coleta foi utilizado o teste de hipótese t de *Student*. Universalmente conhecido por sua vasta aplicação, o teste t utiliza conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma certa hipótese nula, sendo aplicada quando os dados tratados seguem uma distribuição normal. Alternativamente, como neste caso de análise, em que não se conhece a variância da população de dados, o método utiliza uma variância amostral, desta maneira, fazendo um ajuste na população que passa a apresentar uma distribuição t *Student*.

O tratamento estatístico foi realizado no *Excel* utilizando, inicialmente, o teste F para averiguar a relação entre as variâncias dos dois conjuntos de dados avaliados. A depender do resultado da estatística f , sendo inferior ou superior ao f crítico, utilizava-se respectivamente o teste t para amostras de variâncias equivalentes ou para variâncias diferentes. Então, analisando-

se o valor da estatística t , podendo ser inferior ou superior ao t crítico disponibilizado no método, a hipótese nula (H_0) era aceita ou rejeitada, nesse último caso, assumindo a hipótese alternativa (H_1).

Por fim, cabe destacar que a hipótese nula no caso de análise deste trabalho é a igualdade estatística entre as médias dos dois conjuntos de dados e, a hipótese alternativa, relaciona-se com a desigualdade das médias, podendo a média do conjunto hipotético de dados 1 ser inferior ou superior a do conjunto 2.

Tomando como exemplo a verificação da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de separação dos ciclones, a hipótese nula seria equivalente à consideração de que, estatisticamente a um nível de significância de 5%, não houve mudança observável na média dos resultados de eficiência. Por sua vez, a hipótese alternativa, seria equivalente à consideração de que houve incremento ou decremento da eficiência de separação com a variação da velocidade do ar.

Para avaliação da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de separação, o teste de hipóteses adotado pode ser observado na Tabela 5. Para cada condição de vazão de alimentação de sólidos, as médias dos resultados de separação são comparados para cada condição de velocidade de alimentação do ar, duas a duas, para cada ciclone avaliado.

Tabela 5 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de separação global do minério de ferro.

Teste	Vazão de Sólidos [g/s]	Hipótese Nula (H_0)	Hipótese Alternativa (H_1)
1	$\dot{M}_{s,1}$	$\eta [V_2] = \eta [V_1]$	$\eta [V_2] > \eta [V_1]$
2	$\dot{M}_{s,1}$	$\eta [V_3] = \eta [V_2]$	$\eta [V_3] > \eta [V_2]$
3	$\dot{M}_{s,2}$	$\eta [V_2] = \eta [V_1]$	$\eta [V_2] > \eta [V_1]$
4	$\dot{M}_{s,2}$	$\eta [V_3] = \eta [V_2]$	$\eta [V_3] > \eta [V_2]$
5	$\dot{M}_{s,3}$	$\eta [V_2] = \eta [V_1]$	$\eta [V_2] > \eta [V_1]$
6	$\dot{M}_{s,3}$	$\eta [V_3] = \eta [V_2]$	$\eta [V_3] > \eta [V_2]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à avaliação da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de separação dos ciclones, o teste de hipóteses adotado pode ser observado na Tabela 6. De maneira análoga à Tabela 5, para cada condição de velocidade de alimentação do ar, as médias dos resultados de separação são comparados para cada vazão mássica de minério, duas a duas.

Tabela 6 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de separação global do minério de ferro.

Teste	Velocidade do Ar [m/s]	Hipótese Nula (H ₀)	Hipótese Alternativa (H ₁)
1	V ₁	$\eta [\dot{M}_{s,i}] = \eta [\dot{M}_{s,j}]$	$\eta [\dot{M}_{s,i}] > \eta [\dot{M}_{s,j}]$
2	V ₁	$\eta [\dot{M}_{s,j}] = \eta [\dot{M}_{s,k}]$	$\eta [\dot{M}_{s,j}] > \eta [\dot{M}_{s,k}]$
3	V ₂	$\eta [\dot{M}_{s,i}] = \eta [\dot{M}_{s,j}]$	$\eta [\dot{M}_{s,i}] > \eta [\dot{M}_{s,j}]$
4	V ₂	$\eta [\dot{M}_{s,j}] = \eta [\dot{M}_{s,k}]$	$\eta [\dot{M}_{s,j}] > \eta [\dot{M}_{s,k}]$
5	V ₃	$\eta [\dot{M}_{s,i}] = \eta [\dot{M}_{s,j}]$	$\eta [\dot{M}_{s,i}] > \eta [\dot{M}_{s,j}]$
6	V ₃	$\eta [\dot{M}_{s,j}] = \eta [\dot{M}_{s,k}]$	$\eta [\dot{M}_{s,j}] > \eta [\dot{M}_{s,k}]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, para avaliar a influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ dos ciclones na coleta do minério de ferro foi adotado o teste de hipótese apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Teste de hipóteses utilizado para verificação estatística da influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ na eficiência de separação global do minério de ferro.

Teste	Condição Operacional (V _{Ar} , \dot{M}_s)	Hipótese Nula (H ₀)	Hipótese Alternativa (H ₁)
1	(V ₁ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
2	(V ₁ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
3	(V ₂ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
4	(V ₂ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
5	(V ₃ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
6	(V ₃ , $\dot{M}_{s,1}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
7	(V ₁ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
8	(V ₁ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
9	(V ₂ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
10	(V ₂ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
11	(V ₃ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
12	(V ₃ , $\dot{M}_{s,2}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
13	(V ₁ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
14	(V ₁ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
15	(V ₂ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
16	(V ₂ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$
17	(V ₃ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_i] = \eta [C_j]$	$\eta [C_i] > \eta [C_j]$
18	(V ₃ , $\dot{M}_{s,3}$)	$\eta [C_j] = \eta [C_k]$	$\eta [C_j] > \eta [C_k]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 7 constata-se que para cada condição operacional (V_{Ar} ; \dot{M}_s), os resultados de separação dos três ciclones foram comparados, dois a dois, de modo a identificar o ciclone de máxima eficiência na separação do minério de ferro fino. Cabe destacar que o tratamento estatístico é importante para corroborar as constatações iniciais a partir dos resultados experimentais. Trata-se de uma forma sistemática para definir se houve de fato variação da propriedade de interesse a partir de alteração de parâmetros de entrada.

3.4. Simulação CFD

Nesta seção serão apresentadas as principais etapas relacionadas à concepção da simulação fluidodinâmica dos separadores ciclônicos, o pré-processamento, processamento e o pós-processamento. Foi utilizado o pacote computacional *ANSYS Student 2022 R1* para realização de todas as etapas das simulações CFD apresentadas neste trabalho. Cabe destacar que o equacionamento referente à modelagem discutida nesta seção é apresentado no Capítulo 4 e no APÊNDICE C.

3.4.1. Pré-Processamento

Inicialmente, na etapa de pré-processamento é realizada a construção da geometria de análise e, subsequentemente, das malhas computacionais que foram avaliadas. Além disso, é ainda nesta parte inicial da simulação onde são configuradas as regiões de contorno do sistema, métodos de solução e critérios de convergência que serão adotados na formulação.

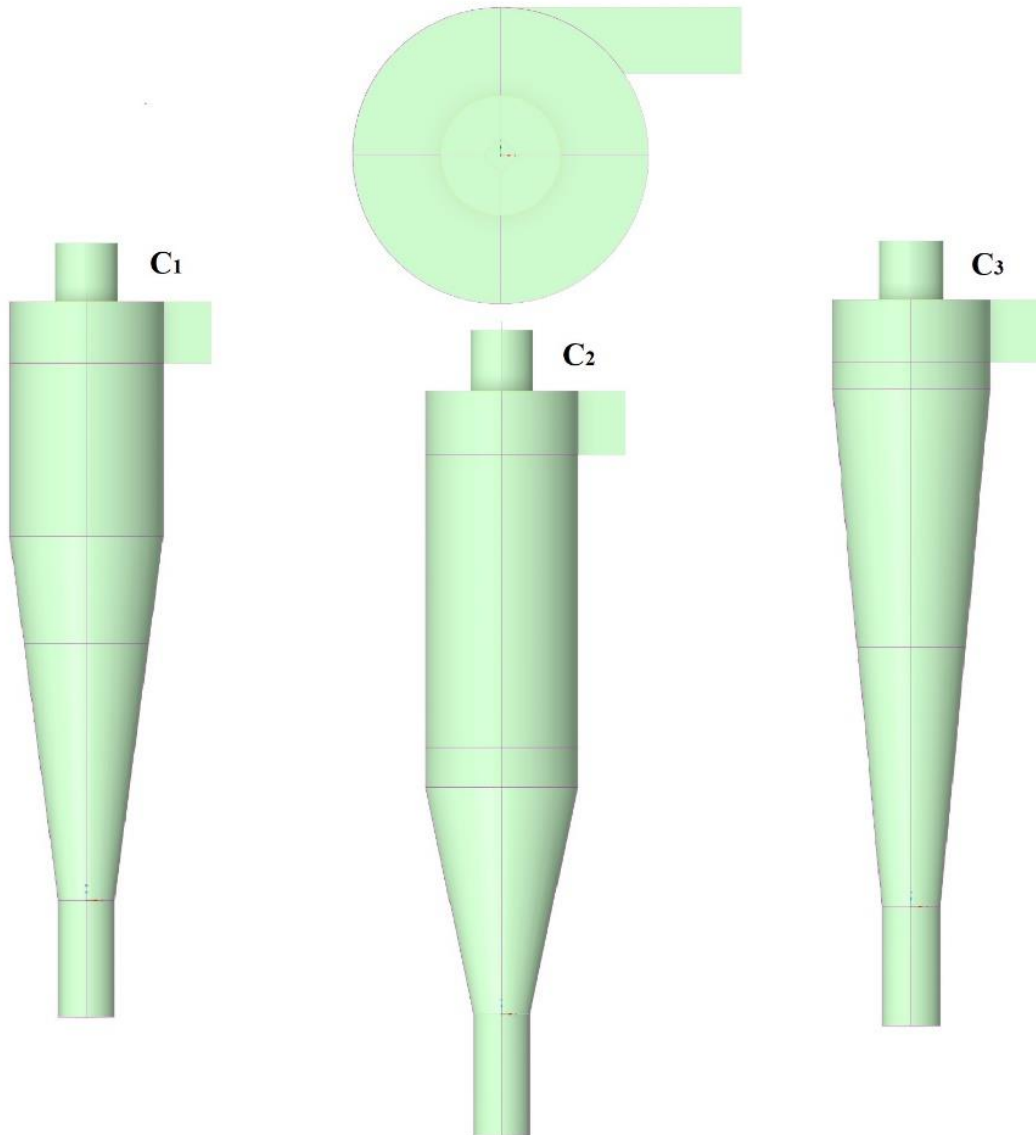
3.4.1.1. Domínio computacional

A primeira e uma das principais tarefas que devem ser cumpridas para a utilização da metodologia CFD é a construção de uma geometria espacial (neste caso, tridimensional) que contemple os aspectos físicos e dimensionais do equipamento/processo que se deseja simular. A construção deste domínio computacional foi viabilizada com o uso do *software* do pacote *ANSYS* intitulado *SpaceClaim*.

De modo a garantir a fidelidade geométrica com os equipamentos reais, os domínios foram construídos com base nas medidas apresentadas na Tabela 3, da seção 3.2.2, bem como das medidas complementares destacadas ainda nesta seção, apenas alterando o diâmetro da caixa coletora, para que se estabelecesse alinhada à base do ciclone (9 x 20 cm). Na Figura 15 podem ser observados as três geometrias para simulação dos ciclones C_1 , C_2 e C_3 . Cabe aqui destacar que o bocal de entrada tangencial foi deslocado 2 milímetros em direção ao centro do equipamento, se afastando levemente do ponto de tangência plena com o corpo do ciclone. Este

procedimento foi empregado para que não se formasse uma região de bico com angulação demasiadamente aguda, que acabaria comprometendo a qualidade dos elementos da malha.

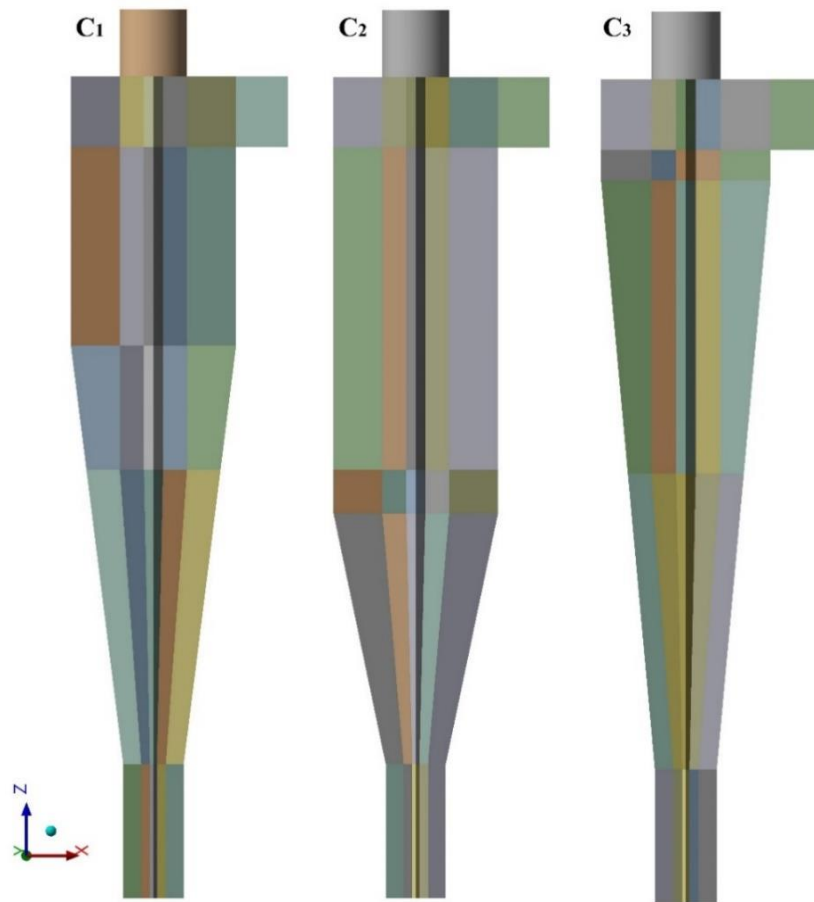
Figura 15 - Domínios computacionais criados para a simulação CFD dos três ciclones analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No intuito de preparar os domínios de forma adequada de forma que favorecesse a criação de malhas computacionais estruturadas, ou seja, malhas com elementos de formato geométrico idêntico, na próxima etapa da simulação, as geometrias dos ciclones foram divididas em 47 corpos mais simples. Foi criado no centro da geometria um bloco de geometria quadrangular, caracterizando a metodologia *O-grid*, conforme feito por Oliveira (2019), buscando orientar a implementação de malhas constituídas unicamente por elementos hexaédricos. A metodologia de decomposição em blocos utilizada pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 - Metodologia de decomposição em blocos empregada na criação das geometrias dos ciclones.



Fonte: Elaborado pelo autor.

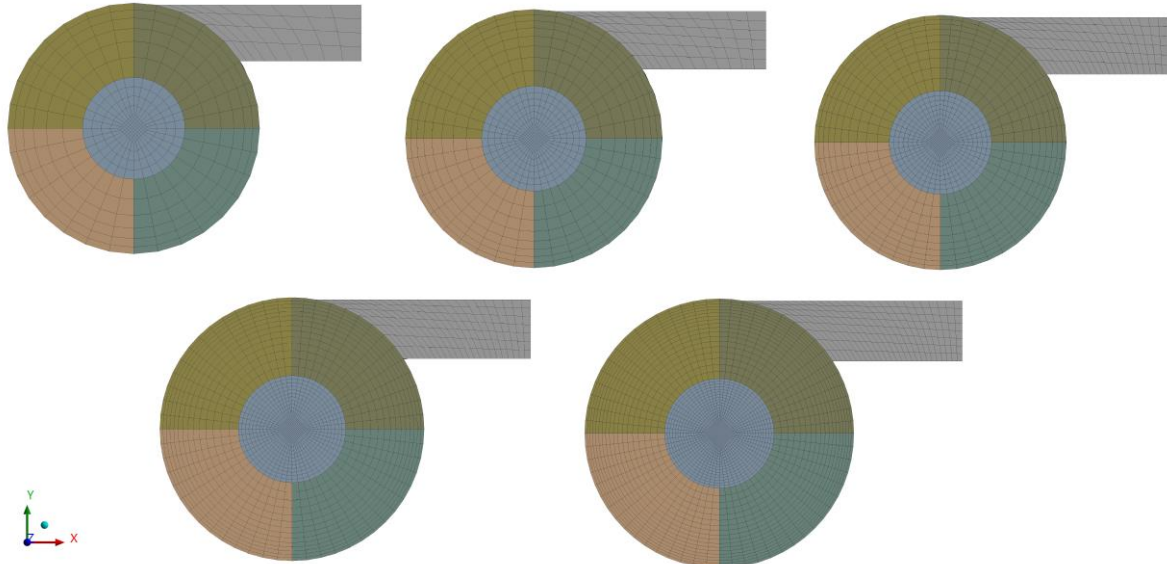
3.4.1.2. Malhas numéricas e regiões de contorno

Após a construção das geometrias dos três ciclones, se inicia a fase de discretização de seus volumes em N elementos, chamadas células computacionais, onde serão resolvidas todas as equações utilizadas na modelagem adotada na simulação para obtenção das soluções globais, seguindo a metodologia dos volumes finitos, na qual se baseia o *software*. A constituição das malhas computacionais é acompanhada da delimitação das regiões de contorno do problema, entre elas “entrada”, “saída” e “parede”, que necessariamente implicam no conhecimento do valor da propriedade de interesse naquela região. As condições de contorno são informações importantes que devem ser conhecidas para delimitar o sistema e fechar o grau de liberdade, tornando o problema passível de solução. Cabe destacar que esta etapa da simulação foi realizada no *software ANSYS Meshing*.

Além disso, foram construídas cinco malhas por ciclone, totalizando 15 malhas computacionais para avaliação da convergência da solução numérica, todas formadas puramente por elementos hexaédricos. Na Figura 17 é apresentado o padrão de refino das

malhas concebidas para o ciclone C_1 , sendo as malhas numeradas de 1 a 5 em ordem crescente de refino. Para os ciclones C_2 e C_3 foram construídas malhas com o padrão de refino semelhante.

Figura 17 - Padrão de refino utilizado na criação das malhas computacionais empregadas na simulação dos ciclones.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que para criação das malhas foi utilizado a razão de refino recomendada pelo método *GCI – Grid Convergence Index* – sendo igual ou superior a 1,30. Na Tabela 8 podem ser observados os padrões de refino utilizado para a elaboração das malhas dos três ciclones.

Tabela 8 - Padrão de refinamento utilizado para criação das malhas computacionais.

Ciclone	C_1		C_2		C_3	
	Número de elementos	Razão de Refino	Número de elementos	Razão de Refino	Número de elementos	Razão de Refino
1	16.656		16.656		16.656	
2	38.112	1,3177	38.112	1,3177	38.112	1,3177
3	83.856	1,3006	83.856	1,3006	84.864	1,3058
4	191.674	1,3173	191.674	1,3173	191.674	1,3120
5	427.440	1,3064	425.072	1,3041	427.440	1,3065

Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais operações utilizadas para constituição das malhas adotadas neste trabalho foram *method*, *face meshing* e *sizing*. Na operação *method* é definido um método de geração dos elementos que, neste caso, foi o *MultiZone*. No algoritmo deste método o *software* fornece a decomposição da geometria em regiões de varredura que serão recobertas apenas por

elementos hexaédricos, se for realmente possível tal procedimento. O *Multizone* foi utilizado em todos os 47 corpos que formam a geometria dos ciclones. Já a operação de *face meshing* foi utilizada na face superior do bocal de entrada dos ciclones, fazendo com que a malha criada neste bloco acompanhe o método empregado no resto da geometria, ou seja, orientando a criação de elementos hexaédricos também nesta região.

A ferramenta *sizing* foi utilizada extensivamente para a criação das malhas, com especial atenção para as opções *edge sizing* e *body sizing*. Durante a implementação da operação *edge sizing*, todas as arestas relevantes da geometria (verticais, horizontais e radiais) dos separadores ciclônicos foram recortadas em um número escolhido de partes, que orientou a criação dos elementos. Durante esta operação, foi aplicado um *bias factor* de 3 unidades a partir das regiões próximas às paredes externas do ciclone, permitindo um grau de refino maior nesta região, conforme pode ser observado na Figura 17. Este refinamento na parede foi utilizado para melhor predição dos gradientes de pressão e velocidade característicos de separadores ciclônicos, especialmente pronunciados nas regiões próximas ao contorno.

Já a operação *body sizing* foi utilizada no bloco de entrada tangencial, permitindo o usuário a escolher o tamanho de elemento característico que formaria a malha naquela região. Depois de implementadas as operações, as malhas eram criadas sequencialmente entre os blocos das geometrias dos ciclones, a partir da base do equipamento, sempre iniciando do bloco central.

Uma vez concebidas as malhas computacionais que seriam avaliadas, a verificação de sua qualidade se faz necessária. Para tal, o *software Meshing* oferece uma vasta gama de métricas de qualidade de elementos utilizadas para mensurar a qualidade da malha como um todo. No escopo deste trabalho, as malhas foram avaliadas mediante as seguintes métricas: *skewness*, *orthogonal quality* e *aspect ratio*. Vale ressaltar que a qualidade dos elementos desempenha um papel importante na precisão e estabilidade da solução numérica (MESHING 2022 R1, HELP GUIDE, 2022).

Neste sentido, fator de *skewness* mede o grau de assimetria do elemento, tendo seu valor quantificado no intervalo entre 0 (zero) e 1 (um). Fatores de *skewness* com valores próximos de 1 indicam células degeneradas, distantes da condição de células simétricas. Já valores próximos a 0 indicam células perfeitamente simétricas em todas as direções. Os intervalos de qualidade das células da malha relativo ao fator de assimetria pode ser observado na Tabela 9.

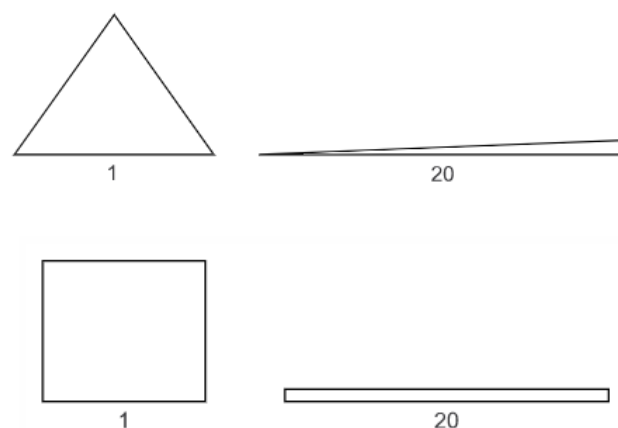
Tabela 9 - Valores do fator de *skewness* e qualidade do elemento.

Valor de <i>Skewness</i>	Qualidade do Elemento
1	Degenerado
0,9 – 1	Ruim
0,75 – 0,90	Pobre
0,50 – 0,75	Razoável
0,25 – 0,50	Bom
0 – 0,25	Excelente
0	Equilateral

Fonte: MESHING 2022R1, HELP GUIDE (2022).

O teste de *orthogonal quality* relaciona-se com o conceito de ortogonalidade, sendo também calculado para cada célula da malha, medindo a ortogonalidade entre a célula centroide com relação as suas vizinhas adjacentes e as faces da malha, ou seja, quão próximo de 90° está o ângulo formado por um vetor normal partindo da célula centroide em direção a esses outros elementos. O fator de ortogonalidade também é medido entre 0 e 1, sendo que estes valores indicam células com péssima e ótima ortogonalidade, respectivamente (MESHING 2022R1, HELP GUIDE, 2022).

Já o *aspect ratio* é uma métrica que relaciona a dimensão das arestas de um elemento tri ou quadrilateral, podendo assumir valor igual ou superior a 1, sendo no primeiro caso a condição de célula equilateral. O elemento é considerado de excelente qualidade quando sua razão de aspecto é inferior a 20 (FERZIGER e PERIC, 2002). A forma dos elementos perante a análise de *aspect ratio* é exemplificada na Figura 18, para o caso de elementos bidimensionais.

Figura 18 - Forma de elementos tri e quadrilaterais com valores baixos e elevados de aspect ratio.

Fonte: MESHING 2022R1, HELP GUIDE (2022).

Tabela 10 - Estatística da qualidade dos elementos das malhas utilizadas nas simulações.

Ciclone	Métrica de Qualidade de Malha		Malha				
			1	2	3	4	5
C ₁	Skewness - Assimetria	Mínimo	1,7026x10 ⁻⁹	9,5675x10 ⁻¹⁰	5,4075x10 ⁻¹⁰	3,3312x10 ⁻¹⁰	3,9275x10 ⁻¹⁰
		Máximo	0,8437	0,8587	0,8587	0,8627	0,8657
		Médio	9,2500x10 ⁻²	8,3715x10 ⁻²	7,8299x10 ⁻²	7,1565x10 ⁻²	6,8689x10 ⁻²
		DP	9,9968x10 ⁻²	9,4106x10 ⁻²	9,4106x10 ⁻²	8,1937x10 ⁻²	7,8825x10 ⁻²
	Orthogonal Quality - Ortogonalidade	Mínimo	0,2587	0,2321	0,2311	0,2243	0,2188
		Máximo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
		Médio	0,9771	0,9810	0,9839	0,9868	0,9879
		DP	5,3288x10 ⁻²	5,0912x10 ⁻²	4,7570x10 ⁻²	4,0875x10 ⁻²	3,8292x10 ⁻²
	Aspect Ratio - Razão de Aspecto	Mínimo	1,5359	1,4300	1,4095	1,3298	1,0415
		Máximo	32,2090	34,1530	27,3220	21,2510	15,6130
		Médio	8,8358	8,1418	6,7696	5,6725	4,6772
		DP	6,9716	6,8407	5,2950	3,9629	2,8025
		Malha	1	2	3	4	5
	C ₂	Skewness - Assimetria	Mínimo	1,7026x10 ⁻⁹	1,2489x10 ⁻⁹	5,4072x10 ⁻¹⁰	3,0849x10 ⁻¹⁰
Máximo			0,8437	0,8587	0,8587	0,8642	0,8662
Médio			9,7208x10 ⁻²	8,6968x10 ⁻²	8,1949x10 ⁻²	7,4608x10 ⁻²	7,1588x10 ⁻²
DP			0,1000	9,4569x10 ⁻²	9,1008x10 ⁻²	8,3535x10 ⁻²	8,0673x10 ⁻²
Orthogonal Quality - Ortogonalidade		Mínimo	0,2587	0,2321	0,2311	0,2219	0,2179
		Máximo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
		Médio	0,9771	0,9793	0,9826	0,9858	0,9870
		DP	5,3288x10 ⁻²	5,1522x10 ⁻²	4,7820x10 ⁻²	4,1104x10 ⁻²	3,8454x10 ⁻²
Aspect Ratio - Razão de Aspecto		Mínimo	1,4575	1,3904	1,3975	1,2914	1,0415
		Máximo	31,6960	34,1530	27,3220	21,2510	15,6130
		Médio	8,4800	7,8048	6,4875	5,4188	4,5051
		DP	6,9577	6,8574	5,2945	3,9679	2,8060
		Malha	1	2	3	4	5
C ₃		Skewness - Assimetria	Mínimo	1,7026x10 ⁻⁹	7,7993x10 ⁻¹⁰	5,4070x10 ⁻¹⁰	1,3082x10 ⁻¹⁰
	Máximo		0,8437	0,8587	0,8587	0,8642	0,8662
	Médio		9,0443x10 ⁻²	8,0649x10 ⁻²	7,4849x10 ⁻²	6,8958x10 ⁻²	6,6450x10 ⁻²
	DP		0,1003	9,4841x10 ⁻²	9,0020x10 ⁻²	8,2197x10 ⁻²	7,8818x10 ⁻²
	Orthogonal Quality - Ortogonalidade	Mínimo	0,2587	0,2321	0,2311	0,2219	0,2179
		Máximo	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
		Médio	0,9771	0,9813	0,9844	0,9873	0,9883
		DP	5,3288x10 ⁻²	5,1294x10 ⁻²	4,7472x10 ⁻²	4,1095x10 ⁻²	3,8400x10 ⁻²
	Aspect Ratio - Razão de Aspecto	Mínimo	1,5354	1,2994	1,2095	1,2516	1,0415
		Máximo	32,2080	33,5010	26,7340	20,5050	15,6130
		Médio	9,1703	8,4751	6,9750	5,9358	4,8818
		DP	6,4617	5,8255	4,6612	3,6708	2,7446

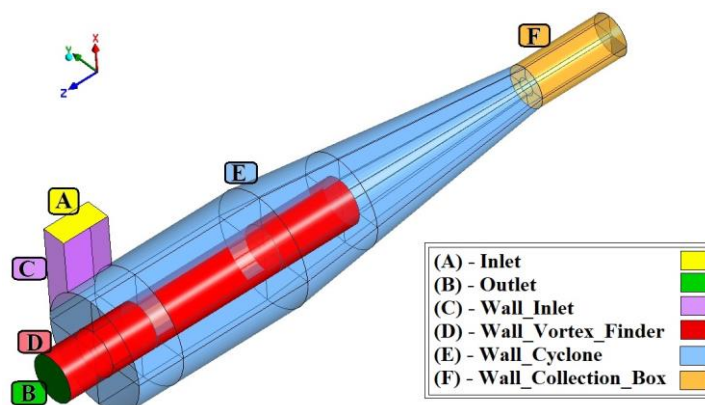
Fonte: Elaborado pelo autor.

Levando-se em consideração as métricas de qualidade descritas nesta seção, na Tabela 10 são apresentadas as estatísticas das malhas criadas para os três ciclones, sendo DP o desvio padrão obtido nas medidas das populações de células. Levando em consideração o valor de referência para o parâmetro *aspect ratio* de 20, a qualidade dos elementos se encontra satisfatória, com valores médios no geral abaixo de 9,0, ainda que com uma grande variabilidade. É importante destacar que, para escoamentos altamente anisotrópicos, razões de aspecto mais elevadas podem contribuir para a precisão dos resultados (ANSYS MESHING 2022 R1, HELP GUIDE, 2022).

Em relação ao teste de ortogonalidade, os resultados se mostram excelentes, com valores médios de *orthogonal quality* superiores a 0,97, estando muito próximos de 1, sendo esta a condição de plena ortogonalidade entre os elementos. Ainda cabe destacar valores mínimos e máximos desta métrica por volta de 0,23 e 1,0, respectivamente e, além disso, um baixo grau de variabilidade, com desvios padrões no geral inferiores a 5%.

Tomando como base os resultados para o fator de *skewness*, observa-se valores médios baixos para todas as malhas, no geral inferiores a 0,1 com desvio padrão máximo de 10%, indicando baixa variabilidade dos valores desta métrica entre os elementos. Além disso, foram obtidos valores mínimos deste parâmetro muito próximos de zero (na ordem de 1×10^{-10}) e valores máximos no geral inferiores a 0,87. Cabe chamar atenção que, caso não tivesse sido realizado a operação de deslocamento do bocal de entrada comentado, os valores máximos de *skewness* se apresentariam muito próximos de 1, condição de células degeneradas. Levando-se em consideração as métricas aqui comentadas, as malhas concebidas se encontram em um ótimo nível de qualidade, sendo a priori totalmente passíveis de utilização para a representação da fluidodinâmica em ciclones.

Figura 19 - Regiões de contorno delimitadas para simulação dos ciclones.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a delimitação das regiões de contorno pode ser observada na Figura 19, exemplificadas para o caso do ciclone C_1 , na qual são destacadas em vermelho as regiões de entrada, saída e paredes do domínio. Conforme visto na Figura 19, os contornos de parede foram subdivididos em parede do bocal de exaustão (C), parede do bocal de entrada tangencial (D), paredes externas do ciclone (E) e paredes da caixa coletora (F).

3.4.1.3. Métodos numéricos, contornos e critérios de convergência

A etapa inicial para determinação da formulação numérica apropriada para simulação fluidodinâmica é a escolha do modelo de turbulência que será empregado. Neste sentido, modelos comumente utilizados no estudo de separadores ciclônicos são os modelos de duas equações $k-\varepsilon$, o modelo de 7 equações das tensões de Reynolds (RSM) e, por fim, o modelo LES – *Large Eddy Simulation*.

Estes modelos apresentam vantagens e desvantagens entre si. O modelo $k-\varepsilon$, por exemplo, pode apresentar falhas na predição do escoamento para fluxos rotativos muito intensos (PANG *et al.*, 2022). Por outro lado, segundo Meier *et al.* (1999), o modelo RNG $k-\varepsilon$ é capaz de representar com qualidade perfis turbulentos com alta vorticidade característicos de ciclones. Em relação ao modelo RSM, ele é reportado como o mais robusto e capaz de representar o escoamento no interior dos separadores, graças ao seu tratamento anisotrópico da turbulência (LAUNDER, 1989), porém, traz consigo um custo computacional e tempo de simulação consideravelmente superior. Por fim, o modelo LES, ainda que demonstre qualidade no estudo de ciclones, necessita de uma malha com demasiado grau de refino, não sendo o mais recomendado para o estudo em questão.

Levando-se em consideração a ampla literatura vigente (CHETIWAL *et al.*, 2017; SAPUTRO *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2019) que demonstra sua qualidade no estudo de ciclones e não necessitar de um demasiado grau de refinamento de malha como no caso do LES, o modelo RSM foi utilizado para representar a turbulência do escoamento gasoso nos equipamentos estudados. A formulação numérica utilizada pode ser vista na Tabela 11.

Inicialmente, é importante detalhar um pouco a modelagem utilizada, partindo de uma formulação estacionária, ou seja, sem dependência das variáveis com relação ao tempo. A eliminação desta dependência empreende à simulação um custo computacional muito inferior quando comparado a modelos transientes, tanto no quesito tempo de simulação quanto em necessidade de processamento da máquina.

Tabela 11 - Formulação numérica utilizada na simulação dos separadores ciclônicos.

Formulação Numérica		
Dependência Temporal	Estacionária	
Aceleração da gravidade	$g_z = -9,81 \text{ m/s}^2$	
Acoplamento	SIMPLE	
Pressão - Velocidade	<i>Flux Type: Rhie-Chow – distance based</i>	
Metodologia de Discretização Espacial	Gradiente	<i>Least Square Cell – Based</i>
	Pressão	<i>Standard</i>
	Momento	<i>Second (2^a) Order Upwind</i>
	Energia Cinética Turbulenta	
	Dissipação Turbulenta	
	Tensões de Reynolds	<i>First (1^a) Order Upwind</i>
Modelo de Turbulência	<i>Reynolds Stress Model</i>	
Fase Gasosa	Modelagem Euleriana	
Multifásico (gás + partículas)	Modelagem Euleriana – Lagrangeana (DPM)	
Resíduos p/ convergência da solução	Fase Gasosa	10^{-3}
Inicialização do cálculo	Inicialização Padrão – <i>Standart</i>	
	Computar a partir de <i>Inlet</i>	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo DPM foi utilizado para incorporação do material sólido nas simulações, tratando-se de uma formulação lagrangeana, na qual cada partícula é tratada individualmente, podendo ser utilizado tanto para fluxos transientes quanto estacionários. No caso de simulações estacionárias, como aqui empregadas, as partículas são monitoradas frente ao fluxo gasoso estabelecido, desde sua posição de injeção até que escapem do domínio ou atinjam outro critério ou contorno especificado (ANSYS Fluent 2022 R1, *Help Guide*). Cabe destacar ainda que, para formulações estacionárias, as partículas necessariamente não interagem umas com as outras. Por outro lado, em relação à fase gasosa, o modelo opera de um ponto de vista euleriano, no qual é considerado um comportamento médio das propriedades de interesse no interior do volume de controle.

Para interpolação das variáveis momento, energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação turbulenta (ϵ) foi utilizado o modelo *upwind* de segunda ordem para geração dos resultados. A metodologia *upwind* consiste em aproximar a propriedade por seu valor no nó à montante da face, o que é conhecido como UDS – *Upwind Differencing Scheme*. No caso do *upwind* de segunda ordem, a aproximação da propriedade é feita através da extrapolação de

uma face em dois pontos, garantindo maior robustez ao modelo (RAMIREZ, 2009). Apenas na modelagem das tensões de Reynolds que foi mantida a formulação de primeira ordem, o que garantiu maior estabilidade à solução. E, no caso do campo de pressões, utilizou-se a formulação padrão *Standard*, que garantiu boa adesão dos resultados de queda de pressão.

Como já foi comentado, o processo que ocorre no interior do ciclone é normalmente tratado como isotérmico, para temperaturas próximas à ambiente. Todavia, ainda que o processo em si seja modelado como isotérmico, descartando o uso da equação de conservação da energia, os efeitos térmicos ainda devem ser considerados de alguma forma, pois as propriedades físicas da fase gasosa são significativamente influenciadas pelas condições térmicas do sistema.

Neste sentido, de modo a imprimir na simulação um fluxo de ar condizente ao utilizado na seção experimental do trabalho, foi feito um ajuste dos parâmetros dinâmicos do ar no *Fluent*, corrigindo sua massa específica e sua viscosidade dinâmica em relação à temperatura média das medidas experimentais (\bar{T}).

Para tal, foi utilizada a lei dos gases ideais para modelar a fase gasosa, hipótese bastante razoável por se tratar do ar em condições brandas de temperatura e pressão. E, no caso da viscosidade dinâmica, foi realizada uma regressão linear dos dados disponíveis no intervalo de 40 e 45°C de SENGERS e WATSON (1986). Os valores utilizados para as propriedades destacadas são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades dinâmicas do ar utilizadas nas simulações CFD.

Definição das Propriedades do Material - Ar		
\bar{T}	ρ	μ
[°C]	[kg/m ³]	[kg/(m.s)]
43,7	1,1364	1,9545x10 ⁻⁵

Fonte: Elaborado pelo autor.

As condições de contorno utilizadas na formulação do modelo podem ser observadas na Tabela 13. Na face de entrada dos ciclones era definida a condição de ‘*velocity-inlet*’ na qual era especificada a velocidade de entrada da fase gasosa no domínio computacional. Na região de exaustão gasosa foi definida uma condição de ‘*pressure-outlet*’ onde era especificado um valor de pressão nula. Tal metodologia era empregada pois a variável de interesse no estudo de ciclones é a variação de pressão entre as seções de entrada e saída, não exatamente importando os módulos dessas propriedades em cada contorno.

Ainda no que tange aos contornos de entrada e saída, foram especificados os valores de intensidade de turbulência (*turbulent intensity*) de 5% e diâmetro hidráulico (*hydraulic diameter*). No caso do bocal de exaustão, por se tratar de um bocal cilíndrico, o diâmetro hidráulico é o próprio D_e , de 0,1 metros, enquanto que, para o bocal de entrada, por se tratar de uma geometria retangular, é definido pela Equação 2, obtendo um valor de 0,072 metros.

$$D_H = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} \quad (\text{Eq. 2})$$

O contorno do tipo ‘*wall*’ foi empregado em todas as faces/paredes externas do ciclone, bem como na parede que delimitava o comprimento de penetração (S) do bocal de exaustão gasosa e as superfícies da caixa coletora. As condições do tipo parede eram modeladas conforme a condição de não deslizamento (*no slip*).

Tabela 13 - Condições de contorno utilizadas na formulação numérica das simulações.

Condições de Contorno e Setup da Operação			
Contorno físico	Região	Condição	Valor Especificado
Entrada do gás	<i>Inlet</i>	<i>velocity-inlet</i>	3,21; 6,42 e 9,64 m/s
Saída do gás	<i>Outlet</i>	<i>pressure-outlet</i>	0 Pa
	<i>Wall_Cyclone</i>		
Paredes do ciclone	<i>Wall_Collection_Box</i> <i>Wall_Vortex_Finder</i> <i>Wall_Inlet</i>	<i>No slip</i>	$\vec{v} = 0$
		DPM	Propriedades da Injeção
		- <i>Max. Number Of Steps = 500.000</i>	- Material: minério de ferro com $\rho_s = 4554,2 \text{ kg/m}^3$
		- <i>Step lenght fator = 1</i>	- Velocidade: 3,21; 6,42 e 9,64 m/s
		- <i>Injection-Type: surface</i>	- Vazão mássica: $0,11296 \times 10^{-3}$;
		- <i>Diameter Distribution: Rosin-Rammler</i>	$0,23206 \times 10^{-3}$ e $0,34611 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
		- <i>Scale flow Rate by Face Area</i>	- Diâmetro mínimo = $0,05 \times 10^{-6} \text{ m}$
Entrada das partículas	<i>Inlet</i>	- <i>Inject Using Face Normal Direction</i>	- Diâmetro máximo = $555,71 \times 10^{-6} \text{ m}$
		Destino das Partículas	
		<i>Inlet – escape</i>	- Diâmetro médio do modelo de Rosin-Rammler = $125 \times 10^{-6} \text{ m}$
		<i>Outlet – escape</i>	- Parâmetro de espalhamento do modelo de Rosin-Rammler = 0,6446
		<i>Wall_Cyclone – Trap</i>	- Número de Diâmetros = 62
		<i>Wall_Inlet – reflect</i>	
		<i>Wall_Vortex_Finder - reflect</i>	
		<i>Wall_Collection_Box – trap</i>	

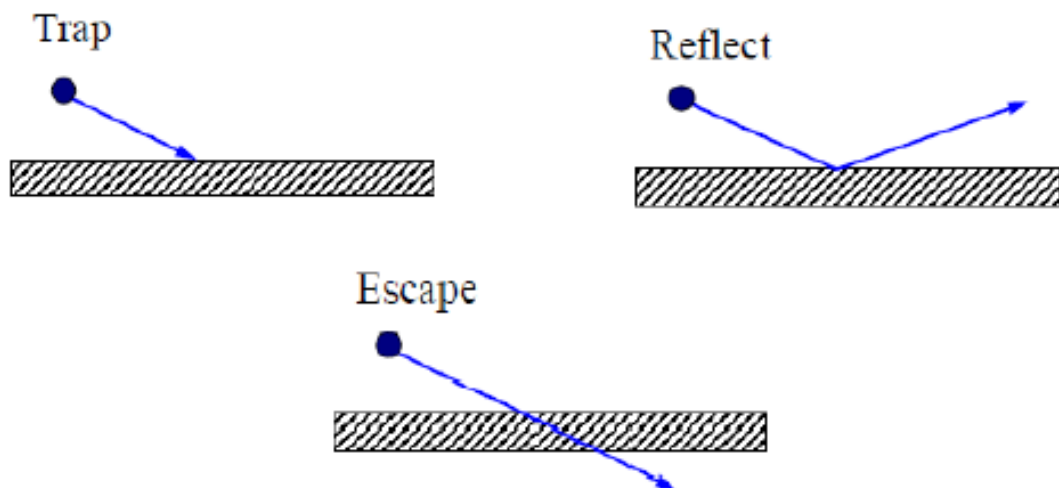
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta modelagem as partículas são dadas como coletadas quando tocam a superfície das paredes do ciclone e da caixa coletora, seguindo a formulação composta por Ramirez (2009). De acordo com Yoshida *et al.* (1991) e Hiraiwa *et al.* (2013), esta premissa se baseia na força inercial que atua sobre as partículas, fazendo com que partículas maiores (consequentemente, mais pesadas) sejam empurradas em direção às paredes, sendo justamente as partículas com maior probabilidade de coleta. E, por sua vez, as partículas que tocam o contorno de saída (*Outlet*) são consideradas como não coletadas, ou seja, as que escapam do mecanismo de separação juntamente com a corrente gasosa.

Além disso, vale ressaltar que as simulações apresentam acoplamento gás-sólido de apenas uma via, ou seja, apenas interações do tipo gás-sólido são consideradas, em outras palavras, as partículas não influenciam no escoamento gasoso. Como o escoamento da fase discreta ocupa uma baixa fração volumétrica (inferior à 10%), esta modelagem torna-se consistente (ELSAYED e LACOR, 2012).

Ainda comentando do destino das partículas, a condição do tipo *reflect*, utilizada nas paredes do bocal de alimentação, bem como do bocal de exaustão, indica que a partícula toca no contorno e é rebatida de maneira espelhada, não ficando retida no contorno, como no caso da condição *trap* utilizada, por sua vez, na superfície do ciclone e da caixa coletora. Por fim, a condição do tipo *escape* pressupõe que a partícula sai do domínio computacional avaliado, sendo considerada como não coletada, sendo esta condição destinada para a superfície superior do bocal de exaustão. A Figura 20 ilustra os três destinos possíveis para as partículas injetadas no ciclone.

Figura 20 - Contornos empregados ao material sólido no âmbito da simulação CFD.



Em formulações estacionárias, podem ocorrer ainda partículas consideradas incompletas (*incomplete*), sendo aquelas que não saem do domínio computacional, não sendo consideradas coletadas ou escapadas. Este fenômeno pode se relacionar ao número máximo de passos utilizados na configuração do modelo DPM (vide Tabela 13), que é justamente o número máximo de passos de integração utilizados para computar a trajetória de uma partícula. Assim sendo, se atingido o número máximo de passos e a partícula não tocar os contornos (no caso, as superfícies de coleta e escape) do sistema, ela é computada como incompleta.

Neste sentido, o manual do *Fluent* orienta que o tamanho do passo de integração (*step length factor*) multiplicado pelo tamanho da malha computacional, deve ser menor ou igual ao número máximo de passos de integração. Caso partículas incompletas ainda ocorram mesmo aumentando o número máximo de passos, é possível que estejam em uma região de recirculação/estagnação presente no domínio.

3.4.2. Processamento

Sequencialmente, na etapa de processamento, é realizada a resolução numérica da modelagem adotada na simulação, até atingir os critérios de convergência previamente estabelecidos. Esta parte da simulação é realizada também no *software Fluent* do pacote computacional *ANSYS Student 2022 R1*.

Após a convergência da fase gasosa perante à tolerância adotada, as partículas eram injetadas no contorno de entrada frente ao escoamento gasoso estabelecido, através do modelo *DPM*, conforme descrito na Tabela 13. Sequencialmente, após o cálculo *DPM*, as partículas eram contabilizadas a partir da ferramenta *particle tracks*, disponível na aba *Graphics* do *Fluent*. Vale destacar que um número de partículas específico era injetado, controlado pelo número de diâmetros analisados e pelo número de elementos computacionais na face de entrada (120 elementos na malha mais refinada de cada ciclone).

O processamento do modelo foi realizado em notebook pessoal. A máquina em questão possuía um processador *Intel Core i5* com 4 núcleos de processamento, 16 GB de memória *RAM* e armazenamento *SSD*. É interessante destacar que os cálculos foram realizados sem o recurso de dupla precisão do *Fluent*.

3.4.3. Pós-Processamento

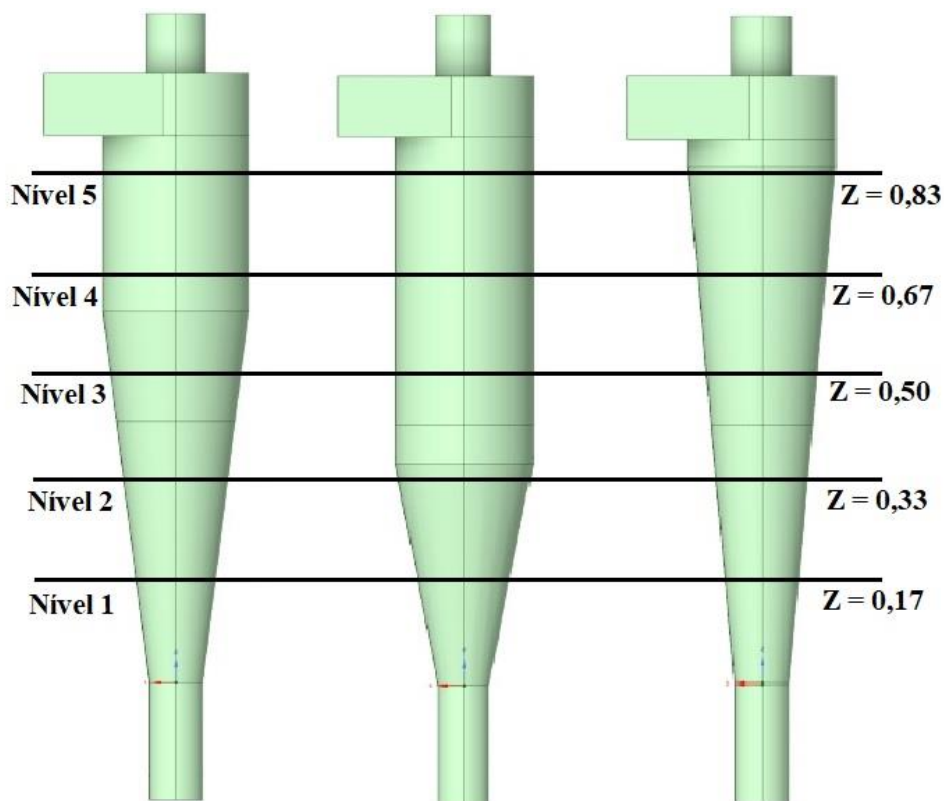
Ao final da metodologia CFD, na fase de pós-processamento, é feita a validação do modelo e dos resultados numéricos adquiridos, através de comparação com resultados de modelos empíricos ou semi-empíricos recorrentes no estudo de ciclones, além da análise dos

perfis de escoamento do equipamento, fornecendo a validação teórica do modelo. Além disso, os resultados das simulações foram comparados com os resultados experimentais de eficiência de coleta.

3.4.3.1. Verificação do modelo

Inicialmente a verificação do simulador foi realizada perante os perfis de escoamento gasoso apresentados no Capítulo 2 deste trabalho. Para obtenção destes perfis no âmbito da simulação fluidodinâmica foram construídas linhas de análise localizadas na posição x central varrendo toda a distância radial y ($x=0$; $-0,123 < y < 0,123$) dos equipamentos e em diferentes níveis axiais, conforme descrito na Figura 21, sendo Z a variável axial adimensionalizada pela altura axial total disponível (H_t), sendo contabilizada a partir da base dos ciclones.

Figura 21 – Ilustrativo da linha de análise para obtenção dos perfis de escoamento gasoso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez construída as linhas, foram plotados os gráficos de velocidade axial, velocidade tangencial e pressão estática em relação à posição radial (y) do ciclone. Depois de obtidos estes valores numéricos, a adimensionalização dos parâmetros e geração final dos gráficos foi feita no *Excel*. Uma vez obtidos os perfis de escoamento gasoso, eles foram comparados com o comportamento esperado para a classe de equipamentos Stairmand, indicado no Capítulo 2.

A queda de pressão dos ciclones foi determinada utilizando a ferramenta de integrais de superfície do *Fluent* para cálculo da pressão na face de entrada do bocal de alimentação, ponderada pela área de escoamento. Como foi utilizado como contorno a condição de pressão estática nula na superfície de saída gasosa (*Outlet*), a diferença de pressão entre os bocais de entrada e saída foi determinado como sendo a pressão na face de entrada.

Os valores de queda de pressão numéricos foram comparados com o modelo ajustado por Scarpa (2000), que avaliou experimentalmente os equipamentos aqui estudados. O modelo ajustado por Scarpa parte da formulação de Shepherd e Lapple (1940) que, embora seja simples e não leve em consideração todas as dimensões do ciclone, apresenta na maioria das vezes resultados tão bons quanto modelos mais complexos (FAYED e OTTEN, 1997). Nesta formulação a queda de pressão é determinada através da Equação 3.

$$\Delta P = \frac{\rho v_i^2}{2} \Delta H \quad (\text{Eq. 3})$$

Na Equação 3, ρ é a massa específica do fluido, v_i a velocidade de entrada no bocal tangencial e ΔH o parâmetro adimensional relacionado às dimensões geométricas do ciclone. No caso do modelo de Shepherd e Lapple, o parâmetro ΔH é determinado conforme se segue abaixo.

$$\Delta H = K \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

em que K é uma constante que assume o valor de 16 no modelo padrão.

Todavia, através de dados experimentais retirados dos ciclones avaliados, Scarpa foi capaz de melhor ajustar o parâmetro K para cada um dos ciclones, de modo a permitir um cálculo mais preciso da queda de pressão de cada um dos equipamentos. Segundo as anotações da autora e levando-se em consideração a nomenclatura dos ciclones inserida no escopo deste trabalho, a constante K assume os valores de 14,5, 14,0 e 15,5 para os ciclones C_1 , C_2 e C_3 , respectivamente. Vale ressaltar que o modelo foi ajustado em condições experimentais consideravelmente próximas às utilizadas neste trabalho, com velocidade de alimentação entre 6,2 e 10,2 m/s.

No que tange à velocidade tangencial máxima, parâmetro também comumente avaliado no estudo de ciclones, ela foi determinada no âmbito computacional através dos contornos de velocidade tangencial no plano axial central ($X = 0$) dos ciclones, conforme pode ser observado

nas figuras do Apêndice D. Foi utilizado como parâmetro de comparação desta propriedade os valores determinados pelo modelo de Iozia e Leith (1990).

Para verificação dos resultados numéricos de eficiência de coleta foi definida a Equação 5 para mensurar o fator de eficiência via CFD, considerando o número de partículas que tocam o contorno de coleta (paredes do ciclone e caixa coletora) e a quantidade de partículas injetadas no contorno de entrada do bocal de alimentação. Uma vez adquiridos, os resultados de η_{CFD} foram comparados com os resultados de eficiência teóricos obtidos pelos modelos apresentados no APÊNDICE B, bem com os resultados de eficiência experimentais.

$$\eta_{CFD} = \frac{N_{p, trapped}}{N_{p, injected}} \quad (\text{Eq. 5})$$

O efeito classificatório do material frente aos separadores ciclônicos também foi avaliado através do simulador numérico. Assim sendo, foram utilizadas injeções dos cinco principais componentes presentes na amostra de minério de ferro, com suas respectivas massas específicas médias, de modo a verificar como se daria a coleta de cada um. Para isto, algumas considerações foram feitas. Inicialmente, o conteúdo de ferro (Fe) contido na amostra foi relacionado ao óxido hematita (Fe_2O_3), pois se trata do mais comumente encontrado na região do Carajás, local de origem do material.

Além disso, as vazões mássicas de entrada das injeções foram determinadas a partir da fração global do respectivo componente presente na amostra estudada no escopo deste trabalho. Cabendo destacar que, como foram avaliados apenas os componentes hematita, sílica, alumina, fósforo e manganês, a vazão mássica total (100%) é considerada apenas entre esses materiais, ou seja, descartando totalmente a existência de demais materiais na amostra.

Em relação à distribuição granulométrica de cada material, foi utilizado o mesmo modelo já comentado, o RRB. Contudo, como não foram obtidos dados experimentais da distribuição de cada componente individual, apenas do mineral completo (como um todo), utilizou-se dados cedidos pela empresa VALE, referentes a uma amostra de minério de ferro com características bastante semelhantes ao estudado no escopo deste trabalho. Os dados utilizados para compor a distribuição granulométrica individual dos componentes podem ser observados na Tabela 14.

Dois pontos devem ser aqui observados. Primeiramente, é muito raro que componentes como fósforo e manganês sejam encontrados puros no minério, se apresentando normalmente na forma de óxidos, tais como P_2O_5 e MnO_2 , por exemplo. Porém, como a análise química não

foi capaz de definir a identidade do composto, foram utilizadas alimentações destes componentes puros. Apenas no caso do Fe foi considerado o óxido Fe_2O_3 por ser o mais comumente encontrado na região de origem do material. Além disso, é importante destacar que para cada faixa de tamanho, a somatória das frações dos componentes, apresentadas na Tabela 14, não atingem 100%, se apresentando entre 71 e 75%. Assim sendo, existem componentes no material analisado que não foram quantificados.

Tabela 14 - Dados de composição química da amostra de minério de ferro da VALE, destacada para 10 intervalos de granulometria analisados.

Abertura [μ m]	Retido [%]	Análise Química [%]								
		<i>Fe</i>	<i>SiO₂</i>	<i>P</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Mn</i>	<i>TiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>PPC</i>
---150	5,60	58,37	7,50	0,037	4,34	0,432	0,187	0,022	0,053	3,89
150--106	6,96	63,07	3,58	0,034	2,44	0,370	0,153	0,022	0,035	2,94
106--75	7,17	64,53	2,60	0,034	2,10	0,354	0,166	0,021	0,032	2,62
75--45	12,35	65,28	1,97	0,035	1,89	0,336	0,190	0,020	0,027	2,42
45--27	15,00	67,44	1,06	0,033	0,65	0,271	0,152	0,017	0,013	1,51
27--19	11,36	66,29	1,46	0,039	1,48	0,311	0,208	0,017	0,030	2,18
19--14	12,66	65,98	1,45	0,039	1,54	0,303	0,208	0,016	0,028	2,08
14--10	5,78	66,23	1,53	0,041	1,59	0,312	0,221	0,017	0,033	2,20
10--7	13,13	66,13	1,37	0,038	1,35	0,297	0,212	0,015	0,020	1,87
7---	10,00	63,63	2,69	0,064	2,21	0,386	0,227	0,021	0,042	2,65
Global	100,00	65,25	2,09	0,048	1,99	0,375	0,194	0,019	0,032	2,44

Fonte: Adaptado de Amostra PCFJ - VALE

Para obtenção das distribuições, utilizou-se uma base de cálculo de 100 g do material especificado na Tabela 14. Então, com a massa de cada componente presente em um determinado intervalo de dimensão e, dividindo-a pela massa total do respectivo componente, era obtida a fração mássica de cada componente em cada intervalo granulométrico.

Além disso, utilizou-se o diâmetro médio contido nos intervalos de dimensão de cada linha da Tabela 14. E, então, com a fração mássica acumulada de cada componente em todos os intervalos, foi obtida a distribuição granulométrica a partir do ajuste RRB, obtendo os parâmetros D' e n para cada material.

É importante chamar atenção novamente que apenas 5 componentes foram considerados nesta etapa: Fe_2O_3 (5.242 kg/m³), SiO_2 (2.630 kg/m³), P (1.823 kg/m³), Al_2O_3 (3.950 kg/m³) e

Mn (7.470 kg/m³). Na Tabela 15 são apresentados os dados de fração mássica obtidos para cada componente, sendo Fr. a porção fracionária e, Ac., a acumulada.

Tabela 15 - Dados utilizados para obtenção das distribuição granulométrica dos componentes individuais.

<i>D_i</i> [μ m]	<i>Fe₂O₃</i>		<i>SiO₂</i>		<i>P</i>		<i>Al₂O₃</i>		<i>Mn</i>	
	Fr. [%]	Ac. [%]	Fr. [%]	Ac. [%]	Fr. [%]	Ac. [%]	Fr. [%]	Ac. [%]	Fr. [%]	Ac. [%]
150,0	5,01	94,99	19,58	80,42	5,28	94,72	13,91	86,09	7,40	92,60
128,0	6,73	88,26	11,62	68,80	6,03	88,70	9,72	76,38	7,88	84,72
90,5	7,09	81,16	8,69	60,11	6,21	82,49	8,62	67,76	7,77	76,95
60,0	12,36	68,80	11,34	48,76	11,01	71,49	13,36	54,40	12,70	64,25
36,0	15,51	53,29	7,41	41,35	12,60	58,88	5,58	48,82	12,44	51,81
23,0	11,55	41,75	7,73	33,61	11,28	47,60	9,62	39,20	10,81	41,00
16,5	12,81	28,94	8,56	25,05	12,57	35,03	11,16	28,05	11,74	29,26
12,0	5,87	23,07	4,12	20,93	6,03	29,00	5,26	22,79	5,52	23,74
8,5	13,31	9,76	8,39	12,54	12,70	16,30	10,14	12,65	11,93	11,81
3,5	9,76	0,00	12,54	0,00	16,30	0,00	12,65	0,00	11,81	0,00
Total	100,00	(-)	100,00	(-)	100,00	(-)	100,00	(-)	100,00	(-)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, todas as comparações entre os resultados numéricos (CFD), experimentais (*Exp*) e teóricos (*Teo*) de uma determinada variável Ψ serão apresentados na forma de desvios percentuais (δ), conforme apresentado na Equação 6.

$$\delta = \frac{|\Psi_{CFD/Teo} - \Psi_{Teo/Exp}|}{\Psi_{Teo/Exp}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

3.4.3.2. Análise de convergência de malha

A convergência da solução numérica foi avaliada através de comparação entre os resultados obtidos pela simulação das cinco malhas com relação aos resultados teóricos e experimentais, demonstrando a aproximação dos resultados conforme o refino das malhas utilizadas nas simulações.

Adicionalmente, foi realizada uma análise de independência de malha orientada pelo método *GCI – Grid Convergence Index* – utilizado para estimar a incerteza da resposta

numérica devido ao grau de discretização do domínio computacional. Trata-se de uma metodologia comum, com vasta aplicação na avaliação de malhas computacionais na literatura aberta. Foi um modelo proposto por Roache (1994) e é fundamentada na Teoria Generalizada da Extrapolação de Richardson (1910).

Para utilização da técnica, primeiramente, define-se uma malha de tamanho representativo h , calculado conforme a Equação 7. Cabe ressaltar que o denominador do expoente (1/3) deve-se à aplicação do método para avaliação de malhas tridimensionais. Em caso de análise de malhas bidimensionais, o expoente correto seria (1/2).

$$h = \left[\frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 7})$$

na qual ΔV_i trata-se do volume da i -ésima célula e N_T o número total de células da malha criada.

Então, determina-se as razões de refinamento (r) entre as malhas, tomando-se as 3 malhas de maior refino, conforme a seguir.

$$r = \frac{h_{coarse}}{h_{fine}} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que h_{coarse} e h_{fine} referenciam as malhas grossa e refinada, respectivamente.

Outro fator fundamental para aplicação da técnica é a ordem do método de discretização p , determinado iterativamente pelas Equações 9, 10 e 11. Ressalta-se ainda que, segundo constatação de Elsayed e Lacor (2012), o procedimento iterativo pode cessar quando o desvio relativo entre a ordem de discretização e o chute seja inferior que 10^{-5} .

$$p = \frac{1}{\ln(r_{ij})} \left| \ln \left(\frac{E_{kj}}{E_{ji}} \right) + q(p) \right| \quad (\text{Eq. 9})$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{ji}^p - s}{r_{kj}^p - s} \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$s = 1. \text{sign} \left(\frac{E_{kj}}{E_{ji}} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

nas quais E_{ij} é a diferença das propriedades f relevantes ao problema, determinadas pela simulação das malhas selecionadas.

É, então, determinado o valor da função “exata” do método, sendo o valor estimado para a propriedade de interesse supondo resolução das equações de transferência em uma malha com número de elementos infinitos, ou seja, cujo espaçamento entre nós é infinitesimal.

$$f_{exact}^{ji} = \frac{r_{ji}^p (f_i - f_j)}{r_{ji}^p - 1} \quad (\text{Eq. 12})$$

Desta forma, é possível determinar o erro relativo entre as respostas fornecidas pelas malhas e o valor “exato”, calculado pelo método, através da Equação 13. Além disso, são determinados os desvios relativos da propriedade de interesse para as malhas de trabalho, duas a duas, conforme expresso na Equação 14.

$$e_{exact}^{ji} = \left| \frac{f_{exact}^{ji} - f_i}{f_{exact}^{ji}} \right| \quad (\text{Eq. 13})$$

$$e_a^{ji} = \left| \frac{f_j - f_i}{f_i} \right| \quad (\text{Eq. 14})$$

Por fim, determina-se a incerteza da resposta numérica obtida pelas malhas avaliadas. Adicionalmente, é realizada a conferência do valor da solução determinada pela simulação, observando se ela se encontra dentro do intervalo assintótico, ou seja, nas vizinhanças do valor “exato”. Para tal, utiliza-se o parâmetro γ , que deve ter seu valor tão próximo quanto possível de 1 para uma convergência de qualidade.

$$GCI_i^{fine} = \frac{1,25e_a^{ji}}{(r_{ij}^p - 1)} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$GCI_j^{coarse} = \frac{1,25e_a^{ji,p} r_{ji}^p}{(r_{ji}^p - 1)} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\gamma = \frac{r_{ji}^p GCI_{fine}}{GCI_{coarse}} \quad (\text{Eq. 17})$$

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo serão detalhados os princípios físicos relacionados ao entendimento do fenômeno que ocorre no interior dos separadores ciclônicos, bem como as equações matemáticas fundamentais para sua descrição. Em linhas gerais, o estudo de ciclone perante a metodologia CFD abrange as equações de conservação (massa e momento) e os modelos de turbulência utilizados para descrever o escoamento da fase gasosa. Além disso, é incluída a modelagem para inserção da fase dispersa (sólida) no equacionamento. Cabe destacar que a equação de conservação da energia térmica não será considerada no modelo, uma vez que se trata de uma formulação isotérmica.

4.1. Modelagem da Fase Gasosa

As equações de transporte que regem o escoamento interno nos separadores ciclônicos são a equação da continuidade e as equações do movimento. A primeira se origina por meio de um balanço material em um dado volume de controle, enquanto as outras provém de um balanço de quantidade de movimento.

4.1.1. Equação da Continuidade

Tomando como base as anotações de Bird *et al.* (2004), realizando-se um balanço material no volume de controle de análise e tomando o limite da expressão matemática quando as dimensões do volume tendem a zero, obtém-se a chamada equação da continuidade, apresentada em coordenadas cartesianas na Equação 18. Na equação em questão, ρ é a massa específica do fluido e v_x , v_y e v_z , as componentes cartesianas do vetor velocidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \right] \quad (\text{Eq. 18})$$

A equação estabelecida descreve a variação da densidade para um ponto fixo, como consequência de variações no vetor velocidade mássica. Normalmente, a equação da continuidade se apresenta na forma da Equação 19, seguindo a notação tensorial, na qual o termo $(\nabla \cdot \rho \underline{v})$ representa o divergente do vetor fluxo de massa, ou seja, a taxa líquida de saída de massa por unidade de volume.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \underline{v}) \quad (\text{Eq. 19})$$

No caso de estudo deste trabalho, levando-se em consideração as premissas de regime permanente e escoamento incompressível, a equação da continuidade se traduz na Equação 20.

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}(v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z) \right] = 0 \quad (\text{Eq. 20})$$

4.1.2. Equação do Movimento

De forma análoga à seção anterior, realizando-se um balanço de momento no volume de controle de análise e tomando o limite das expressões matemáticas quando as dimensões do volume tendem a zero, obtém-se para coordenadas cartesianas as Equações 21, 22 e 23. Cabe destacar que a responsável pelo último termo das equações abaixo é a força gravitacional e, além disso, a variável ϕ se refere ao fluxo combinado de momento, que se relaciona à taxa de transferência de momento por mecanismos molecular e convectivo.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zx} \right) + \rho g_x \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_y = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zy} \right) + \rho g_y \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_z = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zz} \right) + \rho g_z \quad (\text{Eq. 23})$$

Reescrevendo o conjunto de equações acima na forma tensorial, obtém-se a Equação 24.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \underline{v} = - \left(\nabla \cdot \underline{\phi} \right) + \rho \underline{g} \quad (\text{Eq. 24})$$

Na sequência, realizando um balanço de forças atuantes sobre o volume de controle e, além disso, inserindo a expressão do tensor tensão cisalhante para um fluido newtoniano, a exemplo do ar, obtém-se as Equações 25, 26 e 27, conhecidas como equações do movimento nas coordenadas cartesianas x , y e z , respectivamente.

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\rho \frac{Dv_y}{Dt} = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (\text{Eq. 26})$$

$$\rho \frac{Dv_z}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (\text{Eq. 27})$$

nas quais μ é a viscosidade dinâmica do fluido e P a pressão.

No caso de uma análise estacionária o termo temporal da derivada substantiva Dv/Dt é negligenciado, mantendo apenas os termos de variação espacial do vetor velocidade, conforme indicado no conjunto de equações abaixo.

$$\rho \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (\text{Eq. 28})$$

$$\rho \left[v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (\text{Eq. 29})$$

$$\rho \left[v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (\text{Eq. 30})$$

4.2. Equações de Fechamento

Por operarem em faixas de Reynolds elevadas, as equações de fechamento no escopo do estudo de separadores ciclônicos são os modelos de turbulência utilizados para descrever o escoamento da fase gasosa em seu interior. Os modelos de turbulência introduzem no equacionamento as flutuações nas componentes do vetor velocidade (v'), oriundas do movimento caótico do fluido, bem como das tensões resultantes dessas flutuações. Nesta seção, são abordados alguns dos principais modelos de turbulência disponíveis no *Fluent* comumente empregados no estudo de ciclones. Adicionalmente, no APÊNDICE C é apresentado o equacionamento relativo a alguns modelos de turbulência comentados no escopo deste trabalho.

Os escoamentos desenvolvidos nas operações ligadas à engenharia são, em sua maioria, turbulentos, devido ao favorecimento dos processos de transferência com o aumento da velocidade e às grandes vazões de trabalho utilizadas na indústria. Neste sentido, é de fundamental importância entender como modelar o fenômeno da turbulência no estudo de ciclones.

Ainda que em princípio a turbulência seja descrita pelas equações de Navier-Stokes, na maioria das situações não é possível resolvê-las em um grande intervalo de escalas de tempo e espaço através de uma metodologia de simulação numérica direta (DNS – *Direct Numerical*

Simulation), pois, para tal, o custo computacional é proibitivo. Devido a isso, procedimentos de médias são aplicados às equações de Navier-Stokes, de modo a capturar todo ou, ao menos, partes do espectro da turbulência. Neste sentido, surge a metodologia RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* – na qual todas as estruturas turbulentas são eliminadas do escoamento, adicionando outras variáveis que são ajustadas de acordo com um certo modelo de turbulência escolhido.

Alternativamente aos modelos da categoria RANS, existem também os modelos de resolução de escalas (SRS – *Scale-Resolving Simulation*), dos quais se destaca o modelo LES – *Large Eddy Simulation*. Nesta modelagem, ao menos uma porção do espectro turbulento é resolvido em ao menos uma parte do domínio fluido. No geral, simulações que utilizam a metodologia SRS necessitam de um passo de tempo bem pequeno, além de apresentarem um custo computacional mais elevado do que a média dos modelos RANS.

Na sequência desta seção, serão apresentados alguns dos principais modelos de turbulência relacionados à metodologia RANS, justamente por serem a classe de modelos empregada nas simulações presentes no escopo deste trabalho.

4.2.1. Modelo *Standard k-ε*

O modelo *Standard k-ε* é um dos modelos de duas equações mais comuns na modelagem da turbulência, que inclui os parâmetros k e ε , respectivamente, a energia cinética turbulenta e a dissipação turbulenta. O parâmetro k é responsável por determinar a energia disponível para a turbulência, enquanto ε descreve a escala do fenômeno.

4.2.2. Modelo RNG *k-ε*

O modelo RNG *k-ε* é um método derivado do *Standard k-ε* desenvolvido por Yakhot *et al.* (1992), que se caracteriza por uma renormalização das equações de Navier-Stokes e inclusão do termo de produção de tensão P_k . Segundo Meier *et al.* (1999), o modelo RNG *k-ε* é capaz de representar com qualidade perfis turbulentos com alta vorticidade característicos de separadores ciclônicos.

4.2.3. Modelo Reynolds Stress Model

O modelo RSM – *Reynolds Stress Model* – se caracteriza como o mais robusto dos modelos baseados na metodologia RANS. Nesta modelagem, cada uma das seis tensões de Reynolds ($\rho \cdot \overline{v'_i v'_j}$) são individualmente determinadas, utilizando as equações diferenciais de transporte e as equações médias de Reynolds, culminando em modelo de sete equações que devem ser satisfeitas para convergência da resposta numérica.

A robustez do modelo RSM se deve em grande parte ao tratamento anisotrópico da turbulência, levando em consideração a taxa de difusão do tensor de Reynolds devido à viscosidade molecular do fluido, as flutuações da pressão e a convecção ao nível das flutuações da velocidade. O modelo ainda conta com o termo de produção de tensão turbulenta e taxa de dissipação do tensor de Reynolds devido à viscosidade e a pressão, correlacionando as flutuações da pressão e as taxas de deformação (LAUNDER, 1989).

4.3. Modelagem da Fase Dispersa

No escopo deste trabalho o que é chamado de ‘fase dispersa’ são as partículas sólidas injetadas no ciclone em conjunto com a corrente gasosa. Para sua inclusão na modelagem geral do problema, foi utilizado o modelo DPM – *Discrete Phase Model* – seguindo uma formulação Euleriana-Lagrangeana, na qual o gás é tratado como uma fase contínua e as partículas tratadas individualmente. Desta forma, o movimento da partícula é definido a partir dos balanços de forças que agem sobre ela, podendo trocar energia, massa e momento com a fase gasosa.

Utilizando o modelo DPM, o comportamento da fase discreta pode ser estimado de várias formas. Entre elas, pode-se considerar na modelagem apenas a influência de um escoamento fixo da fase contínua sobre a trajetória da partícula, as interações sólido-gás e, ainda, as interações partícula-partícula, caracterizando um acoplamento de uma, duas e quatro vias, respectivamente.

Em virtude das condições experimentais utilizadas no escopo deste trabalho, a fase discreta ocupa uma baixa fração volumétrica (< 10%) da corrente de tratamento. Assim sendo, os efeitos dos modelos de acoplamento de duas e quatro vias são negligenciáveis, podendo ser utilizado um modelo acoplado de apenas uma via (ELSAYED e LACOR, 2012).

Nesta modelagem, o movimento da fase dispersa é descrito através dos efeitos da gravidade e da força de arraste gerado pela fase gasosa, conforme apresentado abaixo (MEIER *et al.*, 2017). No balanço de forças para as partículas apresentado abaixo, o primeiro termo à direita da equação se refere à força de arraste, enquanto o segundo à ação do campo gravitacional.

$$\frac{du}{dt} = F_D \cdot (v - u) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (\text{Eq. 31})$$

em que ρ_p e u são a massa específica e a velocidade da partícula, respectivamente.

O coeficiente de transferência de momento entre o fluido e as partículas, F_D , é dado pela Equação 32, na qual o número de Reynolds da partícula é calculado conforme a Equação 33, na qual d_p é o diâmetro da partícula.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{24\rho_p d_p^2} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |v - u|}{\mu} \quad (\text{Eq. 33})$$

Assumindo a hipótese de partículas esféricas, o modelo de Alexander e Morsi (1972) pode ser utilizado para mensurar o coeficiente de arraste C_D , conforme a Equação 34, sendo que os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 variam conforme o valor de Re_p .

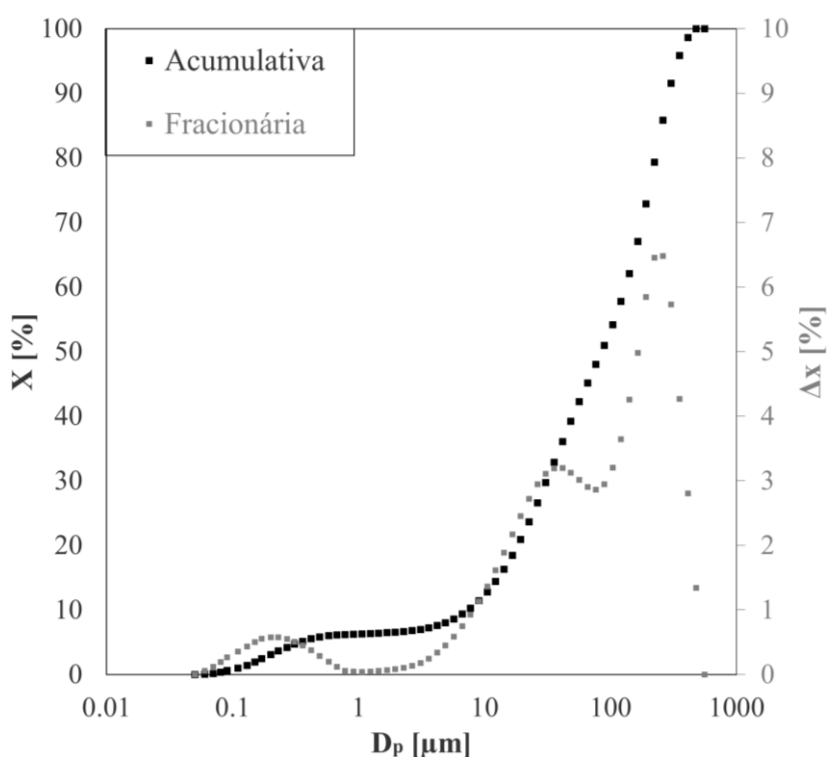
$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (\text{Eq. 34})$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Minério de Ferro

Após a devida preparação do minério de ferro para sua utilização nos ensaios de separação e da operação de quarteamento para adequação da amostra final, o material foi submetido à análise granulométrica perante o equipamento *Mastersizer*. A distribuição granulométrica acumulada (X) e fracionária (Δx) do material pode ser observada na Figura 22, estando o eixo das abscissas (D_p) em escala logarítmica.

Figura 22 - Distribuição granulométrica do minério de ferro estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode-se observar na Figura 22, o material apresenta uma quantidade considerável de particulado na zona sub-micrômica ($< 1 \mu\text{m}$), sendo um material de difícil separação através de ciclones. Contudo, verifica-se nos resultados um diâmetro mediano em torno de $100 \mu\text{m}$, o que estimula o uso do equipamento de separação. Pois, como destacado por Coury *et al.* (2004), se bem projetados, ciclones são capazes de coletar partículas maiores que $10 \mu\text{m}$ com bons valores de eficiência.

Tomando como base a categorização usual do minério de ferro em função de sua dimensão, o material utilizado apresenta porção predominante de *pellet feed* ($D_p < 150 \mu\text{m}$) e, ainda, certa fração de *sinter feed* ($150 < D_p < 12.500 \mu\text{m}$), sendo justamente as frações mais

finas do minério, que por sua vez apresentam maior tendência de arraste na operação de secagem convectiva. Além disso, as extremidades do intervalo de distribuição de tamanhos de partícula se apresentam em 0,05 e 555,71 μm , sendo que as frações mais representativas do minério se apresentam na faixa entre 50 e 400 μm .

A massa específica do minério foi determinada através do método de picnometria. Cabe destacar que houve baixo desvio entre a densidade do solvente calculada durante a execução do ensaio e a de referência em seu rótulo, com resultado mais distante de 0,8609 g/ml. Os resultados gerais podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da técnica de picnometria aplicada ao minério de ferro.

Resultados de Picnometria	
Ensaio	ρ_s [g/mL]
1	4,3516
2	4,5378
3	4,7733
Médio	4,5542 \pm 0,2113

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 17 são mostrados os resultados do FRX para o minério de ferro, destacando todos os principais componentes presentes no material. No geral, observa-se uma elevada composição de ferro no mineral, típico dos reservatórios de predominância de hematita da região do Carajás, configurando-se como um material de excelente qualidade, considerando ainda não ter passado por nenhum processo de concentração.

Tabela 17 - Composição química do minério de ferro.

Composição do Minério de Ferro												
Componente	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	PF
Fração [%]	65,5	1,52	1,41	0,055	0,20	0,11	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	2,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar na Tabela 17 frações insignificantes de óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio e cromo, não sendo possível sua determinação exata. E, portanto, estes elementos serão desconsiderados nas apresentações vindouras de composição dos materiais coletados nos ciclones. O componente 'PF' faz referência à *Perda ao Fogo*, que representa a porcentagem de massa perdida ou decomposta da amostra após ser submetida a um ciclo

térmico de aquecimento pré-determinado, em forno ou mufla. Normalmente a ‘perda ao fogo’ está relacionada à água estrutural ou material orgânico presente na amostra.

É importante ressaltar que a metodologia FRX empregada não conseguiu varrer a composição da amostra em toda sua plenitude, conforme pode ser observado no somatório das frações dos componentes destacados, que apresenta valor de aproximadamente 72%. Os outros 28% da amostra, provavelmente, estão relacionados a componentes não incluídos na curva de calibração utilizada na análise de fluorescência. Cabe chamar atenção que a mesma característica foi encontrada nos dados do material cedido pela VALE, utilizado nas simulações de classificação mineral, apresentado na seção 3.4.3.1. deste trabalho. De toda maneira, os componentes de maior destaque no tratamento deste trabalho, o ferro, sílica, alumina, fósforo e manganês foram devidamente contabilizados.

5.1.1. Ajuste Matemático da Distribuição

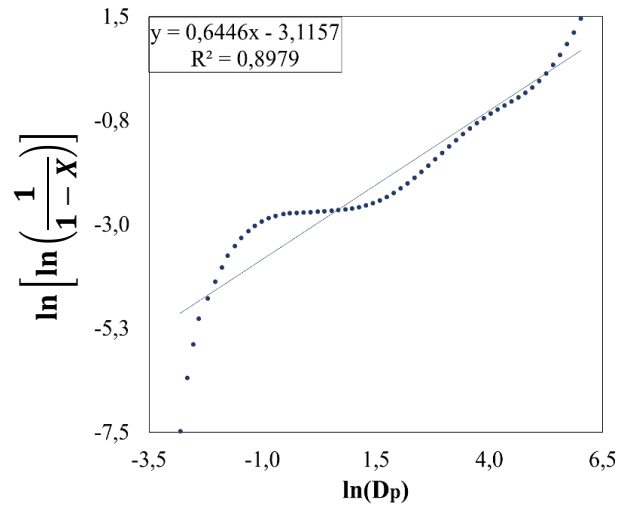
Para posterior determinação da eficiência de coleta teórica dos ciclones e, ainda, para implementação da distribuição granulométrica no âmbito das simulações fluidodinâmicas, três dos mais conhecidos ajustes de distribuição granulométrica (RRB, GGS e Sigmoide) foram testados para ajustar os dados da população de tamanhos presente no minério de ferro. Para tal, foi feita a linearização dos termos de cada um dos ajustes, de modo a determinar os parâmetros típicos dos mesmos e sua adesão aos dados fornecidos pelo *Mastersizer*.

Na Figura 23 é mostrada a adesão dos dados granulométricos frente ao modelo RRB linearizado, sendo D_p o diâmetro das partículas em micras e X a fração acumulada de material.

Através do ajuste avaliado na Figura 23, foi possível determinar os parâmetros de destaque do modelo RRB, além de verificar o nível de adesão dos dados de distribuição do minério de ferro. Inicialmente, percebe-se um coeficiente de correlação razoavelmente alto, próximo a 0,9, indicando boa adesão dos dados. Além disso, foi determinado um valor de diâmetro 63,2% (D') de 125 μm e um parâmetro de espalhamento (n) de aproximadamente 0,6446.

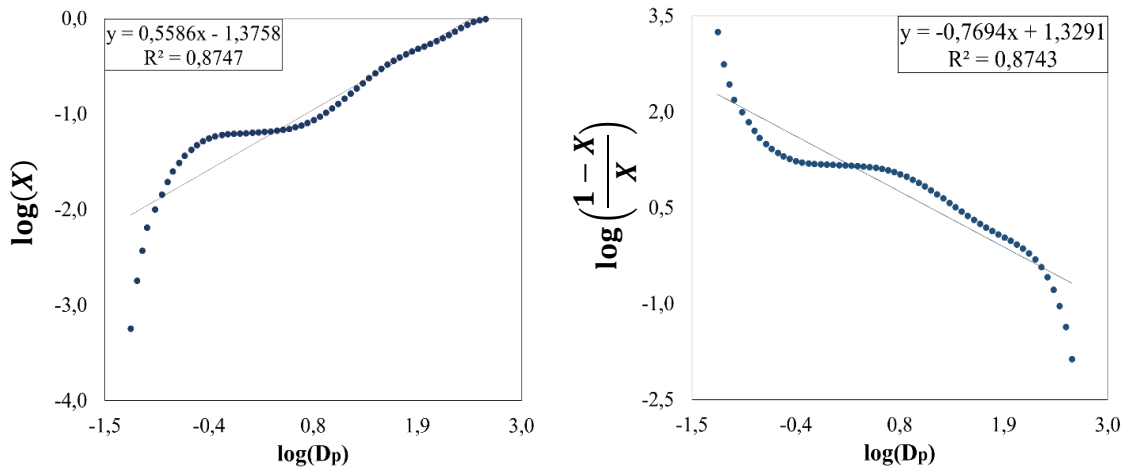
No que tange aos modelos GGS (esquerda) e Sigmoide (direita), apresentados na Figura 24, foram obtidos coeficientes de correlação bem similares, aproximadamente de 0,87, indicando também uma adesão considerável dos dados, ainda que levemente inferior ao do modelo RRB. Foram obtidos os valores de 0,5585 e 290,5 μm para os parâmetros m e k , respectivamente, do modelo GGS. Em relação ao modelo Sigmoide, foi obtido para o parâmetro p de 0,7693 e um parâmetro D_{50} de 53,4 μm .

Figura 23 - Ajuste RRB linearizado aplicado à distribuição granulométrica do minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Linearização dos modelos GGS e Sigmóide aplicada aos dados de granulometria do minério de ferro.

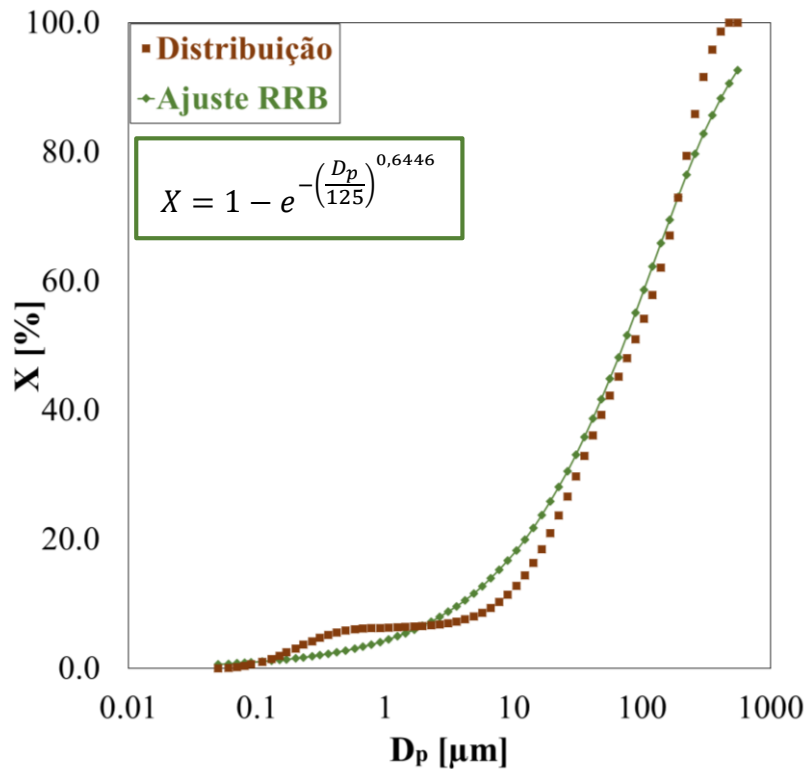


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o modelo RRB foi escolhido para fornecer a relação matemática entre a fração acumulada de material X e os diâmetros das partículas D_i , por apresentar a melhor adesão aos dados da distribuição granulométrica do minério de ferro estudado. Na Figura 25 pode-se observar a distribuição granulométrica real em contraponto ao ajuste proposto pelo modelo.

Observando o gráfico da Figura 25, é possível determinar os principais intervalos de desvios entre os dados reais da distribuição e o ajuste proposto. No geral, o ajuste subestimou as frações de material contidas no intervalo aproximado de 0,2 e 2 μm e de diâmetros superiores à 300 μm . Em contrapartida, as frações de material no intervalo entre 4 e 20 μm foram levemente superestimadas pelo ajuste.

Figura 25 - Comparação dos dados de distribuição granulométrica obtidos pelo *Mastersizer* e ajuste RRB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. Resultados Experimentais

5.2.1. Performance dos Ciclones

Nesta seção serão apresentados os resultados relacionados aos parâmetros de performance dos três ciclones avaliados, como queda de pressão e eficiência de coleta do minério de ferro. Além disso, será demonstrada a influência de certos parâmetros operacionais e geométricos sobre a performance dos equipamentos.

5.2.1.1. Queda de pressão

No que tange à performance do separador ciclônico, a queda de pressão se apresenta como uma medida de destaque, justamente por se relacionar à quantidade de energia necessária para imprimir a separação desejada. Espera-se deste parâmetro um comportamento ascendente conforme se aumenta a velocidade do escoamento, devido ao aumento proporcional dos efeitos de dissipação viscosa e atrito com as paredes. Os resultados obtidos para a queda de pressão dos três ciclones podem ser observados na Tabela 18, juntamente com os valores obtidos através da aplicação do modelo tradicional de Shepherd e Lapple (1940) e o modificado por Scarpa (2000) para os equipamentos aqui estudados. Cabe destacar, que a medida apresentada se trata da queda de pressão livre, ou seja, aquela isenta de material particulado.

Tabela 18 - Resultados de queda de pressão experimental e teórica dos ciclones avaliados.

Ciclone	v_i	T_{Ar}	$\Delta P_{Experimental}$	$\Delta P_{Shepherd \& Lapple}$	ΔP_{Scarpa}
	[m/s]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
C ₁	3,21	36,1	24,0	54,17	49,03
	6,42	45,7	134,0	216,69	196,11
	9,64	47,7	262,0	487,56	442,16
C ₂	3,21	37,6	18,0	54,17	47,34
	6,42	43,7	111,0	216,69	189,34
	9,64	48,3	213,0	487,56	426,91
C ₃	3,21	35,7	29,0	54,17	52,41
	6,42	47,7	170,0	216,69	209,63
	9,64	48,7	368,0	487,56	472,65

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observa-se na Tabela 18, houve de fato o comportamento esperado para a queda de pressão experimental com relação a velocidade, demonstrando o aumento da escala da queda de pressão conforme se aumenta a intensidade do fluxo gasoso. Além disso, é possível destacar a relação inversamente proporcional entre a queda de pressão experimental e a altura do corpo cilíndrico dos ciclones, conforme comentado por Brar *et al.* (2015), ou seja, quanto maior a altura do cilindro, menor foi a queda de pressão constatada no separador ciclônico.

Neste sentido, houve de fato tal comportamento, de modo que: $\Delta P[C_2] < \Delta P[C_1] < \Delta P[C_3]$. Segundo Brar e Shastri (2020) esta diminuição da queda de pressão está relacionada à diminuição da magnitude da velocidade tangencial no interior do ciclone conforme o aumento do corpo cilíndrico, reduzindo os efeitos de atrito com a parede.

Porém, comparando os dados experimentais com os do modelo ajustado por Scarpa (2000), fica evidente um elevado desvio entre os valores, girando entre 23 e 162%. Vale destacar que a metodologia empregada para aferição da queda de pressão experimental foi muito semelhante àquela utilizada por Scarpa, tendo como maior diferença dois aspectos principais. Segundo anotações da autora, era esperado um período de duas horas para que o sistema alcançasse o regime permanente, antes de qualquer tomada experimental. Na metodologia experimental utilizada no escopo deste trabalho, esperou-se apenas por volta de 30 minutos. É possível que o sistema ainda não tenha atingido o regime permanente pleno.

O motivo mais plausível, no entanto, está relacionado à metodologia de aferição da velocidade de entrada praticada por Scarpa, que utilizou o micromanômetro acoplado a um tubo

de Pitot localizado na entrada do equipamento para aferição da vazão de operação. Por outro lado, neste trabalho, foi utilizado um anemômetro fixado na posição central da tubulação da linha de tratamento, pois, conforme já citado, para regimes turbulentos a velocidade do gás no centro se aproxima da média.

Contudo, possivelmente, esta premissa carregou consigo erros, fazendo com que a velocidade média assumida se apresentasse superior a verdadeira da tubulação. Assim sendo, como a velocidade na verdade era inferior daquela que foi considerada, a queda de pressão também será proporcionalmente menor, acarretando expressivos desvios nas comparações com modelos da literatura e simulações fluidodinâmicas.

Além do mais, o anemômetro é um equipamento muito dependente da posição em que é inserido, pois seu sensor deve estar plenamente alinhado horizontalmente à tubulação e posicionado perpendicularmente ao fluxo gasoso. Desta maneira, ainda que realizado com cuidado, é uma medida facilmente variável, não sendo a mais recomendada para a operação. Pode-se destacar ainda o fator de calibração dos equipamentos utilizados nas duas formas de medição de velocidade, o que pode ter impactado nas tomadas experimentais.

Posteriormente, retornando às considerações de Bird *et al.* (2004), é comentado que para regimes turbulentos com valores de Reynolds entre 10^4 e 10^5 , uma aproximação bastante usual que relaciona a velocidade máxima e a média em um tubo se dá na proporção de $4/5$, ou seja, a velocidade média se aproxima de 80% da máxima. Neste sentido, utilizando esta nova consideração, as hipóteses já comentadas ao decorrer do trabalho e o modelo de Shepherd e Lapple (1940), as quedas de pressão nas três velocidades de operação se estabeleceriam em 34,62, 138,68 e 312,05 Pa, valores muito mais próximos das medições experimentais. Contudo, para determinar a viabilidade de uso da relação de velocidades comentada, necessita-se do número de Reynolds e, portanto, da própria velocidade média no tubo. Desta maneira, recomenda-se a utilização de uma nova metodologia para aferição da velocidade de entrada como, por exemplo, a utilizada por Scarpa.

De todo modo, será considerado para efeitos de comparação da queda de pressão, em seções futuras do trabalho, os resultados oriundos do modelo ajustado por Scarpa, sendo específico para os equipamentos estudados e, portanto, com boa confiabilidade.

5.2.1.2. Eficiência de separação global

Conforme comentado, o fator de eficiência foi determinado a partir da massa de minério retida na caixa coletora. Os resultados médios obtidos podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados de eficiência de coleta experimental do minério de ferro para os três ciclones avaliados.

Resultados de Eficiência de Coleta do Minério de Ferro				
Ciclone	v_0 [m/s]	\dot{M}_s [g/s]	T_{Ar} [°C]	η []
C ₁	10,03 ± 0,03	0,11398 ± 0,00083	35,35 ± 1,77	0,688272 ± 0,016853
	20,02 ± 0,04	0,11367 ± 0,00106	44,43 ± 2,76	0,814459 ± 0,020392
	30,03 ± 0,03	0,11406 ± 0,00130	43,68 ± 2,29	0,831957 ± 0,008813
	10,03 ± 0,04	0,23120 ± 0,00137	36,68 ± 2,10	0,685540 ± 0,017241
	20,04 ± 0,04	0,23020 ± 0,00192	44,83 ± 3,76	0,807989 ± 0,015734
	30,01 ± 0,04	0,22950 ± 0,00149	48,32 ± 0,42	0,834387 ± 0,010586
	10,05 ± 0,02	0,34124 ± 0,00570	36,38 ± 0,93	0,680781 ± 0,018685
	20,03 ± 0,04	0,34512 ± 0,00675	47,85 ± 0,84	0,802908 ± 0,019380
	30,03 ± 0,03	0,34188 ± 0,00567	51,05 ± 0,63	0,831421 ± 0,016096
C ₂	10,02 ± 0,04	0,11412 ± 0,00057	39,07 ± 0,82	0,687635 ± 0,025232
	19,99 ± 0,02	0,11383 ± 0,00070	43,43 ± 1,45	0,764563 ± 0,031187
	30,01 ± 0,04	0,11401 ± 0,00031	50,32 ± 4,83	0,782193 ± 0,033498
	10,05 ± 0,04	0,23036 ± 0,00218	34,17 ± 1,98	0,697933 ± 0,007297
	20,02 ± 0,04	0,22940 ± 0,00163	41,38 ± 2,68	0,802656 ± 0,019959
	30,06 ± 0,02	0,23129 ± 0,00223	48,10 ± 3,87	0,818360 ± 0,003702
	10,01 ± 0,03	0,34636 ± 0,00082	39,63 ± 1,69	0,677136 ± 0,011179
	20,01 ± 0,02	0,34371 ± 0,00320	46,22 ± 1,81	0,780258 ± 0,017028
	30,03 ± 0,02	0,34146 ± 0,00466	46,57 ± 0,96	0,818638 ± 0,012711
C ₃	10,03 ± 0,03	0,11249 ± 0,00026	36,62 ± 2,13	0,685289 ± 0,018685
	20,01 ± 0,03	0,11306 ± 0,00096	44,73 ± 1,95	0,781811 ± 0,016722
	30,02 ± 0,05	0,11426 ± 0,00056	46,02 ± 2,31	0,785381 ± 0,013983
	10,02 ± 0,03	0,22998 ± 0,00177	38,28 ± 1,60	0,689308 ± 0,009963
	20,02 ± 0,03	0,23166 ± 0,00144	49,08 ± 2,48	0,774067 ± 0,017898
	30,03 ± 0,03	0,22902 ± 0,00109	49,95 ± 2,01	0,783258 ± 0,014395
	10,05 ± 0,03	0,34424 ± 0,00478	38,40 ± 3,85	0,678371 ± 0,014311
	20,03 ± 0,03	0,34425 ± 0,00457	49,27 ± 4,49	0,776908 ± 0,013108
	30,04 ± 0,02	0,34104 ± 0,00521	50,05 ± 3,08	0,803869 ± 0,018498

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 19, levando-se em consideração apenas a média exata dos resultados, é possível observar que para os três ciclones, o incremento da velocidade de alimentação do ar favoreceu o processo de separação do minério de ferro, mantendo-se constante sua vazão de alimentação. Tal comportamento está de acordo com as observações constatadas por Gimbum *et al.* (2004) e Zhu e Lee (1999).

Por outro lado, observando a eficiência de coleta com relação à variação da vazão mássica de sólidos, é possível vislumbrar uma influência mínima entre essas variáveis. Tal fato provavelmente está associado a elevada diluição da fase sólida na corrente de tratamento que, por sua vez, se relaciona às próprias limitações de alimentação do sistema utilizado na unidade experimental. Cabe destacar que a concentração máxima de sólidos na suspensão, tomando como base a maior vazão de minério e a menor vazão de ar, se estabeleceu por volta de 0,0004% em base volumétrica.

Ainda nos resultados das Tabela 19, para uma mesma condição operacional de velocidade e vazão mássica de sólidos, pode-se observar uma pequena influência da relação entre as alturas cilíndrica e cônica dos ciclones na eficiência de separação do minério de ferro. Contudo, não foi possível identificar nesta análise o efeito comentado por BRAR *et al.* (2015), pois, para tal, deveria ser notável uma eficiência de coleta superior para o ciclone C₃, o que não foi observado na prática. Este comportamento pode estar relacionado a elevada massa específica do material sólido analisado, que acaba por suprimir em grande parte o efeito da razão (h_{cc}/D_c) no fator de coleta.

Além disso, os efeitos de variação de temperatura podem ter contribuído em certo grau na dificuldade de verificação da influência da vazão de sólidos e da razão [h_{cc}/D_c] sobre o fator de eficiência, pois conforme constatado por Gimbum *et al.* (2004), maiores temperaturas de operação estão relacionadas à diminuição do desempenho de separação devido ao aumento da viscosidade da fase fluida. Contudo, conforme visto na Tabela 19, foi obtida uma variação de temperatura ao redor de apenas 15°C, entre as condições de mínima e máxima velocidade, sendo uma variação de pequena magnitude, a qual pouco influencia nas propriedades físicas do gás, não sendo, portanto, o fator de maior relevância.

Por fim, conforme constatado por Gao *et al.* (2012), quando o comprimento do bocal de exaustão encontra a seção cônica do ciclone, a eficiência tende a diminuir, mesmo em ciclones com alturas cônicas mais elevadas, afetando principalmente C₃, cuja penetração do bocal na seção cônica é maior, seguido por C₁. Este comportamento é parcialmente comprovado perante os dados da Tabela 19, na qual verifica-se que na maioria das condições experimentais, C₃ apresentou de fato os menores fatores de eficiência. Assim sendo, o grande valor da profundidade (S) do bocal do *overflow* certamente influenciou nos níveis de separação do minério. Seguindo este raciocínio, esperava-se uma eficiência de coleta global no geral superior no ciclone C₂ ou, porventura, em C₁, cuja penetração do bocal de exaustão no corpo cônico do

ciclone é substancialmente inferior ao do ciclone C₃. De qualquer forma, estas tendências serão melhor abordadas no tratamento estatístico apresentado na próxima seção.

5.2.1.3. Comportamento estatístico dos dados

Neste momento serão apresentados os resultados obtidos para o teste de hipóteses adotado para avaliação da influência da velocidade de alimentação do ar, vazão mássica de alimentação de sólidos e altura do corpo cilíndrico dos ciclones na eficiência de separação do minério de ferro. Os resultados aqui apresentados serão importantes para corroborar ou descartar as observações iniciais destacadas na seção 5.2.1.2.

Tabela 20 - Resultados do teste *t Student* para avaliação estatística da influência da velocidade de alimentação do ar no fator de eficiência dos ciclones.

Ciclone	\dot{M}_s [g/s]	Stat t	$t_{crítico}$	Resultado
C ₁	0,11390 ± 0,00103	11,68384	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		1,92938	1,89457	$H_1: \eta [30] > \eta [20]$
	0,23030 ± 0,00167	12,85006	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		3,40968	1,81246	$H_1: \eta [30] > \eta [20]$
	0,34275 ± 0,00596	11,11242	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		2,77237	1,81246	$H_1: \eta [30] > \eta [20]$
C ₂	0,11399 ± 0,00053	4,69729	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		0,94350	1,81246	$H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,23035 ± 0,00207	12,07065	1,94318	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		1,89488	2,01504	$H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,34384 ± 0,00372	12,40078	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		4,42435	1,81246	$H_1: \eta [30] > \eta [20]$
C ₃	0,11330 ± 0,00096	9,42908	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		0,40118	1,81246	$H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,23022 ± 0,00177	10,13536	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		0,98013	1,81246	$H_0: \eta [30] = \eta [20]$
	0,34266 ± 0,00470	12,43689	1,81246	$H_1: \eta [20] > \eta [10]$
		2,91286	1,83246	$H_1: \eta [30] > \eta [20]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Iniciando os resultados do teste *t student* usado para avaliação estatística dos resultados experimentais, tem-se a Tabela 20, que mostra os resultados obtidos para influência estatística da velocidade de alimentação do ar na eficiência de coleta dos ciclones, a um nível de

significância de 5%. Conforme visto na Tabela 20, o comportamento anteriormente observado durante a análise da Tabela 19 foi estatisticamente constatado. Majoritariamente, os resultados observados mostram de fato o aumento do fator de eficiência de coleta em virtude do incremento da velocidade de alimentação do ar (Gimbum *et al.*, 2004; Zhu e Lee, 1999).

Na Tabela 21 pode-se observar os resultados do teste de hipóteses para avaliação da influência da vazão de alimentação de sólidos na eficiência de separação do material. O tratamento estatístico veio a confirmar o comportamento previsto na análise inicial dos resultados de coleta, indicando que a vazão de alimentação de sólidos não teve efeito notável sobre o fator de eficiência, provavelmente relacionado a elevada diluição da fase dispersa na suspensão. Cabe destacar que este comportamento é válido dentro da faixa avaliada.

Tabela 21 - Resultados do teste *t Student* para avaliação estatística da influência da vazão de alimentação de sólidos no fator de eficiência dos ciclones.

Ciclone	v_0 [m/s]	Stat t	$t_{\text{crítico}}$	Resultado
C ₁	10,04 ± 0,03	0,27756	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,45846	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
	20,03 ± 0,04	0,61534	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,49850	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
	30,02 ± 0,03	0,43205	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,07152	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
C ₂	10,02 ± 0,04	0,96007	1,94318	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,93184	1,89457	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
	20,01 ± 0,03	1,08191	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,11296]$
		2,09122	1,81246	$H_1: \eta[0,23206] > \eta[0,34611]$
	30,04 ± 0,03	2,62870	2,01504	$H_1: \eta[0,23206] > \eta[0,11296]$
		0,05149	1,94318	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
C ₃	10,04 ± 0,03	0,46496	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,71999	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
	20,02 ± 0,03	0,56519	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		0,31374	1,81246	$H_0: \eta[0,34611] = \eta[0,23206]$
	30,03 ± 0,04	0,25917	1,81246	$H_0: \eta[0,23206] = \eta[0,11296]$
		1,95296	1,81246	$H_1: \eta[0,34611] > \eta[0,11296]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, na Tabela 22, podem ser observados os resultados da análise estatística utilizada para investigar a influência da razão $[h_{cc}/D_c]$, relacionada à variação geométrica dos três ciclones, na eficiência de separação do minério de ferro.

Tabela 22 - Resultados dos testes *t Student* para avaliação estatística da influência da altura do corpo cilíndrico dos ciclones na coleta do minério de ferro.

Teste	Condição Experimental		Stat t	t _{crítico}	Resultado
	$v_{\theta} - \dot{M}_s$				
	[m/s; g/s]				
1	10,03 ± 0,03	-	0,05143	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
2	0,11372 ± 0,00092	-	0,18301	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
3	20,02 ± 0,03	-	3,03247	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_3]$
4	0,11372 ± 0,00092	-	1,19388	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
5	30,03 ± 0,03	-	6,90262	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_3]$
6	0,11372 ± 0,00092	-	0,21516	1,89458	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
7	10,03 ± 0,03	-	1,71064	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
8	0,23029 ± 0,00181	-	0,46357	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_1]$
9	20,02 ± 0,03	-	0,51391	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
10	0,23029 ± 0,00181	-	2,61217	1,81246	$H_1: \eta[C_2] > \eta[C_3]$
11	30,03 ± 0,03	-	3,50036	1,94318	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_2]$
12	0,23029 ± 0,00181	-	5,78466	1,81246	$H_1: \eta[C_2] > \eta[C_3]$
13	10,03 ± 0,03	-	0,25088	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_3]$
14	0,34326 ± 0,00485	-	0,16652	1,81246	$H_0: \eta[C_3] = \eta[C_2]$
15	20,02 ± 0,03	-	2,15066	1,81246	$H_1: \eta[C_1] > \eta[C_2]$
16	0,34326 ± 0,00485	-	0,38179	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$
17	30,03 ± 0,03	-	1,52668	1,81246	$H_0: \eta[C_1] = \eta[C_2]$
18	0,34326 ± 0,00485	-	1,61187	1,81246	$H_0: \eta[C_2] = \eta[C_3]$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 22 indicam que a razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ teve considerável influência estatística nos resultados de eficiência de separação. Ainda que não tenha sido possível a verificação desse comportamento em toda a série de dados, nas condições dos testes 3, 5, 11 e 15, é observado que as separações mais eficazes foram resultantes da utilização do ciclone C₁, seguido majoritariamente por C₂ e, então, C₃, levando-se em consideração a média dos resultados de coleta. Assim sendo, no âmbito experimental, foi obtido como ciclone de máxima eficiência para coleta do minério de ferro o ciclone C₁, ou seja, a maior separação se deu no ciclone de razão $[h_{cc}/D_c]$ intermediária, igual à 1,65.

O resultado obtido para a influência da altura do corpo cilíndrico no fator de coleta está em certa consonância com o comportamento esperado Gao *et al.* (2012), sendo que majoritariamente as menores eficiência foram encontradas para C₃, no qual o bocal de exaustão invade uma maior porção da região cônica do separador. Por outro lado, as maiores eficiências de coleta foram encontradas para C₁, seguido majoritariamente por C₂. É possível que melhores separações tenham sido obtidas para o ciclone C₁ devido ao campo centrífugo de maior intensidade, oriundo da maior altura cônica em relação à C₂, ainda que o bocal de exaustão tenha invadido certa porção da seção cônica. Neste sentido, é possível inferir que o ciclone C₁ tenha apresentado um equilíbrio entre os dois efeitos comentados.

Porém, cabe destacar que, conforme visto nos resultados das Tabelas 19 e 22, os resultados de eficiência entre os ciclones para uma mesma condição experimental se apresentaram muito próximos entre si, dificultando muito a verificação de uma tendência com relação à variação do parâmetro geométrico. Isto posto, pode-se presumir que de fato a elevada massa específica do material sólido suprimiu fortemente o fator de geometria $[h_{cc}/D_c]$, tendo uma tendência elevada de ser coletado com baixa influência das características geométricas do separador. Além disso, como já comentado, possíveis variações de velocidade entre os ensaios experimentais, em virtude da metodologia utilizada para sua aferição, podem ter contribuído para a dificuldade de verificação.

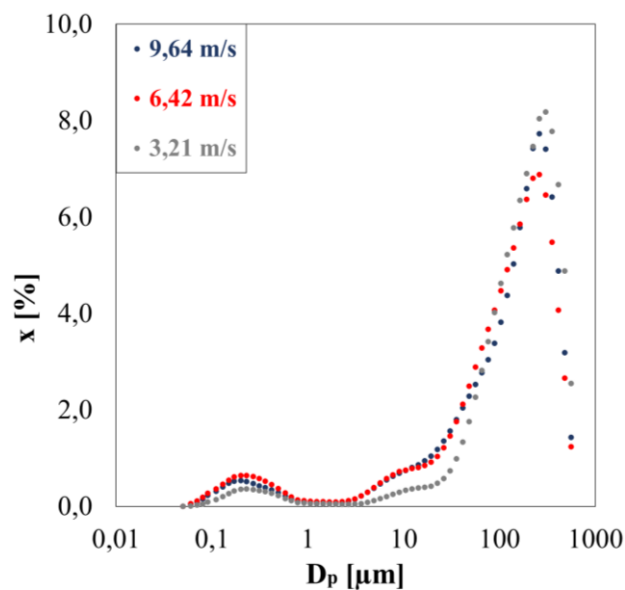
5.2.1.4. Eficiência de separação fracionária

Nesta seção serão discutidos mais uma vez os resultados de eficiência de coleta do minério de ferro, porém, de forma mais aprofundada, verificando como se deu a separação do material particulado por dimensão de partícula. Desta maneira, serão apresentadas as distribuições fracionárias de dimensão de partícula obtidas para os materiais coletados no *underflow* dos ciclones.

Iniciando a discussão, observa-se a Figura 26 que contém as frequências de tamanhos presentes nas amostras coletadas por C_1 , na condição de máxima vazão de alimentação de sólidos. Analisando a Figura 26, fica claro o aumento da eficiência de coleta na parte majoritária dos diâmetros de partícula conforme o aumento da velocidade de alimentação do ar, principalmente evidenciado entre as velocidades de 3,21 e 6,42 m/s.

Em relação à condição de velocidade máxima, é possível verificar que a frequência de tamanhos de partícula se estabeleceu muito próxima com relação a de 6,42 m/s, o que também foi obtido nos resultados de eficiência global apresentados na Tabela 19. É possível que certa variação de granulometria no material alimentado tenha gerado tal comportamento, pois, não foi realizado um procedimento de amostragem sistemático para constituição das amostras alimentadas, sendo realizado apenas uma homogeneização manual.

Figura 26 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C_1 , na condição operacional de 0,34611 g/s, para as três velocidades avaliadas.



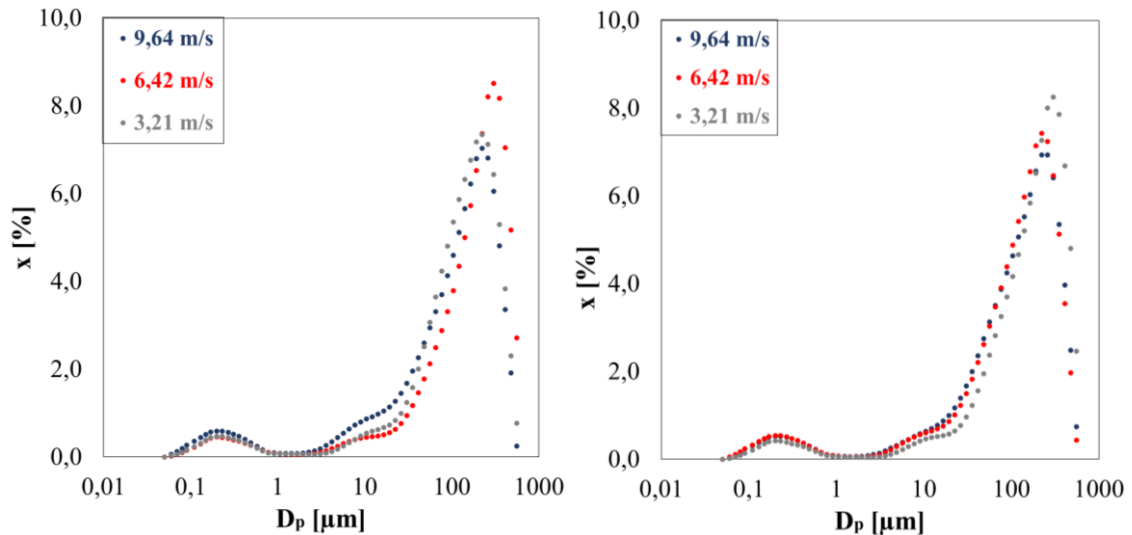
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 27, os resultados de frequência (x) de partículas mostrados são mostrados para os ciclones C_2 e C_3 , na condição máxima de alimentação de sólidos.

Em linhas gerais, pode-se observar o aumento das eficiências individuais de coleta das partículas com o aumento da velocidade de alimentação. Houve, no entanto, certos intervalos de dimensão de partículas nos quais velocidade inferiores apresentaram, aparentemente, uma coleta superior, assim como também pode ser visto na Figura 26. Isto pode estar relacionado novamente a certa variação da distribuição granulométrica do material alimentado durante os

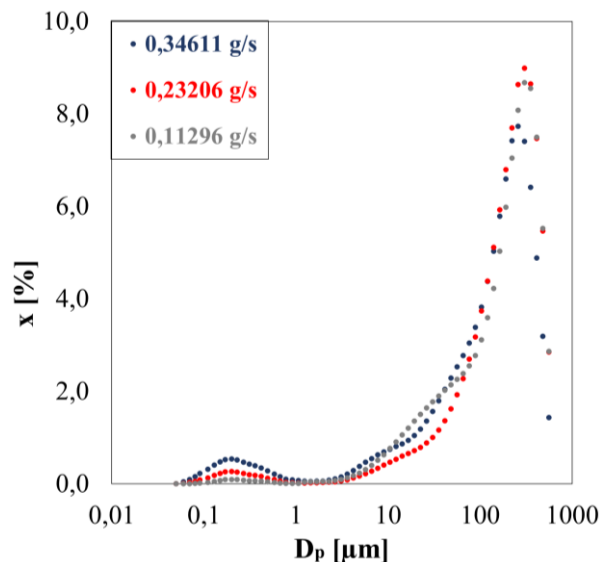
ensaios. Todavia, é possível observar um comportamento geral da influência da velocidade de alimentação do ar na eficiência de coleta das partículas em grande parte da série de dados.

Figura 27 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos ciclones C₂ e C₃, na condição operacional de 0,34611 g/s, para as três velocidades avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C₁, na condição operacional de 9,64 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

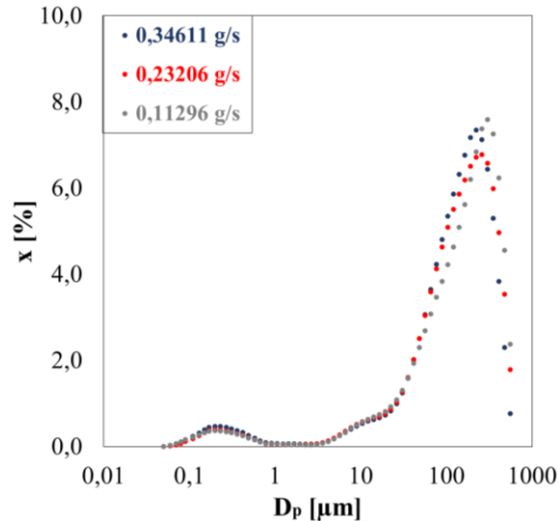
Já na Figura 28, são mostrados os resultados de eficiência de coleta individual em função da vazão mássica de alimentação de sólidos para o ciclone C₁, na condição de velocidade máxima do ar. No geral, pode-se observar um aumento da eficiência individual de coleta para os diâmetros na faixa submicrômica, conforme o aumento da vazão de alimentação de sólidos.

Este efeito pode estar relacionado a adesão dessas partículas diminutas na superfície de partículas de maior dimensão que, por sua vez, estão presentes em maior quantidade no sistema nas condições de vazões mássicas superiores.

Em contraponto, é também possível verificar que o aumento da vazão influenciou negativamente nos fatores de eficiência individuais na faixa aproximada entre 10 e 100 μm . É possível presumir que este favorecimento da separação em parte dos diâmetros enquanto piora na coleta de outros, empreendeu pouco efeito da vazão mássica de sólidos nas eficiências globais de separação.

Um comportamento análogo ao do ciclone C_1 foi visto em C_2 , conforme pode-se observar na Figura 29. O aumento da vazão mássica favoreceu levemente a coleta de partículas na faixa de dimensão submicrômica e de 70 a 200 μm , ao mesmo passo que desfavoreceu a coleta de partículas de dimensão entre 1 a 50 μm e superiores a 200 μm , desta maneira, mantendo praticamente inalterada a eficiência global de coleta.

Figura 29 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados do ciclone C_2 , na condição operacional de 3,21 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas.

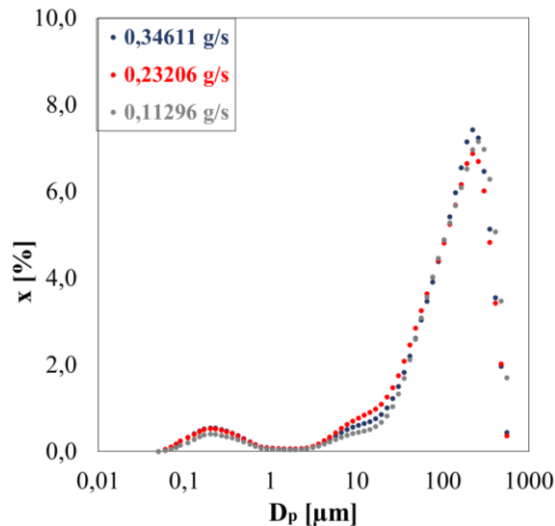


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, nos resultados do ciclone C_3 (Figura 30), observa-se uma separação mais consistente dos diâmetros desde a faixa submicrômica até por volta de 50 μm na condição de velocidade do ar intermediária (6,42 m/s), com um aumento dos fatores de eficiência individual devido ao aumento da vazão mássica, principalmente comparando as condições de 0,11296 e 0,23206 g/s. Porém, no geral, as eficiências voltam a diminuir nas condições de alimentação

superiores para os diâmetros maiores, mais uma vez justificando uma mínima influência da vazão mássica no fator de eficiência global do ciclone.

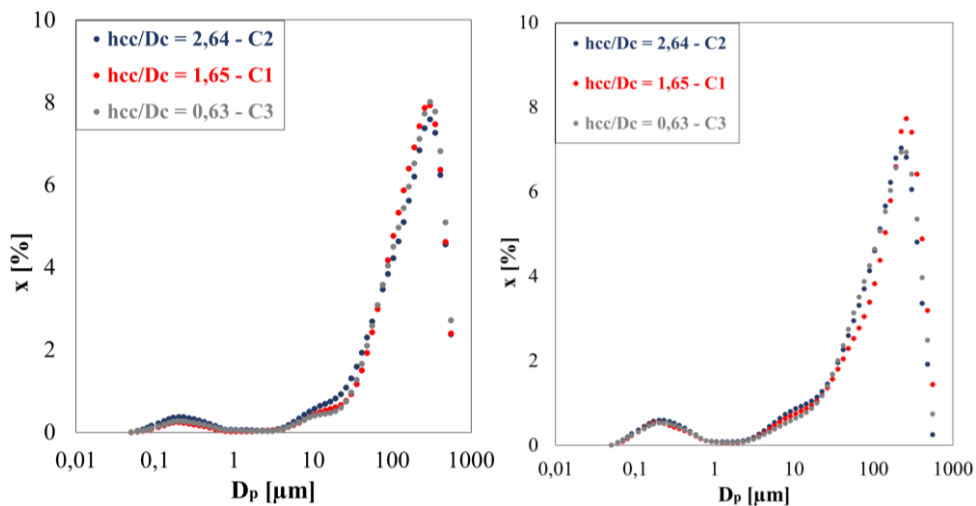
Figura 30 - Frequência de tamanhos de partículas no materiais coletados do ciclone C₃, na condição operacional de 6,42 m/s, para as três vazões mássicas avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

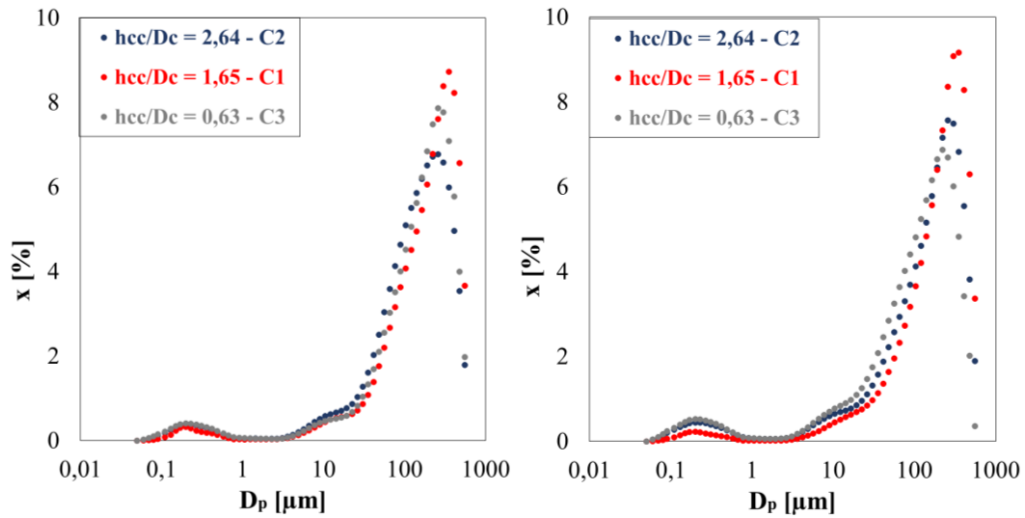
No que tange a influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ na eficiência de coleta individual das partículas, tem-se a Figura 31, na qual estão os resultados de frequência de tamanho de partícula nas condições experimentais extremas $[(\dot{M}_{s,1}; V_1); (\dot{M}_{s,3}; V_3)]$ para os três ciclones estudados. Analisando os dados obtidos, observa-se que o ciclone C₂ assumiu posição de destaque na coleta de partículas até por volta de 50 μm , porém, sendo superado por C₁ e C₃ nos diâmetros maiores, especialmente na faixa superior a 100 μm .

Figura 31 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos três ciclones, nas condições operacionais extremas de velocidade e vazão mássica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Frequência de tamanhos de partículas nos materiais coletados dos três ciclones, nas condições operacionais intermediárias de velocidade e vazão mássica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas condições experimentais intermediárias $[(\dot{M}_{s,2}; V_1); (\dot{M}_{s,2}; V_2)]$ apresentadas na Figura 32, por outro lado, observa-se que C₂ e C₃ foram os que apresentaram melhor coleta para dimensões de partícula até por volta de 200 μm , sendo apenas superados por C₁ nos diâmetros superiores. Comparando ainda as Figuras 31 e 32, realmente percebe-se que C₁ apresentou coletas no geral mais eficientes para os diâmetros maiores, enquanto C₂ e C₃ apresentaram melhores resultados para os diâmetros inferiores, com certa variação de comportamento para as faixas de diâmetros intermediários. Observa-se de fato uma grande dificuldade na verificação de uma tendência em toda a série de dados com relação à altura do corpo cilíndrico dos ciclones.

Além disso, conforme já comentado das Figuras 31 e 32, nos testes realizados no ciclone C₁ houve maior coleta de partículas de maior dimensão, para a maioria das condições experimentais. É esperado que tais partículas possuam massa superior às partículas menores, sobretudo melhor coletadas por C₂, o que pode ter influenciado na medida de massa que originou os dados de eficiência global de coleta, destacando C₁ como o ciclone de máxima eficiência.

5.2.1.5. Composição química dos coletados

Na Tabela 23 são mostrados os resultados de composição química obtidos para as amostras de material coletado nos três ciclones avaliados. Inicialmente, tomando como base os resultados do FRX do minério de ferro original, utilizado na alimentação dos ciclones, pode-se perceber que todos os ciclones empreenderam uma concentração do conteúdo férrico. Todavia, é notável que o ciclone C₁ se destacou levemente neste aspecto, permitindo uma concentração

relativa máxima de 1,5% da fração de ferro no minério, sendo no geral um valor pequeno, porém, relacionando-o com as vazões praticadas no setor de mineração, trata-se de um nível não negligenciável.

Além disso, percebe-se uma tendência consistente da influência da velocidade de alimentação do ar na concentração de F_e . Nos resultados obtidos para os três ciclones, a menor velocidade de alimentação do ar (3,21 m/s) favoreceu a concentração do ferro, provavelmente por permitir um escape de maior quantidade de partículas mais leves, com maior constituição de sílica e alumina, por exemplo, cujas massas específicas são inferiores ao do ferro. Por outro lado, não foi averiguado um comportamento padronizado para a influência da vazão de alimentação de sólidos nesta questão, praticamente não alterando o valor da composição férrica.

Tabela 23 - Composição química dos materiais coletados no *underflow* dos três ciclones, nas condições extremas de velocidade e vazão mássica estudadas.

Resultados FRX								
Ciclone C ₁								
Amostra	Condição Experimental		Componente					
	v_i [m/s]	\dot{M}_s [g/s]	% Fe	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% P	% Mn	% PF
1	3,21	0,11296	66,5	1,37	0,95	0,039	0,15	2,36
2	9,64		66,3	1,33	1,05	0,043	0,15	2,43
3	3,21	0,34611	66,5	1,36	1,04	0,042	0,15	2,37
4	9,64		66,4	1,37	1,05	0,043	0,15	2,47
Ciclone C ₂								
1	3,21	0,11296	65,9	1,27	0,96	0,040	0,15	2,32
2	9,64		65,7	1,30	1,04	0,041	0,15	2,42
3	3,21	0,34611	65,9	1,29	0,97	0,040	0,15	2,24
4	9,64		65,7	1,34	1,05	0,039	0,15	2,43
Ciclone C ₃								
1	3,21	0,11296	65,8	1,29	1,01	0,038	0,16	2,46
2	9,64		65,6	1,33	1,02	0,040	0,15	2,34
3	3,21	0,34611	65,9	1,30	0,99	0,039	0,15	2,76
4	9,64		65,7	1,29	1,02	0,040	0,15	2,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange à eliminação dos outros componentes da matriz sólida, observa-se que os ciclones definitivamente contribuíram para este objetivo, diminuindo sobretudo o teor de

alumina (3.950 kg/m^3) do minério, com diminuições relativas deste componente por volta de 25% a 32% em relação ao minério original. Tomando como base as observações de Morais *et al.* (2015), elevadas concentrações de alumina estão relacionadas ao aumento do índice de degradação à redução do *sinter feed*. Desta maneira, esta diminuição da concentração de alumina pode ser um dado valioso para melhor enquadramento das frações intermediárias do minério de ferro frente ao processo de redução. Além do mais, é possível presumir um menor gasto de matérias-primas complementares no processo de obtenção do concentrado de ferro, destacado no Capítulo 2, através desta remoção inicial dos outros componentes da matriz sólida.

Percebe-se também que a remoção da alumina se deu de maneira mais eficiente para as condições de menor velocidade do ar, por permitir maior escape de partículas mais leves, pobres em ferro e ricas nos outros componentes, tal como a própria alumina. Quanto maior a velocidade de alimentação, mais elevada a eficiência de separação e menor o diâmetro de corte, permitindo que partículas mais leves/menores sejam também mais coletadas, desfavorecendo o processo de desconcentração destes componentes. Em relação à vazão de alimentação de sólidos, percebe-se que a remoção da alumina se deu predominantemente na condição mínima.

Conforme dito ainda por Aquino (2013) e Quaresma (2001), deseja-se também uma baixa concentração de fósforo nas frações mais finas do minério de ferro. No geral, a concentração de fósforo já era baixa no material original. De toda maneira, os ciclones permitiram uma remoção relativa geral de fósforo de magnitude levemente inferior que a alumina, na ordem de 20%. Todavia, a concentração de fósforo sofreu menor influência dos parâmetros do escoamento, por já se tratar de um material significativamente mais leve que os demais, tendendo a concentrar-se no *overflow* em quaisquer condições de operação.

Dos componentes do minério com exceção do ferro, a sílica (2.630 kg/m^3) apresentou a menor diferença relativa com o material original e, além disso, sua concentração foi pouco afetada pelas condições operacionais. Isto pode estar relacionado a sílica estar mais presente nas faixas de diâmetros de partícula superiores, cuja tendência é de serem coletados no *underflow*, enquanto que a alumina se encontra mais dispersa na distribuição granulométrica do material. A desconcentração relativa do conteúdo de sílica se manteve por volta de 10 a 15%.

No que tange ao manganês (Mn), também praticamente não houve influência dos parâmetros operacionais dos ciclones em sua retirada do material, sendo que no geral houve uma diminuição relativa de sua composição em torno de 25%. Tal efeito está provavelmente ligado a elevada massa específica do manganês, que provê ao material a tendência de ser

coletado em quaisquer condições operacionais. Apenas partículas de manganês com diâmetros consideravelmente diminutos seriam capazes de escapar do processo de separação empregado nos ciclones, o que possivelmente se relaciona com a fração retirada do material aqui comentada.

5.3. Resultados Numéricos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no âmbito das simulações CFD, avaliando a convergência das respostas numéricas através das 5 malhas criadas para cada um dos ciclones, conforme descrito no Capítulo 3. Desta maneira, aqui serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos perfis de escoamento gasoso, parâmetros dinâmicos do escoamento e convergência da solução perante o método GCI, possibilitando a determinação da malha mais adequada para simulação dos equipamentos.

5.3.1. Comportamento Dinâmico das Malhas

De modo a verificar a confiabilidade dos resultados gerados durante as simulações fluidodinâmicas, foi realizado um estudo de convergência de malha para a condição de velocidade máxima de alimentação do gás ($v_i = 9,64$ m/s), avaliando os perfis de escoamento da fase gasosa no interior dos ciclones frente ao perfil teórico esperado devido ao efeito do vórtice de Rankine e, além disso, os valores da queda de pressão e velocidade tangencial também foram verificados.

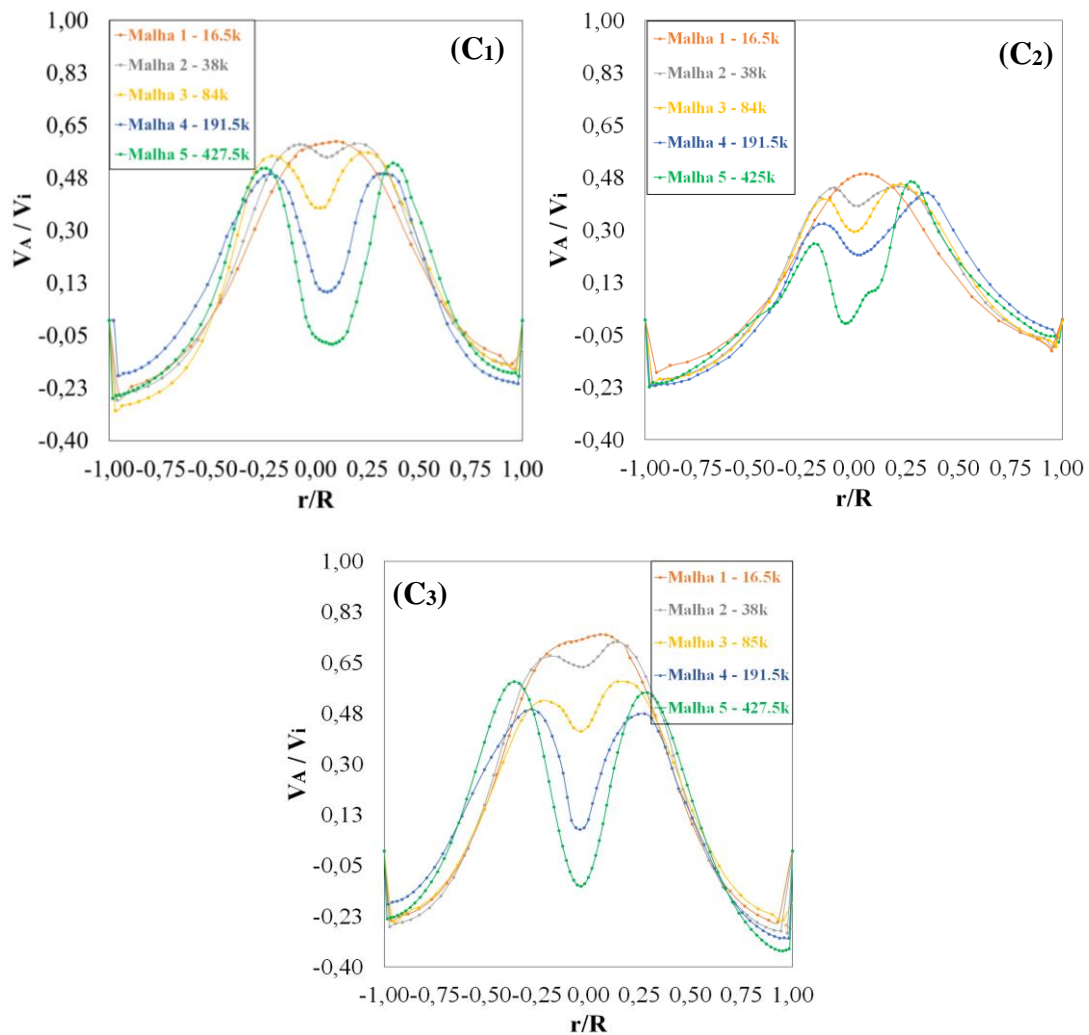
No caso da análise de convergência da queda de pressão, os resultados foram comparados com os resultados provenientes do modelo ajustado por Scarpa (2000). Por outro lado, os valores de velocidade tangencial máxima foram avaliados perante os valores propostos por um dos modelos teóricos descritos no APÊNDICE B, no caso, o modelo de Iozia e Leith (1990), cuja utilização perpassa o cálculo desta propriedade.

5.3.1.1. Perfis de escoamento da fase gasosa

Nesta seção serão apresentados os resultados gráficos obtidos pelas simulações para os perfis de escoamento gasoso, em resposta ao vórtice de Rankine que ocorre no interior dos ciclones. Os perfis aqui apresentados foram plotados no nível 1 apresentando na Figura 21 da seção 3.4.3.1. ($Z = 0,17$), varrendo toda a distância radial ($-1,0 < Y < 1,0$) disponível nesta seção central ($X = 0$), sendo oriundos da condição operacional de 9,64 m/s. Cabe destacar que X , Y e Z são as variáveis espaciais adimensionalizadas e, na legenda das figuras, estão contidas as quantidades de elementos das malhas associadas ao perfis.

Em virtude do efeito do vórtice de *Rankine* que ocorre no interior dos ciclones, é esperado para o perfil de velocidade axial o formato da letra M, também referido como ‘*W invertido*’, comportamento típico para a família de ciclones Stairmand. Desta maneira, é esperado deste perfil de escoamento, valores de velocidade baixas no centro radial, devido ao escoamento altamente rotativo do gás no interior do equipamento. As velocidades então apresentam um comportamento crescente conforme o afastamento do centro, até atingir dois picos de máximo, representando o vórtice gasoso interno, voltando a diminuir conforme se aproxima das paredes do ciclone. Os perfis obtidos para os três ciclones podem ser observados na Figura 33.

Figura 33 - Perfis de velocidade axial obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial $Z = 0,17$.



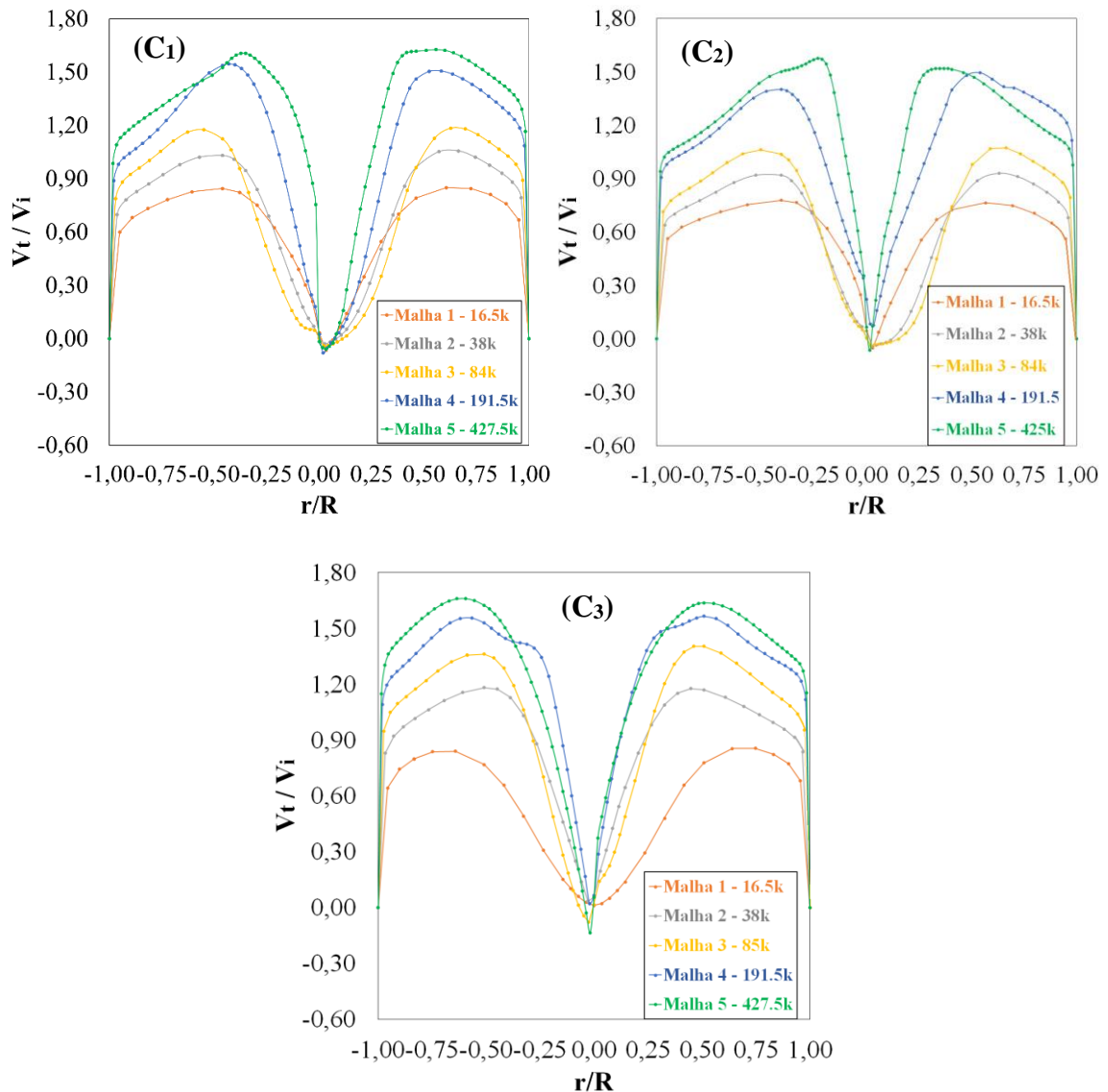
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar também da Figura 33 que a partir da malha 2 de cada ciclone, começou-se a se observar o gradiente de velocidade no centro do equipamento, se acentuando

conforme o aumento do refino da malha. A partir da malha 4, no geral, pode-se considerar o aspecto qualitativo do *W invertido* para o perfil de velocidade axial, porém, tornando-se plenamente definido apenas na malha 5, a mais refinada.

Os efeitos da vorticidade do gás também são observados nos perfis de velocidade tangencial do gás no interior dos ciclones, fazendo com que a velocidade tangencial seja praticamente zero no centro radial do equipamento, aumentando seu valor conforme se distancia do centro até atingir seu pico e, então, mais uma vez diminuindo conforme se aproxima das paredes do equipamento em um comportamento aproximadamente linear. Os perfis de velocidade tangencial dos três ciclones podem ser observados na Figura 34.

Figura 34 - Perfis de velocidade tangencial obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial $Z = 0,17$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar nos perfis de velocidade tangencial um intervalo de queda lenta desta componente da velocidade nos intervalos de r/R entre aproximadamente -0,8 a -0,3 e +0,3 a +0,8 para os ciclones C_1 e C_2 , e no intervalo de -0,8 a -0,6 e +0,8 a +0,6 para o ciclone C_3 , por se tratarem de regiões mais distantes dos efeitos de parede. A variação entre os intervalos de queda lenta entre os ciclones se deve a área de escoamento disponível para cada um deles, que diminui conforme o aumento do corpo cônico. E, então, aproximando-se mais da parede externa do ciclone, percebe-se a queda aproximadamente linear da velocidade tangencial, devido ao forte gradiente de pressão nas regiões próximas à parede, conforme destacado por Oliveira (2019).

No geral, todas as 15 malhas conseguiram prever qualitativamente o comportamento esperado para os perfis de velocidade tangencial nos ciclones, porém com principal destaque para as malhas 4 e 5, nas quais houve menor diferença na resposta gráfica, indicando a convergência do campo de velocidades presente nos três ciclones.

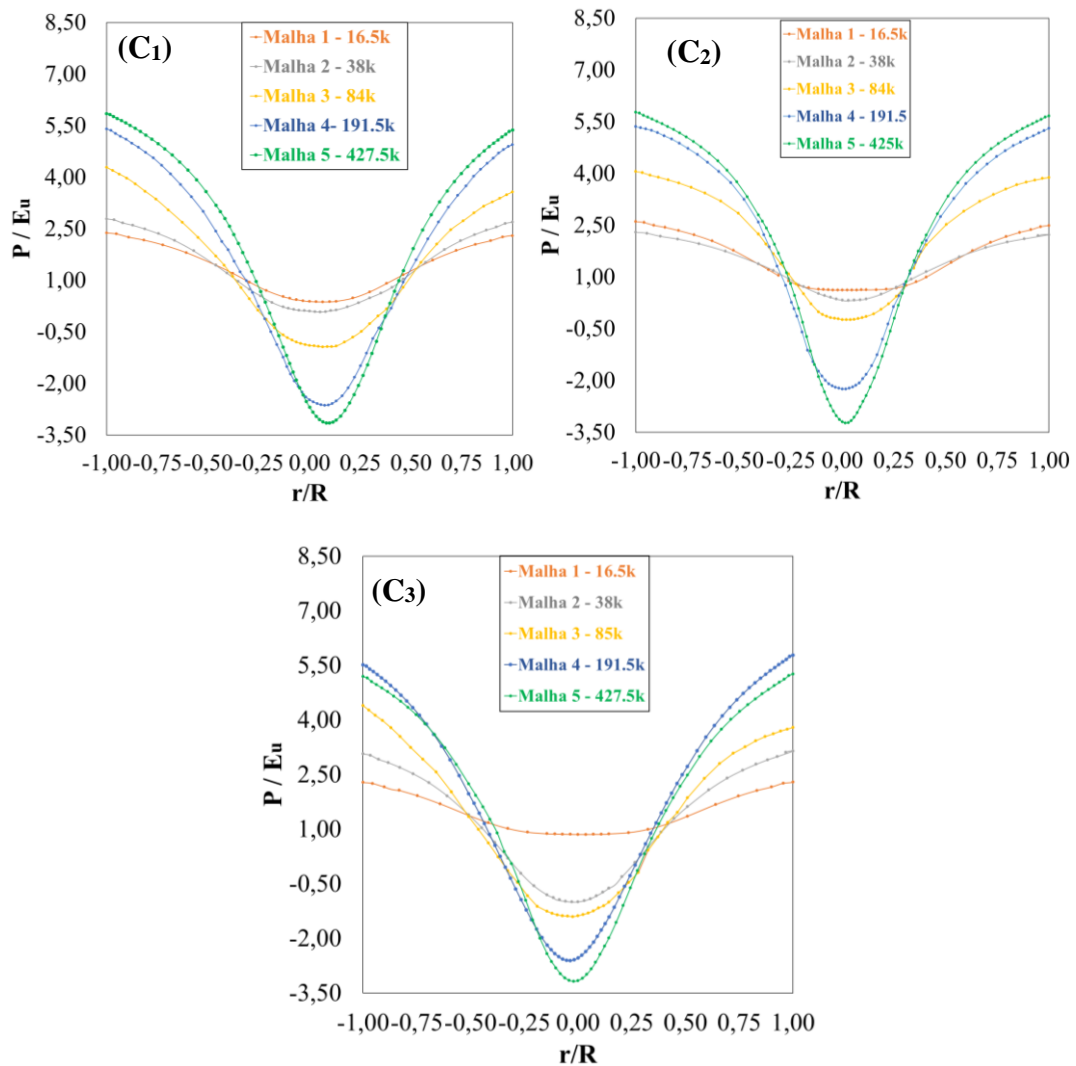
Por fim, na Figura 35 são apresentados os perfis de pressão estática dos três ciclones. Conforme pode-se observar, o comportamento foi conforme o esperado, indicando um forte gradiente de pressão radial, devido ao escoamento rotativo do gás no interior do separador. Além disso, cabe chamar atenção para os valores de pressão negativos próximos do centro radial dos equipamentos, indicando a região de formação do vórtice gasoso induzido ascendente.

No geral, as malhas empregadas demonstraram o comportamento qualitativo esperado para o perfil de pressão estática. Contudo, apenas a partir da malha 4 em que o gradiente de pressão se torna melhor definido nas regiões próximas ao centro dos equipamentos. E, na malha 5, pode-se considerar que o perfil se torna plenamente definido.

Levando em consideração os resultados gráficos aqui apresentados, relacionados ao comportamento esperado para os perfis de escoamento da fase fluida, fica claro que as malhas 4 e 5 apresentaram boa aproximação do comportamento esperado para os perfis de escoamento gasoso em separadores ciclônicos.

Contudo, apenas na malha 5, de maior refino, que pode ser considerado que os perfis se tornam plenamente definidos, sendo capaz de representar consistentemente os fortes gradientes de velocidade e pressão típicos desta classe de equipamentos. Assim sendo, nesta primeira análise, a malha 5 ganha papel de destaque para a simulação dos equipamentos estudados.

Figura 35 - Perfis de pressão estática obtidos para os três ciclones através da simulação das 5 malhas avaliadas, na condição de alimentação de 9,64 m/s traçados na posição axial $Z = 0,17$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1.2. Queda de pressão e velocidade tangencial máxima

Neste momento será apresentada uma comparação de resultados teóricos e simulados para duas propriedades de interesse no estudo de ciclones, a queda de pressão e a velocidade tangencial máxima. Os dados de queda de pressão foram comparados aos resultados obtidos pelo ajuste de Scarpa (2000) na condição operacional de 9,64 m/s. Em relação aos dados de velocidade tangencial máxima, a comparação foi realizada mediante aos valores determinados através do modelo de Iozia e Leith (1990), que perpassa o cálculo desta propriedade.

A Tabela 24 apresenta a comparação dos dados de queda de pressão e velocidade tangencial máxima conforme o refino das malhas, para os três ciclones. Vale destacar que a velocidade tangencial máxima teórica foi a mesma para os três ciclones devido ao fato de o

modelo adotado não levar em conta a dimensão do corpo cilíndrico em sua formulação, para as características dimensionais dos ciclones avaliados.

Tabela 24 - Avaliação das respostas numéricas frente aos valores experimentais de ΔP e teóricos de $V_{t,max}$.

$v_i = 9,64 \text{ m/s}$						
Ciclone C₁						
Malha	Queda de Pressão			Velocidade Tangencial Máxima		
	ΔP_{CFD} [Pa]	ΔP_{SCARPA} [Pa]	δ [%]	$V_{t,max}^{CFD}$ [m/s]	$V_{t,max}^{Correlação}$ [m/s]	δ [%]
1	172,1191		61,07	11,4515		32,76
2	209,4266		52,64	13,6434		19,89
3	241,6229	442,16	45,35	14,9969	17,03	11,94
4	362,5409		18,01	16,9271		0,60
5	410,1529		7,24	17,9931		5,66
Ciclone C₂						
1	151,3917		64,54	11,1167		34,72
2	198,5846		58,87	12,9663		23,86
3	219,0011	426,91	48,70	14,5757	17,03	14,41
4	328,2512		23,11	16,6230		2,39
5	376,9194		11,71	17,8770		4,97
Ciclone C₃						
1	192,0868		59,36	11,7830		30,81
2	258,7151		45,26	15,8518		6,92
3	312,4835	472,65	33,89	17,2038	17,03	1,02
4	414,0884		12,39	18,0853		6,20
5	452,9636		4,17	18,5742		9,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 24, observa-se que, no geral, conforme o refinamento das malhas, mais os resultados se aproximavam dos valores de referência. Além disso, levando-se em consideração os resultados de queda de pressão, os valores numéricos mais próximos dos valores propostos pelo ajuste de Scarpa foram obtidos através da malha 5, para os três ciclones, com desvios gerais inferiores à 12%.

Tais desvios podem estar relacionados às variações de temperatura durante os ensaios experimentais, uma vez que foi considerada uma temperatura média constante para todas as condições operacionais. Além disso, houve certo nível de desvio das medidas dos ciclones com

relação ao realizado por Scarpa que, mesmo em pequeno grau, pode ter contribuído para as divergências. Contudo, é possível dizer que houve boa adesão das respostas numéricas com relação ao ajuste de Scarpa.

Em relação a velocidade tangencial máxima, desvios baixos foram observados entre os resultados simulados e preditos pelo modelo teórico de Iozia e Leith. Inicialmente, cabe destacar que correlações empíricas, a exemplo da utilizada nesta seção, podem carregar consigo incertezas e erros experimentais, normalmente sendo utilizadas para fornecer informações globais sobre o sistema. Desta forma, é possível entender um grau maior de desvio com relação a esta propriedade.

Dito isso, observa-se que a malha 4 ofereceu a melhor adesão aos resultados teóricos da velocidade tangencial máxima para os ciclones C_1 e C_2 , com desvios de 0,6% e 2,39%, respectivamente. Com a malha 5, os desvios aumentaram levemente, para 5,66% e 4,97%. Porém, levando-se em consideração os perfis apresentados na seção anterior e os desvios com relação a queda de pressão, a malha 5 demonstra-se a mais indicada para a simulação dos equipamentos. Por outro lado, para o ciclone C_3 , houve melhor aproximação da velocidade tangencial máxima através das malhas 3, 4, 2 e 5, com desvios na magnitude de 1,02%, 6,20%, 6,92% e 9,07%, respectivamente. Contudo, avaliando simultaneamente os resultados para ΔP e $V_{t,máx}$, observa-se uma predição melhor do comportamento dinâmico de C_3 através da malha 5, devido aos desvios da queda de pressão perante as malhas 2, 3 e 4 serem substancialmente mais elevados.

Vale também destacar que foi possível averiguar a influência de h_{cc} nos dois parâmetros analisados. Conforme o aumento da altura do corpo cilíndrico ($C_3 < C_1 < C_2$), menores foram os valores obtidos para a queda de pressão e velocidade tangencial máxima, devido ao encurtamento da região de aceleração gasosa relacionada ao corpo cônico dos equipamentos, conforme destacado por Brar *et al.* (2015) e Brar e Shastri (2020).

Apenas no sentido de ilustrar a diferença das medidas obtidas para os ciclones, a Tabela 25 é apresentada. Deve-se destacar que foi feita a atualização das variáveis geométricas averiguadas no estudo de Scarpa, pois, nele foi considerado como altura total (H_t) a distância da base do ciclone até o nível de início do bocal de alimentação. Por outro lado, neste trabalho, foi considerado a distância foi considerada da base até o topo, conforme ilustrado por Coury *et al.* (2004) e muitos outros estudos relacionados à ciclones.

Tabela 25 - Comparação das relações geométricas obtidas experimentalmente com as de SCARPA (2000).

Razão Geométrica	C_1		C_2		C_3	
	Exp.	Scarpa (2000)	Exp.	Scarpa (2000)	Exp.	Scarpa (2000)
a/D_c	0,43	0,40	0,43	0,40	0,43	0,40
b/D_c	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22	0,21
S/D_c	2,39	2,5	2,39	2,50	2,39	2,50
B/D_c	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
D_c/D_c	0,41	0,40	0,41	0,40	0,41	0,40
h_{cc}/D_c	1,65	1,61	2,64	2,61	0,63	0,61
H_t/D_c	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18

Fonte: Elaborado pelo autor

De toda maneira, conforme visto nesta seção, as melhores respostas numéricas simultâneas relacionadas aos parâmetros dinâmicos do escoamento aqui avaliados, se concentraram através da simulação das malhas de maior refinamento (5) para os três ciclones. Assim sendo, em mais uma instância de análise a malha 5 ganha destaque, sendo até o momento a mais adequada para representar a fluidodinâmica dos separadores.

5.3.2. Convergência da Solução Numérica e Escolha das Malhas

Além da comparação dos resultados simulados com os modelos da literatura, foi utilizado ainda o método GCI para avaliar a convergência da solução oferecida pelas malhas estudadas, de modo a auxiliar na escolha da melhor malha para representar o comportamento fluidodinâmico de cada ciclone.

Para tal, foram determinadas as incertezas numéricas relacionadas a cada uma das malhas para as duas propriedades anteriormente apresentadas, a velocidade tangencial máxima e queda de pressão, na condição de maior velocidade de alimentação do ar (9,64 m/s). Os resultados podem ser observados na Tabela 26. Vale destacar que todo o procedimento de cálculo relacionado ao método GCI foi realizado perante os resultados das três malhas de maior refino, conforme feito por Oliveira (2019).

Conforme visto na Tabela 26, foi possível observar a convergência da solução numérica perante às malhas avaliadas, diminuindo a incerteza da solução numérica, no geral, conforme se aumentava o refinamento. Em relação à queda de pressão, a melhor convergência se deu através da malha 5 para os ciclones C_1 , C_2 e C_3 , com incertezas numéricas de aproximadamente 10,18%, 14,31% e 6,92% respectivamente.

No que tange à velocidade tangencial máxima, o mesmo comportamento foi obtido, os menores níveis de incerteza foram obtidos através da malha 5, de maior refino, para os três ciclones. Vale destacar uma ótima convergência para o ciclone C₃, com uma incerteza numérica na malha de maior refino de apenas 4,29%. Em relação aos ciclones C₁ e C₂, as incertezas foram superiores, por volta de 10% e 15,69%, respectivamente. Contudo, ainda assim, foi possível observar a convergência da solução frente ao conjunto de malhas utilizadas para simulação dos ciclones.

Tabela 26 - Resultados de incertezas das respostas numéricas obtidas para condição operacional de 9,64 m/s através do método GCI.

Incerteza da Malha	Ciclone C ₁	
	ΔP	$V_{t,máx}$
GCI ₁ [%]	37,1568	46,1082
GCI ₂ [%]	14,8892	26,0267
GCI ₃ [%]	11,9844	15,5768
GCI ₄ [%]	27,9313	18,5049
GCI ₅ [%]	10,1786	10,0029
Incerteza da Malha	Ciclone C ₂	
GCI ₁ [%]	31,6700	48,2509
GCI ₂ [%]	14,4470	30,4201
GCI ₃ [%]	22,2810	25,0085
GCI ₄ [%]	34,9630	26,3068
GCI ₅ [%]	14,3080	15,6932
Incerteza da Malha	Ciclone C ₃	
GCI ₁ [%]	51,9582	72,2518
GCI ₂ [%]	19,7663	40,1670
GCI ₃ [%]	13,9093	12,8517
GCI ₄ [%]	19,3024	7,7882
GCI ₅ [%]	6,9177	4,2940

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a convergência da solução numérica também é evidenciada pelos valores do fator γ , que devem ser tão próximos de 1 quanto possível, demonstrando que a solução está próxima do intervalo assintótico compreendido por f_{exact} (valor exato suposto pelo método GCI em virtude da modelagem numérica empregada). Levando-se em consideração as três malhas mais refinadas para cada ciclone, os valores de gama se estabeleceram por volta de 0,88 para

as respostas numéricas de queda de pressão de C_1 e C_2 , e por volta de 0,91 para C_3 . Com relação às respostas de velocidade tangencial máxima, melhores valores de γ foram obtidos, de 0,94, 0,93 e 0,97, respectivamente para os ciclones C_1 , C_2 e C_3 .

A escolha da malha mais apropriada para representação do fenômeno físico que ocorre no interior dos ciclones perpassa a análise dos perfis de escoamento, comparação com resultados experimentais e teóricos, grau de convergência e incerteza das malhas e, em última instância, o tempo de simulação.

Levando-se em consideração a escolha pela formulação estacionária para simulação dos ciclones, isto confere ao processo de simulação numérica um tempo muito inferior às simulações transientes, sendo que, as simulações fluidodinâmicas mais demoradas, utilizando as malhas mais refinadas (malhas 5), tomou uma média de 90 a 120 minutos.

Devido a este fator de tempo reduzido para viabilização das simulações, esta variável não será levada em consideração neste trabalho. Em outras palavras, dada a formulação utilizada na simulação dos ciclones, o tempo de simulação não é um fator limitante, ainda que, obviamente, haja um custo computacional mais acentuado para as malhas com mais elementos.

Conforme visto nas seções anteriores, a malha 5 apresentou em todos os testes as melhores predições das propriedades dinâmicas, campos de pressão e velocidade e as menores incertezas numéricas gerais para os três ciclones avaliados. Desta maneira, esta foi a malha escolhida para geração dos demais resultados no âmbito das simulações fluidodinâmicas dos três ciclones.

5.3.3. Resultados Simulados

5.3.3.1. Propriedades dinâmicas do escoamento gasoso

Uma vez definidas as malhas apropriadas para a simulação de cada um dos ciclones, primeiramente vale destacar os resultados obtidos para todas as condições de velocidade de alimentação do ar avaliadas, destacando as relações de interdependência entre as variáveis estudadas. Os resultados podem ser observados na Tabela 27.

Inicialmente, já é possível discernir o comportamento esperado para a queda de pressão. Em todos os ciclones, o aumento da velocidade de alimentação do ar acarretou aumento da queda de pressão dos ciclones bem como da velocidade tangencial máxima. Além disso, foi também possível discernir o efeito da razão geométrica $[h_{co}/D_c]$ nas respostas numéricas,

gerando os maiores valores destas propriedades para o ciclone C₃, seguido por C₁ e C₂, conforme reportado na literatura.

Tabela 27 - Resultados numéricos nas três condições operacionais de velocidade, obtidos através da simulação da malhas 5 dos três ciclones.

Ciclone C₁						
v_i [m/s]	ΔP_{CFD} [Pa]	ΔP_{Scarpa} [Pa]	δ [%]	V_{tmax}^{CFD} [m/s]	$V_{tmax}^{Correlação}$ [m/s]	δ [%]
3,21	38,16	49,03	22,17	5,45	5,68	4,05
6,42	174,18	196,11	11,18	11,58	11,35	2,03
9,64	410,15	442,16	7,24	17,99	17,03	5,66
Ciclone C₂						
v_i [m/s]	ΔP_{CFD} [Pa]	ΔP_{Scarpa} [Pa]	δ [%]	V_{tmax}^{CFD} [m/s]	$V_{tmax}^{Correlação}$ [m/s]	δ [%]
3,21	35,49	47,34	25,03	5,38	5,68	5,28
6,42	159,00	189,34	16,02	11,47	11,35	1,06
9,64	376,92	426,91	11,71	17,88	17,03	4,97
Ciclone C₃						
v_i [m/s]	ΔP_{CFD} [Pa]	ΔP_{Scarpa} [Pa]	δ [%]	V_{tmax}^{CFD} [m/s]	$V_{tmax}^{Correlação}$ [m/s]	δ [%]
3,21	42,74	52,41	18,45	5,84	5,68	2,82
6,42	191,34	209,63	8,72	12,06	11,35	6,26
9,64	452,96	472,65	4,17	18,57	17,03	9,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, comparando os resultados numéricos de queda de pressão com os obtidos através do ajuste de Scarpa, é possível observar uma boa concordância de resultados, com desvios máximos ao redor de 25%. Vale chamar atenção que os maiores desvios desta propriedade se concentraram na condição operacional de menor velocidade de alimentação (3,21 m/s). Este comportamento está relacionado, provavelmente, ao fato de ser o valor de velocidade mais distante das condições operacionais utilizadas para ajuste do modelo (6,2 a 10,2 m/s). Ainda assim, uma boa adesão foi obtida, demonstrando a qualidade do ajuste proposto por Scarpa, podendo ser extrapolado até mesmo para condições fora do intervalo de obtenção, com o devido cuidado.

Além disso, a natureza isotérmica do modelo numérico pode ter contribuído para o aumento dos desvios relativos da queda de pressão para a condição de mínima velocidade de alimentação, justamente por ser nesta condição onde há a maior diferença de temperatura entre a real e a média estipulada. Talvez, realizando a determinação de temperatura média e,

consequentemente, de uma massa específica da fase fluida para cada condição de velocidade operacional, os resultados apresentem uma melhor adesão.

Em relação à velocidade tangencial máxima dos três ciclones, os resultados numéricos simulados apresentaram boa adesão aos valores obtidos através da correlação de Iozia e Leith, com desvios inferiores à 9%. Na condição de alimentação de 3,21 m/s os desvios se apresentaram ao redor de 5% para os ciclones C_1 e C_2 , e por volta de 3% para o ciclone C_3 . Utilizando a velocidade de alimentação de 6,42 m/s, os erros também se apresentaram em escala semelhante para os ciclones C_1 e C_2 , e levemente superior para C_3 , ao redor de 6%.

Além disso, para enfatizar a qualidade da malha proposta para modelagem do comportamento fluidodinâmico presente nos equipamentos, é apresentada a Figura 36, destacando o a direção do fluxo rotativo do gás na forma vetorial. Pode-se também perceber, através das vistas superiores, a formação do vórtex gasoso interno, responsável pela exaustão.

Figura 36 - Ilustração vetorial do fluxo rotativo do gás para os três ciclones, destacando a formação do vórtex gasoso interno, na condição operacional de 3,21 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3.2. Eficiência de Coleta Global - Comparativo

Nesta seção serão mostrados os resultados de eficiência de coleta global obtidos através da metodologia *CFD* em contraponto com os modelos empíricos de: 1 - Barth (1956), 2 - Leith e Licht (1972), 3 - Iozia e Leith (1990) e 4 - Massarani (2002). Além de averiguar a capacidade preditiva do modelo numérico utilizado, este procedimento também permitiu uma revisão profunda de diversos modelos de eficiência de coleta aplicados no estudo de separadores ciclônicos. Os resultados podem ser observados na Tabela 28.

Cabe destacar que os modelos da literatura avaliados não levam em consideração a concentração de sólidos na corrente de tratamento. Assim sendo, as eficiências globais teóricas serão as mesmas para uma mesma condição de velocidade, não importando a vazão mássica de alimentação de sólidos empregada, porém servindo como uma boa base de comparação para averiguar a qualidade da resposta numérica.

Inicialmente, já é possível observar uma considerável concordância da ordem de grandeza dos resultados teóricos e obtidos via *CFD*, apresentando no geral uma escala muito similar, com desvios relativos entre 6% e 10%. O modelo de Leith e Licht gerou os maiores fatores de coleta de todos os modelos avaliados, indicando recuperações entre 93% e 95%. Por outro lado, os modelos de Barth, Iozia e Leith e Massarani apresentaram resultados muito próximos entre si, sobretudo para as condições de 6,42 e 9,64 m/s, entre 91% e 92%. Na condição de 3,21 m/s os resultados de Massarani se apresentaram em um patamar levemente superior, por volta de 91%.

No geral, o modelo de Leith e Licht apresentou a melhor adesão aos dados numéricos. Porém, mesmo considerando este modelo teórico que, por sua vez, já apresentou uma coleta superior comparada aos demais modelos, os resultados numéricos de fato se mostram superestimados, com fatores de coleta demasiadamente próximos de 100%. Este efeito está provavelmente ligado a hipótese de coleta do material na parede do ciclone que, aliada a elevada massa específica do material, gerou tal comportamento. Vale destacar que é comum que esta hipótese de coleta apresente tal tendência (BOGODAGE e LEUNG, 2015).

Contudo, a hipótese de coleta na parede foi utilizada para geração dos resultados, pois, considerando coleta apenas nas paredes da caixa coletora, por exemplo, o que seria tecnicamente mais natural, a quantidade de partículas consideradas incompletas pelo modelo ultrapassou a casa dos 70%. Por outro lado, utilizando a formulação implementada, o número

máximo de partículas incompletas previstas pelo modelo se estabelecia por volta de 230 partículas, das 7.440 injetadas, sendo por volta de 3% do total.

Tabela 28 - Comparativo dos resultados de eficiências de coleta globais obtidos pelas simulações numéricas e correlações presentes na literatura.

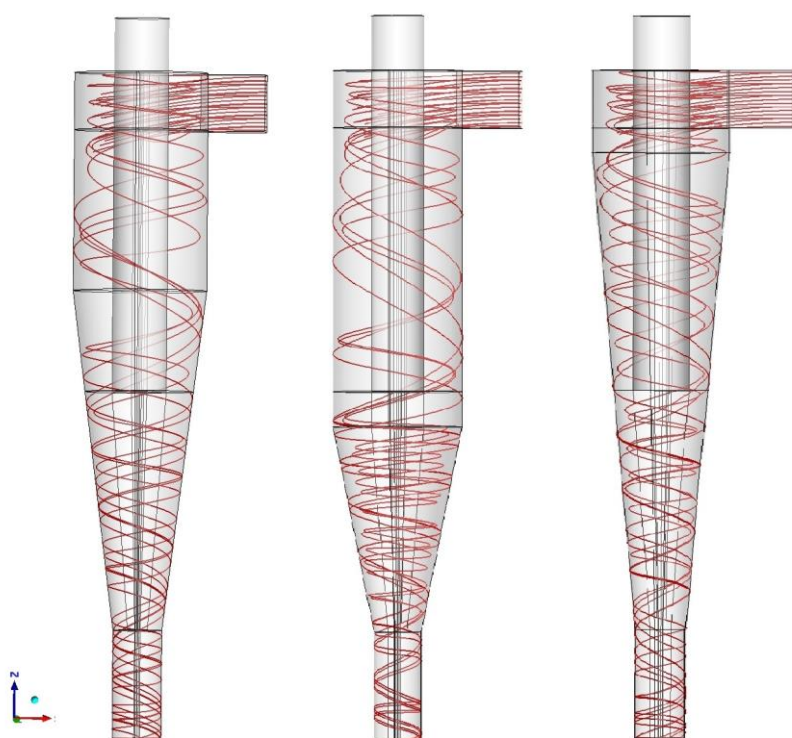
Ciclone	v_i [m/s]	\dot{M}_s [g/s]	η_{CFD} []	η_1 []	η_2 []	η_3 []	η_4 []
C ₁	3,21	0,11296	0,971774	0,889508	0,926215	0,896270	0,910310
		0,23206					
		0,34611					
	6,42	0,11296	0,978360	0,909893	0,947920	0,910350	0,918321
		0,23206					
		0,34611					
9,64	0,11296	0,983199	0,920342	0,953930	0,926938	0,921915	
	0,23206						
	0,34611						
C ₂	3,21	0,11296	0,979167	0,889701	0,936210	0,896270	0,910310
		0,23206					
		0,34611					
	6,42	0,11296	0,981452	0,910301	0,948030	0,910350	0,918321
		0,23206					
		0,34611					
9,64	0,11296	0,983871	0,920538	0,955436	0,926938	0,921915	
	0,23206						
	0,34611						
C ₃	3,21	0,11296	0,968682	0,889000	0,926046	0,896270	0,910310
		0,23206					
		0,34611					
	6,42	0,11296	0,975269	0,909452	0,947830	0,910350	0,918321
		0,23206					
		0,34611					
9,64	0,11296	0,982796	0,920012	0,951364	0,926938	0,921915	
	0,23206						
	0,34611						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale destacar que a relação entre o número máximo de passos de integração, tamanho do passo de integração e tamanho da malha foi respeitada. E, além disso, na tentativa de melhor adaptar os resultados, chegou a ser utilizado um valor de 10.000.000 de passos, mantendo-se

constante os demais parâmetros e, mesmo assim, não foram observadas melhorias significativas na quantidade de partículas incompletas, além de tomar um tempo extensivamente superior para a convergência do cálculo DPM. Desta maneira, a consideração de coleta na parede se mostrou necessária. É possível que tal fenômeno esteja relacionado a alguma zona de recirculação presente nos equipamentos. Além disso, cabe chamar atenção que em poucas simulações partículas ‘escapadas’ foram encontradas, mantendo-se no geral estagnadas no ciclone como incompletas, quando não coletadas na parede. O comportamento predominante das partículas ao decorrer das simulações pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 - Percurso das partículas no interior dos separadores ciclônicos, na condição operacional de 9,64 m/s.

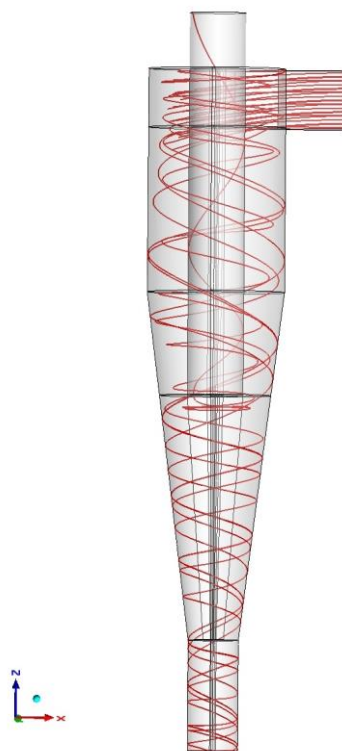


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar da Figura 37 que de fato as partículas seguiram o fluxo rotativo descendente do gás no interior dos equipamentos, chegando, em sua maioria, até às paredes dos ciclones e da caixa coletora. Além disso, é possível perceber certas regiões de recirculação de material, predominantemente próximas ao topo do ciclone, podendo indicar que os gradientes de velocidade e pressão não se encontram totalmente definidos nesta seção. Além disso, um fato curioso, é que as partículas no geral não demonstram o comportamento ascendente motivado pelo vórtex gasoso induzido, ainda que o mesmo tenha se formado, como indicado na Figura 36. Neste sentido, a ausência de partículas consideradas ‘escapadas’ pelo modelo

provavelmente se relacionada a esse fato, sendo raramente encontradas nas respostas, apenas em certas condições de operação, conforme exemplificado na Figura 38.

Figura 38 - Percurso das partículas no interior do ciclone C₁, indicando o comportamento das partículas consideradas escapadas do mecanismo de separação na condição de 3,21 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto na Figura 38, partículas que tocaram no contorno de escape (*outlet*) do ciclone C₁ na condição operacional de 3,21 m/s foram oriundas de uma zona de recirculação estabelecida próxima do centro geométrico do equipamento. Contudo, não foi possível observar o comportamento ascendente das partículas não coletadas desde a base do ciclone. Tal comportamento deve ser melhor investigado em trabalhos futuros.

De qualquer forma, retornando aos resultados numéricos da Tabela 28, foi possível obter o comportamento reportado por Gimbum *et al.* (2004) no que tange a relação diretamente proporcional entre a velocidade de alimentação do ar e a eficiência de coleta do material sólido. Em outras palavras, o aumento da velocidade de alimentação empreendeu maiores eficiência de coleta, ainda que a variação tenha se apresentando em uma escala muito pequena, porém consistente, em todas as três condições operacionais avaliadas. Tomando como exemplo a condição de 3,21 m/s, 7.230, 7.285 e 7.207 partículas foram consideradas coletadas para os ciclones C₁, C₂ e C₃, respectivamente e, o restante, praticamente todas incompletas. Na

condição de máxima velocidade, os valores de partículas coletadas se estabeleceram mais próximos entre si, entre 7.315, 7.320 e 7.312.

Por outro lado, não foi possível verificar a influência da vazão mássica de alimentação de sólidos no fator de eficiência numérica, em virtude tanto da alta diluição da fase sólida como também pela proximidade dos fatores de eficiência nas condições estudadas. E, levando-se em consideração que mesmo o efeito da velocidade de entrada foi pouco pronunciado, é possível inferir que a formulação estacionária talvez não seja a mais recomendada para representação do movimento das partículas no interior dos equipamentos, sendo mais adequada para uma estimativa inicial. Neste sentido, sugere-se que trabalhos futuros realizem a simulação transiente dos equipamentos estudados.

Além disso, foi possível constatar em grande parte a influência do fator geométrico $[h_{cc}/D_c]$ sobre o fator de coleta dos ciclones avaliados. Para todas as condições experimentais, os fatores de eficiência global foram superiores empregando o ciclone C₂, o que está, em certo grau, em consonância com a literatura, pois, mesmo este equipamento possuindo uma altura cônica menor do que os outros, o que não é positivo para a separação (BRAR *et al.*, 2015) devido à diminuição da intensidade do campo centrífugo, este é o único ciclone em que a penetração do bocal de exaustão não chegou à seção cônica do equipamento e, conforme dito por Gao *et al.* (2012), quando isto ocorre, o processo de separação é enfraquecido, afetando os ciclones C₁ e C₃.

A mesma tendência também foi verificada utilizando os modelos de Barth e Leith e Licht, ainda que em pequena escala, justamente por levarem em conta tanto a altura do corpo cilíndrico quanto o comprimento de penetração do bocal em sua formulação. Por fim, em linhas gerais foram obtidas separações numéricas entre 97,92% e 98,39% para o ciclone C₂, em contraponto aos valores ao redor de 90 e 92% preditos por três dos modelos teóricos. Comparativos similares foram obtidos para os ciclones C₁ e C₃.

Sequencialmente, apresenta-se a Tabela 29, na qual estão presentes os resultados médios experimentais para a eficiência de coleta, em contraponto às respostas obtidas numericamente e ao modelo empírico de Leith e Licht, através do qual observou-se maior concordância com os resultados obtidos via CFD. Neste sentido, é possível observar de fato uma boa adesão entre os resultados numéricos e obtidos através da correlação empírica, com desvios máximos inferiores a 5%.

Tabela 29 - Comparativo dos resultados de eficiência de coleta obtidos numericamente frente ao modelo de Leith e Licht e valores experimentais.

Ciclone	v_i [m/s]	\dot{M}_s [g/s]	η_{CFD} []	η_{Exp} []	η_2 []	δ_{Exp}^{CFD} [%]	δ_{Exp}^2 [%]	δ_2^{CFD} [%]
C ₁		0,11296		0,688272		41,19	34,57	
	3,21	0,23206	0,971774	0,685540	0,926215	41,75	35,11	4,92
		0,34611		0,680781		42,74	36,05	
		0,11296		0,814459		20,12	16,39	
	6,42	0,23206	0,978360	0,807989	0,947920	21,09	17,32	3,21
		0,34611		0,802908		21,85	18,06	
C ₂		0,11296		0,831957		18,18	14,66	
	9,64	0,23206	0,983199	0,834387	0,953930	17,83	14,33	3,07
		0,34611		0,831421		18,26	14,73	
		0,11296		0,687635		42,40	36,15	
	3,21	0,23206	0,979167	0,697933	0,936210	40,30	34,14	4,59
		0,34611		0,677136		44,60	38,26	
C ₃		0,11296		0,764563		28,37	24,00	
	6,42	0,23206	0,981452	0,802656	0,948030	22,28	18,11	3,53
		0,34611		0,780258		25,79	21,50	
		0,11296		0,782193		25,78	22,15	
	9,64	0,23206	0,983871	0,818360	0,955436	20,22	16,75	2,98
		0,34611		0,818638		20,18	16,71	
C ₃		0,11296		0,685289		41,35	35,13	
	3,21	0,23206	0,968682	0,689308	0,926046	40,53	34,34	4,60
		0,34611		0,678371		42,80	36,51	
		0,11296		0,781811		24,74	21,24	
	6,42	0,23206	0,975269	0,774067	0,947830	25,99	22,45	2,89
		0,34611		0,776908		25,53	22,00	
C ₃		0,11296		0,785381		25,14	21,13	
	9,64	0,23206	0,982796	0,783258	0,951364	25,48	21,46	3,30
		0,34611		0,803869		22,26	18,35	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, inserindo os resultados experimentais na comparação das eficiências de coleta globais, observam-se desvios acentuados, principalmente na condição de mínima velocidade de alimentação, com erros por volta de 34% a 44% quando comparados aos

resultados obtidos via simulação e o modelo da literatura. Para as demais condições de velocidade, os desvios diminuíram consideravelmente, fazendo com que os menores erros fossem encontrados na condição de máxima velocidade, por volta de 14 a 26%.

Os desvios encontrados nos fatores globais de coleta experimentais podem estar relacionados, conforme já comentado, à metodologia utilizada para aferição da velocidade de entrada. É provável que as velocidades de entrada verdadeiras estivessem menores do que as consideradas para efeito dos cálculos, contribuindo para o agravamento dos desvios.

Além disso, dada a pequena dimensão da caixa coletora (15 cm x 20 cm) e o fato do material não estar sendo continuamente retirado conforme a operação, existe a possibilidade de reentrada do material no volume do ciclone, podendo diminuir a eficiência dos ensaios. Efeitos de perda de material relacionada à sucção do material do disco alimentador, na operação de retirada da caixa coletora para medição da massa coletada e adesão às paredes da unidade também podem ter contribuído para a divergência dos resultados.

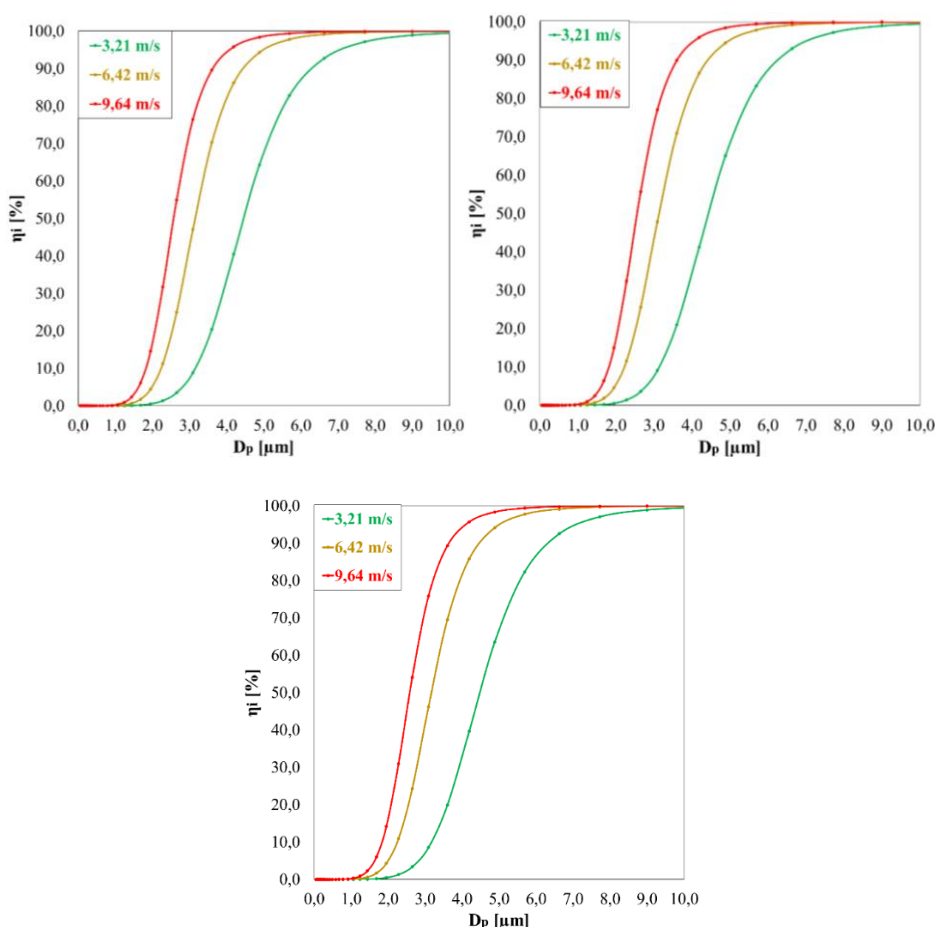
5.4. Análise das Curvas de Eficiência

Nesta seção serão apresentadas e discutidas as curvas de eficiência obtidas por três modelos empíricos propostos no escopo deste trabalho, Barth (1956), Leith e Licht (1972) e Iozia e Leith (1990), tecendo comparações com os demais resultados de coleta do material sólido destacados nas seções anteriores.

Inicialmente, é apresentada a Figura 39, na qual são evidenciadas as curvas de eficiência geradas através da modelagem proposta por Barth, para os três ciclones estudados. Destaca-se que os resultados são mostrados na faixa de diâmetros compreendida até 10 μm , de modo a facilitar a observação do comportamento da eficiência frente às variáveis estudadas.

Observa-se da Figura 39 que o aumento da velocidade de alimentação do ar favoreceu o processo de separação, averiguado pelo deslocamento da curva de eficiência para a esquerda, indicando que para um mesmo tamanho de partícula a curva de 9,64 m/s apresenta maior eficiência de coleta, seguida pela de 6,42 e 3,21 m/s. Neste sentido, vê-se também uma diminuição do diâmetro de corte da distribuição conforme o aumento da velocidade, indicando mais uma vez um melhor desempenho do ciclone. Para a condição de 9,64, 6,42 e 3,21 m/s, observam-se diâmetros de corte por volta de 2,5, 3,2 e 4,5 μm , respectivamente.

Figura 39 - Curvas de eficiência geradas pelo modelo de *Barth* para os três ciclones nas três condições operacionais de velocidade estudadas, no intervalo entre 0 e 10 μm



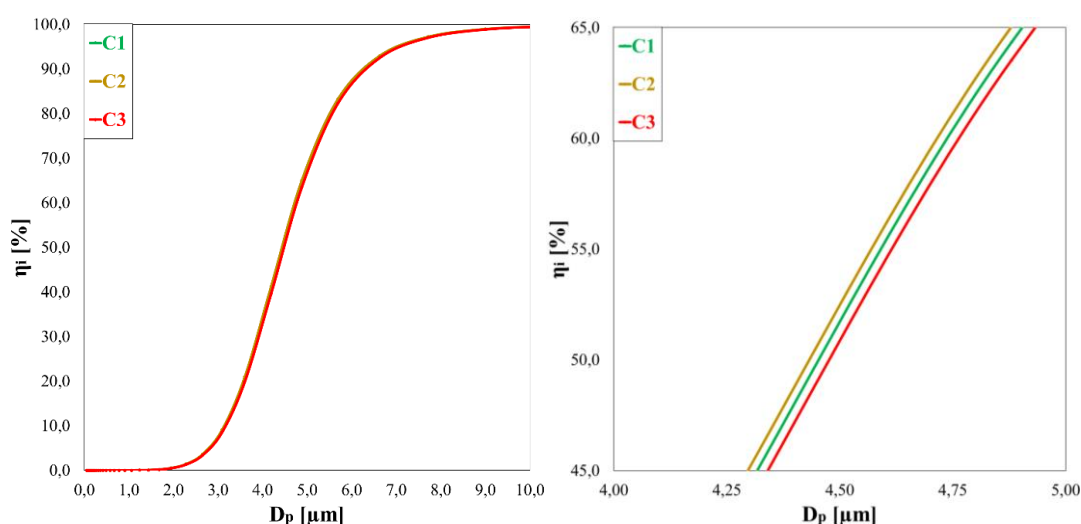
Fonte: Elaborado pelo autor.

A baixa magnitude dos diâmetros de corte apresentados justifica também os altos valores de eficiência global de coleta apresentados na seção anterior, indicando uma ótima coleta do minério de ferro através da utilização dos ciclones, muito motivada pela elevada massa específica do material. Além disso, a proximidade entre os D_{50} permite entender a proximidade entre os resultados de eficiência global de coleta nas três condições de velocidade de alimentação do ar, apresentadas na Tabela 28.

Na Figura 40, por sua vez, são apresentados simultaneamente as curvas de eficiência propostas por Barth para os três ciclones, na condição de mínima velocidade de alimentação do ar. Inicialmente, cabe destacar a proximidade entre as curvas de eficiência, contribuindo para o argumento já comentado que a elevada massa específica do material sólido suprimiu em muito a diferenciação do desempenho de coleta entre os ciclones, dificultando a avaliação da influência da razão geométrica $[h_{cc}/D_c]$ no fator de coleta do minério de ferro.

Todavia, realizando uma ampliação na escala do gráfico, observa-se que de fato houve diferenças no desempenho dos ciclones, sendo que foi obtida uma melhor separação para o ciclone C₂, seguido por C₁ e C₃. Levando-se em consideração apenas a altura do corpo cônico dos ciclones, esperava-se um comportamento contrário para a eficiência de coleta (BRAR *et al.*, 2015). Contudo, levando-se em consideração o efeito comentado por Gao *et al.* (2012), o comportamento está de acordo com o esperado, pois, uma vez que o bocal de exaustão encontra a seção cônica do separador, a eficiência tende a diminuir, afetando principalmente o desempenho de C₃, seguido por C₁.

Figura 40 - Comparativo das curvas de eficiência de *Barth* para os três ciclones na condição operacional de 3,21 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

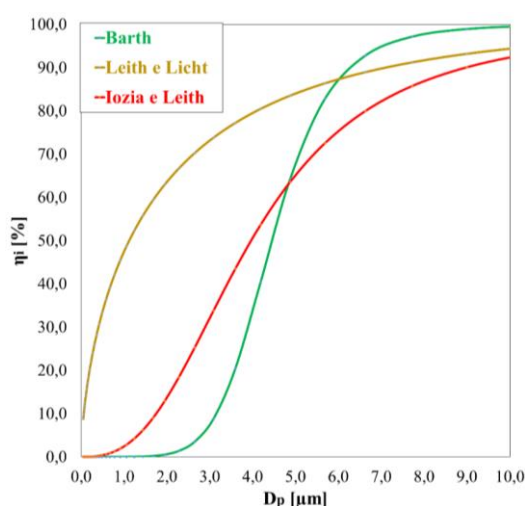
Vale ressaltar novamente a proximidade dos resultados de eficiência de coleta entre os três ciclones, comportamento encontrado no âmbito computacional, experimental e através dos modelos da literatura, ressaltado aqui pela Figura 40. De fato, a elevada massa específica do material sólido provavelmente minimizou em grande parte o efeito da variação geométrica entre os ciclones (h_{cc}).

Já na Figura 41 são mostradas as curvas de eficiência obtidas para os três modelos empíricos avaliados, para a condição de alimentação de mínima velocidade gasosa no ciclone C₁. É possível perceber claramente uma superestimação da coleta geral do material sólido através da aproximação de Leith e Licht, observando um diâmetro de corte substancialmente inferior quando comparados aos obtidos através dos dois outros modelos. Contudo, vê-se também que esta superestimação é principalmente compreendida para dimensões até por volta de 5 μm , sendo que para diâmetros superiores os fatores de coleta são consideravelmente

inferiores aos propostos por Barth, fazendo com que as eficiências globais se apresentassem relativamente próximas entre si.

No que tange aos modelos de Barth e Iozia e Leith, observa-se uma boa aproximação na representação das curvas de eficiência, sendo que para o segundo foram obtidos diâmetros de aproximadamente $3,96 \mu\text{m}$ para os três ciclones na condição de mínima alimentação do ar, valor bastante próximo dos já apresentados do modelo de Barth para esta mesma condição operacional. Além disso, cabe destacar que segundo a modelagem proposta por Iozia e Leith os diâmetros de corte dos três ciclones foram iguais devido ao fato do modelo citado não levar em consideração a altura do corpo cilíndrico do ciclone sobre o desempenho de separação, para ciclones cujo diâmetro do eixo central (d_c) é inferior ao diâmetro do bocal do *underflow* (B), conforme pode ser visto no equacionamento presente no APÊNDICE B.

Figura 41 - Curvas de eficiência de Barth, Leith e Licht e Iozia e Leith, geradas para o ciclone C_1 na condição operacional de $3,21 \text{ m/s}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

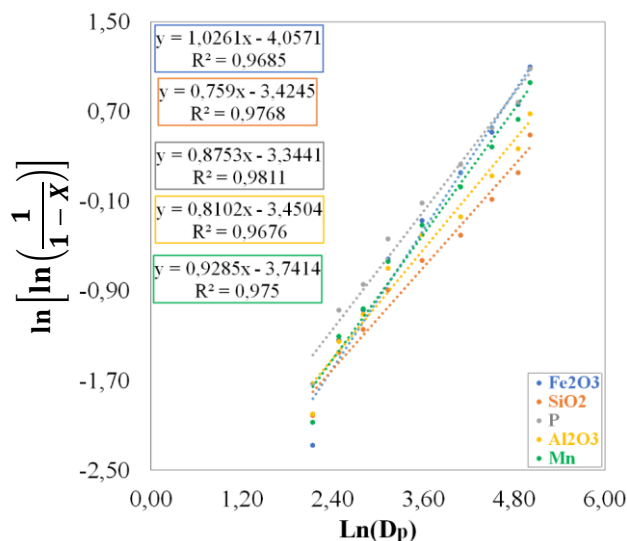
Além do mais, comparando-se ainda os modelos de Barth e Iozia e Leith é possível perceber que para dimensões de partícula inferiores a $5 \mu\text{m}$, o segundo modelo superestima levemente os fatores de separação. Por outro lado, para diâmetros superiores, o modelo de Barth leva consigo uma pequena supervalorização da coleta. Estes dois comportamentos antagônicos, contudo, ainda próximos entre si, garantem uma melhor congruência entre os resultados de eficiência global de coleta frente a estes dois modelos.

5.5. Avaliação Numérica da Classificação Mineral

Para avaliar o efeito classificatório dos ciclones, inicialmente foram obtidas as distribuições granulométricas dos cinco componentes relevantes do material apresentado na

Tabela 15. Os ajustes dos dados de distribuição granulométrica dos componentes, frente ao modelo RRB linearizado pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 - Ajustes lineares dos dados granulométricos dos componentes da amostra de minério de ferro através do modelo RRB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

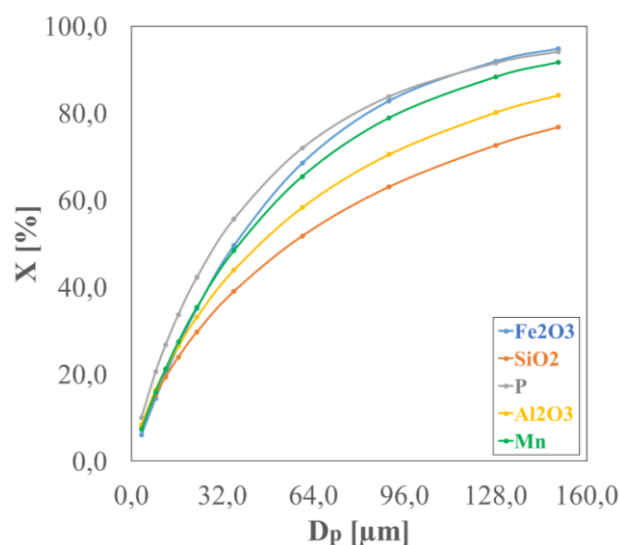
Pode-se observar na Figura 42 uma ótima adesão dos dados de distribuição granulométrica dos cinco componentes envolvidos, através do modelo RRB, destacado pelos elevados valores do coeficiente de correlação (R^2), todos superiores a 0,96. Além disso, através das constantes das equações lineares ajustadas pelo *Excel*, foi possível determinar para cada material os valores de n e D' , que são apresentados sequencialmente na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores dos parâmetros do modelo RRB para as distribuições dos cinco componentes avaliados.

Componente	Parâmetros do modelo RRB	
	n []	D' [μm]
Fe ₂ O ₃	1,0261	52,14
SiO ₂	0,7590	91,09
P	0,8753	45,63
Al ₂ O ₃	0,8102	70,72
Mn	0,9285	56,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os parâmetros em mãos, os ajustes propostos pelo modelo *RRB* puderam ser plotados, conforme apresentado na Figura 43. Vale ressaltar que foi feito um ajuste para cada componente, ou seja, o foco agora não é na amostra do minério de ferro como um todo, mas em cada componente individualmente.

Figura 43 - Distribuições granulométricas dos componentes avaliados através do ajuste RRB.

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando os dados observados na Tabela 30 e as condições de velocidade operacional extremas (3,21 m/s e 9,64 m/s), avaliadas no escopo deste trabalho, foram feitas injeções individuais dos componentes frente aos separadores ciclônicos computacionais, buscando averiguar como se comporta a coleta de cada um.

Vale destacar que todas as simulações foram realizadas considerando a condição de alimentação total de 0,34611 g/s, pois não foi obtida influência da vazão mássica de sólidos nos resultados de eficiência, bem como nos próprios resultados experimentais oriundos do FRX, ao menos de uma forma consistente. Os resultados de eficiência de coleta individual dos componentes na condição de mínima velocidade podem ser observados na Tabela 31.

Conforme destacado por Gimbum *et al.* (2004), espera-se maiores fatores de eficiência conforme o aumento da massa específica do material sólido a ser separado. Tal efeito foi, ainda que em pequena escala, levemente verificado na condição de mínima velocidade. Para todos os três ciclones, a menor coleta se deu para o componente fósforo, seguido pela sílica, os componentes de menor massa específica considerados. Apenas através do ciclone C₁ em que não foi possível distinguir a coleta da sílica com relação à componentes mais pesados.

Além disso, houve pouca diferença entre as coletas dos componentes entre os três ciclones, sendo que o ciclone C₂ apresentou uma coleta levemente superior para todos os componentes, com exceção da sílica, a qual teve sua coleta igual à C₁. Além disso, não houve diferenciação de coleta entre os ciclones C₁ e C₃ para a hematita, alumina e manganês. Apenas

para os componentes mais leves em que foi possível vislumbrar uma diferenciação de coleta entre estes dois ciclones.

Tabela 31 - Resultados numéricos de eficiência dos componentes do minério de ferro na condição de 3,21 m/s.

Componente	Fe_2O_3	SiO_2	P	Al_2O_3	Mn	Total
Ciclone		C₁				
$N_{P,injected}$	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
$N_{P,trapped}$	1080	1080	1057	1080	1080	5.377
$N_{P,Escaped}$	11	0	0	0	0	11
$N_{P,incomplete}$	109	120	143	120	120	612
Ciclone		C₂				
$N_{P,injected}$	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
$N_{P,trapped}$	1082	1080	1058	1082	1082	5.384
$N_{P,Escaped}$	9	0	0	0	0	9
$N_{P,incomplete}$	109	120	142	118	118	607
Ciclone		C₃				
$N_{P,injected}$	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
$N_{P,trapped}$	1080	1078	1054	1080	1080	5.372
$N_{P,Escaped}$	11	0	0	0	0	11
$N_{P,incomplete}$	109	122	146	120	120	617

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando como exemplo o ciclone C_1 , considerando o número de partículas coletadas de Fe_2O_3 pelo número total de partículas coletadas que, por sua vez, formariam o material do *underflow* do ciclone, percebe-se um aumento de concentração de 20% para 20,08%, tratando-se de uma concentração relativa na casa de 0,42%. Levando-se em consideração os resultados experimentais do FRX, através dos quais verificou-se uma concentração deste componente na ordem de 1,53%, pode-se dizer que ao menos o comportamento previsto pelo modelo está em consonância com o experimental, ainda que o nível de concentração não tenha sido o mesmo. Para os ciclones C_2 e C_3 o grau de concentração se deu em 0,48% e 0,52%, respectivamente.

No que tange a alumina, sílica e manganês, devido à proximidade dos fatores de coleta destes três componentes, o comportamento simulado diferiu bastante do experimental. Nos resultados do FRX, foi possível constatar uma tendência de desconcentração destes componentes com relação ao mineral original. Contudo, o modelo numérico gerou uma concentração dos componentes comentados na corrente do *underflow*. Assim sendo, é provável que a coleta destes componentes tenha sido superestimada pelo modelo.

Em relação ao fósforo, o comportamento qualitativo do modelo numérico se alinhou melhor com os dados experimentais, indicando também uma tendência de desconcentração do componente na corrente coletada, justamente relacionado ao fato de ser o componente mais leve da mistura. Contudo, assim como o ferro, os níveis de desconcentração se mostraram bastante divergentes, sendo que no viés experimental, verificou-se uma retirada relativa deste componente da ordem de 20%. Já no âmbito numérico, a desconcentração máxima deste componente se deu em 1,89%, para o ciclone C₃

Mesmo levando em consideração as diferenças de composição do minério de ferro avaliado experimentalmente com aquele utilizado como base para as simulações de classificação, é difícil compreender uma divergência tão expressiva de comportamento. Um fator a ser considerado é justamente a composição da injeção montada para avaliar a classificação numérica a qual apresentou o mesmo número de partículas para cada componente, mesmo tendo sido efetuada a correção da vazão mássica dos componentes mediante a composição de cada um na amostra considerada.

Na injeção do tipo *surface*, o número de partículas é de fato controlado pelo número de diâmetros considerados em cada amostra e o número de elementos na face de entrada (*Fluent 2022 R1, Help Guide, 2022*), e não pela vazão mássica, que afeta apenas os termos fontes de transferência de calor, momento e massa relacionados ao cálculo. Porém, não foi verificada uma maneira de controle arbitrário do número de partículas injetadas conforme feito por Pang *et al.* (2022), em que foi possível injetar um número proporcional de partículas para cada componente conforme a sua composição na amostra real.

Vale ressaltar que o mesmo tipo de injeção foi utilizado em ambos os casos, a categoria de superfície (*surface*). No caso de Pang, por outro lado, considerou-se um único diâmetro de partícula e foi empregado o *software Fluent* em sua versão completa, com licença de uso, não sendo limitado pela versão *Student* aqui utilizada. Mesmo considerando apenas um diâmetro de análise, não foi possível encontrar uma maneira de controle do número de partículas, o que pode indicar que a versão completa do *software* apresenta algum recurso a mais para esta contabilização.

Um dado bastante interessante aqui encontrado se relaciona com a eficiência global de coleta da amostra considerando as injeções dos componentes individuais. Conforme pode ser observado nos dados da Tabela 31, considerando o total de partículas coletadas pelo total de

partículas injetadas (6.000), obtêm-se uma coleta de 89,63%, 89,73% 89,53% para os ciclones C₁, C₂ e C₃, respectivamente.

Tais valores se aproximam muito dos valores de coleta global preditos pelos modelos teóricos (Barth, 1956; Iozia e Leith, 1991; Massarani, 2002), em um nível até mesmo mais próximo do que os resultados numéricos considerando a distribuição do minério de ferro como um todo. Ainda que não haja uma explicação aparente para este fato, vale a pena ser aqui ressaltado, o que talvez possa contribuir para uma forma mais contundente de simular a separação de uma mistura multicomponente no futuro.

Na Tabela 32, por sua vez, podem ser observados os resultados de coleta dos componentes individuais na condição de 9,64 m/s.

Tabela 32 - Resultados numéricos de eficiência dos componentes do minério de ferro na condição de 9,64 m/s.

Componente	<i>Fe₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>P</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Mn</i>	Total
Ciclone			C₁			
<i>N_{P,injected}</i>	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
<i>N_{P,trapped}</i>	1082	1080	1080	1080	1082	5.404
<i>N_{P,Escaped}</i>	10	0	12	0	0	22
<i>N_{P,incomplete}</i>	108	120	108	120	118	574
Ciclone			C₂			
<i>N_{P,injected}</i>	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
<i>N_{P,trapped}</i>	1082	1082	1082	1082	1082	5.410
<i>N_{P,Escaped}</i>	9	0	10	0	0	19
<i>N_{P,incomplete}</i>	109	118	108	118	118	571
Ciclone			C₃			
<i>N_{P,injected}</i>	1200	1200	1200	1200	1200	6.000
<i>N_{P,trapped}</i>	1080	1080	1078	1080	1082	5.400
<i>N_{P,Escaped}</i>	8	0	0	0	0	8
<i>N_{P,incomplete}</i>	112	120	122	120	118	592

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser constatado através da análise das Tabelas 31 e 32, o efeito da velocidade não foi sentido na coleta de todos os componentes, sendo principalmente notado nos componentes mais leves da matriz, em especial o fósforo. É possível que a quantidade amostral das partículas aqui implementadas para cada componente, consideravelmente inferior ao determinado nas injeções do minério de ferro total, tenha gerado uma dificuldade de observar o efeito da velocidade.

Além disso, devido ao fator de coleta do fósforo ter se estabelecido mais próximo dos demais componentes nesta nova condição operacional, sua desconcentração foi menos pronunciada, na ordem de 0,1% com relação a fração contida no material alimentado através dos ciclones C₁ e C₃. Para o ciclone C₂, não houve qualquer tipo de concentração do fósforo, se estabelecendo nos mesmo 20% da amostra inicial, pelo fato da coleta de todos os componentes ter sido igual nesta nova condição.

O nível de concentração do óxido de ferro também se deu em menor grau, entre por volta de 0,1% para o ciclone C₁, enquanto nos demais ciclones não foi observada qualquer mudança de composição. Para os componentes Al₂O₃ e SiO₂, no geral, também não houve nenhum efeito classificatório notável nesta nova condição, mantendo sua composição nos 20% do coletado. Apenas no caso do ciclone C₁ em que foi verificada uma leve desconcentração da sílica e alumina, na ordem de 0,07%.

O manganês, por sua vez, manteve sua tendência de concentração, conforme obtido na condição de mínima velocidade operacional. Contudo, sua concentração se deu em escala reduzida, devido ao aumento da coleta dos demais componentes, diminuindo de uma média próxima de 0,5% para 0,15%, sendo que em ambas as condições a maior concentração se deu para o ciclone C₃, provavelmente por apresentar menor coleta de partículas mais leves, como a sílica e o fósforo.

Além do mais, na condição de velocidade máxima, foi possível constatar o ciclone C₂ com a maior eficiência apenas para os componentes mais leves da matriz. Com relação aos demais componentes, pouca diferença foi encontrada entre os três ciclones, sendo que para muitos componentes a coleta foi considerada igual, especialmente entre C₁ e C₃. Por outro lado, observando a coleta global conforme feito anteriormente, a relação entre os ciclones ainda foi mantida, com fatores de separação de 0,901%, 0,902% e 0,900% para C₁, C₂ e C₃, respectivamente, ressaltando novamente a pequena influência da velocidade de alimentação nesta análise.

Ainda que não tenha sido uma tendência conclusiva, os resultados aqui apresentados indicam certa diferença de coleta entre os componentes do minério de ferro, sendo talvez possível uma simulação mais apropriada que consiga amparar a mudança de composição sentida nos resultados do FRX. Desta maneira, sugere-se aqui que mais estudos sejam realizados nesta vertente ainda muito pouco desvendada até os dias de hoje, explorando a capacidade classificatória de separadores ciclônicos.

6. CONCLUSÃO

O objetivo central deste trabalho era avaliar o desempenho de separadores ciclônicos na coleta e concentração do minério de ferro proveniente da operação de secagem convectiva em chute de transferência. Neste sentido, frente aos resultados apresentados pelos modelos empíricos e determinados numericamente via simulação fluidodinâmica, observou-se uma excelente tendência de recuperação do mineral carreado, na ordem de 90% para velocidade relativamente baixas.

Além disso, tomando como base os resultados experimentais, foi possível constatar uma tendência de concentração do conteúdo férrico no coletado dos ciclones frente ao material alimentado, principalmente relacionado à diferença entre as massas específicas e distribuições granulométricas dos principais componentes que permeiam a matriz sólida. Neste contexto, velocidades inferiores de alimentação são desejadas, por permitir maior escape de partículas mais leves, ricas em fósforo, alumina e sílica, por exemplo, gerando uma maior desconcentração destes componentes no material recuperado pelos ciclones. Contudo, é importante ressaltar que para velocidade de alimentação inferiores, menor será a recuperação total do minério. Assim sendo, é necessário que haja uma definição de prioridade na operação.

Em relação às influências dos parâmetros operacionais no desempenho dos ciclones, foi constatado através dos modelos da literatura, simulação numérica e pelas distribuições de frequência de partículas dos materiais coletados, que o incremento da velocidade de alimentação da suspensão possibilitou maiores fatores de eficiência gerais. Contudo, não foi possível averiguar uma tendência para influência da vazão de alimentação de sólidos na separação, principalmente devido a elevada diluição da fase sólida em meio a fase contínua.

Foi possível também verificar através dos resultados experimentais e dos modelos da literatura, apresentados no escopo deste trabalho, uma eficiência de coleta levemente superior para o ciclone C₂, principalmente relacionado a posição do bocal de exaustão no interior do ciclone. Porém, no que tange aos resultados experimentais, a máxima coleta se deu para C₁. Neste sentido, sugere-se a implementação de uma metodologia mais adequada para aferição da velocidade de entrada dos ciclones e repetição dos resultados aqui gerados, no sentido de atestar com maior confiabilidade o ciclone mais adequado para a separação global do minério de ferro.

Além disso, avaliando a concentração do conteúdo férrico, o ciclone C₁ apresentou um comportamento de destaque, gerando uma concentração da ordem de 1,5% do ferro original, reduzindo a concentração de outros componentes, principalmente sílica, alumina e fósforo,

materiais no geral não-desejados para o processo de redução do minério que ocorre nos alto-fornos, relacionado à produção do aço, contribuindo para a melhoria de qualidade do material alimentado na operação.

No que tange às simulações fluidodinâmicas, foi possível aferir que a formulação estacionária é bastante capaz para estudo do escoamento monofásico do ar, gerando bons resultados dos parâmetros dinâmicos do escoamento, como queda de pressão e velocidade tangencial máxima. Contudo, pelos resultados obtidos, percebe-se uma dificuldade de monitoramento e estudo de variáveis relacionadas à fase dispersa, sugerindo aqui que em trabalhos futuros a simulação transiente seja implementada.

Vale ainda destacar que a consideração de coleta na parede do equipamento acaba por gerar uma superestimação dos dados de coleta. E, em relação ao processo de classificação do material sólido, os resultados numéricos não se mostraram satisfatórios, com grande divergência com relação ao experimental. Neste sentido, sugere-se um estudo mais aprofundado da modelagem das partículas, buscando uma metodologia que possibilite um ajuste mais contundente da quantidade de partículas injetadas de cada componente. Ainda assim, foi possível vislumbrar uma tendência de concentração do mineral hematita e desconcentração do fósforo através dos ciclones, ainda que em magnitudes bastante divergentes ao viés experimental.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando melhor avaliar a influência dos parâmetros operacionais na coleta e classificação do minério de ferro através dos separadores ciclônicos, sugere-se a expansão do intervalo de vazão mássica de alimentação de sólidos possível na unidade experimental. Neste sentido, pode-se padronizar a alimentação do sólido através de frações do disco do alimentador, ao invés de utilizar o perímetro completo de rotação. Ou, alternativamente, pode ser acoplado um motor de maior potência no sistema de alimentação.

Ainda no viés experimental, recomenda-se a diminuição da profundidade do bocal de exaustão gasosa, especialmente no caso dos ciclones C_1 e C_3 , nos quais o bocal invadiu a seção cônica dos equipamentos, não sendo benéfico para a separação do material sólido, conforme relatado ao decorrer do trabalho. Porém, vale destacar que, uma vez reduzido o bocal, a eficiência de coleta tenderá a certo grau de aumento, o que poderá reduzir os efeitos classificatórios do material, devido a relação inversamente proporcional entre essas operações, conforme já destacado.

Além disso, seria interessante a implementação de uma caixa coletora de maiores dimensões ou, alternativamente, de um sistema de retirada contínua do material sólido coletado, buscando minimizar efeitos de recirculação de material para o interior do ciclone. E, por fim, a metodologia de aferição da velocidade de alimentação deve ser reavaliada, selecionando um equipamento de medição mais adequado. Neste sentido, sugere-se ainda a instalação de uma placa de orifício para uma medição mais adequada.

No que tange às simulações fluidodinâmicas, recomenda-se uma investigação mais profunda acerca do refinamento das malhas computacionais, em regiões específicas dos equipamentos, buscando minimizar a ocorrência de zonas de recirculação que porventura tenham ocorrido. Também é sugerida a realização das simulações transientes dos processos aqui avaliados, buscando melhor capturar o comportamento das partículas no interior dos ciclones.

Finalmente, é sugerido que trabalhos futuros concentrem esforços no estudo das diferentes metodologias de injeção do material sólido disponíveis no *Fluent*, buscando melhor adaptar a composição da mistura sólida multicomponente alimentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMAYER, S.; MATHIEU, V.; JULLEMIER, S.; CONTAL, P.; MIDOUX, N.; RODE, S.; LECLERC, J.-P. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. *Chemical Engineering and Processing*, 2004.

ANSYS, INC. *ANSYS FLUENT 2022R1 User's Guide*. [S.l.], 2022.

ANSYS, INC. *ANSYS MESHING 2022 R1. Help Guide*, 2022.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de transporte. 2ª. Ed. Editora LTC, 2004.

BRAR, L. S.; SHARMA, R. P.; ELSAYED, K. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology*, Elsevier B.V., v. 286, p. 668–677, 2015. ISSN 1873-328X.

BRAR, L. S.; SHASTRI, R. Numerical investigations of the flow-field inside cyclone separators with different cylinder-to-cone ratios using large-eddy-simulations. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B.V., v. 249, 2020.

BRISOLA, D. F.; FERNANDES, T. L. A. P. Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X. XVI Jornada de Iniciação Científica (CETEM), 2008.

BOGODAGE, S. G.; LEUNG, A. Y. T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution. *Department of Architectural and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China*, 2015.

CARNEIRO, A. L. M. Caracterização de partículas sólidas. 1981. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARVALHO, P. S. L., et al. Minério de ferro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CASAL, J.; BENET, J. M. M. *Chemical Engineering*, v. 24, p. 99-100 (1983).

CASSOLA, M.S., CHAVES, A.P. Effect of the addition of organic binders on the behavior of iron ore pellets. *KONA Powder and particle* n° 16, 1998.

CHETIWAL, M.; JHAMNANI, B. A CFD Analysis of Cyclone Separator. *IJSR*, ISSN 2319-7064, 2016.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo, 1977, 4ª edição.

COCCO, R.; KARRI, S. B. R.; MORIN, M.; RAYNAL, L. Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations. *Powder Technology*, Elsevier B.V., v.377, p.174-185, 2021.

COELHO, E. M. Separação de minerais de rochas fosfáticas e de minério de ferro por flotação e por agregação seletiva. Tese (Concurso para professor titular do Departamento de Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1984.

COELHO, P. Ciclones industriais – Separadores ciclônicos, 2012. Disponível em <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/ciclones-industriais.html>> acessado em 25 de julho de 2022.

COURY, J. R.; JUNIOR, R. P.; HUNG, Y.-T. Cyclones. In: WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. (Ed.). *Air Pollution Control Engineering*. Second edition. New Jersey: Humana Press Inc., 2004. cap. 3, p. 97–151. ISBN 1-58829-161-8.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral, p. 63-65, 2010.

DUARTE, H. A. FERRO – UM ELEMENTO ESTRATÉGICO QUE PERMEIA HISTÓRIA, ECONOMIA E SOCIEDADE. *Química Nova*, Vol. 42, No 10, 1146-1153, 2019.

ELSAYED, K.; LACOR, C. The effect on cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. *Computers & Fluids*, v. 71, p. 224-239, 2012.

FAYED, M. E.; OTTEN, L. Handbook of Powder Science. 2ª Ed., 1997.

FERREIRA, R. F.; POLICARPO, D. L. V.; PADULA, V. P.; FERREIRA, M. T. S. LIMITE DE UMIDADE TRANSPORTÁVEL DE MINÉRIOS DE FERRO: ASPECTOS REGULATÓRIOS E TÉCNICOS. ABM, 2016.

GAO, C.; SUN, G.; YANG, J. Effect of the inlet dimensions on the maximum-efficiency cyclone height. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B. V., v. 105, p. 15-23, 2012.

GIAIOTTI, D. B.; STEL, F. The Rankine Vortex Model. Regional Meteorological Observatory, via Oberdan, 16/A I-33040 Visco (UD), ITALY, 2006.

GIMBUN, J., CHOONG, T.S.Y., FAKHRU’L-RAZI, A., CHUAH, T.G., 2012. Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency. *J. Teknol.*

HIRAIWA, Y.; OSHITARI, T.; FUKUI, K.; YAMAMOTO, T.; YOSHIDA, H. Effect of free air inflow method on fine particle classification of gas-cyclone. 2013.

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. [S.l.]: Springer, 2002. ISBN 3 540-43326-0.

IOZIA, D. L.; LEITH, D. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency. *Aerosol Science and Technology*, Taylor & Francis Online, v. 12, p. 596–606, 1990. ISSN 0278-6826.

ITV de Ouro Preto testa equipamento que reduz umidade do minério de ferro (2016). Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/about_vale/news/Paginas/itv-de-ouro-preto-testa-equipamento-que-reduz-umidade-do-minerio-de-ferro.aspx>. Acessado em 21 de julho de 2022. Referenciado como (ITV, 2016).

ISHIKAWA, Y. Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption. *Ironmaking Conference Proceedings*, AIME, v. 41, p. 80-89, 1982.

JESUS, C. A. G.; JOAQUIM, L. G. FERRO. ANM/MG, 2018.

LACERDA, A. F. ESTUDO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS NO DESEMPENHO DE CICLONES CONVENCIONAIS E FILTRANTES. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LAUNDER, B. E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 9, p. 963–985, 1989. ISSN 0271-2091.

LEITH, D.; JONES, D. L. Cyclones. In: FAYED, M. A.; OTTEN, L. *Handbook of Science and Technology*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1997, p. 727-752.

MALISKA, C. R. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL. FUNDAMENTOS E COORDENADAS GENERALIZADAS. Universidade Federal de Santa Catarina (1995).

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2002.

MEIER, H. F.; MORI, M. Anisotropic behavior of the reynolds stress in gas and gas-solid flow in cyclones. *Powder Technology*, v. 101, p. 108–119, 1999.

MORAIS, F. F.; OLIVEIRA, V.; SANTAMARIA, J. L. F. A INFLUÊNCIA DAS MATÉRIA-PRIMA NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO. ABM WEEK, Rio de Janeiro, Brasil, 2015. ISSN 2176-3135.

MOURÃO, José Murilo. NT Minério de Ferro e Pelotas. Situação Atual e Tendências 2025. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos. Estudo Prospectivo para Energia Fotovoltaica: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. Determination of the Transportable Moisture Limit of Iron Ore Fines for the Prevention of Liquefaction in Bulk Carriers. Mar. Struct. 2015, 40, 193–224.

MUSCHELKNAUTZ, E. Die Berechnung von Zyklonabscheidern für Gase: Chemie Ingenieur Technik, v. 44, p. 63-71, 1972.

OGAWA, A. *Separation of Particles from Air and Gases*. First edition. [S.l.]: CRC Press, 1984. ISBN 978-0849357886.

OLIVEIRA, R. A. F. ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM UM CICLONE ADAPTADO COM BICOS ASPERSORES DE ÁGUA UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD). Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2019.

PINTO, T. C. S.; JUNIOR, D. M.; LIA, L. R. B.; FILHO, L. S. L. MECANISMOS DE SECAGEM VISANDO A REDUÇÃO DE UMIDADE EM SINTER FEED DE MINÉRIO DE FERRO. ABM WEED, Rio de Janeiro, Brasil, 2015. ISSN 2176-3135.

RAMIREZ, M. V. SIMULAÇÃO DA PERDA DE CARGA E DA EFICIÊNCIA DE COLETA EM CICLONES ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD), Tese de mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo – Brasil, 2009.

SALOMÃO, E. P. Indicadores da indústria mineral brasileira. ABPM, Brasília, 2015.

SCARPA, J. D. A. Influência de Características Geométricas no desempenho de um ciclone. Tese de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo – Brasil, 2000.

SENGERS, J. V.; WATSON, J. T. R. Journal of Physical and Chemical Reference Data 15 (1986), p. 1291-1322.

SHEPHERD, C. B.; LAPPLE, C.E. Flow pattern and Pressure drop, *Ind. Eng. Chem.* 31 (1939) p. 972-984.

STAIRMAND, B. C. The design and performance of the cyclone separators, *Trans. Instn. Chem. Engrs* 29 (1951) p. 356-372.

TALLES, V. B.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A.S. Produção de sinter de minério de ferro utilizando poeira de aciaria elétrica como matéria prima. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 72-77, jan.-mar. 2013.

WASILEWSKI, M. Analysis of the effects of temperature and the share of solid and gas phases on the processo of separation in a cyclone suspension preheater. *Separation and Purification Technology*, Elsevier B.V., v. 168, p. 114-123, 2016.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. Second edition. [S.l.]: Birmingham Press, Inc., 1998. ISBN 1-928729-10-X.

YAKHOT, V.; ORSZAG, S. A.; THANGAM, S.; GATSKI, T. B.; SPEZIALE, C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids*, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, 1992. ISSN 0899-8213.

YOSHIDA, H.; SAEKI, T.; HASHIMOTO, K.; FUYUKI, T. Size classification of submicron powder by air cyclone and three-dimensional analysis. *J. Chem. Eng., Japan*, 24, 640–647 (1991).

ZHAO, B. Modelling pressure drop coefficient for cyclone separators: a support vector machine approach. *Chemical Engineering Science*, v. 64, p. 4131–4136, 2009.

ZHU, Y., LEE, K.W., 1999. Experimental study on small cyclones operating at high flowrates. *J. Aerosol Sci.* 30, 1303–1315.

APÊNDICE A – Modelos de Ajuste para Distribuição Granulométrica

Esta seção é destinada a apresentação dos modelos presentes na literatura para ajuste da distribuição granulométrica do material particulado sob a forma $X = X(D_i)$.

A.1. Ajuste de Rosin-Rammler-Bennet (RRB)

O ajuste *RRB* é um dos mais comumente empregados no estudo de sistemas particulados, se caracterizando por possuir dois parâmetros que devem ser ajustados de acordo com a população de tamanhos da amostra sólida, D' e n . É uma função que relaciona diretamente o diâmetro da partícula D_i com a fração em massa de partículas com diâmetros inferiores a D_i , de acordo com a Equação A.1.1. Cabe destacar que o parâmetro D' faz referência ao valor do diâmetro de $D_{63,2}$, ou seja, a medida de diâmetro na qual 63,2% da população de tamanhos da amostra está abaixo do valor de D' .

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D_i}{D'}\right)^n} \quad (\text{Eq. A.1.1})$$

A.2. Ajuste de Gates-Gaudin-Shumann (GGS)

O ajuste *GGS* tem o comportamento análogo ao *RRB*, também apresentando dois parâmetros que devem ser ajustados de acordo com a população de tamanhos da amostra sólida, k e m , de acordo com a Equação A.2.1.

$$X = \left(\frac{D_i}{k}\right)^m \quad (\text{Eq. A.2.1})$$

A.3. Ajuste Sigmóide

Da mesma forma que os anteriores, o ajuste *Sigmoide* apresenta dois parâmetros que devem ser ajustados, d e p , conforme a Equação A.3.1.

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D_i}\right)^p} \quad (\text{Eq. A.3.1})$$

APÊNDICE B – Modelos de Eficiência de Coleta para Ciclones

Esta seção será dedicada ao detalhamento dos modelos de eficiência de coleta e queda de pressão em ciclones presentes na literatura. Porém, cabe destacar que o equacionamento base para determinação da eficiência de coleta global é apresentado sob a forma $\eta = \eta(\eta_i, X)$ apresentada na Equação B.1, na qual η_i é a eficiência fracionária de coleta da partícula i dada pelos modelos de eficiência e, X , a fração acumulada de material, determinada experimentalmente e ajustada pelos modelos de distribuição granulométrica.

$$\eta = \int_0^1 \eta_i dX \quad (\text{Eq. B.1})$$

B.1. Modelo de Barth

O modelo de BARTH (1956) avalia a eficiência de coleta como uma função da relação entre as velocidades terminais da partícula hipotética D_i e da partícula de corte, cuja eficiência de coleta é de 50%. Sua utilização parte do seguinte equacionamento:

$$\eta_i = \frac{1}{\left[1 + \left(v_{ts}/v_{ts}^m\right)^{-3,2}\right]} \quad (\text{Eq. B.1.1})$$

na qual v_{ts} e v_{ts}^m são, respectivamente, as velocidades terminais das partículas i e da partícula de corte, cujo diâmetro é igual à D_{50} . A relação (v_{ts}/v_{ts}^m) pode ser mensurada para Equação B.1.2.

$$\frac{v_{ts}}{v_{ts}^m} = \frac{\pi h^m \rho_s v_{t,max}^2 D_i^2}{9\mu Q} \quad (\text{Eq. B.1.2})$$

em que h^m é a altura do eixo central do ciclones, $v_{t,max}$ a velocidade tangencial máxima no ciclone, D_i o diâmetro da partícula i , Q a vazão de alimentação, ρ_s a massa específica do material sólido e μ a viscosidade dinâmica do gás (ar). O comprimento h^m pode ser determinado através de um dos seguintes equacionamentos, a depender da relação entre o diâmetro do bocal de exaustão (D_e) e do bocal de coleta do sólido (B).

$$\text{Se } D_e \leq B \quad h^m = H_t - S \quad (\text{Eq. B.1.3})$$

$$\text{Se } D_e \geq B \quad h^m = \frac{(H_t - h_{cc})(D_c - D_e)}{(D_c - B)} + (h_{cc} - S) \quad (\text{Eq. B.1.4})$$

Já a velocidade tangencial máxima pode ser determinada pela Equação B.1.5, que depende do valor de h^m , cotas do ciclone, velocidade na seção de exaustão gasosa (v_s) e dos parâmetros α e λ . Sendo α um parâmetro adimensional que depende da relação geométrica (b/D_c) e λ relacionado ao fator de atrito, sugerido como 0,02 (COURY *et. al.*, 2004).

$$v_{t,\max} = v_s \left[\frac{(D_e/2)(D_c - b)\pi}{2ab\alpha + h^m(D_c - b)\pi\lambda} \right] \quad (\text{Eq. B.1.5})$$

$$v_s = \frac{4Q}{\pi D_e^2} \quad (\text{Eq. B.1.6})$$

$$\alpha = 1 - 1,2(b/D_c) \quad (\text{Eq. B.1.7})$$

B.2. Modelo de Leith e Licht

O modelo de LEITH e LICHT (1972) é baseado na hipótese de que as partículas não coletadas estão totalmente misturadas na direção radial em um dado ponto de posição axial, devido aos efeitos da turbulência da fase gasosa. Desta forma, o tempo de residência da partícula dentro do ciclone pode ser associado ao tempo necessário para que a partícula se mova na direção radial e axial até atingir a parede do equipamento. A metodologia é utilizada como apresentado em sequência abaixo.

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G\tau_i Q}{D_c^3} (n + 1) \right]^{\frac{1}{2n+2}} \right\} \quad (\text{Eq. B.2.1})$$

em que G é o parâmetro geométrico adimensional, n é o expoente do vórtex e τ_i o tempo de relaxação. O parâmetro G pode ser determinado conforme a Equação B.2.2, enquanto τ_i e n podem ser calculados a partir das Equações B.2.3 e B.2.4, respectivamente.

$$G = \frac{D_c}{a^2 b^2} \left\{ 2 \left[\pi \left(S - \frac{a}{2} \right) (D_c^2 - D_e^2) \right] + 4V_{nl,H} \right\} \quad (\text{Eq. B.2.2})$$

$$\tau_i = \frac{\rho_s D_i^2}{18\mu} \quad (\text{Eq. B.2.3})$$

$$n = 1 - (1 - 0,67D_c^{0,14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \quad (\text{Eq. B.2.4})$$

nas quais T é a temperatura de operação na escala Kelvin e $V_{nl,H}$ é o volume anular relacionado à penetração do bocal de exaustão gasosa no ciclone. A depender do valor do parâmetro Z_c (comprimento natural do vórtex), calculado segundo a Equação B.2.5, utiliza-se a expressão para V_{nl} ou V_H , conforme destacado abaixo.

$$Z_c = 2,3D_e \left(\frac{D_c^2}{ab} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. B.2.5})$$

$$\text{Se } (H_t - S) < Z_c \quad V_H = \frac{\pi D_c^2}{4} (h_{cc} - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{H_t - h_{cc}}{3} \right) \left(1 + \frac{B}{D_c} + \frac{B^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_e^2 (H_t - S)}{4} \quad (\text{Eq. B.2.6})$$

$$\text{Se } (H_t - S) > Z_c \quad V_{nl} = \frac{\pi D_c^2}{4} (h_{cc} - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{Z_c + S - h_{cc}}{3} \right) \left(1 + \frac{d_c}{D_c} + \frac{d_c^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_e^2 Z_c}{4} \quad (\text{Eq. B.2.7})$$

na qual d_c é o diâmetro do eixo central do ciclone, dado pela Equação B.2.8.

$$d_c = D_c - (D_c - B) \left(\frac{S + Z_c - h_{cc}}{H_t - h_{cc}} \right) \quad (\text{Eq. B.2.8})$$

B.3. Modelo de Iozia e Leith

O modelo de IOZIA e LEITH (1990) parte da metodologia de *Barth* (1956), propondo novas equações para estimar o diâmetro e o comprimento do eixo central do ciclone e a velocidade tangencial máxima, baseando-se em 26 experimentos em ciclones realizados em temperatura ambiente. A correlação para a eficiência de coleta individual é concebida através da partícula de diâmetro de *Stokes*, que é definido como o diâmetro da esfera que detém a mesma velocidade terminal da partícula em questão.

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D_i}\right)^\beta} \quad (\text{Eq. B.3.1})$$

na qual D_{50} é o diâmetro de corte da população de partículas, determinado através das condições geométricas e operacionais do ciclone, conforme indicado pela Equação B.3.2. E, o expoente β , é determinado através da correlação expressa na Equação B.3.3.

$$D_{50} = \left(\frac{9\mu Q}{\pi\rho_s Z_c v_{t,\max}^2}\right)^{0,5} \quad (\text{Eq. B.3.2})$$

$$\ln \Omega = 0,62 - 0,87 \cdot \ln D_{50} + 5,21 \cdot \ln \left(\frac{ab}{D_c^2}\right) + 1,05 \cdot \ln \left(\frac{ab}{D_c^2}\right)^2 \quad (\text{Eq. B.3.3})$$

em que Z_c e $v_{t,\max}$, respectivamente o comprimento do eixo central do ciclone e a velocidade tangencial máxima em seu interior, podem ser determinados pelas equações abaixo.

$$v_{t,\max} = 6,1 \cdot v_i \cdot \left(\frac{ab}{D_c^2}\right)^{0,61} \cdot \left(\frac{D_e}{D_c}\right)^{-0,74} \cdot \left(\frac{H_t}{D_c}\right)^{-0,33} \quad (\text{Eq. B.3.4})$$

$$\text{Se } d_c < B \quad Z_c = H_t - S \quad (\text{Eq. B.3.5})$$

$$\text{Se } d_c > B \quad Z_c = (H_t - S) - \left[\frac{(H_t - h_{cc})}{\left(\frac{D_c}{B}\right) - 1} \right] \cdot \left[\left(\frac{d_c}{B}\right) - 1 \right] \quad (\text{Eq. B.3.6})$$

em que v_i é a velocidade do gás na entrada do ciclone e d_c o diâmetro do eixo central, calculado através da Equação B.3.7.

$$\frac{d_c}{D_c} = 0,47 \cdot \left(\frac{ab}{D_c^2}\right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{D_e}{D_c}\right)^{1,4} \quad (\text{Eq. B.3.7})$$

B.4. Modelo de Massarani

A metodologia apresentada por MASSARANI (2002) parte da correlação empírica para determinação da eficiência individual de coleta, expressa na Equação B.4.1, específica para ciclones da família *Lapple* e *Stairmand*.

$$\eta_i = \frac{\left(D_i/D_{50}\right)^2}{1 + \left(D_i/D_{50}\right)^2} \quad (\text{Eq. B.4.1})$$

Tomando como base o caso bastante comum em que a distribuição granulométrica do material sólido pode ser representada pelo modelo de Rosin-Rammler-Bennet (*RRB*), a integração da Equação B.4.1 assume o formato final a seguir.

$$\eta = \frac{\frac{1,11n}{0,118 + n}}{1,81 - 0,322n + \left(\frac{D'}{D_{50}}\right)} \left(\frac{D'}{D_{50}}\right) \quad (\text{Eq. B.4.2})$$

na qual D' e n são os parâmetros do ajuste *RRB*. E, o diâmetro de corte, pode ser determinado pela Equação B.4.3.

$$\frac{D_{50}}{D_c} = k \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. B.4.3})$$

na qual o parâmetro k assume o valor de 0,041 para ciclones da família *Stairmand*.

APÊNDICE C – Modelos de Turbulência

Nesta seção serão detalhadas as formulações matemáticas de alguns modelos de turbulência comentados no Capítulo 4, que podem ser utilizados no âmbito da simulação fluidodinâmica para modelagem do escoamento da fase gasosa no interior dos ciclones.

C.1. Modelo RNG k - ε

O termo de produção de tensão utilizado no modelo RNG k - ε é dado pela Equação C.1.1.

$$P_k = -\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (\text{Eq. C.1.1})$$

Desprezando-se as flutuações, as equações de transporte para k e ε são expressas, respectivamente, pelas Equações C.1.2 e C.1.3. Cabe destacar que, devido à formulação estacionária utilizada nas simulações, os termos de variação temporal (primeiros termos das equações) são negligenciados.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (\text{Eq. C.1.2})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Eq. C.1.3})$$

na qual

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (\text{Eq. C.1.4})$$

$$\eta = \frac{S k}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. C.1.5})$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}} \quad (\text{Eq. C.1.6})$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Eq. C.1.7})$$

sendo μ_t a viscosidade turbulenta. Os coeficientes de fechamento $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e C_μ possuem os valores 1,44, 1,92 e 0,09, respectivamente. Já o valor do número de *Prandtl* turbulento para k e ε são $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$ (WILCOX, 1998).

C.2. Modelo das Tensões de Reynolds (RSM – *Reynolds Stress Model*)

A equação exata de transporte do modelo *RSM* é apresentada na Equação C.2.1.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \overline{v'_i v'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \cdot v_k \cdot \overline{v'_i v'_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq. C.2.1})$$

na qual o primeiro termo representa a derivada temporal local da tensão, enquanto o segundo termo descreve o transporte convectivo devido ao tensor de *Reynolds* e D_{ij} , P_{ij} , Π_{ij} e ε_{ij} representam o mecanismo difusivo, a produção de tensão, o termo de pressão e a dissipação viscosa, respectivamente. Os termos do lado direito da equação são determinados conforme a seguir.

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \cdot \overline{v'_i v'_j v'_k} + (\overline{\rho' v'_j}) \cdot \delta_{ij} + (\overline{\rho' v'_i}) \cdot \delta_{jk} - \mu \cdot \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{v'_i v'_j}) \right] \quad (\text{Eq. C.2.2})$$

$$P_{ij} = -\rho \cdot \left[(\overline{v'_i v'_j}) \frac{\partial v_j}{\partial x_k} + (\overline{u'_j u'_k}) \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right] \quad (\text{Eq. C.2.3})$$

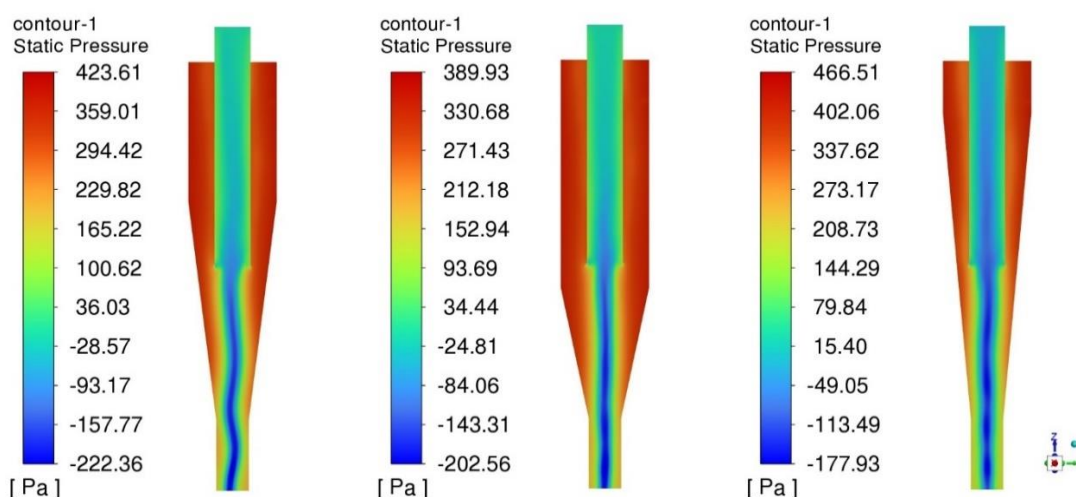
$$\Pi_{ij} = p \cdot \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Eq. C.2.4})$$

$$\varepsilon_{ij} = -2 \cdot \mu \cdot \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial v'_j}{\partial x_k} \right) \quad (\text{Eq. C.2.5})$$

APÊNDICE D – Contornos de Pressão e Velocidade Tangencial

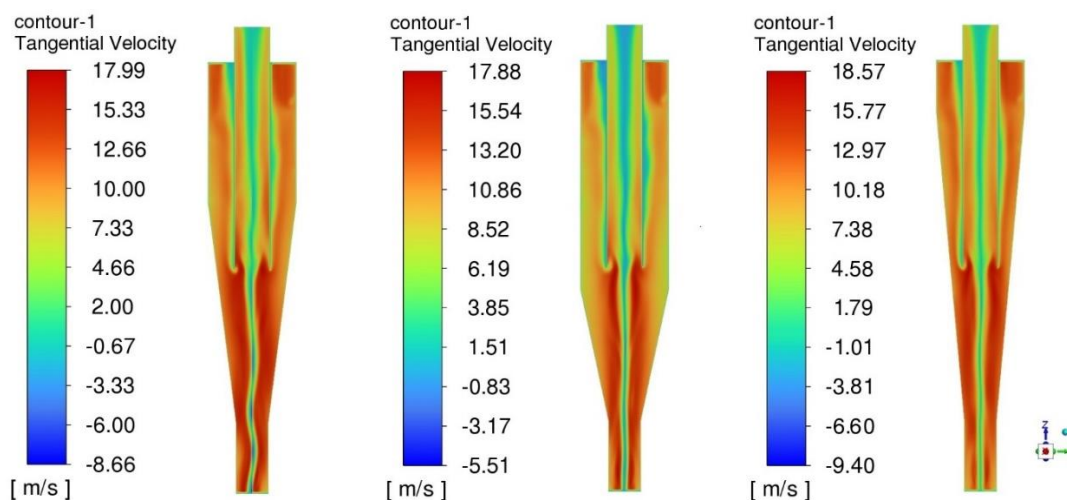
Nesta seção final da dissertação são mostrados os contornos de pressão e velocidade tangencial obtidos para os três ciclones através da simulação CFD, gerados através das malhas de número 5 para os três equipamentos. Nos contornos de pressão estática fica evidente o forte gradiente de pressão radial, com pressões superiores nas regiões próximas à parede, destacando ainda a zona de pressão negativa, que representa a região em há o vórtice gasoso ascendente induzido. No que tange aos contornos de velocidade tangencial, podem ser observados valores próximos de zero na posição central dos equipamentos, aumentando seu valor em direção oposta ao centro e, por fim, diminuindo nas posições rentes à parede.

Figura 44 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 9,64 m/s.



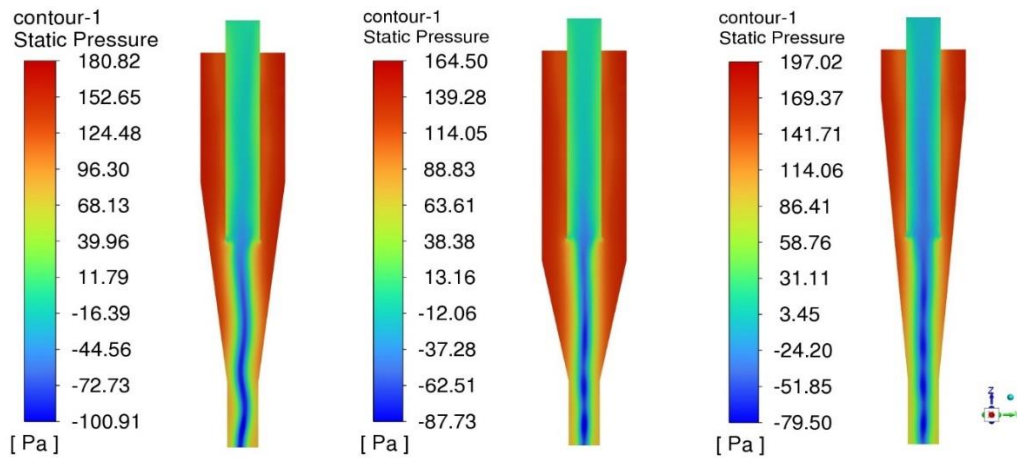
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 9,64 m/s.



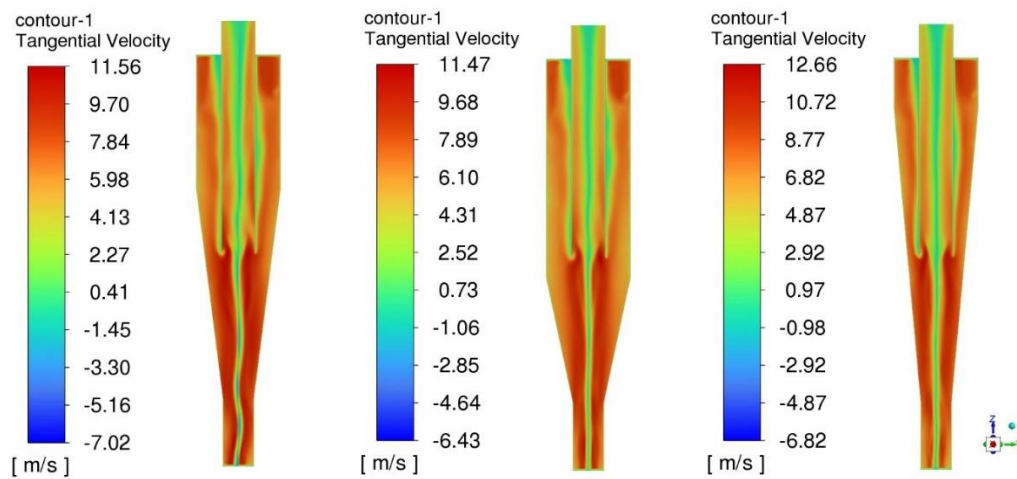
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 6,42 m/s.



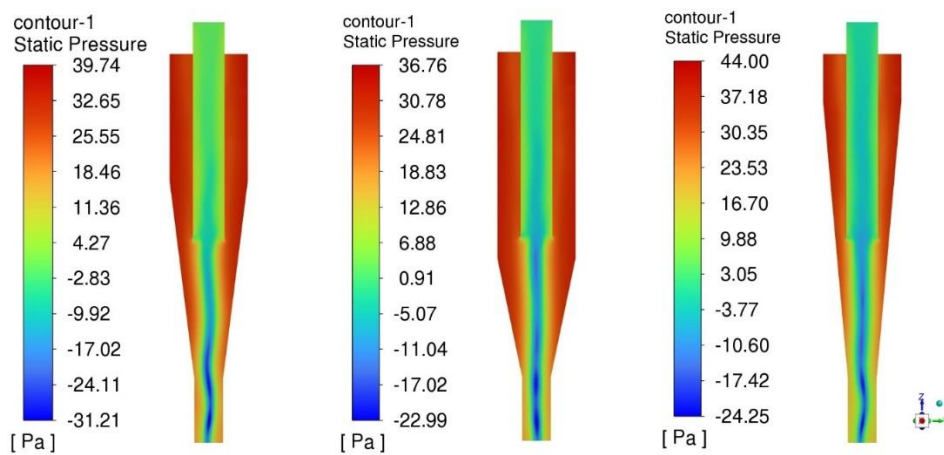
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 6,42 m/s.



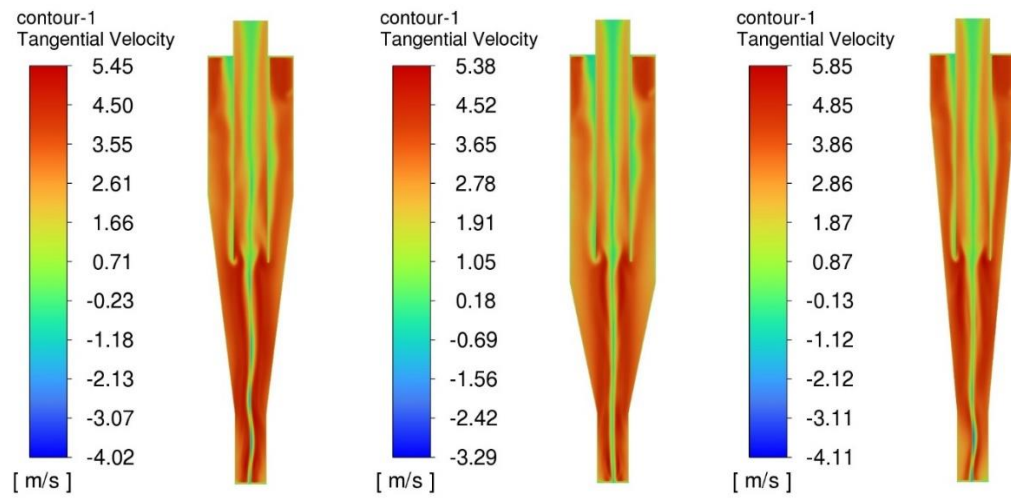
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Contornos de pressão estática na condição operacional de 3,21 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Contornos de velocidade tangencial na condição operacional de 3,21 m/s.

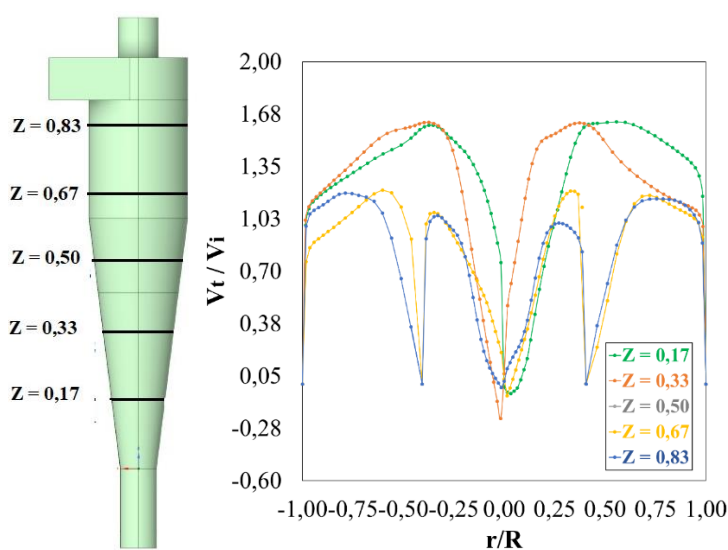


Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – Perfis de Escoamento do Gás ao longo do Eixo Axial

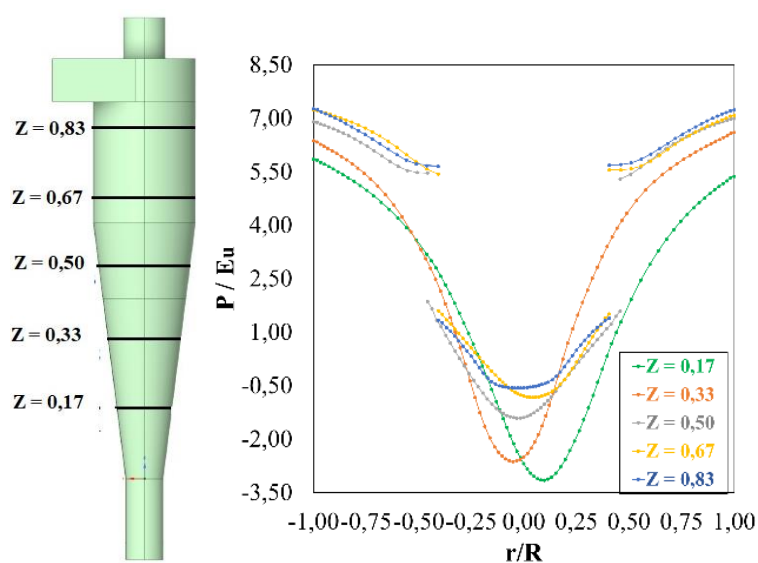
Nesta seção serão apresentados os perfis de escoamento da fase gasosa ao longo dos cinco níveis axiais previamente estipulados, com Z variando entre 0,17, 0,33, 0,50, 0,67 e 0,83. Vale destacar que Z é a variável axial normalizada pela altura total (H_t) do equipamento, sendo contabilizado a partir da base dos ciclones. Ressalta-se que os perfis aqui apresentados foram gerados na condição operacional de máxima velocidade (9,64 m/s), utilizando a malha otimizada escolhida, no caso, as malhas de maior refinamento para cada ciclone.

Figura 50 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C_1 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C_1 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C₁.

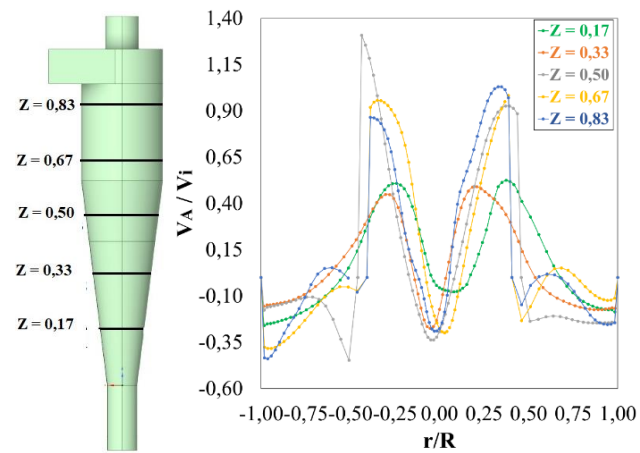


Figura 53 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C₂.

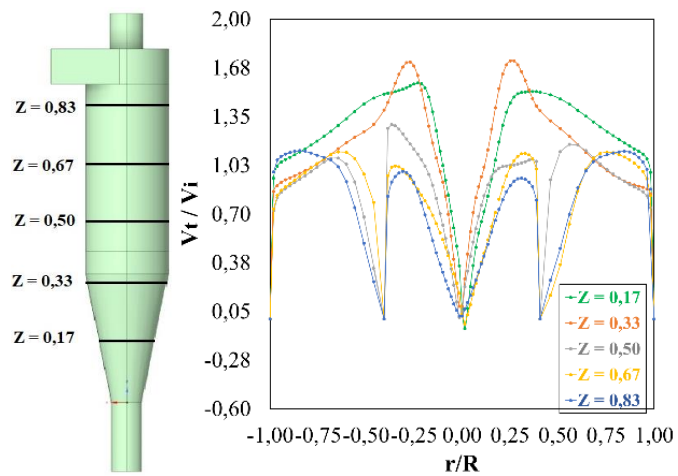


Figura 54 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C₂.

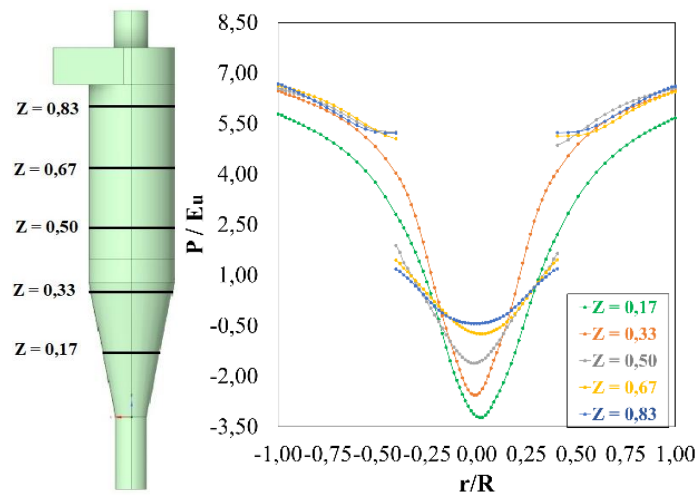
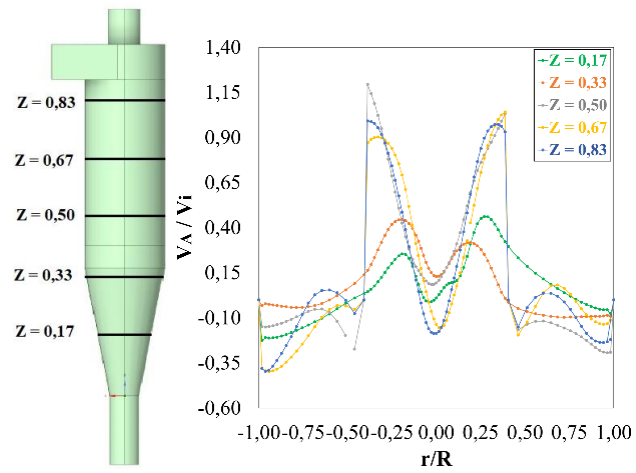
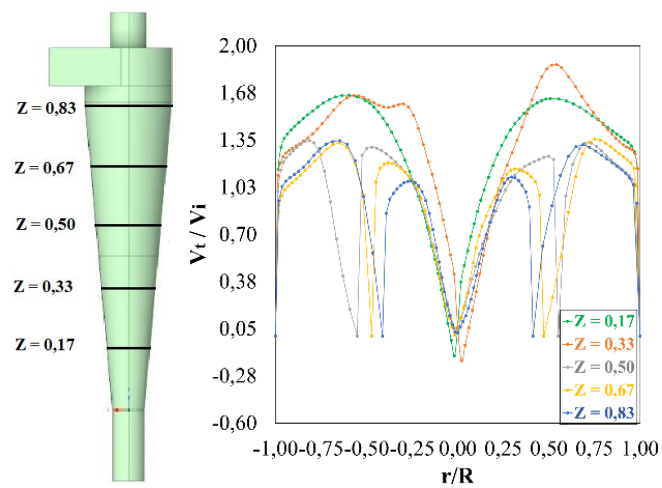


Figura 55 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C₂.



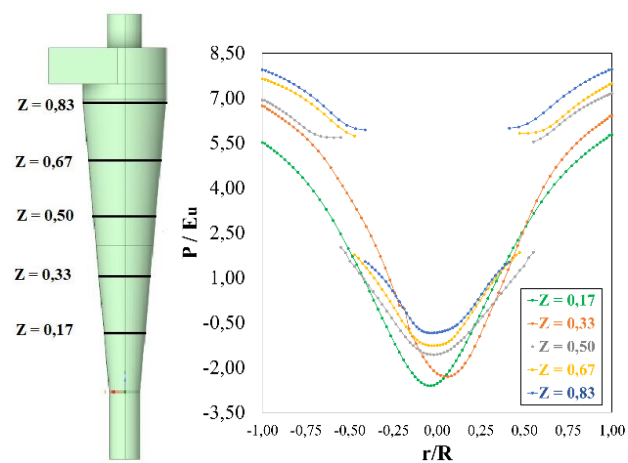
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Perfis de velocidade tangencial ao longo do eixo axial do ciclone C₃.



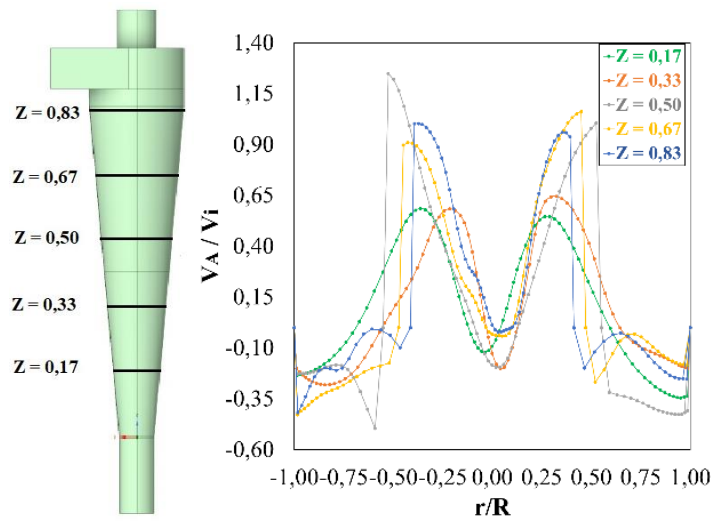
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Perfis de pressão estática ao longo do eixo axial do ciclone C₃.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - Perfis de velocidade axial ao longo do eixo axial do ciclone C₃.



Fonte: Elaborado pelo autor.