



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUIZ EDUARDO DE ARAUJO OLIVEIRA

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE CICLONES

Maceió

2023

LUIZ EDUARDO DE ARAUJO OLIVEIRA

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE CICLONES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão.

Coorientador: Prof. Dr. Thais Logetto Caetité Gomes

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C289m Oliveira, Luiz Eduardo de Araujo.
Avaliação numérica da eficiência de separação de ciclones / Luiz
Eduardo de Araujo Oliveira. – 2023.
[97] f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.

Co-orientador: Thais Logetto Caetité Gomes

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia
Química). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió,
2023.

Bibliografia: f. 67-68.

Apêndices: f. 69.

Anexos: f. 70-[97].

1. Separador ciclônico - Características geométricas. 2. Abordagem euleriana.
3. Eficiência de separação. 4. Queda de pressão. I. Título.

CDU: 531.373.466



LUIZ EDUARDO DE ARAUJO OLIVEIRA

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE CICLONES

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
RODOLFO JUNQUEIRA BRANDAO
Data: 29/05/2023 15:14:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão



Documento assinado digitalmente
WAGNER ROBERTO DE OLIVEIRA PIMENTEL
Data: 30/05/2023 13:49:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wagner Roberto de Oliveira Pimentel



Documento assinado digitalmente
JOAO BATISTA MAIA ROCHA NETO
Data: 30/05/2023 17:55:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Batista Maia Rocha Neto

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida, pela sabedoria que me foi concedida e oportunidade de desenvolver esse trabalho.

Aos meus Pais, José Luiz e Maria dos Anjos, por toda a dedicação e apoio durante toda minha trajetória até aqui.

Aos meus irmãos, Maria Larisse, Luiz Emanuel e meu cunhado Rodolfo Costa por todo o apoio durante a graduação.

A minha namorada, Larissa Sá por toda paciência, apoio e incentivo nos momentos bons e também difíceis.

Ao meu orientador e amigo, Professor Rodolfo Junqueira Brandão, que me tornou certamente uma pessoa e profissional melhor com seu conhecimento e orientação, além de reativar a paixão pela Engenharia Química.

A Thais Logetto pela paciência e orientação em um momento de extrema importância para minha formação profissional.

A PROTEQ e ao Movimento Empresa Júnior, que me deram um propósito e me ensinou a ser inconformado e sempre buscar mais.

A todos os meus amigos e companheiros de Universidade que me acompanharam e foram importantíssimos na minha jornada até aqui.

RESUMO

A compreensão acerca do comportamento de escoamentos turbulentos é de fundamental importância no que diz respeito à concepção de projetos e otimização de equipamentos industriais com escoamentos complexos. Frente a isso, os separadores ciclônicos industriais têm grande destaque na separação de partículas sólidas imersas em um meio fluido. Destacam-se como principais setores de aplicação do separador as seguintes áreas: engenharia química, ambiental, proteção ecológica, processamento de alimentos, minerais e metalurgia. Tendo isso em vista, o presente trabalho teve como objetivo estudar a influência do diâmetro do *overflow*, *underflow*, altura da seção cônica, cilíndrica e *vortex finder* em um separador ciclônico industrial na eficiência de separação ciclônica. Diante disso, utilizou-se de um planejamento composto central (PCC), como estratégia de simulação, obtendo-se 27 simulações sendo essas discretizadas utilizando uma abordagem Euleriana através do OpenFoam como resolvidor numérico. Analisando individualmente as configurações, observou-se que o diâmetro do *overflow*, *underflow*, altura da seção cilíndrica, cônica e *vortex finder* foram significativas na predição da eficiência de separação, sendo essa última a única que não é significativa na análise do perfil de velocidade e queda de pressão. Ao avaliar o PCC, obteve-se um coeficiente de correlação quadrático de 0,9228 para a queda de pressão, sendo este modelo adequado para sua predição, todavia de 0,5665 para a eficiência de separação, evidenciando que existem características geométricas não estudadas significativas na predição da eficiência de separação. Sendo assim, o presente trabalho obteve resultados significativos na predição das configurações geométricas utilizando CFD em um separador ciclônico industrial onde até então são utilizados métodos empíricos na sua concepção de projetos.

Palavras-chave: Separador Ciclônico, Abordagem Euleriana, Eficiência de Separação, Características Geométricas, Queda de Pressão.

ABSTRACT

Understanding the behavior of turbulent flows is of fundamental importance with regard to designing projects and optimizing industrial equipment with complex flows. In view of this, industrial cyclonic separators have great prominence in the separation of solid particles immersed in a fluid medium. The following areas stand out as the main application sectors of the separator: chemical engineering, environmental, ecological protection, food processing, minerals and metallurgy. With this in mind, the present work aimed to study the influence of the diameter of the overflow, underflow, height of the conical and cylindrical section and vortex finder in an industrial cyclonic separator on the efficiency of cyclonic separation. Therefore, a central composite planning (CCP) was used as a simulation strategy, obtaining 27 simulations, which were discretized using an Eulerian approach through OpenFoam as numerical solver. Analyzing the configurations individually, it was observed that the diameter of the overflow, underflow, height of the cylindrical section, conic and vortex finder were significant in predicting the separation efficiency, the latter being the only one that is not significant in the analysis of the velocity and drop profile depression. When evaluating the PCC, a quadratic correlation coefficient of 0.9228 was obtained for the pressure drop, this model being adequate for its prediction, however of 0.5665 for the separation efficiency, showing that there are significant geometric characteristics not studied in predicting separation efficiency.

Keywords: Cyclonic separator, Eulerian approach, separation efficiency, geometric characteristics, pressure drop.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Dimensões características de um separador ciclônico.	12
Figura 2- Linhas de escoamento de um separador ciclônico.	13
Figura 3- Curva de comportamento prático e teórico de um ciclone	16
Figura 4-- Representação dos pontos de uma malha	19
Figura 5- Campo de fluxo em uma malha	22
Figura 6- Cursos oferecidos pela desenvolvedora do OpenFoam	24
Figura 7- Principais pastas do OpenFoam. a) Pasta <i>system</i> b) Pasta <i>constant</i> c) Pasta 0	24
Figura 8- Modelo para um PCC de 2 fatores.....	26
Figura 9- Construção da geometria através do Onshape.....	29
Figura 10- Fluxograma de avaliação de resultados.....	32
Figura 11- Ciclones de referência utilizado no teste de malha	34
Figura 12- Vista aproximada da malha dos ciclones de referência	34
Figura 13- Perfis de velocidade no ciclone. a) Velocidade no plano $y= 0,2$ b) Perfil de velocidade no plano $y= -0,2$ c) Perfil de velocidade no plano $y= 0$	35
Figura 14- Variação de velocidade no <i>underflow</i> com o tempo.....	36
Figura 15- Resultado para a qualidade da malha.....	37
Figura 16- Linhas de corrente do ciclone de referência a) Linha de todo ciclone b) Linhas do vórtex ascendente.....	38
Figura 17- Perfil de pressão do ciclone de referência	39
Figura 18- Perfil de pressão no <i>overflow</i>	40
Figura 19- Perfis de velocidade no ciclone de referência. a) Velocidade tangencial b) Velocidade axial em y c) Velocidade axial em z.....	41
Figura 20- Fração de partículas no <i>underflow</i>	42
Figura 21- perfil de velocidade no <i>underflow</i>	42
Figura 22- Erro ao longo do tempo da fração de partículas.	43
Figura 23- Recorte de um do script em Python utilizado para coleta de dados quantitativos.	45
Figura 24- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 17, 18 e 27.....	47
Figura 25- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 19, 20 e 27.....	49

Figura 26- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 21, 22 e 27.....	51
Figura 27- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 23, 24 e 27.....	53
Figura 28- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 25, 26 e 27.....	55
Figura 29- Distribuição do valor normal esperado vs resíduo para a queda de pressão	58
Figura 30- Distribuição do valor predito vs valor esperado para a queda de pressão	58
Figura 31- Superfícies de respostas da queda de pressão sob influência de a) D_u/D_c e D_o/D_c b) D_o/D_c e L_2/D_c c) L_3/D_c e D_o/D_c d) D_u/D_c e L_2/D_c e) V_f/D_c e L_2/D_c	59
Figura 32- Distribuição do valor normal esperado vs resíduo para a eficiência de separação.....	62
Figura 33- Distribuição do valor predito vs valor esperado para a eficiência de separação.....	63
Figura 34- Superfície de resposta da influência de L_3/D_c e D_o/D_c na queda de pressão.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Proporções geométricas das principais famílias de separadores ciclônicos.	14
Tabela 2- Planejamento composto central para investigação de variáveis independentes sobre diferentes configurações geométricas em um separador ciclônico.....	28
Tabela 3- Número de elementos de malha em cada simulação.....	29
Tabela 4- Malhas e números de elementos utilizados no teste de independência....	30
Tabela 5- Configurações de simulação	31
Tabela 6- Configurações geometrias do PCC em seus pontos axiais.....	33
Tabela 7- Resultados de queda de pressão no teste de independência de malha ...	35
Tabela 9- Resultados para eficiência de separação e queda de pressão nos ciclones estudados.....	44
Tabela 10- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 17,18 e 27.....	46
Tabela 11- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 19,20 e 27.....	48
Tabela 12- Fração volumétrica de partículas no interior dos ciclones 19, 20 e 27....	48
Tabela 13- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 21, 22 e 27.....	50
Tabela 14- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 21, 22 e 27.....	52
Tabela 15- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 25, 26 e 27.....	54
Tabela 16- Tabela ANOVA do PCC do modelo completo para a avaliação da queda de pressão.....	56
Tabela 17- Tabela ANOVA do PCC do modelo reduzido para a avaliação da queda de pressão.....	57
Tabela 18- Tabela ANOVA do PCC do modelo completo para avaliação da eficiência de separação.....	61
Tabela 19- Tabela ANOVA do PCC do modelo reduzido para avaliação a eficiência de separação.....	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Específicos	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Ciclones	12
3.1.1	Escoamento e dimensionamento de ciclones	13
3.1.2	Perda de carga em ciclones	14
3.1.3	Eficiência de separação em ciclones	15
3.2	Fluidodinâmica computacional.....	16
3.2.1	Equação da Continuidade	17
3.2.2	Equação do Movimento	17
3.2.3	Equação do movimento da partícula.....	18
3.3	Método de discretização.....	18
3.3.1	Malha numérica	19
3.3.2	Modelos de turbulência	20
i)	LES	21
ii)	RANS	22
iii)	DNS.....	23
3.4	OpenFoam	23
3.5	Planejamento de experimentos	25
4.	METODOLOGIA	27
4.1	Pré-processamento.....	27
4.1.1	Planejamento composto central	27
4.1.2	Geometria	28
4.1.3	Malha	29

4.2	Resolução numérica	30
4.3	Pós processamento	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Criação da geometria.....	32
5.2	Teste de independência de malha	34
5.3	Simulação com ciclone de referência	38
5.4	Avaliação das características geométricas de separadores ciclônicos	43
5.4.1	Efeito individual dos níveis	45
i)	Análise do efeito do diâmetro do <i>overflow</i> (Do).....	45
ii)	Análise do efeito do diâmetro do <i>underflow</i> (Du).....	47
iii)	Análise do efeito da altura da seção cilíndrica (L2)	49
iv)	Análise do efeito da altura da seção cônica (L3).....	51
v)	Análise do efeito do <i>vortex finder</i> (Vf).....	53
5.5	Avaliação do planejamento composto central	55
5.5.1	Análise da queda de pressão	55
5.5.2	Análise da eficiência de separação (S)	60
6.	CONCLUSÃO	65
7.	PROPOSTAS FUTURAS	66
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
9.	APÊNDICE	69
10.	ANEXO	70

1. INTRODUÇÃO

A compreensão acerca do comportamento da dinâmica de partículas dispersas em meio fluido é de fundamental importância no entendimento de diversas operações unitárias relacionadas à engenharia, de tal modo que sua modelagem se torna cada vez mais necessária no estudo, concepção e otimização de equipamentos que envolvem escoamentos multifásicos. Dentre os equipamentos utilizados na resolução desse problema, destaca-se o ciclone, sendo esse um aparato utilizado na remoção de material particulado contido em corrente de gás por meio da força centrífuga. Devido a isso, os ciclones são comumente utilizados em processos industriais, incluindo a engenharia química, engenharia ambiental, proteção ecológica, processamento de alimentos, minerais e metalurgia (Fu et al., 2021; Pandey; Brar, 2022; Pirker; Kahrimanovic; Aichinger, 2009).

Ciclones são equipamentos com estrutura simples e de elevada confiabilidade, no entanto, o escoamento em seu interior é complexo e estudos acerca do mesmo ainda encontram-se escassos. Diante disso, mesmo tendo sua primeira patente registrada em 1885, seus parâmetros de construção são comumente definidos a partir de regras empíricas e observações experimentais. Esse tipo de modelagem requer grande número de simplificações, os quais podem afetar os resultados e conseqüentemente restringir o uso de ciclones (Misiulia *et al.*, 2020).

Desta forma, surge na década de 60 uma nova abordagem a Fluidodinâmica Computacional (*Computation Fluid Dynamics* – CFD) se tornando uma alternativa no estudo a aperfeiçoamento desses equipamentos a fim de melhorar a eficiência de separação, reduzir custos operacionais e de construção.

Embora seu desenvolvimento tenha se iniciado na década de 60, somente na década de 90 a mesma passou a ter maior aceitação na indústria, tendo como percussor projetos aeronáuticos. Nos últimos anos, principalmente com os avanços tecnológicos, a CFD vem se tornando cada vez mais indispensável no estudo de equipamentos industriais.

Tendo isso em vista, o presente trabalho tem como objetivo avaliar numericamente um ciclone industrial, avaliando numericamente os resultados encontrados através da modificação de parâmetros de construção do mesmo, visando assim maximizar o seu rendimento de separação além da redução da perda de carga.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo estudar a eficiência de um separador ciclônico, bem como a dissipação de energia quantificada na forma de perda de carga, utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional, observando a influência de parâmetros da geometria de sua construção.

2.2 Específicos

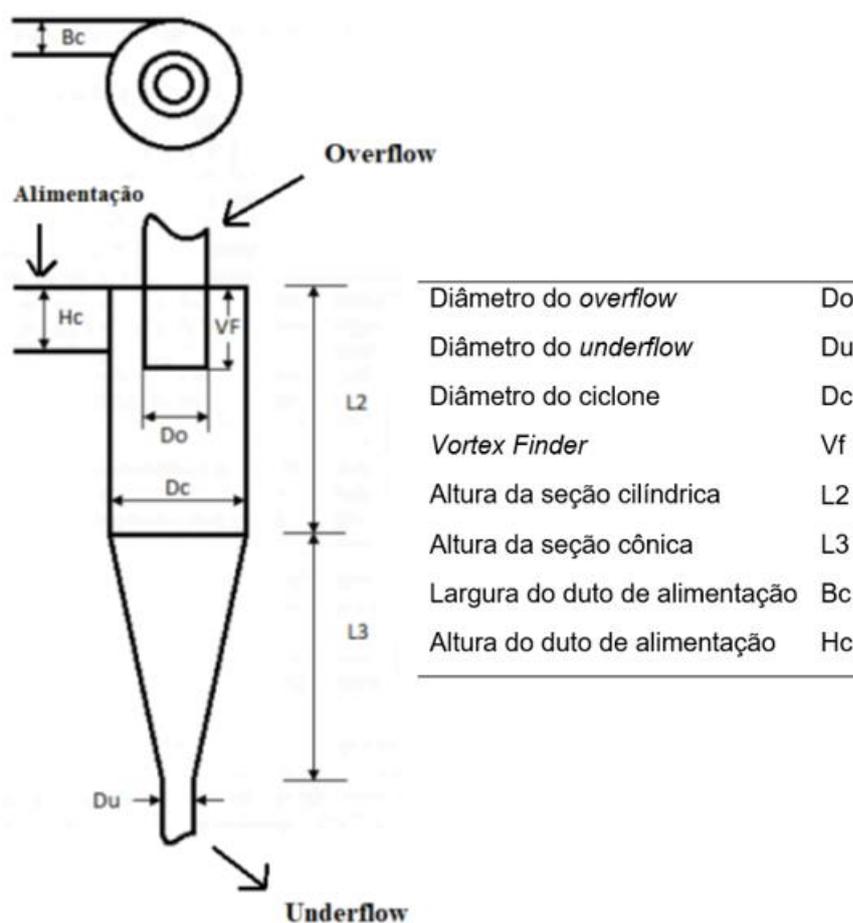
- Confeccionar separadores ciclônicos em CAD para avaliação numérica de eficiência de separação e queda de pressão;
- Investigar a influência da quantidade de elementos de malha na precisão da avaliação das variáveis resposta;
- Estudar utilizando a fluidodinâmica computacional, os perfis de velocidade, queda de pressão e eficiência de separação de um ciclone;
- Estudar a influência da altura da seção cônica, cilíndrica, diâmetros do *underflow*, *overflow* e *vortex finder* de um separador ciclônico industrial utilizando CFD.
- Utilizar técnicas de planejamento de experimentos e simulação CFD a fim de desenvolver um modelo de ajuste relacionando proporções geométricas à perda de carga e eficiência de separação como variáveis de resposta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclones

Ciclones são equipamentos amplamente utilizados nas indústrias químicas, utilizado em operações de separação gás-sólido. Sua geometria é relativamente simples, consistindo em um cone cilíndrico sem peças móveis. A alimentação ocorre através de um duto, geralmente retangular ou circular, localizado na parte lateral superior tangencial ao cilindro. Além disso, têm duas saídas, o *underflow*, localizada na parte inferior da seção cônica, cuja finalidade é a remoção de partículas sólidas e o *overflow*, localizado no topo da seção cilíndrica, permitindo a saída do gás. Segundo Perry (1997) seu uso é indicado para separação de partículas com diâmetros entre $5\mu\text{m}$ e $200\mu\text{m}$, podendo ser utilizado em partículas menores a depender do tamanho, massa e concentração. A Figura 1 apresenta a vista superior e lateral de um ciclone industrial (Bird, 2004; Cremasco, 2012; Bof, 2018).

Figura 1- Dimensões características de um separador ciclônico.

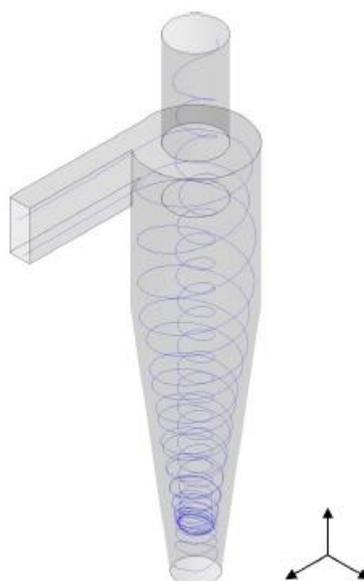


Fonte: Adaptado de Bof, 2018.

3.1.1 Escoamento e dimensionamento de ciclones

Desde o primórdio da sua criação, no final do século XIX, diversos trabalhos experimentais têm sido realizados a fim de entender as características do escoamento no interior de um ciclone. Apesar disso, devido a turbulência em seu interior, o entendimento sobre características importantes como a perda de carga e eficiência de separação ainda são escassos. O fluxo de escoamento comumente utilizado para um separador ciclônico é ilustrado na Figura 2.

Figura 2- Linhas de escoamento de um separador ciclônico.



Fonte: Oliveira, 2019.

É possível identificar na Figura 2 que no equipamento há uma entrada lateral tangencial, podendo ser retangular ou circular, a qual ocorre a alimentação da mistura multifásica. Após a alimentação o princípio básico de separação se baseia na força centrípeta do gás devido a aceleração gravitacional que resulta em um movimento altamente rotativo do gás promovendo a separação (Shastri; Wasilewski; Brar, 2021).

Ao entrar na parte côncava do equipamento, devido ao afunilamento, há a aceleração das fases. Somando a esse efeito o fato de o escoamento na região central ser de baixa pressão, quando o vórtice externo se aproxima da região do *underflow* ocorre a inversão na sua direção axial resultando em um movimento helicoidal ascendente na região central do ciclone. O vórtice central é formado por

um gás pobre em materiais particulados resultando na separação das partículas do meio pela saída superior, o *overflow* (Shastri; Wasilewski; Brar, 2021; Venkatesh et al., 2020).

Para o dimensionamento de um ciclone, existem dois parâmetros principais a serem observados: perda de carga e eficiência de separação. Esses dois parâmetros estão também estritamente ligados à eficiência energética do sistema e devem encontrar o meio termo entre um ciclone com boa eficiência energética, de separação e uma baixa perda de carga (Sommerfeld, 2019).

Os projetos de dimensionamento de ciclones têm sido tradicionalmente realizados de forma empírica através de experimentos e baseados em famílias geométricas. As classificações mais utilizadas levam em consideração o diâmetro do ciclone, tendo destaque os ciclones do tipo Lapple e Stairmand H.E, sendo suas dimensões apresentadas na Tabela 1 (Svarovsky, 1981).

Tabela 1- Proporções geométricas das principais famílias de separadores ciclônicos.

	Lapple	Stairmand H.E.
Bc/Dc	0,25	0,20
Do/Dc	0,50	0,50
Hc/Dc	0,50	0,50
L2/Dc	2,00	1,50
VF/Dc	0,63	0,50
L3/Dc	2,00	2,50
Du/Dc	0,25	0,38

Fonte: Adaptado Svarovsky (1981)

3.1.2 Perda de carga em ciclones

A perda de carga em ciclones se refere à queda de pressão, sendo esse um parâmetro extremamente importante visando minimizar o consumo energético da operação unitária. As principais causas desse fenômeno são:

- Atrito no duto de entrada;
- Atrito com a parede;
- Perdas cinéticas no ciclone;
- Variação de pressão entre a entrada e saída;

Para Shepherd e Lapple (1939, 1940) apenas a perda de carga por energia cinética é importante dentro de um ciclone e somente elas deveriam ser levadas em consideração em um escoamento ciclônico. Além disso, segundo Koch e Licht

(1977), os mesmos autores propuseram uma equação simples que proporciona resultados tão eficientes quanto as equações complexas para perda de carga podendo assim a perda de carga ser calculada de acordo com a Equação 1.

$$\Delta P = \frac{\xi \rho V_e^2}{2} \quad (1)$$

Sendo ξ o fator constante para cada tipo de ciclone, V_e a velocidade de entrada do gás e ρ a densidade do gás com o material particulado.

3.1.3 Eficiência de separação em ciclones

A eficiência global de um ciclone é influenciada pelas condições operacionais, propriedades físicas do material particulado e pela geometria do equipamento.

Existe uma maneira simples e direta de medir a eficiência de separação de um ciclone: relacionando a massa total de sólidos coletados no *underflow* e a massa inicial de sólidos na alimentação, essa relação está disposta na Equação 2.

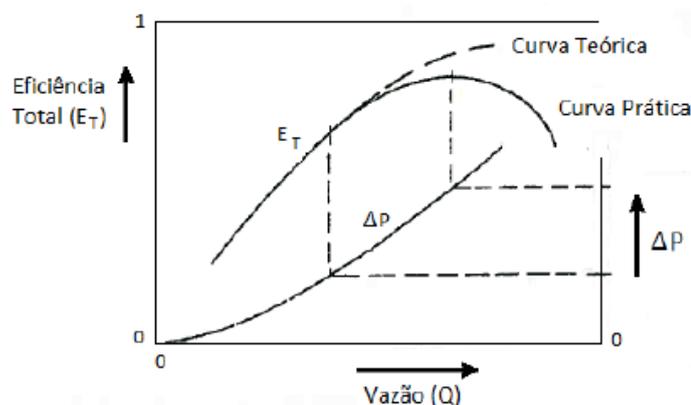
$$S = \frac{S_u}{S_i} \quad (2)$$

Sendo S a eficiência total de separação, S_u a vazão mássica coletada no *underflow* e S_i a vazão mássica de sólidos na alimentação.

Neste caso a eficiência global pode aumentar quando a concentração de materiais particulados aumenta, devido ao arraste das partículas mais finas pelas mais grossa. Esse fenômeno foi relatado por diversos autores como Mothes & Loffler (1988) e Hoffman et al. (1992) que obtiveram essa conclusão pesando as partículas no funil.

Svarovsky (1981) relatou que a eficiência de separação varia de acordo com a vazão conforme disposto na Figura 3. O gráfico mostra que o aumento da vazão resulta no aumento da eficiência total até um ponto máximo, a partir dele a eficiência decai. Observa-se também, o aumento da perda de carga ocasionado pelo aumento da vazão, sendo assim, é possível perceber que altas eficiências são encontradas quando há perdas de carga razoáveis.

Figura 3- Curva de comportamento prático e teórico de um ciclone



Fonte: Adaptado de Svarovsky (1981) por Bof (2018).

3.2 Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional, também conhecida como CFD, é a área de conhecimento que analisa sistemas envolvendo fenômenos de transporte, como transferência de massa, energia e movimento por meio de simulações utilizando métodos numéricos, matemáticos e computacionais. Sendo assim, devido sua versatilidade pode ser aplicado em diversas operações unitárias desde processos de separação à mistura (Pandey et al., 2022; Pirker; Kahrimanovic; Aichinger, 2009).

Para exemplificar a vasta aplicabilidade do uso de CFD no estudo de engenharia, temos, por exemplo, o trabalho realizado por Fu et. al. (2021) que realizou um estudo numérico das revoluções de partículas e auto-rotação de alta velocidade em ciclones através do CFD-DEM. Assim como também Santos *et. al.* (2013) que fez um estudo experimental utilizando CFD no comportamento hidrodinâmico em tambor rotatório.

No estudo da fluidodinâmica de sistemas particulados, como no caso de ciclones, havendo baixa concentração de material particulado, ou seja, sistemas diluídos, pode-se considerar que a interação entre partícula-partícula é desprezível. Dessa forma, a simplificação permite considerar a avaliação dinâmica de uma partícula esférica, isolada e imersa em um fluido infinito desprezando a interferência de paredes. Sendo a influência da presença de parede, forma da partícula e concentração do sistema consideradas por meio de relações empíricas que são incorporadas ao sistema nas simulações (Bof, 2018).

Além disso, a fluidodinâmica da partícula pode ser descrita através de equações de movimento e sua condição de aderência na interface fluido-partícula. Sendo assim, é importante o conhecimento das propriedades físicas das partículas como densidade, forma e dimensões e as possíveis simplificações do sistema. Ademais, tem-se também a necessidade do entendimento da descrição da fase fluida, sendo esta avaliada a partir da utilização da equação da continuidade e de momento (Massarani, 1997).

Nos tópicos a seguir, serão apresentados apenas as equações de conservação aplicáveis a esse trabalho: Equação da Continuidade e Equação da Conservação de Quantidade de Movimento, podendo ser observado suas respectivas deduções em Bird *et al* (2004).

3.2.1 Equação da Continuidade

A equação da continuidade é baseada no princípio da conservação de massa e pode ser vista na Equação 3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad (3)$$

Sendo, ρ a massa específica do fluido, t o tempo e v o vetor velocidade do fluido.

3.2.2 Equação do Movimento

A equação de movimento surge a partir da segunda lei de Newton, quando aplicada ao balanço de momento para uma porção infinitesimal de fluido obtemos a Equação 4.

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \tau] + \rho f \quad (4)$$

Sendo p a pressão estática, τ a tensão viscosa e f a resultante das forças do campo atuando no volume de controle.

Com a inserção da equação da tensão viscosa proposta por Stokes (1842), considerando o escoamento incompressível e com viscosidade constante a Equação 5 pode ser escrita de acordo com a Equação 6, sendo esta denominada como Equações de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - \mu \nabla^2 v + \rho f \quad (5)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido.

3.2.3 Equação do movimento da partícula

A segunda lei de Newton afirma que a força resultante que atua sobre um corpo é igual ao produto de sua massa pela sua taxa de variação com o tempo. Essa lei fornece a base para uma das equações mais importantes da mecânica dos fluidos em sistemas particulados, a equação de movimento da partícula. Quando considerada a massa da partícula constante, obtemos a Equação 6.

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \sum f_p \quad (6)$$

Sendo, m_p a massa da partícula, v_p é o vetor velocidade da partícula e f_p é a resultante das forças atuando na partícula.

3.3 Método de discretização

As equações apresentadas anteriormente, na maior parte dos casos, não têm solução analítica para os casos tridimensionais. Sendo assim, é necessário a aplicação de métodos numéricos para a resolução das mesmas. Existem várias abordagens para a resolução desses modelos, sendo as mais utilizadas: Diferença Finitas, Elementos Finitos e Volumes Finitos. Alguns métodos são mais apropriados para determinados problemas, neste trabalho o método mais adequado é os volumes finitos, já que ele está inserido nos principais códigos comerciais de CFD, por se tratar de uma metodologia de resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento em um determinado volume de controle (Yang et al., 2022).

Já quando falamos do material particulado, temos dois modos de abordagens que podem ser adotadas: Lagrangeana e Euleriana. Na abordagem Lagrangeana a fase dispersa é analisada individualmente, onde as leis de Newton são utilizadas para descrever o movimento do objeto obtendo assim os vetores de posição e velocidade de cada partícula. Já a descrição Euleriana, que foi aplicada nesse trabalho, não é necessário acompanhar a posição e velocidade da partícula, em vez

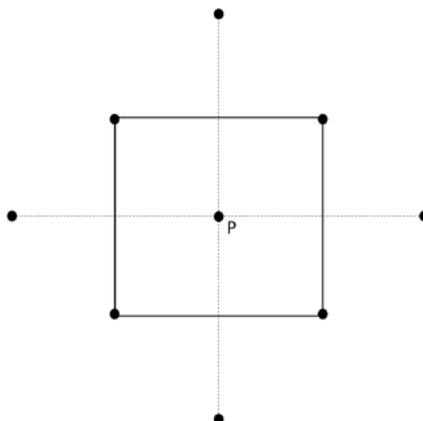
disso, é definido uma variável tempo dentro do volume de controle sendo assim analisado o fluxo de partículas (Çengel, 2015; Meier; Mori 1998).

3.3.1 Malha numérica

Uma das principais etapas do método dos volumes finitos é a divisão do volume de controle. Para tal, alguns critérios, segundo Blazek (2001) devem ser seguidos: o domínio físico deve ser totalmente preenchido com a malha, não deve haver espaços vazios entre os elementos sem malha e os volumes não devem se cruzar. Em outras palavras, a malha também deve ser a mais regular possível, visando assim a convergência numérica (Blazek, 2001).

Quando há a construção de um elemento de malha, considera-se um ponto P, central à geometria, em um arranjo conhecido como co-localizado. A Figura 4 apresenta um elemento de malha quadrática em 2D, onde é possível observar os nós, localizados nas extremidades do quadrado, e os pontos centrais de uma malha vizinha, indicado pelo ponto na extremidade da linha pontilhada (BOF, 2018).

Figura 4-- Representação dos pontos de uma malha



Fonte: Bof, 2018.

Uma malha é composta, portanto, por nós, as extremidades da malha, e o elemento do volume de controle, podendo este ter sua geometria definida como: Hexaédrico, triangular, retangular, prismática, etc (Salvo, 2013).

Segundo Blazek (2001) existem dois tipos de malhas, as malhas estruturadas e não estruturadas.

- Malhas estruturadas: São malhas onde os elementos de malha são regularmente espaçados e perfeitamente alinhados. Sendo assim, a posição

de cada nó da malha pode ser identificada espacialmente (i, j, k). A principal vantagem desse tipo de malha está na sua simplicidade facilitando a convergência numérica e sua principal desvantagem está na restrição geométrica, podendo esse tipo de malha somente ser utilizado em geometrias regulares e simples. Sendo assim, esse tipo de malha tem geometria quadrática em geometrias 2D e hexaédrica em 3D.

- Malhas não estruturadas: São malhas que têm sua forma e tamanho variado, o que possibilita mais flexibilidade e adaptabilidade a geometrias complexas. Além disso, seus nós são desordenados não existindo restrição quanto ao número de vizinhos. Segundo Blazek (2001) a principal desvantagem está atrelada à necessidade de resoluções numéricas sofisticadas aumentando o tempo de simulação e podendo levar a menor eficiência computacional.

De forma geral, a qualidade da malha deve ser verificada e acompanhada durante sua confecção. Podemos definir a qualidade da malha numérica em 6 parâmetros:

- Tamanho dos elementos: Quanto maior o número de elementos, mais refinada é a malha. O aumento no número de elementos resulta em maior precisão numérica e necessita de maior potencial computacional.
- Conformidade: Os nós devem ser conformes e coincidirem com seus vizinhos, não havendo assim espaços vazios entre os elementos de malha.
- Ortogonalidade: Os ângulos entre as faces devem ser próximos de 90°, garantindo maior estabilidade numérica e precisão nos resultados.
- Homogeneidade: A distribuição da malha deve ser homogênea, com volumes próximos em todas as regiões do domínio.
- Suavidade: A malha deve ter suavidade na transição entre regiões da geometria, evitando mudanças bruscas.
- Razão de aspecto: Relaciona a proporção entre o comprimento mais longo de uma célula e o mais curto. O aumento desse parâmetro pode acarretar em instabilidade numérica, portanto, deve-se minimizar o seu valor.

3.3.2 Modelos de turbulência

A turbulência em escoamentos decorre de movimentos aleatórios e caóticos de um fluido quando a sua velocidade é alta o suficiente. Durante a turbulência, as

partículas individuais de fluido se movem em diferentes direções e com velocidades variáveis, causando mistura e agitação no fluido. Isso geralmente resulta em maior dissipação de energia e perda de pressão no sistema, além de um escoamento caótico e complexo.

Em função da complexidade atrelada a descrição da turbulência, não existem modelos exatos para o tratamento desse fenômeno, utiliza-se então de aproximações a resolução numérica do problema (BOF, 2018). Sendo assim, segundo Hanshaj 2019, diversos fatores influenciam na escolha do modelo de turbulência, como as características físicas do escoamento, o tipo do problema, nível de precisão pretendido, recursos computacionais disponíveis e quantidade de tempo disponível para a simulação.

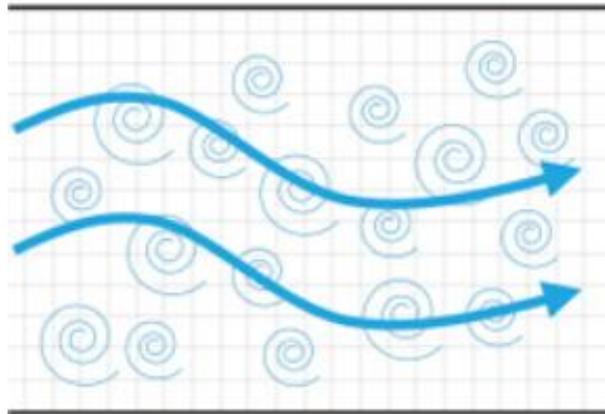
Os principais modelos de turbulência utilizados em CFD baseiam-se nas equações de Navier-Stokes havendo três abordagens principais para sua resolução: *Large Eddy Simulation* (LES), *Reynolds Average Navior Stokes* (RANS) e *Direct Numerical Simulation* (DNS) (Silva,2016).

i) LES

O modelo de turbulência LES se fundamenta na resolução numérica em grandes escalas de turbulência que geralmente dominam a transferência calor, momento, ou qualquer outro parâmetro de interesse na engenharia. Dessa forma, pequenas escalas de turbulência influenciam grandes escalas, esse modelo então calcula diretamente grandes vórtices em sua malha enquanto o efeito de vórtices menores, que não é capturado pela malha, é contabilizado como modelagem. Devido a isso, como também é ressaltado por Hansraj (2019) a principal desvantagem desse método é seu custo computacional, podendo chegar a ser cem vezes maior se comparado a outros métodos. A Figura 5 ilustra o campo de fluxo em uma malha.

Para a modelagem em escalas cujo o vórtice é menor que a malha se utiliza de modelos matemáticos de modelagem, sendo o mais famoso o de Smagorinsky.

Figura 5- Campo de fluxo em uma malha



Fonte: Takao Itami, 2019. <https://www.cradle-cfd.com/media/column/a165>

ii) RANS

O modelo RANS leva em consideração que os vórtices em transição devido ao seu pequeno tamanho e aleatoriedade. Sendo assim, o método consiste em modelar o campo médio em termos de tempo, quando esse conceito é aplicado os fenômenos transitórios são suavizados e tornam-se invisíveis. Apesar disso, o campo também é afetado pela turbulência como natureza de fluxo esse efeito é denominado viscosidade turbulento (Hansraj, 2019).

Em simulações RANS existem diversos tipos de modelos de viscosidade turbulenta que podem ser utilizados como: K- ϵ , K- Ω , RNG K- ϵ .

O modelo K- ϵ é um dos modelos mais simples que podem ser adotados, ele resolve equações da energia cinética turbulenta K e da taxa de dissipação ϵ em zonas afastadas da parede. É um modelo bastante aceito e popular industrialmente devido sua robustez, baixo custo computacional e precisão aceitável. Com o decorrer dos anos esse modelo começou a sofrer melhoras originando versões mais precisas como a RNG e *realizable*. A equação de energia cinética turbulenta e taxa de dissipação pode ser vista nas equações 7 e 8, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (8)$$

Sendo G_k a energia cinética turbulenta relacionada com os gradientes da velocidade média, G_b a energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade, Y_M a variação da dilatação na turbulência compressível e os valores das constantes $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k e σ_ϵ iguais a 1,44, 1,92, 0,09, 1,0, e 1,3 respectivamente.

Além disso, a viscosidade turbulenta pode ser calculada segundo a Equação 9.

$$u_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

Sendo C_μ constante.

Por outro lado, o modelo K- Ω têm como principal diferença, quando comparado aos modelos K- ϵ , a substituição da equação da taxa de dissipação (Equação 9) pela equação da taxa de dissipação específica, que pode ser vista na Equação 10. Além disso, assim como o modelo K- ϵ o modelo K- Ω sofreu variações sendo a mais conhecida delas o modelo K- Ω SST (*Shear Stress Transport*).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + G_\omega + Y_\omega + S_\omega \quad (10)$$

iii) DNS

Por fim, no DNS todas as escalas de turbulência são resolvidas numericamente, tornando esse modelo o de maior custo computacional. Esse modelo necessita de malhas muito refinadas e considera uma vasta escala de tempo e comprimento do escoamento turbulento. Como todas as escalas são resolvidas numericamente, nesse modelo não há a necessidade de utilizar modelagem matemática e ainda não foi amplamente estudado devido principalmente a limitações tecnológicas e de tempo (Moser, 1999).

3.4 OpenFoam

O OpenFoam é um resolvidor numérico de código aberto desenvolvido pela empresa OpenCFD sendo hoje o principal resolvidor gratuito do mercado. É utilizado desde a confecção da malha até a resolução numérica do problema, no entanto, apesar de ser gratuito e poderoso sua utilização não é simples. Sua complexidade pode ser exemplificada, na Figura 6, pelo custo do curso oferecido pela própria empresa como forma de monetizar seu produto.

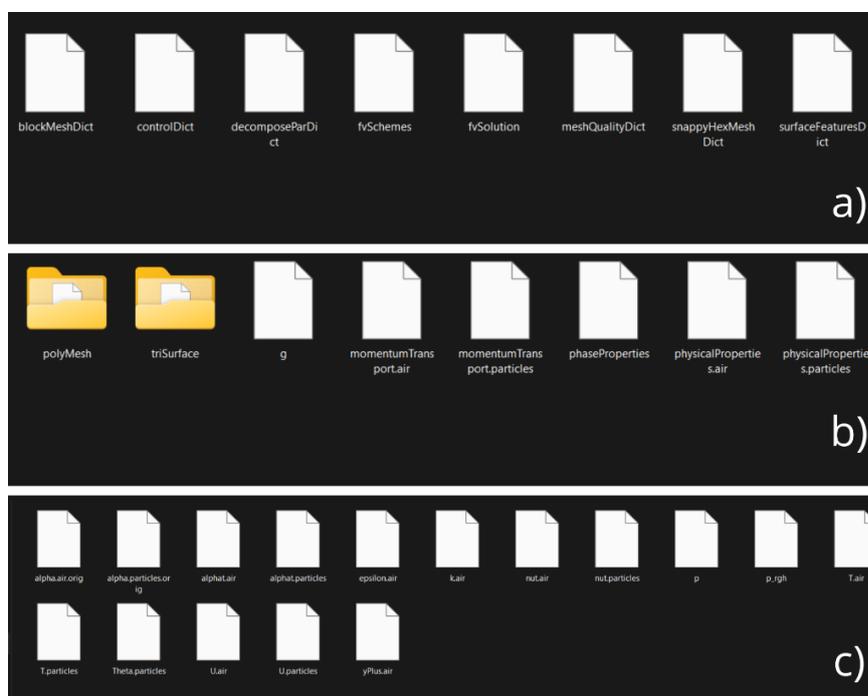
Figura 6- Cursos oferecidos pela desenvolvedora do OpenFoam

SILVER €5k	GOLD €25k	PLATINUM €100k
Access to Hub ✓	Access to Hub ✓	Access to Hub ✓
Functionality ✓	Functionality ✓	Functionality ✓
Integration ✗	Integration ✓	Integration ✓
Mentoring ✗	Mentoring ✓	Mentoring ✓
Architecture ✗	Architecture ✗	Architecture ✓
Marketing/Promotion ✗	Marketing/Promotion ✗	Marketing/Promotion ✓
Individual Level	Group Level	Corporate Level

Fonte: <https://www.openfoam.com/trainings/courses>, acessado em 14 de março de 2023.

O OpenFoam é composto por três pastas principais a pasta *system*, *constant* e *0*, sendo apresentado o conteúdo de cada uma delas na Figura 7.

Figura 7- Principais pastas do OpenFoam. a) Pasta *system* b) Pasta *constant* c) Pasta *0*



Fonte: Autor, 2023.

A pasta *System* é importante principalmente para a divisão do volume de controle. No arquivo *BlockMeshDict*, por exemplo, é adicionada as coordenadas a qual o *software* irá criar uma caixa com a malha dividida de acordo com as coordenadas também escolhidas no mesmo arquivo. Além disso, parâmetros como

tempo de a ser simulado, *timestep*, número de Courant e número de células da malha também são nomeados nesta pasta.

A pasta *constant* é alimentada com informações como a geometria do ciclone, modelo de turbulência, gravidade e propriedades das partículas e fluido. Sendo, portanto, como o próprio nome diz, uma pasta com informações que não serão modificadas ao decorrer das simulações no presente estudo.

Por fim, a pasta 0 apresenta informações iniciais do sistema a ser simulado, fazendo alusão ao tempo zero de simulação, além das condições de contorno. Nessa seção contém, por exemplo, a quantidade de ar e partículas em percentagem na alimentação, a forma como será calculado nut (viscosidade turbulenta), temperatura do sistema, condições de contorno de pressão, velocidade das partículas e ar, e os valores/chutes de k e ϵ .

3.5 Planejamento de experimentos

Na resolução numérica de problemas envolvendo CFD, é comumente avaliado a partir da utilização de planejamentos experimentais, principalmente devido ao tempo que será utilizado durante as simulações numéricas. Visto isso, obter dados apropriados que possam ser analisados por métodos estatísticos são de grande importância quando se pretende obter conclusões válidas e objetivas.

Algumas técnicas podem ser empregadas quando necessário fazer um planejamento experimental tendo destaque, por exemplo, às metodologias de análise de superfície de resposta com o Planejamento composto central (PCC) utilizado por diversos autores como Brandão (2019) em seu estudo intitulado “Investigação numérica e experimental do escoamento granular e dos fenômenos de segregação radial e axial em tambor rotatório”. Este método analisa a influência de fatores independentes nos resultados de um determinado estudo. De forma geral, um PCC para k fatores é formado por três tipos de pontos: Fatoriais, axiais e centrais.

Os pontos fatoriais são pontos de coordenadas $x_i = -1$ ou $x_i = +1$, sendo $i = 1, \dots, k$. A parte axial que consiste em pontos de coordenadas nulas exceto os valores de α e os pontos centrais codificados em zero para todas as coordenadas.

É possível calcular o número de experimentos através da soma dos pontos fatoriais, axiais e centrais (Equação 11). Além disso, as Equações 12 e 13 demonstram a relação para determinar o número de pontos fatoriais e axiais para um número k de fatores.

$$N = N_F + N_A + N_C \quad (11)$$

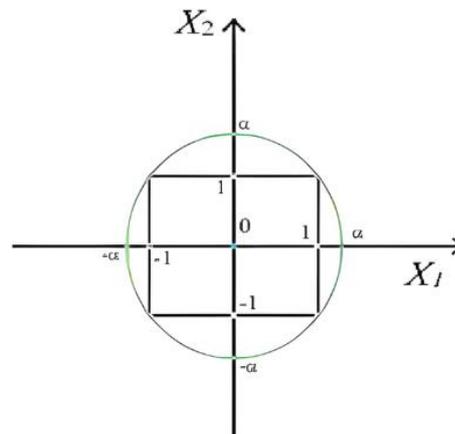
$$N_F = 2^{k-1} \quad (12)$$

$$N_A = 2k \quad (13)$$

Sendo N , N_F e N_A o número de simulações, pontos fatoriais e axiais respectivamente. Já o número de simulações no ponto central (N_C) é onde ocorre as replicações. Para experimentos práticos é comum replicar esse ponto a fim de obter um maior nível de confiança nos resultados.

Para uma simulação com $k = 2$ a Figura 8 mostra esquematicamente como é construído o planejamento tendo os pontos fatoriais em 1 e -1, os pontos axiais em coordenadas nulas e alfas e o ponto central em (0,0).

Figura 8- Modelo para um PCC de 2 fatores



Fonte: Autor, 2023.

4. METODOLOGIA

Esse trabalho consiste no estudo das proporções geométricas do diâmetro do *overflow*, *underflow*, altura da seção cônica, cilíndrica e *vortex finder*, para um separador ciclônico. Para tal, adotou-se a metodologia de resolução de um problema em CFD descrita por Versteeg e Malalaseka (2007). Essa sistemática descrita pelos autores pode ser dividida em 3 etapas: pré-processamento, resolução numérica e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento foram geradas as geometrias do problema e a sua discretização por meio da confecção da malha. Já na etapa de resolução numérica, ocorreu a discretização das equações diferenciais em cada volume de controle, resultado assim em um sistema de equações algébricas a serem resolvidas. Por fim, a etapa de pós-processamento consiste na visualização dos dados por meio de visualização gráfica e tratamento dos resultados.

4.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento é crucial para obter resultados precisos e confiáveis em uma simulação CFD. Nessa etapa é realizado o planejamento de experimentos, preparados os modelos geométricos a serem simulados e a confecção da malha. A seguir, nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 serão apresentados a metodologia aplicada nessas etapas.

4.1.1 Planejamento composto central

Nesse trabalho, optou-se pela utilização do Planejamento Composto Central (PCC) analisando 5 relações geométricas de interesse: D_o/D_c , D_u/D_c , L_2/D_c , L_3/D_c e V_f/D_c . A Tabela 2 apresenta o PCC proposto com os valores das variáveis avaliadas e os níveis adotados, culminando em 27 simulações, utilizando um alfa de rotabilidade de 2. Além disso, utilizou-se um ciclone cujo diâmetro da parte cilíndrica foi definido em 200 mm ($D_c = 200$ mm) e mantendo-se fixo a altura e raio de alimentação em $0,2 \cdot D_c$.

Tabela 2- Planejamento composto central para investigação de variáveis independentes sobre diferentes configurações geométricas em um separador ciclônico.

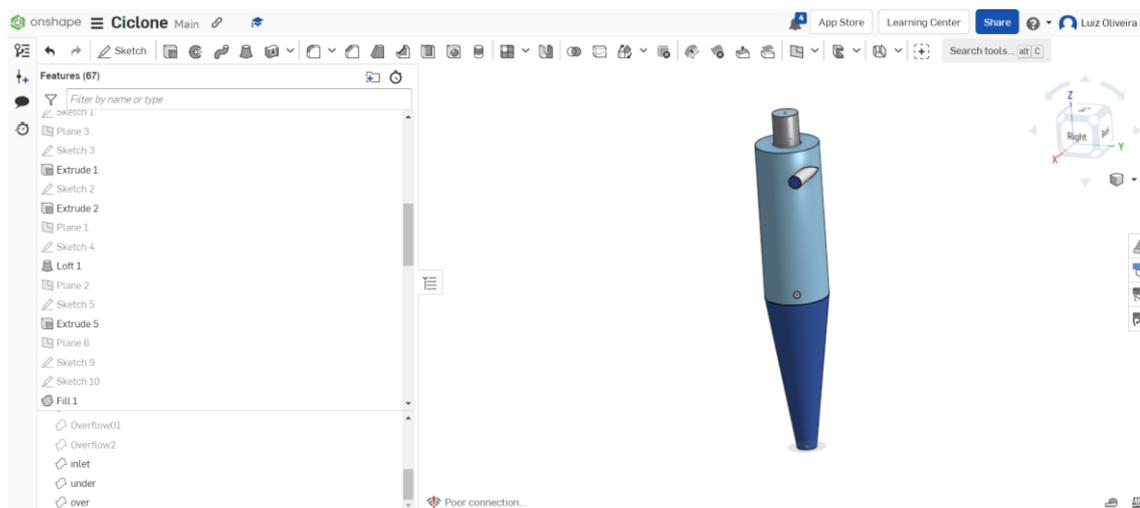
Simulação	Do/Dc	Du/Dc	L2/Dc	L3/Dc	Vf/Dc
1	0,3(-1)	0,2(-1)	1(-1)	1,5(-1)	0,7(1)
2	0,3(-1)	0,2(-1)	1(-1)	3,5(1)	0,3(-1)
3	0,3(-1)	0,2(-1)	2(1)	1,5(-1)	0,3(-1)
4	0,3(-1)	0,2(-1)	2(1)	3,5(1)	0,7(1)
5	0,3(-1)	0,4(1)	1(-1)	1,5(-1)	0,3(-1)
6	0,3(-1)	0,4(1)	1(-1)	3,5(1)	0,7(1)
7	0,3(-1)	0,4(1)	2(1)	1,5(-1)	0,7(1)
8	0,3(-1)	0,4(1)	2(1)	3,5(1)	0,3(-1)
9	0,5(1)	0,2(-1)	1(-1)	1,5(-1)	0,3(-1)
10	0,5(1)	0,2(-1)	1(-1)	3,5(1)	0,7(1)
11	0,5(1)	0,2(-1)	2(1)	1,5(-1)	0,7(1)
12	0,5(1)	0,2(-1)	2(1)	3,5(1)	0,3(-1)
13	0,5(1)	0,4(1)	1(-1)	1,5(-1)	0,7(1)
14	0,5(1)	0,4(1)	1(-1)	3,5(1)	0,3(-1)
15	0,5(1)	0,4(1)	2(1)	1,5(-1)	0,3(-1)
16	0,5(1)	0,4(1)	2(1)	3,5(1)	0,7(1)
17	0,2(-2)	0,3(0)	1,5(0)	2,5(0)	0,5(0)
18	0,6(-2)	0,3(0)	1,5(0)	2,5(0)	0,5(0)
19	0,4(0)	0,1(-2)	1,5(0)	2,5(0)	0,5(0)
20	0,4(0)	0,5(-2)	1,5(0)	2,5(0)	0,5(0)
21	0,4(0)	0,3(0)	0,5(-2)	2,5(0)	0,5(0)
22	0,4(0)	0,3(0)	2,5(-2)	2,5(0)	0,5(0)
23	0,4(0)	0,3(0)	1,5(0)	0,5(-2)	0,5(0)
24	0,4(0)	0,3(0)	1,5(0)	4,5(-2)	0,5(0)
25	0,4(0)	0,3(0)	1,5(0)	2,5(0)	0,1(-2)
26	0,4(0)	0,3(0)	1,5(0)	2,5(0)	0,9(-2)
27 (C)	0,4(0)	0,3(0)	1,5(0)	2,5(0)	0,5(0)

Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Geometria

A geometria dos ciclones simulados definidas na seção 4.1.1 foi gerada utilizando o Oneshape, *software* de sistema *computer-aided desing* (CAD) gratuito e disponibilizado em nuvem. A Figura 9 apresenta a vista isométrica de um separador ciclônico nesse ambiente.

Figura 9- Construção da geometria através do Onshape



Fonte: Autor, 2023.

4.1.3 Malha

Na geração das malhas foi utilizado o próprio OpenFoam através do comando *blockMesh* para geração das malhas. Tendo isso em vista, utilizou-se de um espaçamento máximo do elemento de 0,05m e nas regiões próximas a parede de 0,04m. A Tabela 3 apresenta a quantidade de elementos de cada ciclone construído.

Tabela 3- Número de elementos de malha em cada simulação.

Simulação	Nº de Elementos	Simulação	Nº de Elementos
1	100 936	15	199 412
2	143 208	16	257 260
3	150 152	17	157 100
4	195 112	18	199 068
5	185 052	19	147 188
6	181 732	20	223 016
7	183 732	21	118 578
8	234 268	22	219 708
9	118 616	23	117 480
10	166 200	24	216 460
11	173 158	25	166 460
12	212 792	26	171 890
13	152 820	27	169 148
14	202 732		

Fonte: Autor, 2023.

4.2 Resolução numérica

A etapa de resolução numérica é a etapa onde ocorre de fato a discretização das equações diferenciais em cada volume de controle (elemento de malha). Inicialmente realizou-se um teste de independência de malha a fim de garantir que os resultados obtidos independem da malha utilizada. Frente a isso, utilizou-se de 3 simulações no ciclone com dimensões definidas pelo ponto central do planejamento, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4- Malhas e números de elementos utilizados no teste de independência.

Malha	Número de elementos
Grosseira	62.044
Central	169.148
Refinada	477.746

Fonte: Autor, 2023.

Após o teste de independência de malha iniciou-se as simulações numéricas no Openfoam empregando o solucionador *multiphaseEulerFoam*, por ser um escoamento multifásico, sendo a fase fluida avaliada como incompressível e em regime transiente, e uma abordagem Euleriana. Devido ao escoamento altamente turbulento utilizou-se do modelo RANS kEpsilon, modelo este validado por Azadi (2010) em seu estudo sobre o efeito de tamanhos de ciclones sobre a eficiência de separação.

Já para a caracterização matemática das interações partícula-partícula e partícula-parede, foi aplicada a Teoria Cinética do Fluxo Granular (KTGF). Na região de entrada do ciclone (*inlet*) foi estabelecido o escoamento de uma mistura ar-partícula, com 1% v/v de sólidos. O tempo de simulação foi definido para o ciclone operar em estado estacionário, sendo estimado em 30 segundos, com um passo de tempo de 10^{-4} segundos. A Tabela 5 apresenta as principais configurações que foram utilizadas para cada simulação.

O computador que executou as simulações possuía um processador AMD Ryzen 9 5900 3.7 GHz (32 GB de memória RAM) e uma placa de vídeo GTX 1660. Além disso, utilizou-se de 12 núcleos que executaram as simulações em paralelo.

Tabela 5- Configurações de simulação

Corrente de alimentação		
Velocidade	20	m/s
Pressão absoluta	101125	Pa
Fração volumétrica do ar	0,99	-
Fração volumétrica das partículas	0,01	-
Condições de contorno		
Zona	Tipo	
entrada	<i>velocity-inlet</i>	
overflow	<i>pressure-outlet</i>	
underflow	<i>pressure-outlet</i>	
parede	<i>wall (no-slip)</i>	
Esquema de interpolação		
Gradiente	2ª ordem <i>upwind</i>	
Momento	2ª ordem <i>upwind</i>	
Fração volumétrica	2ª ordem <i>upwind</i>	
Energia cinética turbulenta	2ª ordem <i>upwind</i>	
Taxa de dissipação turbulenta	2ª ordem <i>upwind</i>	
Tensores de Reynolds	2ª ordem <i>upwind</i>	
Regime transiente		

Fonte: Autor, 2023.

4.3 Pós processamento

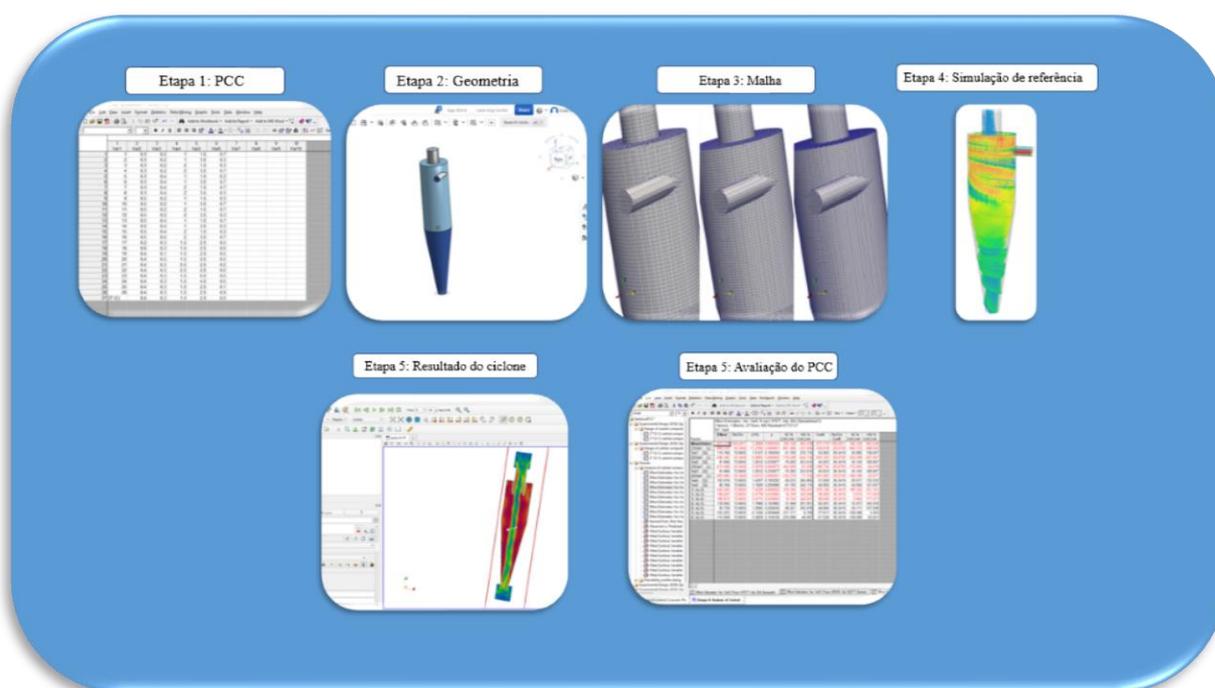
Na etapa de pós processamento utilizou-se de três ferramentas: os *softwares* Paraview 5.11 e Statistica 10 e a linguagem de programação Python. O Paraview tem por principal função facilitar a visualização e analisar grande conjunto de dados. Além disso, a ferramenta permite a visualização de diversas camadas específicas de resultados, alterando e personalizando parâmetros como tamanho, cor, transparência, rotação de câmera, etc.

A utilização da linguagem de programação Python é versátil e permitiu analisar os resultados fornecidos diretamente pelo Openfoam e com interface com o Paraview. Para esse trabalho algumas bibliotecas tiveram destaque em sua utilização, Pandas, que tem o objetivo de facilitar a interpretação e manipulação de conjuntos de dados e *Numpy*, essencial em análises matemáticas estatísticas de estruturas de dados complexos, como vetores e matrizes, bem comuns no presente estudo. Por fim, a utilização do Statistica foi imprescindível na construção do PCC e análise do mesmo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao estudo fluidodinâmico e da eficiência de separação em ciclones com diferentes relações geométricas. Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados, é apresentado na Figura 10 o fluxograma das etapas realizadas.

Figura 10- Fluxograma de avaliação de resultados



Fonte: Autor, 2023.

5.1 Criação da geometria

A seguir serão apresentados os resultados referentes à criação da geometria utilizando o planejamento composto central (Tabela 6). A fim de evidenciar a influência de cada parâmetro estudado, os resultados são apresentados para seus respectivos alfas de rotabilidade onde há maior discrepância da configuração estudada.

Tabela 6- Configurações geométricas do PCC em seus pontos axiais

Variável	Simulações	Configuração geométrica	
Do	17 e 18		
Du	19 e 20		
L2	21 e 22		
L3	23 e 24		
Vf	25 e 26		

Fonte: Autor,2023.

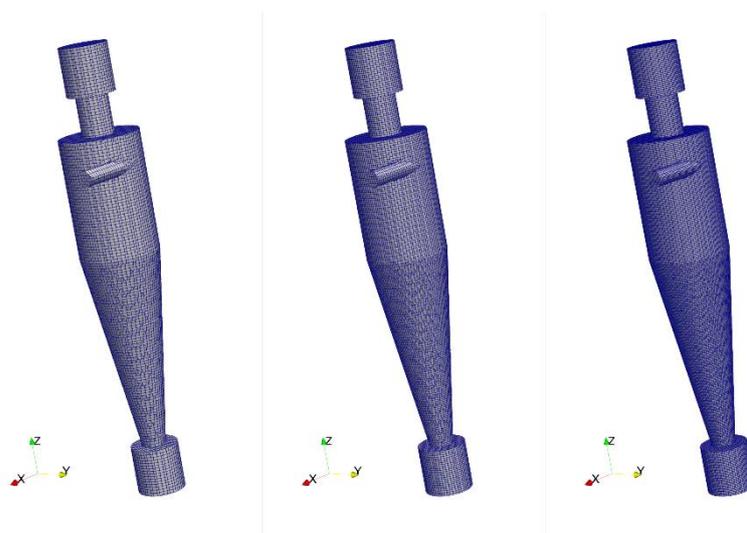
Os projetos de cada ciclone podem ser visualizados individualmente no Anexo

I.

5.2 Teste de independência de malha

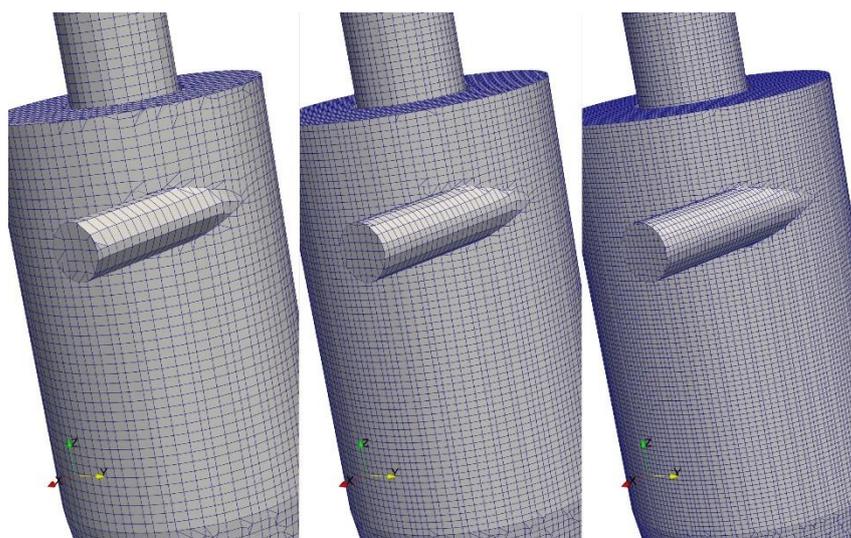
A priori da avaliação das relações geométricas do ciclone, foi realizado o teste de independência de malha a fim de verificar sua influência nos resultados da simulação trazendo respostas fidedignas e que, por outro lado, não aumentem desnecessariamente o esforço computacional. Sendo assim, as Figuras 11 e 12 apresentam as malhas utilizadas no teste.

Figura 11- Ciclones de referência utilizados no teste de independência de malha



Fonte: Autor, 2023.

Figura 12- Vista aproximada da malha dos ciclones de referência



Fonte: Autor, 2023

Posto isso, segundo Freitas (2009) e Almeida (2015) alguns parâmetros como a avaliação dos perfis de pressão e aceleração são importantes para garantir a

independência de malha. A Tabela 7 mostra o número de elementos em cada malha e a queda de pressão observada nos respectivos ciclones.

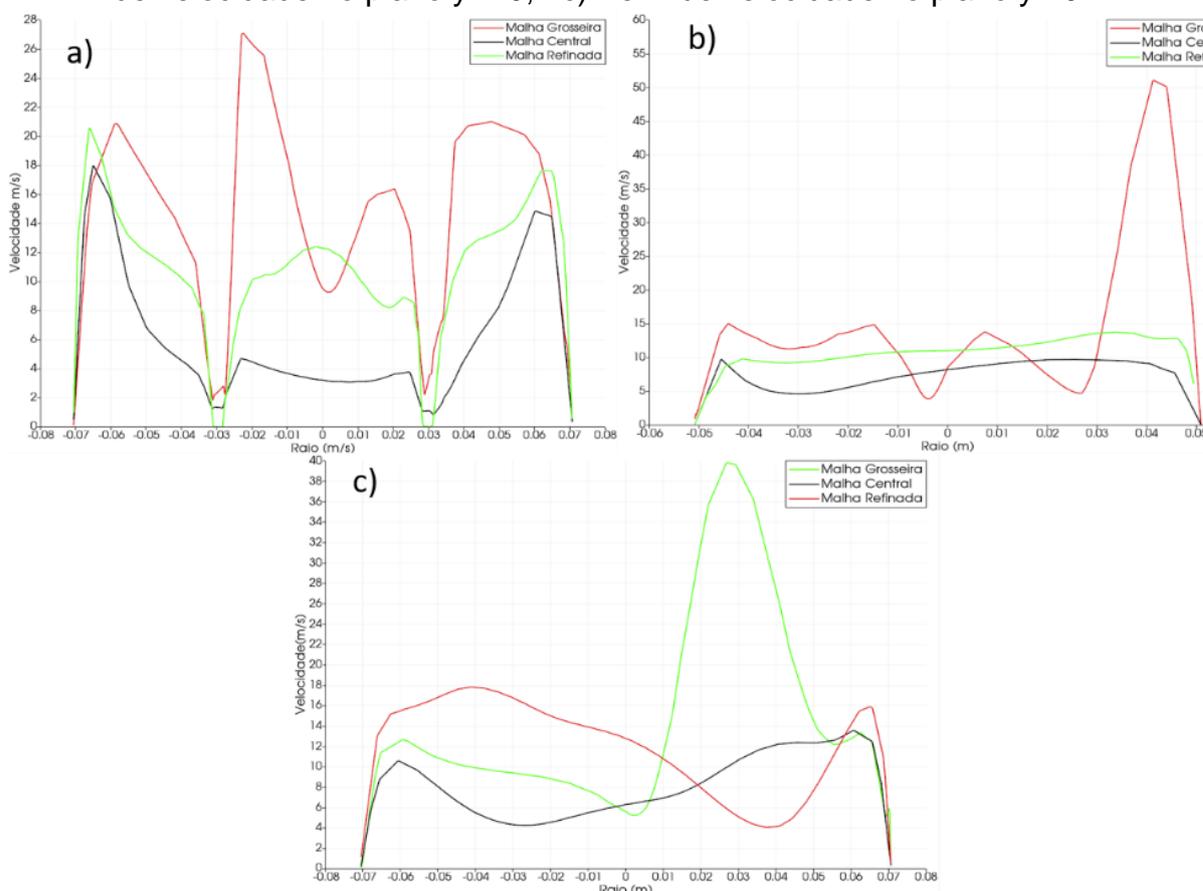
Tabela 7- Resultados de queda de pressão no teste de independência de malha

Malha	Número de elementos	Queda de Pressão (Pa)
Grosseira	62.044	1753
Central	169.148	103
Refinada	477.746	339

Fonte: Autor, 2023

A partir da análise da Tabela 7, observa-se que a queda de pressão é acentuada na malha grosseira tendo seu resultado minimizado na simulação central. Fica evidente então que o sistema que terá menor perda de carga é a malha central, sendo essa, portanto, a mais adequada quando analisado apenas esse parâmetro. Todavia, apesar de apresentar o melhor resultado, não é possível concluir que essa resposta é a mais adequada a ser utilizada, por conta disso, realizou-se também a análise no perfil de velocidade (Figura 13) nas malhas estudadas.

Figura 13- Perfis de velocidade no ciclone. a) Velocidade no plano $y=0,2$ b) Perfil de velocidade no plano $y=-0,2$ c) Perfil de velocidade no plano $y=0$.

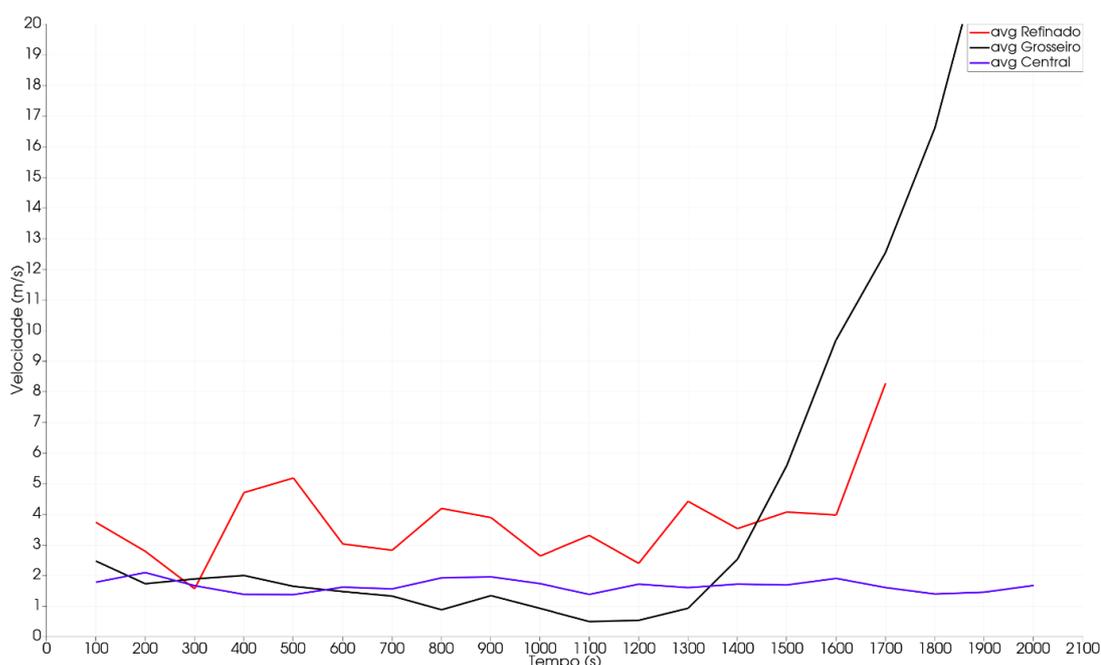


Fonte: Autor, 2023.

Ao avaliar os perfis de velocidade reforça-se que o refino da malha é significativo nos resultados da simulação. Nesse sentido, nota-se que os perfis de velocidade da malha grosseira demonstram maior instabilidade obtendo maiores variações observando a Figura 13 (a). Além disso, os resultados obtidos nos cortes abaixo e no plano central, para a malha grosseira, demonstram uma possível instabilidade numérica ao obter-se picos de velocidade duas vezes maiores que a velocidade de entrada do fluido (20m/s).

Quando observado o perfil da malha refinada e central observa-se uma tendência de proximidade entre elas, notando uma possível estabilidade numérica para esses casos. Assim sendo, visando verificar qual malha seria adequada a ser utilizada na simulação, a Figura 14 mostra os perfis de velocidade no *underflow* ao longo do tempo para as malhas estudadas.

Figura 14- Variação de velocidade no *underflow* com o tempo



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 14 demonstra que a malha grosseira apresenta instabilidade numérica em aproximadamente 1300s, sendo essa inadequada para o presente estudo. Já quando analisado a malha central e refinada, a malha central apresenta maior estabilidade numérica adequada quando comparada a refinada.

Cabe ressaltar também que alguns parâmetros podem influenciar a qualidade dos resultados como, por exemplo, a razão do refino da malha aplicada nas regiões

próximas às paredes. Essa técnica de refinamento próximo as paredes são aplicadas a fim de capturar o comportamento detalhado do fluido em regiões onde ocorrem mudanças bruscas nas propriedades do fluido. Tendo isso em vista, a região próxima a parede tem um escoamento lento e com perturbações que podem gerar turbulência em menor escala, vórtices e gradientes de pressão acentuados, sendo assim necessário maior refinamento de malha e conseqüentemente maior poder computacional e eficiência numérica.

Como a malha central apresentou resultados satisfatórios para pressão, perfil de velocidade ao longo da geometria e perfil de velocidade no *underflow*, conclui-se que esse refinamento é adequado para o presente estudo e pode ser utilizado sem alterações nos resultados das simulações.

Do mesmo modo, um outro parâmetro importante a ser analisado em todas as simulações e que garante a estabilidade numérica é a qualidade da malha. Frente a isso, essa verificação foi realizada através do comando *checkMesh* no OpenFoam, utilizando a qualidade de malha proposta pelo próprio *software* e disponível na pasta *system->meshQualityDict*. O resultado obtido para um dos testes está apresentado na Figura 15.

Figura 15- Resultado para a qualidade da malha

```

File Edit View Search Terminal Help
Mesh stats
points: 167468
faces: 485901
internal faces: 463244
cells: 159882
faces per cell: 5.93653
boundary patches: 4
point zones: 0
face zones: 0
cell zones: 0

Overall number of cells of each type:
hexahedra: 158833
prisms: 6973
wedges: 0
pyramids: 0
tet wedges: 16
tetrahedra: 0
polyhedra: 2060
Breakdown of polyhedra by number of faces:
faces: number of cells
4 1882
5 978

Checking topology...
Boundary definition OK.
Cell to face addressing OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.
Face vertices OK.
Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
Patch Faces Points Surface topology
inlet 50 57 ok (non-closed singly connected)
walls 18863 10160 ok (non-closed singly connected)
overflow 2224 2225 ok (non-closed singly connected)
underflow 2320 2313 ok (non-closed singly connected)

Checking geometry...
Overall domain bounding box (-0.1 -0.1 -0.62) (0.158003 0.108105 0.52)
Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (5.59676e-16 -8.50221e-16 2.85993e-17) OK.
Max cell openness = 3.80745e-16 OK.
Max aspect ratio = 4.31336 OK.
Minimum face area = 2.65046e-07. Maximum face area = 8.98148e-05. Face area magnitudes OK.
Min volume = 1.37181e-08. Max volume = 3.14741e-07. Total volume = 0.0199044. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 49.2769 average: 3.73689
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 3.74449 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

End

```

Fonte: Autor, 2023.

Analisando, por exemplo, a não ortogonalidade observa-se que se obteve um valor máximo de 49,27 estando dentro do valor estipulado de 65 no *meshQualityDict*. Já quando avaliado o *skewness*, limitado até no máximo 4 obteve-se um valor de 3,74 estando também de acordo com o esperado. Frente a isso, as análises aqui realizadas poderiam ser realizadas em todos os parâmetros escolhidos, além disso, a importância de cada parâmetro está descrita na seção 3.3.1.

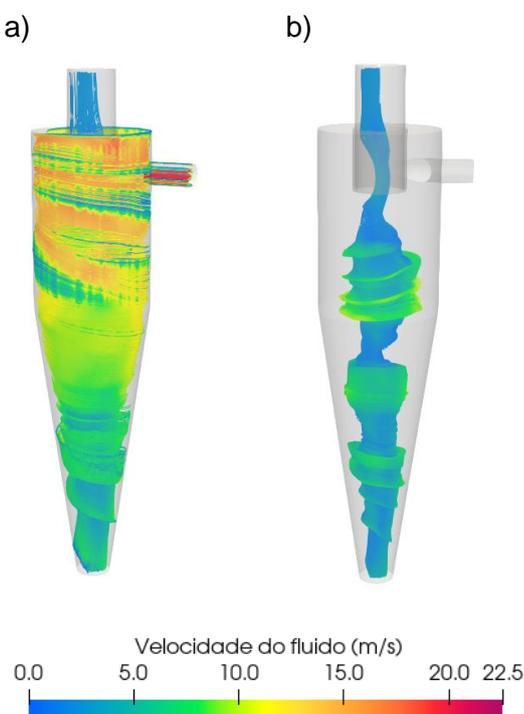
5.3 Simulação com ciclone de referência

O ponto central do planejamento, ciclone 27, é um importante parâmetro de comparação entre os casos estudados. Diante disso, neste tópico serão apresentadas análises dos resultados obtidos para esta configuração.

i) Avaliação qualitativa: Linhas de corrente

O ciclone é um equipamento com uma alimentação tangencial a face lateral e têm duas saídas, *overflow* e *underflow*. A Figura 16 mostra as linhas de corrente de fluido no interior do equipamento.

Figura 16- Linhas de corrente do ciclone de referência a) Linha de todo ciclone b) Linhas do vórtex ascendente



Fonte: Autor, 2023.

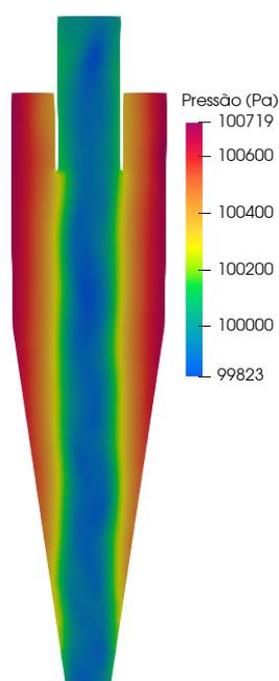
É possível notar a formação do vórtex descendente nas regiões periféricas do ciclone que se forma devido a geometria circular da seção cilíndrica e cônica. O fluxo de gás ao chegar à região do *underflow* forma o vórtex ascendente que flui pelo *overflow*. Assim, observa-se que esse comportamento citado é típico e qualitativamente esperado nesse tipo de equipamento.

Com o intuito de melhor compreender a dinâmica do escoamento no interior deste equipamento variáveis como queda de pressão e perfis de velocidade foram avaliadas.

ii) Queda de Pressão

A queda de pressão é uma variável importante para a otimização do ciclone e está diretamente relacionada com a perda de carga. A Figura 17 apresenta o comportamento da pressão no interior do equipamento, sendo possível notar na região periférica com maior gradiente de pressão. Esse comportamento se dá pelo movimento altamente rotacional do fluido nas regiões próximas as paredes, gerando assim um aumento de pressão na direção radial. Ademais, observando a região central pode-se constatar uma zona de menor pressão, que gera o vórtex ascendente no ciclone.

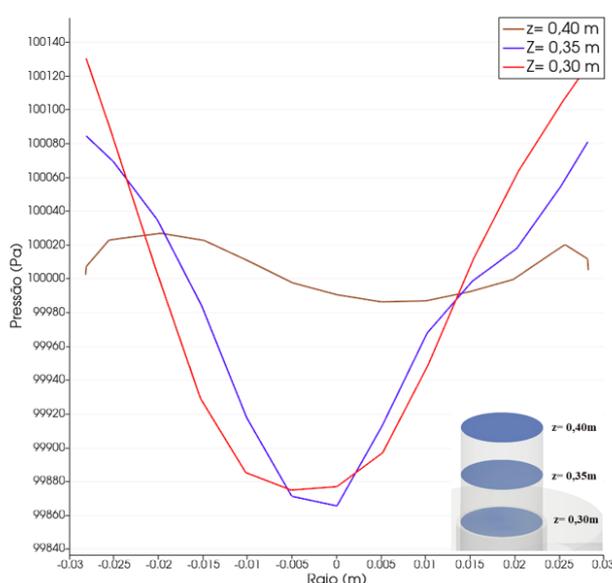
Figura 17- Perfil de pressão do ciclone de referência



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, uma outra característica importante a ser estudada é a queda de pressão no *overflow* (Figura 18). Nessa região o gradiente de pressão diminui com o aumento da altura do *vortex finder*. Esse comportamento é resultado da fricção fluido-parede, gerando perda de carga, e diminuindo gradativamente o delta de pressão na superfície. Sendo assim, a superfície de saída do fluido tende a ter um comportamento linear, influenciado pela aproximação da saída do ciclone, que é constante. Ambos os comportamentos citados, no interior do ciclone e *vortex finder*, estão condizentes e são esperados para o comportamento do ciclone.

Figura 18- Perfil de pressão no *overflow*



Fonte: Autor, 2023

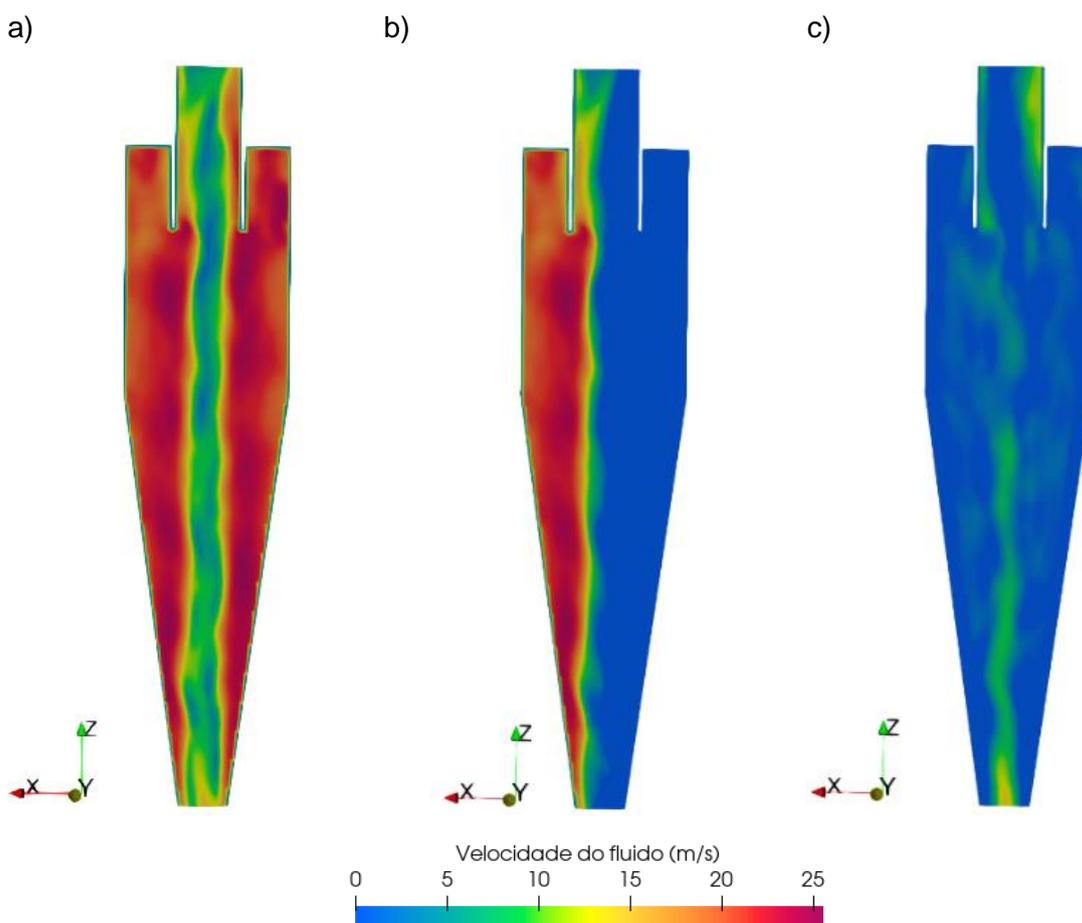
iii) Perfis de Velocidade

A análise da velocidade também é um importante parâmetro a ser avaliado no estudo de um ciclone. A Figura 19 apresenta o comportamento da velocidade do fluido tangencial e axiais em y e z no interior do equipamento.

É possível observar que a velocidade tangencial alcançada é superior velocidade média de entrada do fluido, evidenciando a importância do estudo dessa variável. O perfil de velocidade, em Figura 19 (a), cresce com o raio do equipamento, atingindo seu pico e decrescendo até aderir a velocidade nula da parede, corroborando com a condição de não deslizamento especificada na parede. Além disso, vale ressaltar que as velocidades estão em magnitude, por conta disso não há velocidades negativas no sistema.

Na Figura 19 (b) a velocidade está expressa em y , é possível então notar o movimento anti-horário do fluido tendo sua corrente acentuada em apenas um lado do ciclone. Já na Figura 19 (c) podemos notar a corrente de gás ascendente formada no *underflow* evidenciando a formação do vórtex de recuperação de fluido purificado.

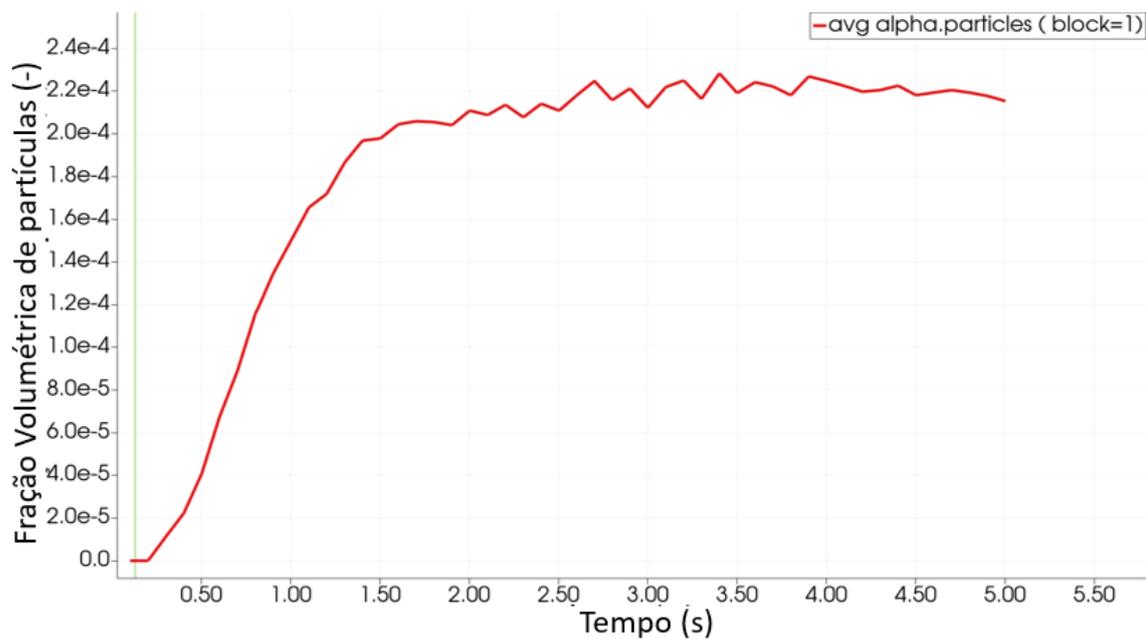
Figura 19- Perfis de velocidade no ciclone de referência. a) Velocidade tangencial b) Velocidade axial em y c) Velocidade axial em z



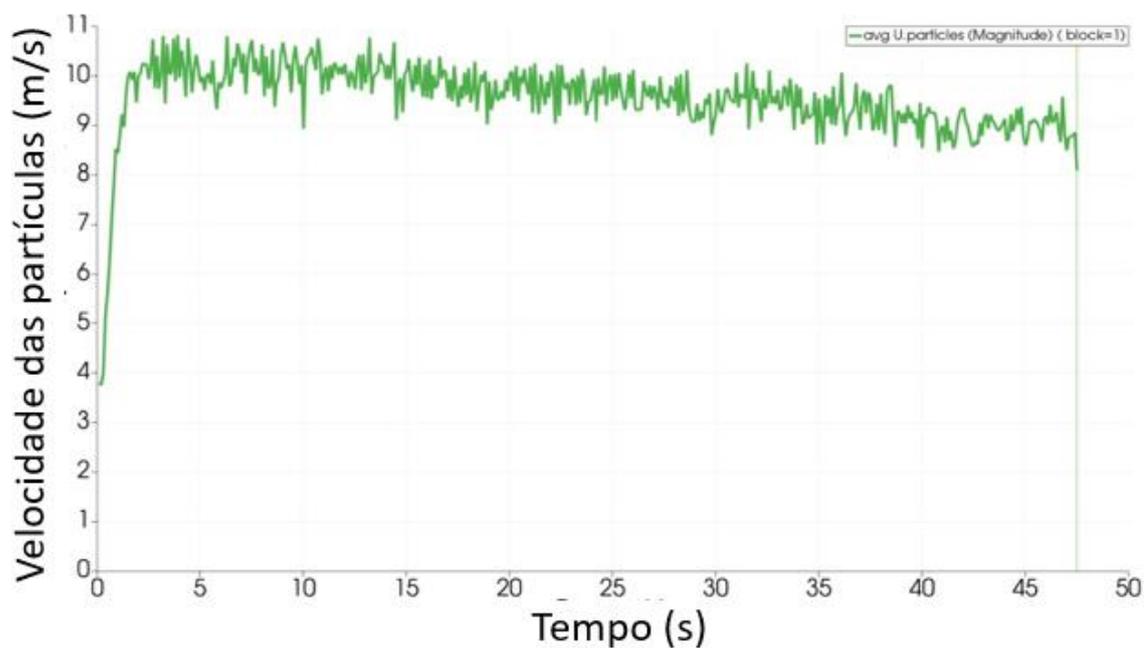
Fonte: Autor, 2023.

iv) Estado estacionário

A verificação do estado estacionário nas simulações adveio da análise dos gráficos de fração de partículas e velocidade no *underflow*. As Figuras 20 e 21 mostram esses resultados para o ciclone 27.

Figura 20- Fração de partículas no *underflow*

Fonte: Autor, 2023.

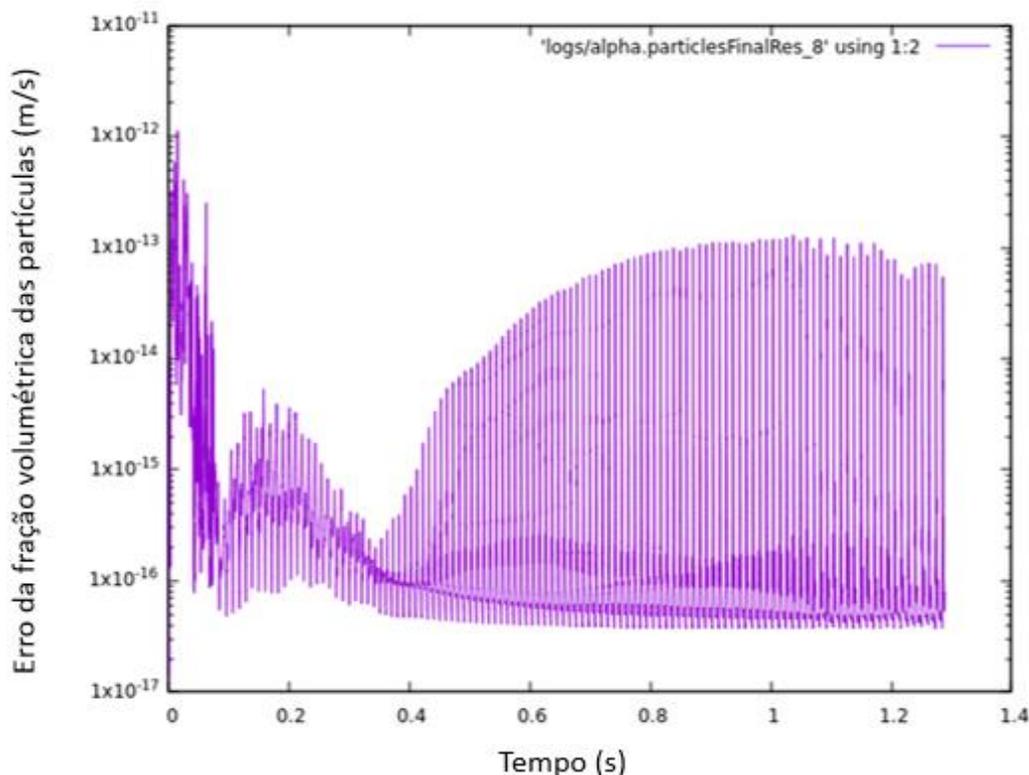
Figura 21- perfil de velocidade no *underflow*

Fonte: Autor, 2023.

Além dos gráficos de velocidade e fração das partículas no *underflow* a convergência numérica também foi acompanhada pelo gráfico de resíduos adotando

um critério de convergência de 10^{-4} . A Figura 22 mostra o gráfico de resíduos para a fração de partículas onde é possível notar que há a convergência, uma vez que ao longo de toda a simulação os resíduos foram inferiores ao critério estabelecido.

Figura 22- Erro ao longo do tempo da fração de partículas.



Fonte: Autor, 2023.

5.4 Avaliação das características geométricas de separadores ciclônicos

Os resultados para a eficiência total de separação e queda de pressão nas simulações avaliadas foram determinados (Tabela 8) com o auxílio do *software* de pós-processamento *Paraview* e quantificados através do *script* em Python (Figura 23).

Tabela 8- Resultados para eficiência de separação e queda de pressão nos ciclones estudados

Simulação	Fatores					Respostas	
	Do/Dc	Du/Dc	L2/Dc	L3/Dc	Vf/Dc	S (%)	Queda de pressão (Pa)
1	-1	-1	-1	-1	1	36,32	2523
2	-1	-1	-1	1	-1	91,23	1969
3	-1	-1	1	-1	-1	87,32	1923
4	-1	-1	1	1	1	88,41	1214
5	-1	1	-1	-1	-1	92,47	881
6	-1	1	-1	1	1	67,98	738
7	-1	1	1	-1	1	94,72	685
8	-1	1	1	1	-1	66,39	559
9	1	-1	-1	-1	-1	22,59	706
10	1	-1	-1	1	1	79,29	599
11	1	-1	1	-1	1	91,92	473
12	1	-1	1	1	-1	24,37	657
13	1	1	-1	-1	1	14,38	586
14	1	1	-1	1	-1	38,61	467
15	1	1	1	-1	-1	20,90	494
16	1	1	1	1	1	36,83	444
17	-2	0	0	0	0	43,47	1357
18	2	0	0	0	0	10,43	374
19	0	-2	0	0	0	75,81	1285
20	0	2	0	0	0	61,67	372
21	0	0	-2	0	0	22,81	964
22	0	0	2	0	0	28,89	693
23	0	0	0	-2	0	42,99	1059
24	0	0	0	2	0	39,48	647
25	0	0	0	0	-2	32,18	809
26	0	0	0	0	2	23,81	802
27 (C)	0	0	0	0	0	78,65	743

Fonte: Autor, 2023.

Figura 23- Recorte de um do script em Python utilizado para coleta de dados quantitativos.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 path = "/home/n002/Documents/multi_cyclone/"
6 diametro_overflow = [60,60,60,60,60,60,60,100,100,100,100,100,100,100,40,120,80,80,80,80,80,80,80,80] #mm
7 diametro_underflow = [40, 40, 40, 40, 80, 80, 80, 80, 40, 40, 40, 40, 80, 80, 80, 80, 60, 60, 20, 100, 60, 60 , 60, 60, 60 , 60, 60] #mm
8
9 for i in range(1,28,1):
10     if i!=29:
11         try:
12             print(f"INICIANDO SIMULAÇÃO {i}")
13
14             path_inlet = path+f'{i}/dados_inlet_{i}.csv'
15             path_overflow = path+f'{i}/dados_overflow_{i}.csv'
16             path_underflow = path+f'{i}/dados_underflow_{i}.csv'
17
18             inlet_df = pd.read_csv(path_inlet)
19             overflow_df = pd.read_csv(path_overflow)
20             underflow_df = pd.read_csv(path_underflow)
21
22             dp = inlet_df.loc[:, 'avg(p)'].values - overflow_df.loc[:, 'avg(p)']
23
24             area_inlet = np.pi*(40**2)/4 #mm²
25             area_overflow = np.pi*(np.array(diametro_overflow)**2)/4 #mm²
26             area_underflow = np.pi*(np.array(diametro_underflow)**2)/4 #mm²
27
28
29             vMassica_inlet_p = ((area_inlet/(10**6))*20)*inlet_df.loc[:, 'avg(U.particles (Magnitude))']*800 #kg/s
30             vMassica_overflow_p = ((area_overflow[i-1]/(10**6))*overflow_df.loc[:, 'avg(U.particles (Magnitude))']*800 #kg/s
31             vMassica_underflow_p = ((area_underflow[i-1]/(10**6))*underflow_df.loc[:, 'avg(U.particles (Magnitude))']*800 #kg/s
32             mass_balance_p = vMassica_inlet_p-vMassica_overflow_p-vMassica_underflow_p
33

```

Fonte: Autor, 2023.

Buscando uma melhor compreensão a respeito das variáveis independentes (fatores) sobre as variáveis resposta é discutido no tópico 5.4.1 a influência individual de cada uma delas.

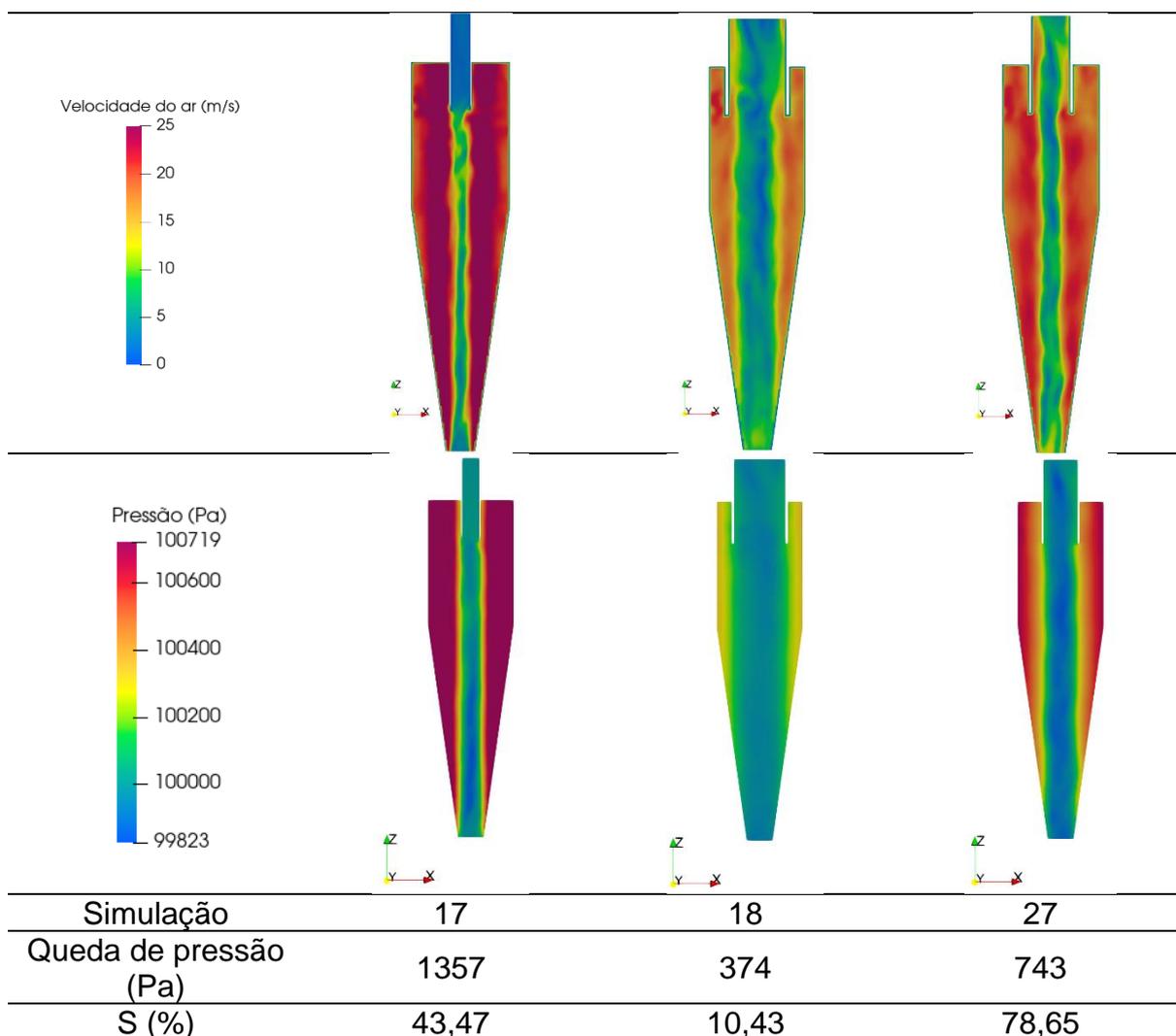
5.4.1 Efeito individual dos níveis

Estudar o efeito combinado dos parâmetros se torna uma tarefa dispendiosa devido aos complexos padrões de escoamento no interior do equipamento. Frente a isso, com o objetivo de simplificar a interpretação dos resultados, a influência de cada característica geométrica foi avaliada individualmente nas simulações 17 a 26. Desse modo, os tópicos a seguir apresentam a análise individual de cada um destes parâmetros.

i) Análise do efeito do diâmetro do *overflow* (Do)

O diâmetro do *overflow* pode ser analisado individualmente comparando as simulações 17 e 18 (Tabela 9), os quais correspondem a relação Do/Dc igual a 0,2 e 0,6, respectivamente.

Tabela 9- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 17,18 e 27.



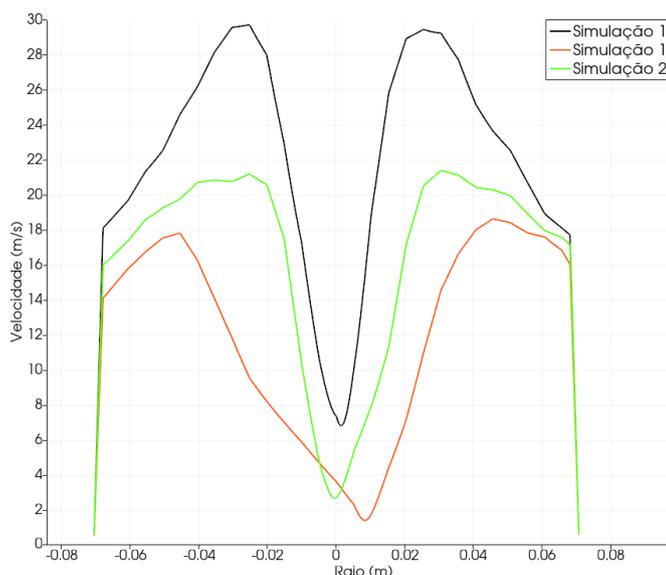
Fonte: Autor, 2023.

A partir da verificação da Tabela 9, é possível notar que na simulação 17 a velocidade e pressão do sistema são maiores, comparados aos resultados obtidos nas simulações 18 e 27, o que está de acordo com o esperado devido a diminuição do diâmetro do overflow. Já na simulação 18 a velocidade e pressão do sistema é menos acentuada o que diminuiu a eficiência de separação do ciclone.

Ao avaliar os resultados apresentados na Tabela 9, observa-se que ao elevar o diâmetro do *overflow* a eficiência separação apresenta um comportamento não linear, evidenciando que existe um diâmetro ótimo entre os limites avaliados que seria adequado a ser utilizado. Essa observação é reforçada quando observamos os resultados do ciclone 27 o qual obtém uma melhor eficiência de separação tendo o diâmetro do *overflow* no ponto central.

As constatações citadas anteriormente também podem ser observadas na Figura 24, que mostra o perfil de velocidade no plano de interseção entre a parte cilíndrica e cônica do separador ciclônico. Tendo isso em vista, o perfil apresentado mostra um aumento gradativo da velocidade do fluido até atingir uma velocidade máxima entre a parede e centro do ciclone.

Figura 24- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 17, 18 e 27.



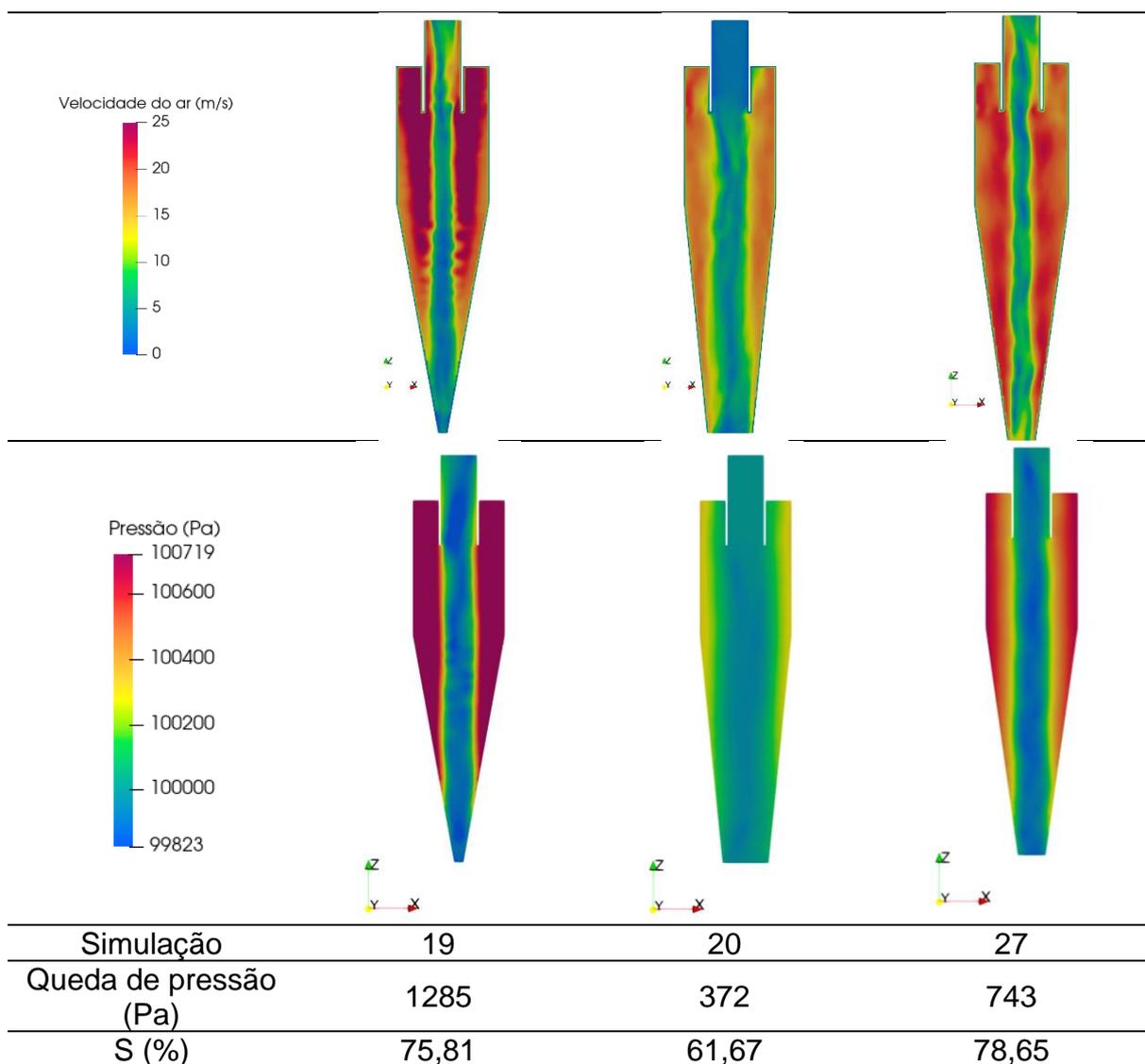
Fonte: Autor, 2023.

ii) Análise do efeito do diâmetro do *underflow* (D_u)

O diâmetro do *underflow* pode ser analisado individualmente comparando as simulações 19 e 20 (Tabela 10), os quais correspondem a relação D_u/D_c igual a 0,1 e 0,5, respectivamente.

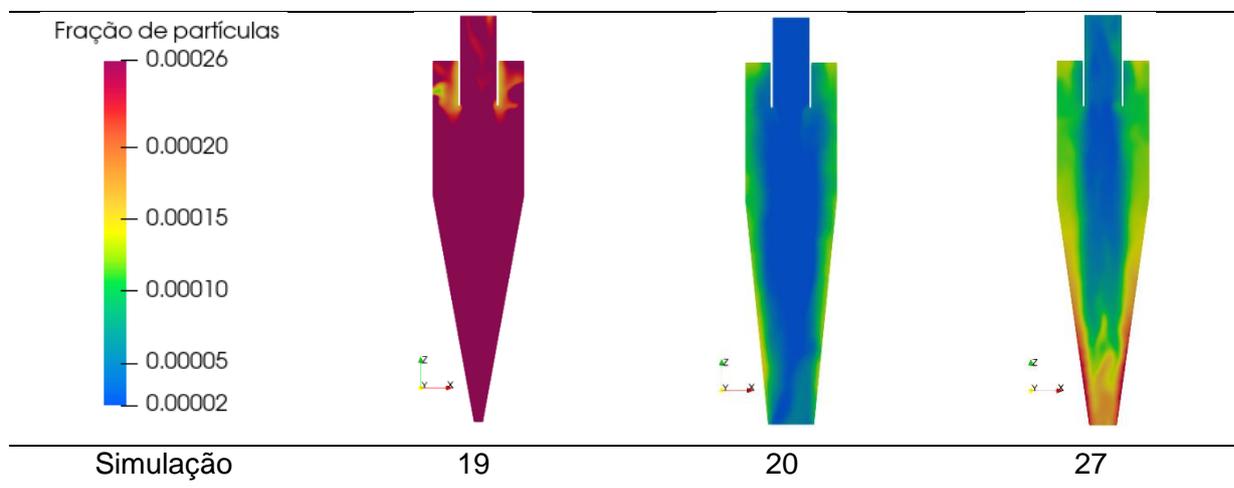
A verificação da Tabela 11 permite notar que a redução do diâmetro do *underflow*, que implica na restrição do fluxo material, acarreta no aumento da velocidade no interior do ciclone. O aumento da velocidade pode criar zonas de baixa pressão no ciclone, resultando na queda de pressão geral. Entretanto, a redução do diâmetro do *underflow* pode também gerar obstrução na saída de material, o que aumenta a resistência do fluxo do fluido, gerando uma queda de pressão adicional. Esses resultados são corroborados pela análise da concentração volumétrica de partículas no ciclone (Tabela 12), sendo a simulação 19 aquela que apresenta o maior valor quando comparado com as simulações 20 e 27.

Tabela 10- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 19,20 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

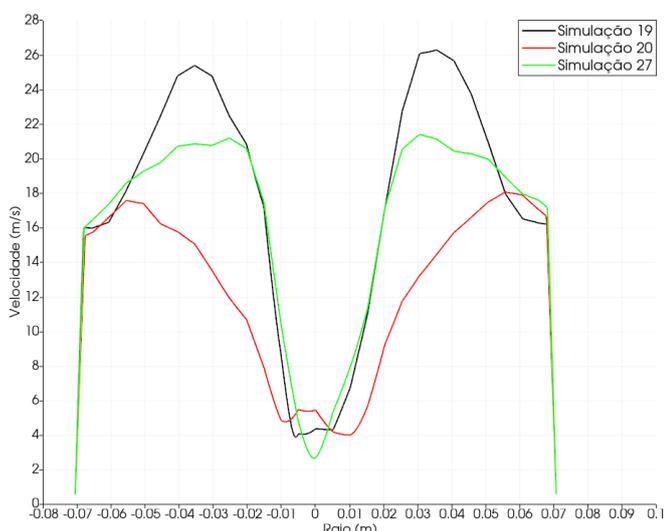
Tabela 11- Fração volumétrica de partículas no interior dos ciclones 19, 20 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 25 mostra a relação da velocidade do fluido no interior dos ciclones no plano de interseção entre a parte cilíndrica e cônica. É possível notar que o ciclone 19, que atinge maior pressão nas regiões periféricas, também atinge maior velocidade. À medida que o fluxo de ar é dirigido para o centro do ciclone, ele é acelerado e há a geração da zona de baixa pressão no centro, nos casos estudados nessa seção quanto menor é o diâmetro do *underflow* maior é a velocidade do fluido e conseqüentemente maior a pressão. Essa relação é fundamental e esperada para o funcionamento de um ciclone e também explica a maior queda de pressão no ciclone 19 e a menor no ciclone 20.

Figura 25- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 19, 20 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

iii) Análise do efeito da altura da seção cilíndrica (L2)

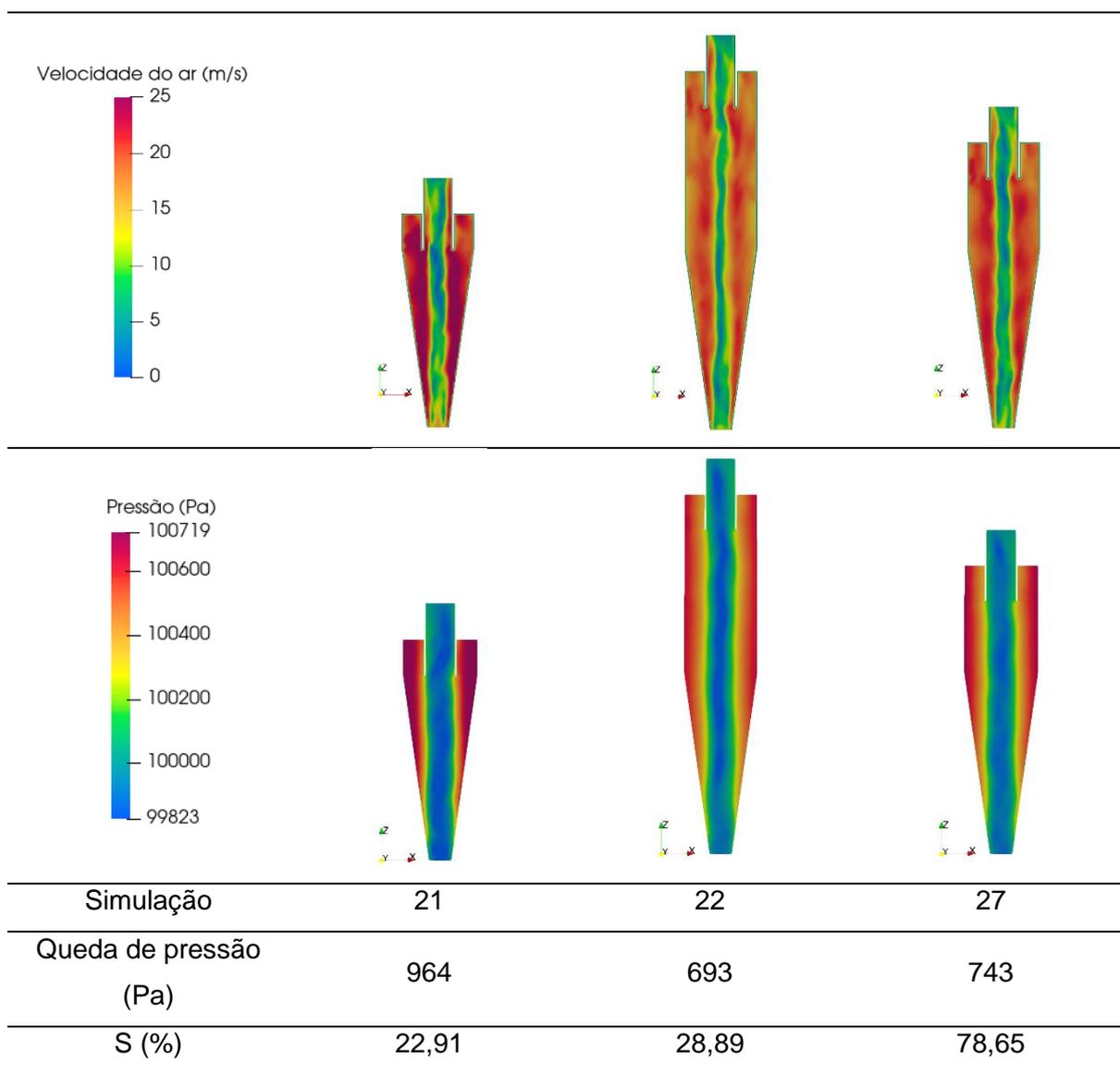
A altura da seção cilíndrica pode ser analisada individualmente comparando as simulações 21 e 22 (Tabela 12), os quais correspondem a relação $L2/D_c$ iguais a 0,5 e 2,5, respectivamente.

A seção cilíndrica de um separador ciclônico é responsável pela distribuição uniforme do fluido de gás e partículas que entram no equipamento. Por conta disso, a seção cônica deve ser menor que a cilíndrica pois é na cônica onde ocorre a maior aceleração do fluido, gerando assim maior separação das partículas.

Quando avaliado a Tabela 12 nota-se que a simulação 22 obteve maior queda de pressão e velocidade, esse resultado é refletido pela influência dos fenômenos

dissipativos da seção cilíndrica do ciclone. Essa observação também pode ser constatada ao avaliar o ciclone 21, a qual obtém maior perfil de velocidade e pressão pela minimização da seção cilíndrica, em contrapartida o direcionamento das partículas nesse ciclone não se deu de forma adequada, resultado esse que pode ser observado pelo resultado da eficiência de separação.

Tabela 12- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 21, 22 e 27.

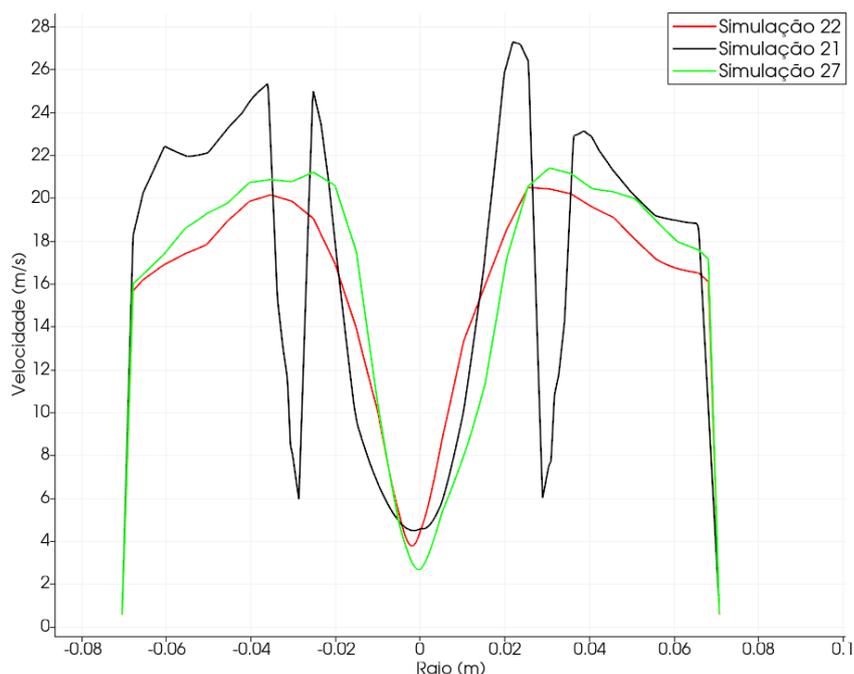


Fonte: Autor, 2023

O perfil de velocidade também pode ser analisado através da Figura 26. A simulação 27 apresenta três vales em seu perfil, esse comportamento é resultado da proximidade da interseção da seção cônica e cilíndrica, a qual foi realizado o corte, sendo esse resultado condizente com o que era esperado.

Ademais, nota-se que existe uma altura ótima entre os limites avaliados que seria adequada a ser utilizada, essa observação é reforçada quando observamos os resultados do ciclone 27 o qual obtém uma melhor eficiência de separação tendo a altura da seção cilíndrica no ponto central.

Figura 26- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 21, 22 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

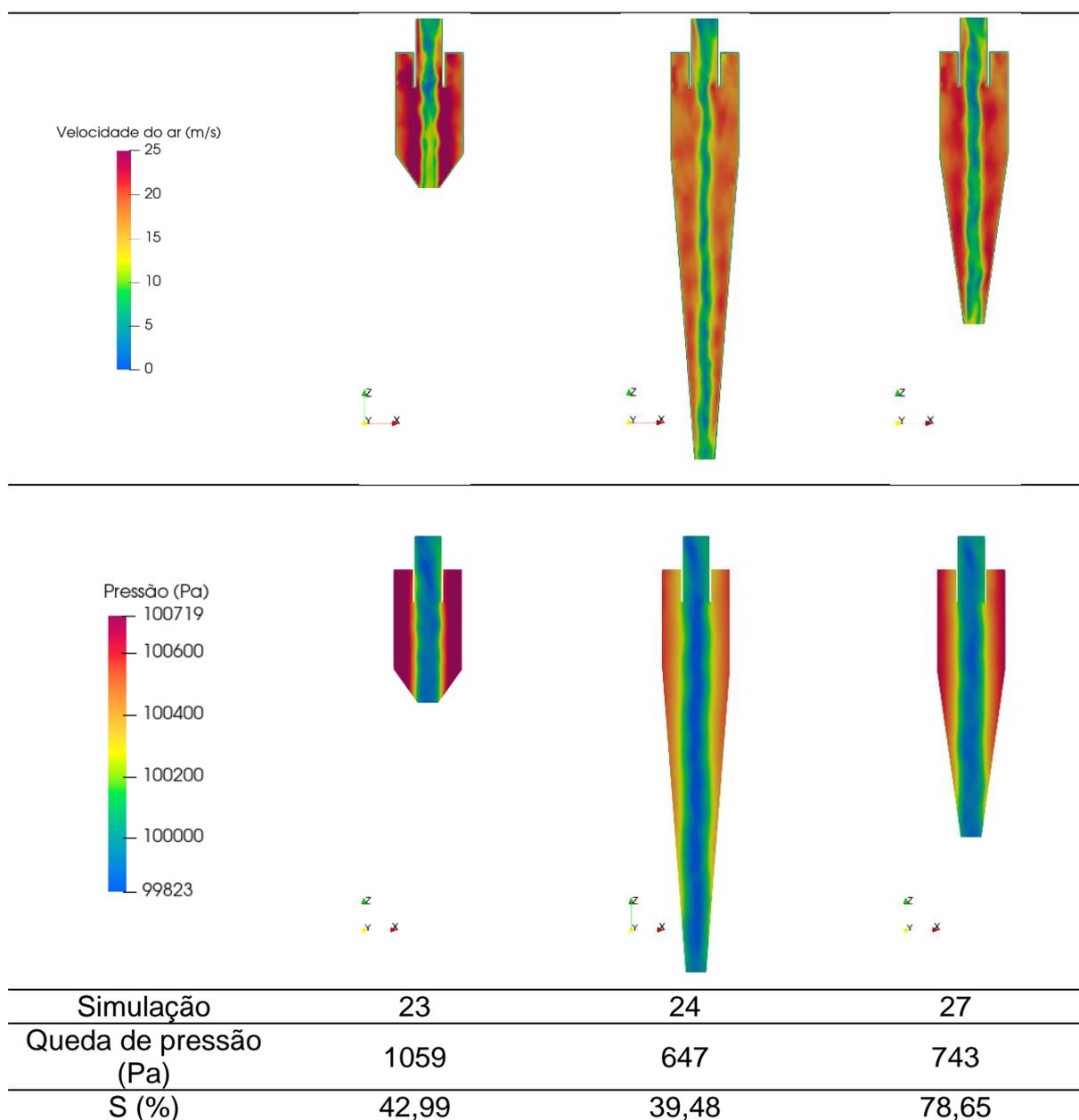
iv) Análise do efeito da altura da seção cônica (L3)

A altura da seção cônica pode ser analisada individualmente comparando as simulações 23 e 24 (Tabela 13), os quais correspondem as relações $L3/Dc$ iguais a 0,5 e 4,5, respectivamente.

A seção cônica do separador ciclônico é a principal responsável pela força centrífuga gerada dentro do equipamento, sendo esse o principal responsável pela separação de partículas imersa no meio fluido. Frente a isso, a Tabela 13 apresenta a simulação 23 na qual seção cônica não garante a aceleração do fluido diminuindo a eficiência de separação quando comparada a simulação 27. Além disso, observa-se na simulação 24 que a altura da seção cônica analisada influenciou negativamente na eficiência de separação.

O estudo do perfil de velocidade também pode ser analisado através da Figura 27 onde observa-se que a simulação 23 obteve o maior pico de velocidade. Essa observação se deu pela ausência de fenômenos dissipativos com o ciclone obtendo assim o perfil de velocidade de acordo com a alimentação.

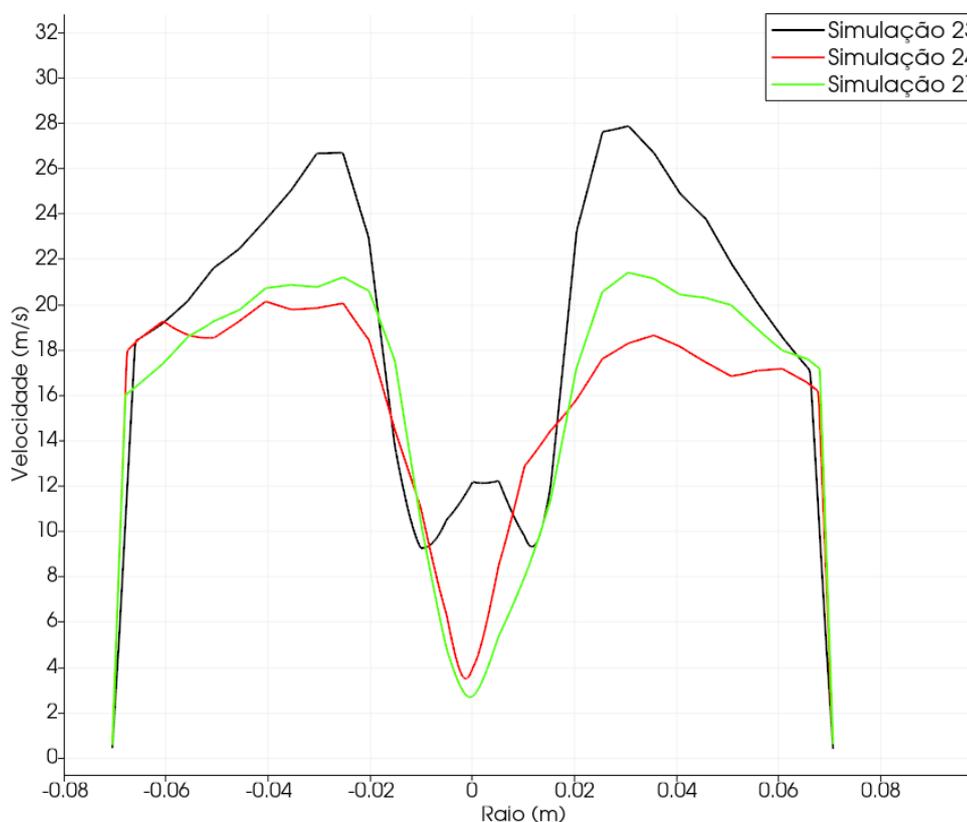
Tabela 13- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 21, 22 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

Ademais, com base nas contatações citadas nota-se que a eficiência de separação apresenta um comportamento não linear, evidenciando a existência de uma altura ótima entre os limites avaliados.

Figura 27- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 23, 24 e 27.



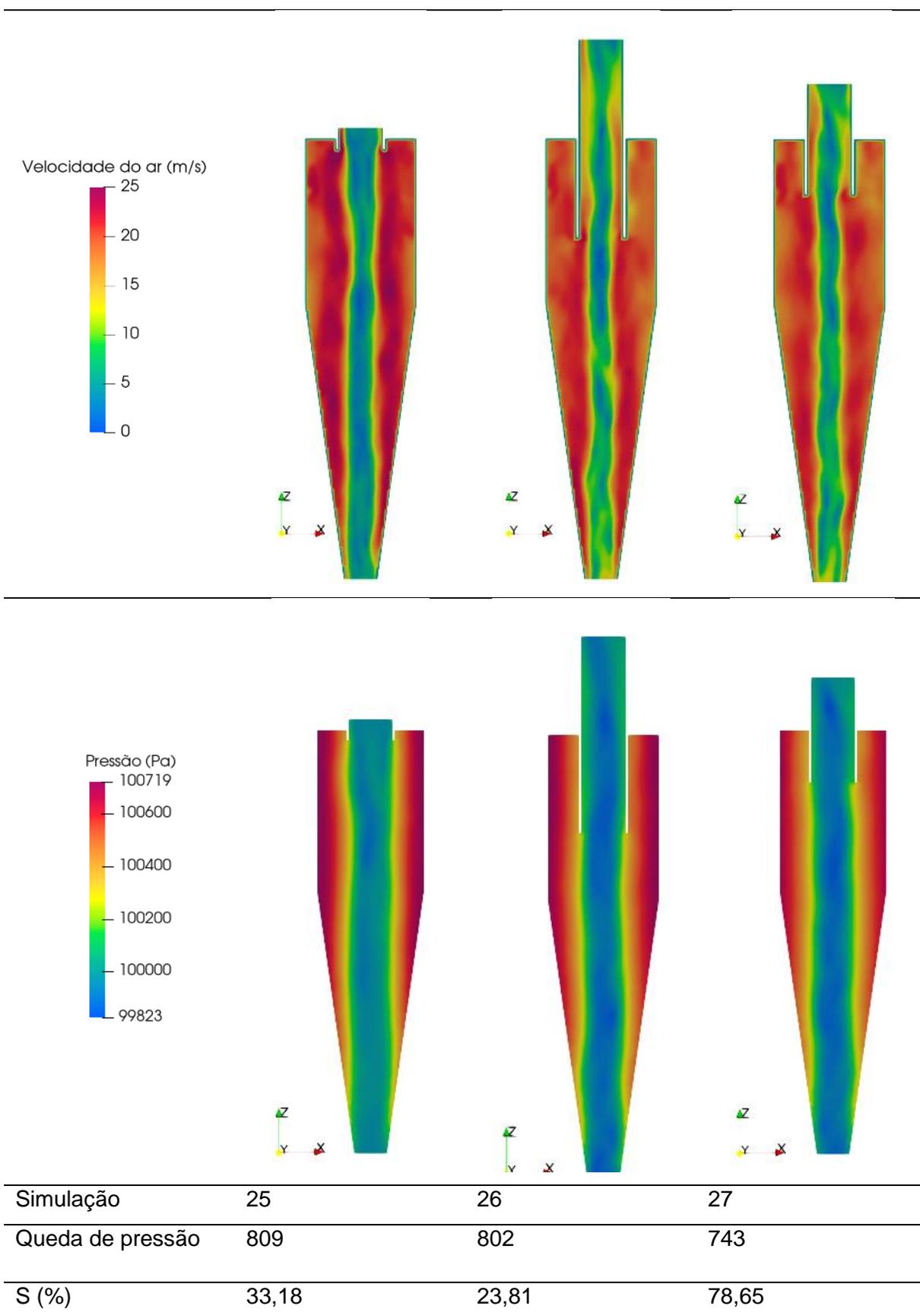
Fonte: Autor, 2023.

v) Análise do efeito do *vortex finder* (V_f)

O efeito do *vortex finder* pode ser analisada individualmente comparando as simulações 25 e 26 (Tabela 14), os quais correspondem as relações V_f/D_c iguais a 0,1 e 0,9, respectivamente.

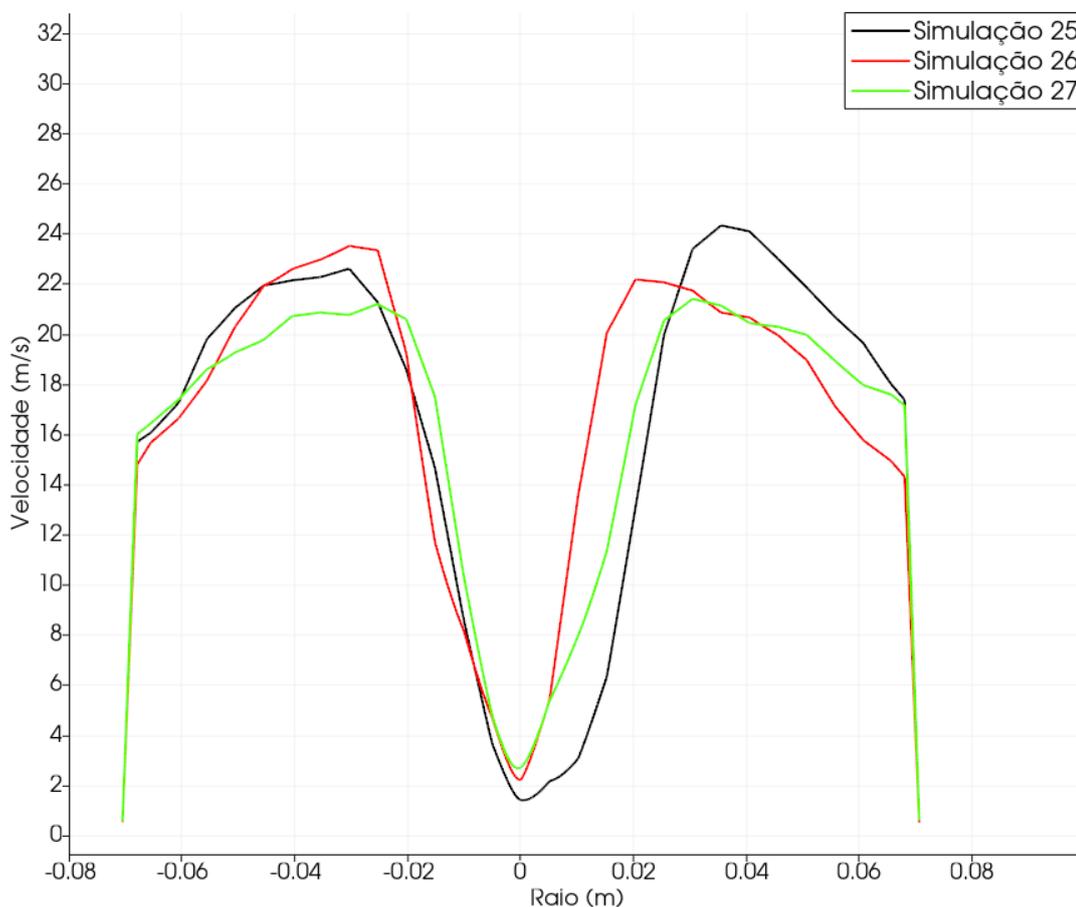
O *vortex finder* atua como um canalizador, orientando o fluxo para que as partículas mais pesadas sejam direcionadas para a parede do separador ciclônico, favorecendo assim a separação. Analisando a Tabela 14 observa-se que os perfis de velocidade e pressão analisados não apresentam mudanças significativas, resultado este que também pode ser observado na Figura 28. Todavia, ao avaliar a eficiência de separação identifica-se que o valor desta grandeza foi alterado de 33,18% para 23,81% ao modificar o comprimento do *vortex finder* (simulações 25 e 26), enquanto que na simulação 27 o valor de S foi de 78,65%, demonstrando que V_f possui influência significativa sobre essa resposta.

Tabela 14- Resultados qualitativos e quantitativos dos ciclones 25, 26 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 28- Perfil de velocidade no eixo de separação entre a parte cônica e cilíndrica nas simulações 25, 26 e 27.



Fonte: Autor, 2023.

5.5 Avaliação do planejamento composto central

Como discorrido no fluxograma da Figura 10, nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos diferentes ciclones através do planejamento composto central para a queda de pressão e eficiência de separação do ciclone.

5.5.1 Análise da queda de pressão

A análise da queda de pressão é uma importante característica pois está diretamente relacionado com a perda de carga do ciclone, variável essa com interesse de minimização. Sendo assim, a Tabela 15 apresenta a análise de variância (ANOVA) do PCC avaliado para a queda de pressão. Considerando todos os termos inclusos no modelo para determinação da queda de pressão, o coeficiente de correlação quadrático (R^2) foi de 0,9743, sendo desta forma adequado para a predição desta variável.

Tabela 15- Tabela ANOVA do PCC do modelo completo para a avaliação da queda de pressão.

	Efeito	Erro	p	Coefficiente	Erro
Média/ Interc.	677,7789	155,1019	0,0047	677,7789	155,1019
Do/Dc (L)	-669,2350	71,7982	0,0001	-334,6175	35,8991
Do/Dc (Q)	110,1658	87,9345	0,2569	55,0829	43,9673
Du/Dc (L)	-586,3650	71,7982	0,0002	-293,1825	35,8991
Du/Dc (Q)	91,6658	87,9345	0,3374	45,8329	43,9673
L2/Dc (L)	-213,4683	71,7982	0,0249	-106,7342	35,8991
L2/Dc (Q)	91,6658	87,9345	0,3374	45,8329	43,9673
L3/Dc (L)	-203,9850	71,7982	0,0295	-101,9925	35,8991
L3/Dc (Q)	103,9158	87,9345	0,2820	51,9579	43,9673
Vf/Dc (L)	-34,1817	71,7982	0,6509	-17,0908	35,8991
Vf/Dc (Q)	80,1658	87,9345	0,3971	40,0829	43,9673
Do/Dc x Du/Dc	540,2525	87,9345	0,0009	270,1262	43,9673
Do/Dc x L2/Dc	180,0975	87,9345	0,0865	90,0488	43,9673
Do/Dc x L3/Dc	180,0725	87,9345	0,0865	90,0362	43,9673
Do/Dc x Vf/Dc	-6,3725	87,9345	0,9446	-3,1863	43,9673
Du/Dc x L2/Dc	130,0025	87,9345	0,1898	65,0012	43,9673
Du/Dc x L3/Dc	93,7275	87,9345	0,3275	46,8638	43,9673
Du/Dc x Vf/Dc	62,2725	87,9345	0,5054	31,1362	43,9673
L2/Dc x L3/Dc	27,6225	87,9345	0,7641	13,8113	43,9673
L2/Dc x Vf/Dc	-155,2225	87,9345	0,1280	-77,6113	43,9673
L3/Dc x Vf/Dc	-115,0475	87,9345	0,2386	-57,5238	43,9673

Fonte: Autor, 2023.

Adotando um critério de significância de 90%, verifica-se que alguns parâmetros estão acima do nível de significância estabelecido ($p > 0,1$) 90%, sendo assim considerados como não significativos. Procedeu-se então com a redução do modelo, iniciando pelos fatores e combinações de fatores com maior valor-p, visto que a remoção de um termo afeta a significância dos demais. Os resultados obtidos após a remoção dos termos não significativos podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16- Tabela ANOVA do PCC do modelo reduzido para a avaliação da queda de pressão

	Efeito	Erro	p	Coefficiente	Erro
Média/Interc.	890,0363	28,1849	0,0000	890,0363	28,1849
Do/Dc (L)	-669,2350	59,7892	0,0000	-334,6175	29,8946
Du/Dc (L)	-586,3650	59,7892	0,0000	-293,1825	29,8946
L2/Dc (L)	-213,4683	59,7892	0,0024	-106,7342	29,8946
L3/Dc (L)	-203,9850	59,7892	0,0033	-101,9925	29,8946
Do/Dc x Du/Dc	540,2525	73,2265	0,0000	270,1262	36,6133
Do/Dc x L2/Dc	180,0975	73,2265	0,0249	90,0488	36,6133
Do/Dc x L3/Dc	180,0725	73,2265	0,0249	90,0362	36,6133
Du/Dc x L2/Dc	130,0025	73,2265	0,0937	65,0012	36,6133
L2/Dc x Vf/Dc	-155,2225	73,2265	0,0490	-77,6113	36,6133

Fonte: Autor, 2023.

A correlação quadrática (R^2) para o novo modelo reduzido foi de 0,9228. Pelo resultado obtido pode-se concluir que a remoção dos termos não acarreta em perda significativa na qualidade do ajuste do modelo, obtendo ainda uma correlação adequada para a predição desta variável. Sendo assim, o modelo reduzido obtido encontra-se apresentado na Equação 14, assim como suas codificações nas Equações 15, 16, 17, 18 e 19.

$$E_t = 890,0363 - 334,6175x_1 - 293,1825x_2 - 106,7342x_3 - 101,9925x_4 + 270,1262x_1x_2 + 90,0488x_1x_3 + 90,0362x_1x_4 + 65,0012x_2x_3 - 77,6113x_3x_5 \quad (14)$$

$$x_1 = \frac{\frac{Do}{Dc} - 0,5}{0,2} \quad (15)$$

$$x_2 = \frac{\frac{Du}{Dc} - 0,3}{0,1} \quad (15)$$

$$x_3 = \frac{\frac{L2}{Dc} - 1,5}{0,5} \quad (17)$$

$$x_4 = \frac{\frac{L3}{Dc} - 2,5}{2} \quad (18)$$

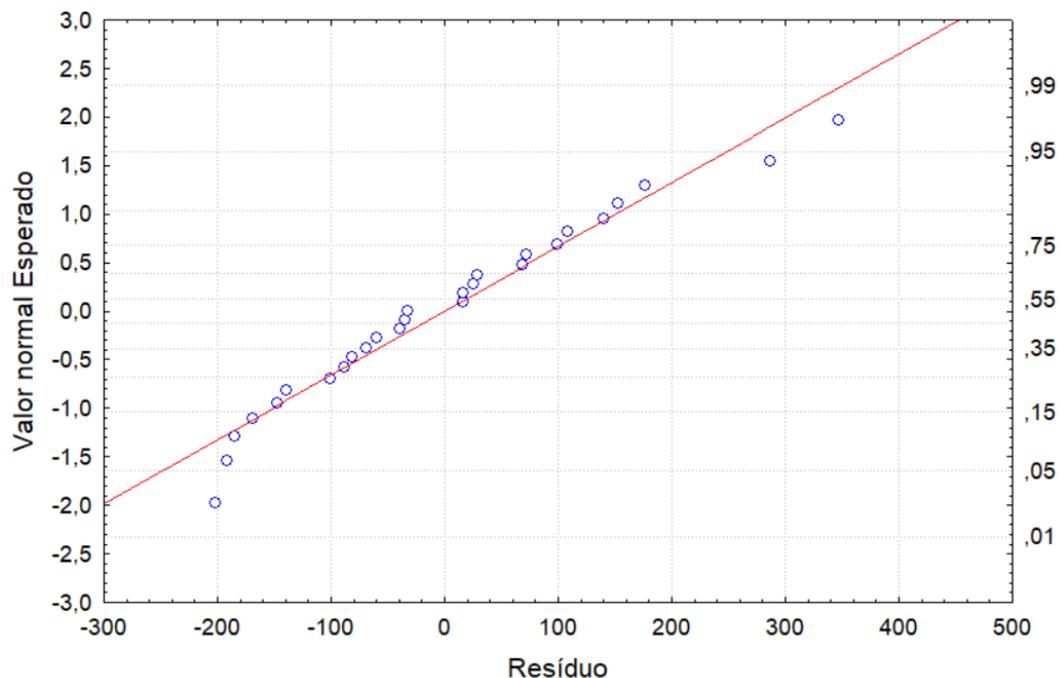
$$x_5 = \frac{\frac{Vf}{Dc} - 0,5}{0,2} \quad (19)$$

Sendo x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_5 a codificação das características geométricas Do/Dc, Du/Dc, L2/Dc, L3/Dc e Vf/Dc respectivamente.

A avaliação dos resíduos foi realizada mediante a análise das Figuras 29 e 30. Observa-se que tanto na Figura 29, que mostra o resíduo em função do valor

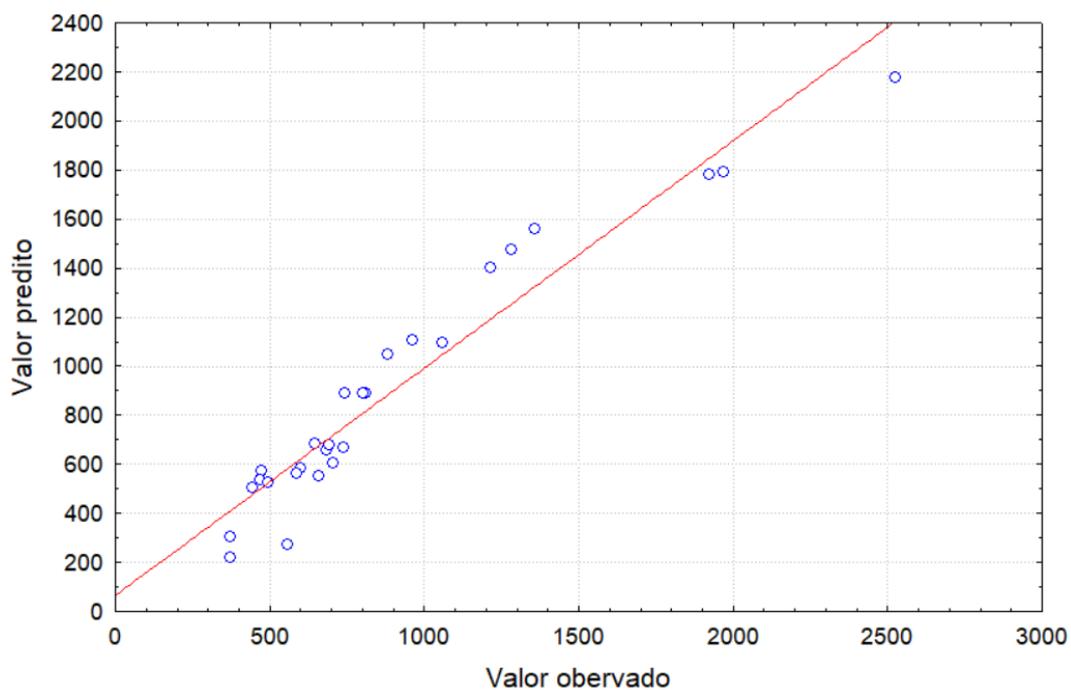
normal esperado, quanto na Figura 30, que mostra o valor esperado em função do valor predito, têm-se uma distribuição aleatória próximas a reta de ajuste, indicando não haver qualquer evidência de anormalidade.

Figura 29- Distribuição do valor normal esperado vs resíduo para a queda de pressão



Fonte: Autor, 2023.

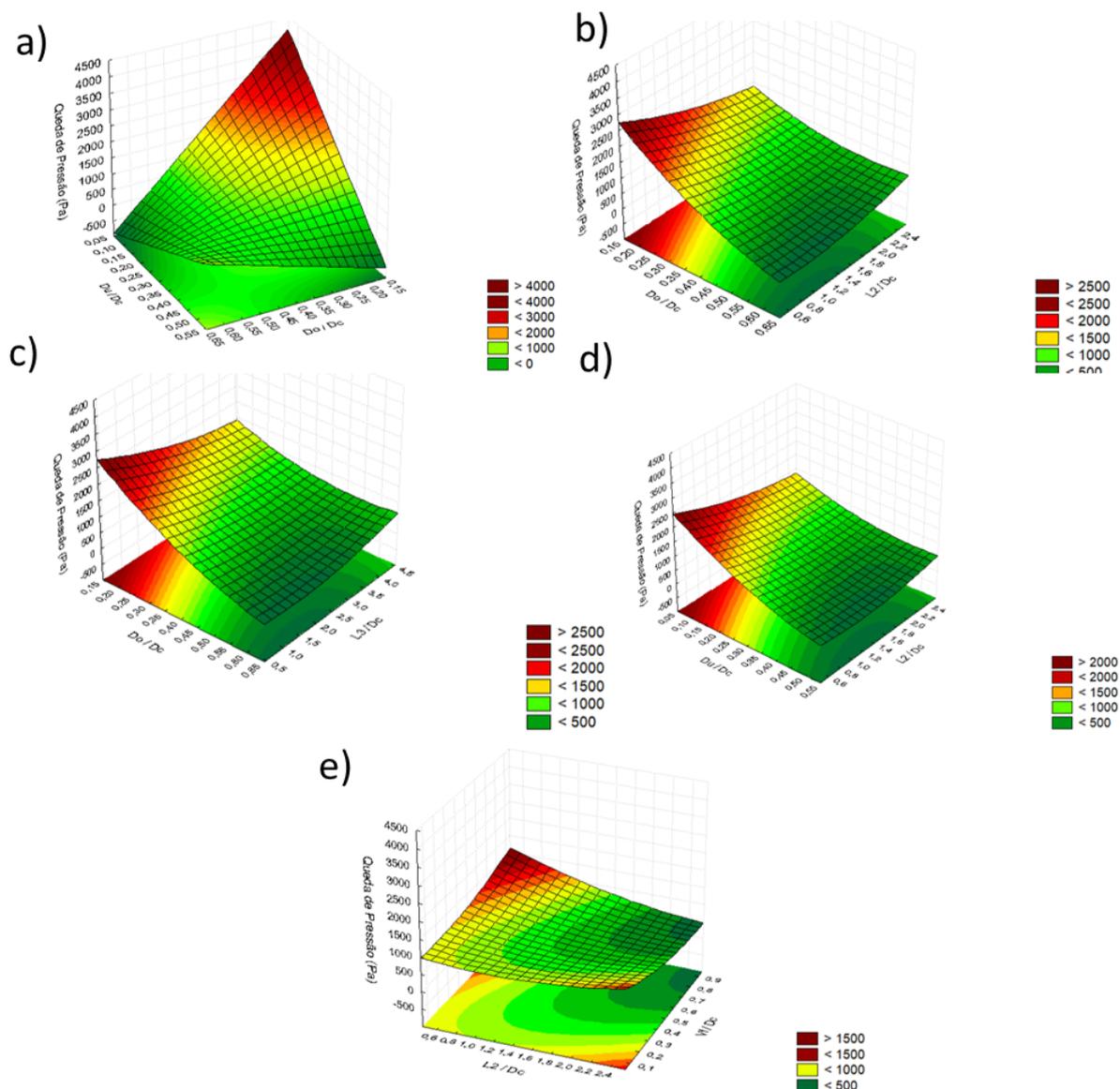
Figura 30- Distribuição do valor predito vs valor esperado para a queda de pressão



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, a Figura 31, apresentam as superfícies de resposta geradas para a queda de pressão e corroboram para a análise do efeito combinado.

Figura 31- Superfícies de respostas da queda de pressão sob influência de a) D_u/D_c e D_o/D_c b) D_o/D_c e L_2/D_c c) L_3/D_c e D_o/D_c d) D_u/D_c e L_2/D_c e) V_f/D_c e L_2/D_c



Fonte: Autor,2023.

Analisando as codificações lineares significativas, sem o efeito combinado, percebe-se que todas contribuem para a queda de pressão do sistema, já as quadráticas não apresentaram significância para a região estudada. Sendo assim, isoladamente, as variáveis contribuem positivamente para a minimização da perda de carga sendo este um resultado que contribui para a otimização do ciclone. Tendo

isso em vista, fica evidenciado que o modelo de queda de pressão obtido apresenta comportamento linear entre os limites estudados.

Analisando a Figura 31, bem como a equação do modelo reduzido, verifica-se que o efeito das codificações de x_1x_2 , x_1x_3 , x_1x_4 e x_2x_3 contribuíram negativamente para minimizar a perda de carga do ciclone, no entanto, a codificação x_3 , única que teve como significativa o *vórtex finder*, teve contribuição positiva para minimizar a perda de carga do ciclone.

Observa-se também, que o maior impacto decorre do Do, já que esse fator está presente em quatro oportunidades na equação reduzida esse resultado também foi encontrado por Hoffmann e Stein, 2008 corroborando para a aceitação dos resultados encontrados.

5.5.2 Análise da eficiência de separação (S)

Assim como para a análise da queda de pressão, a Tabela 17 apresenta a análise de variância (ANOVA) do PCC avaliado para a eficiência de separação. Sendo assim, sem negligência de qualquer interação de fatores, obteve-se o coeficiente de correlação quadrático (R^2) de 0,8136.

Adotando um critério de significância de 90%, assim como na análise da queda de pressão, verifica-se que alguns parâmetros estão acima do nível de significância estabelecido ($p > 0,1$) 90%. Procedeu-se então com a redução do modelo, iniciando pelos fatores e combinações de fatores com maior valor-p, visto que a remoção de um termo afeta a significância dos demais também para este caso. Os resultados obtidos após a remoção dos termos não significativos podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 17- Tabela ANOVA do PCC do modelo completo para avaliação da eficiência de separação.

	Efeito	Erro	p	Coefficiente	Erro
Média/Interc.	63,9292	16,7254	0,0087	63,9292	16,7254
Do/Dc (L)	-18,2168	7,7424	0,0568	-9,1084	3,8712
Do/Dc (Q)	-14,8122	9,4824	0,1693	-7,4061	4,7412
Du/Dc (L)	-6,4690	7,7424	0,4354	-3,2345	3,8712
Du/Dc (Q)	6,0844	9,4824	0,5448	3,0422	4,7412
L2/Dc (L)	2,7801	7,7424	0,7318	1,3901	3,8712
L2/Dc (Q)	-15,3600	9,4824	0,1564	-7,6800	4,7412
L3/Dc (L)	14,1892	7,7424	0,1166	7,0946	3,8712
L3/Dc (Q)	-7,6679	9,4824	0,4496	-3,8340	4,7412
Vf/Dc (L)	7,5094	7,7424	0,3695	3,7547	3,8712
Vf/Dc (Q)	-14,2879	9,4824	0,1826	-7,1439	4,7412
Do/Dc (L) e Do/Dc (L)	-8,5816	9,4824	0,4003	-4,2908	4,7412
Do/Dc (L) e L2/Dc (L)	-9,9751	9,4824	0,3333	-4,9875	4,7412
Do/Dc (L) e L3/Dc (L)	-2,7205	9,4824	0,7838	-1,3603	4,7412
Do/Dc (L) e Vf/Dc (L)	3,5114	9,4824	0,7239	1,7557	4,7412
Du/Dc (L) e L2/Dc (L)	-1,8627	9,4824	0,8508	-0,9314	4,7412
Du/Dc (L) e L3/Dc (L)	-0,2618	9,4824	0,9789	-0,1309	4,7412
Du/Dc (L) e Vf/Dc (L)	-15,0377	9,4824	0,1639	-7,5189	4,7412
L2/Dc (L) e L3/Dc (L)	-5,9871	9,4824	0,5511	-2,9936	4,7412
L2/Dc (L) e Vf/Dc (L)	0,9001	9,4824	0,9275	0,4500	4,7412
L3/Dc (L) e Vf/Dc (L)	11,5573	9,4824	0,2687	5,7786	4,7412

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 18- Tabela ANOVA do PCC do modelo reduzido para avaliação a eficiência de separação.

	Efeito	Erro	p	Coefficiente	Erro
Média/ Interc.	62,5217	6,8179	0,0000	62,5217	6,8179
Do/Dc (I)	-18,2168	6,4680	0,0107	-9,1084	3,2340
Do/Dc (Q)	-14,2844	6,4680	0,0390	-7,1422	3,2340
L2/Dc (Q)	-14,8322	6,4680	0,0328	-7,4161	3,2340
L3/Dc (L)	14,1892	6,4680	0,0402	7,0946	3,2340
Vf/Dc (Q)	-13,7600	6,4680	0,0460	-6,8800	3,2340
Du/Dc x Vf/Dc	-15,0377	7,9217	0,0722	-7,5189	3,9608

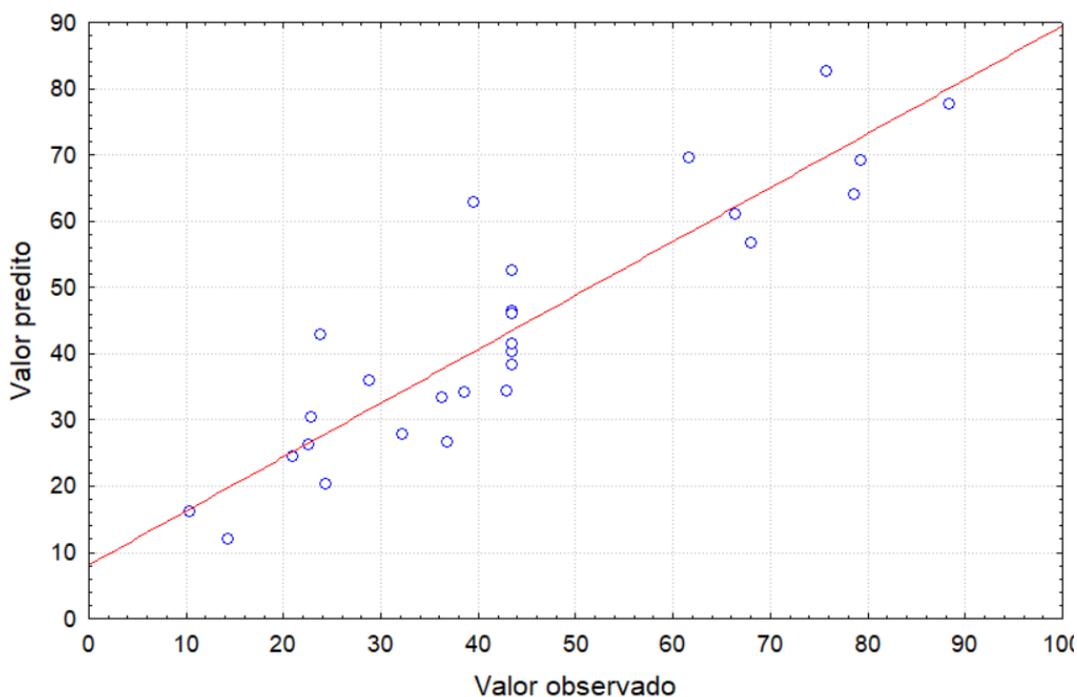
Fonte: Autor, 2023.

A correlação quadrática (R^2) para o novo modelo reduzido foi de 0,5665. Pelo resultado obtido observa-se que houve uma perda de 0,2471 pontos, no entanto, considerando a complexidade do escoamento, o resultado obtido se mantém adequado para a predição dessa variável. Sendo assim, o modelo reduzido obtido está apresentado na Equação 20 e suas codificações foram apresentadas nas Equações 15, 16, 17, 18 e 19.

$$S = 62,5217 - 9,1084x_1 - 7,1422x_1^2 - 7,1461x_3^2 + 7,0946x_4 - 6,8800x_5^2 - 7,5189x_2x_5 \quad (20)$$

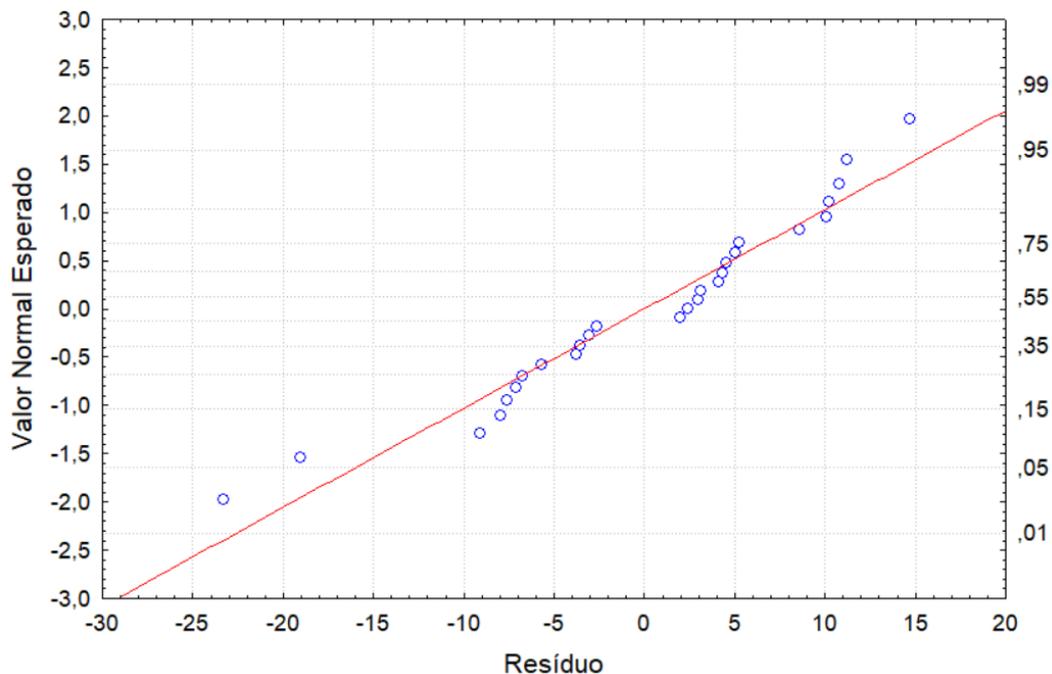
A avaliação dos resíduos dos resultados obtidos foi feita mediante a análise das Figuras 36 e 37. É observado que, assim como para a queda de pressão, os gráficos demonstram uma distribuição aleatória corroborando para a validação do modelo proposto.

Figura 32- Distribuição do valor normal esperado vs resíduo para a eficiência de separação



Fonte: Autor, 2023

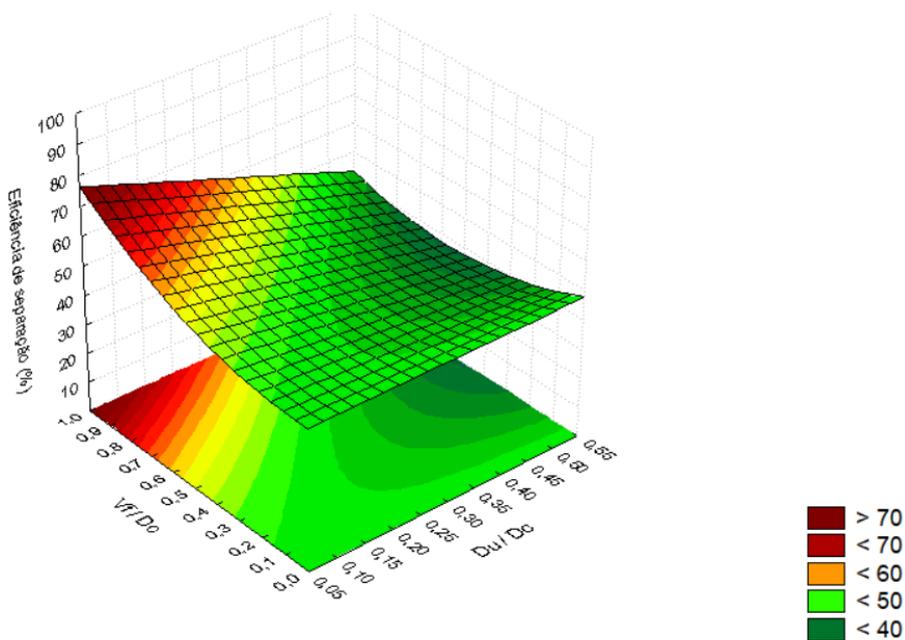
Figura 33- Distribuição do valor predito vs valor esperado para a eficiência de separação



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, a Figuras 34 apresenta a superfície de resposta significativa gerada para a eficiência de separação e corroboram para a análise do efeito combinado.

Figura 34- Superfície de resposta da influência de $L3/Dc$ e Do/Dc na queda de pressão.



Fonte: Autor, 2023.

Analisando a Equação 21, observa-se que Do/Dc e $L3/Dc$ em sua forma linear e Do/Dc , $L2/Dc$ e Vf/Dc em suas formas quadráticas foram significativas no intervalo estudado e todas, exceto $L3/Dc$, contribuíram negativamente para a melhoria da eficiência de separação. Já quando analisado o efeito combinado, nota-se que apenas $L3/Dc \times Do/Dc$ teve significância e obteve contribuição positiva para o aumento da eficiência de separação do ciclone.

Com os resultados observados nessa seção, nota-se que o estudo do raio e altura de alimentação do ciclone, características não estudadas no presente trabalho, podem afetar os resultados de eficiência de separação do ciclone.

Elsayed e Lacor, 2010, 2011 e 2013 verificaram que o raio de alimentação do ciclone, juntamente com o diâmetro do *overflow*, são os efeitos que afetam de forma mais significativa a eficiência de separação de um separador ciclônico. Esse resultado corrobora para as análises feitas nessa seção e reforçam a importância do estudo do raio de alimentação do ciclone para obtenção de um melhor modelo de ajuste.

Ademais, no presente estudo de 5 características geométricas utilizou-se de 29 609 min de simulação numérica, em desktop com especificações mencionadas na seção 4.2. Adotando um PCC com duas características geométricas ausentes, constatou-se que seriam necessárias 79 simulações, demandando um tempo de simulação de 77 972 min. Frente a isso, tornou-se inviável a realização do ajuste com a adição dessas variáveis no presente estudo.

6. CONCLUSÃO

Baseando-se nos objetivos propostos no presente trabalho acerca da avaliação numérica da eficiência de separação em separador ciclônico, tem-se as seguintes conclusões a seguir:

- ✓ A simulação por fluidodinâmica computacional utilizando a estratégia do Planejamento Composto Central (PCC) mostrou-se uma ferramenta poderosa na predição e entendimento de fenômenos em equipamento complexo como um separador ciclônico;
- ✓ A aplicação de uma abordagem numérica Euleriana se deu de maneira satisfatória, podendo-se observar as linhas de correntes, perfil de velocidade, perda de carga e eficiência de separação ciclônica;
- ✓ Constatou-se que o refino da malha utilizada na simulação é significativo e influencia nos resultados obtidos, sendo assim necessário a realização de um teste de independência de malha;
- ✓ Observou-se que as variações do diâmetro do *overflow*, altura da seção cilíndrica e cônica, analisadas individualmente, são significativas na predição da eficiência de separação, perfil de velocidade e queda de pressão.
- ✓ Constatou-se que ao avaliar essas características elas apresentam um comportamento não linear na avaliação da eficiência de separação, evidenciando a existência de um diâmetro ótimo entre os limites avaliados;
- ✓ Analisando individualmente do efeito do diâmetro do *underflow* observou-se que a diminuição dessa característica pode gerar obstrução na saída do material. Além disso, observou-se que é significativa na predição da eficiência de separação ciclônica;
- ✓ A avaliação do *voxtex finder* permitiu observar que a variação nessa característica não alterou significativamente os perfis de pressão e velocidade. Apesar disso, essa configuração foi significativa na eficiência de separação ciclônica evidenciando que existem características não estudadas que são importantes na predição dessa resposta;
- ✓ Ao avaliar o PCC observou-se que na predição da queda de pressão do separador ciclônico obteve-se um coeficiente de correlação quadrático, após adotar um critério de significância de 90%, de 0,9228, sendo esse adequado para a predição dessa variável.

- ✓ Além da avaliação da queda de pressão com o auxílio do PCC, obteve-se um coeficiente de correlação quadrático, após adotar um critério de significância de 10%, de 0,5665 para a eficiência de separação. Tendo isso em vista, conclui-se que existem características geométricas não estudadas significativas na predição dessa resposta.

7. PROPOSTAS FUTURAS

- Estudar as configurações geométricas não avaliadas: Raio e altura da alimentação;
- Otimizar o separador ciclônico estudado maximizando a eficiência de separação e minimizando a queda de pressão;
- Identificar os valores mínimos e máximos das configurações geométricas que permitem o fenômeno de ciclonação;
- Avaliação da influência das condições operacionais e propriedades granulares;
- Avaliar a eficiência de separação e queda de pressão em separadores ciclônicos em série e paralelo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDO, S.; MORI, M.; PERES, A. P.; DIONÍSIO, R. P., 3-D Computational Fluid Dynamics for Gas and Gas-Particulate Flows in a Cyclone With Different Inlet Section Angles. *Powder Technology*, vol. 162, p. 190-200, 2006.

BOF, C. G. “Desenvolvimento de um ciclone para separação de material particulado de uma corrente de gás de combustão de coqueria “heat recovery””. Dissertação de mestrado, FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia Brasil, 2009.

CRISTEA, E. D.; MALFA, E. 3D, Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Pre-Heater Top Cyclone. *Proceedings of Fluent European User's Group Meeting*, Harrogate, U. K, 18p., 9-10 June, 1994.

ELSAYED KHAIRY, K.; LACOR, C., Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 22, p. 6048–6058, 2010.

FU, P., CFD-DEM simulation of particle revolution and high-speed self-rotation in cyclones with different structural and operating parameters. *Chemical Engineering Journal Advances*, v. 8, 2021.

HANSRAJ, H. S., Análise CFD de modelos de turbulência durante a combustão no motor CFM56-3). Tese (Mestrado), UBI, Covilhã, Portugal, 2019.

HOFFMAN, A. C.; A. VANSANTEN, et al., Effects of Geometry and Solid loading on the Performance of Gas Cyclones. *Powder Technology*, vol. 70, no 1, p. 83-91, 1992.

HOFFMANN A.C.; STEIN, L.E., 2008, “Gas Cyclones And Swirl Tubes – Principles, Design and Operation”, Second Edition, Springer – Verlag Berlin Heidelberg.

LANGFORD, J. A.; MOSER, R. D. Optimal LES formulations for isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 398, p. 321–346, 1999.

MASSARANI, G., *Fluidodinâmica em sistemas particulados*/Giulio Massarani – 2ª. Edição – Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

MEIER, H. F.; MORI, M. Gas-Solid Flow in Cyclones: The Eulerian-Eulerian Approach, Submitted and accepted for presentation on ESCAPE 8-Belgium on May 1998, and accepted for publication in the *Computer & Chemical Engineering*, 1998.

MISIULIA, D. et al. High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study. *Powder Technology*, v. 364, p. 943–953, 2020.

MOTHES, H. e LOFFLER, F. Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators. *Int. Chem. Eng.*, vo. 28, p. 231-240, 1988.

PANDEY, S. et al. CFD Investigations of Cyclone Separators with Different Cone Heights and Shapes. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 12, n. 10, 1 maio 2022.

PANDEY, S.; BRAR, L. S. On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD. *Powder Technology*, v. 407, n. January, p. 117629, 2022.

PIRKER, S.; KAHRIMANOVIC, D.; AICHINGER, G. Modeling mass loading effects in industrial cyclones by a combined Eulerian-Lagrangian approach. *Acta Mechanica*, v. 204, n. 3–4, p. 203–216, maio 2009.

SALVO, R. V., Efeitos de modelos submalha em escoamentos em ciclones. Dissertação de mestrado, FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2009.

SHASTRI, R.; WASILEWSKI, M.; BRAR, L. S. Analysis of the novel hybrid cyclone separators using large-eddy simulation. *Powder Technology*, v. 394, p. 951–969, 2021.

SOMMERFELD, I. M. Influence of Inter-Particle Interactions on the Performance of Cyclone Separators. 2019.

VENKATESH, S. et al., Multi-objective optimization, experimental and CFD approach for performance analysis in square cyclone separator. *Powder Technology*, v. 371, p. 115–129, 2020.

YANG, X. et al., Effects of operational and geometrical parameters on velocity distribution and micron mineral powders classification in cyclone separators. *Powder Technology*, v. 407, n. June, p. 117609, 2022.

9. APÊNDICE I: Trabalho aceito em congresso



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS NA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO EM CICLONES

LEA OLIVEIRA¹, LFN LOPES¹, ECG PEREIRA¹, RJ BRANDÃO¹, TLC GOMES¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia
E-mail para contato: rodolfo.brandao@ctec.ufal.br

RESUMO – A compreensão acerca do comportamento de escoamentos turbulentos é de fundamental importância no que diz respeito à concepção de projetos e otimização de equipamentos industriais com escoamentos complexos. Frente a isso, os separadores ciclônicos industriais têm grande destaque na separação de partículas sólidas imersas em um meio fluido. Tendo isso em vista, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do diâmetro do overflow, underflow e altura da seção cilíndrica em um separador ciclônico industrial utilizando de uma abordagem Euleriana através do Software OpenFoam. Os resultados obtidos destacaram a influência das configurações estudadas e mostraram que as mesmas são significativas para a otimização da eficiência de separação ciclônica.

1 INTRODUÇÃO

O ciclone é um dos equipamentos industriais mais importantes utilizados na separação de partículas sólidas de uma fase fluida. Isso é possível devido ao fluxo de ar rotativo gerado no interior do dispositivo, que submete as partículas a diferentes intensidades da força centrífuga, de acordo com sua densidade, culminando em sua separação (Shastri et al., 2021). Os ciclones são amplamente aplicados em diferentes contextos, como na produção de cimento, aço e pós metálicos, indústrias de alimentos e farmacêuticas, e no controle da poluição do ar, entre outros (Shastri et al., 2021; Venkatesh et al., 2020).

Dentre as vantagens em comparação a outros métodos de separação sólido-gás, os ciclones possuem estrutura simples, sem partes móveis, o que permite o baixo custo de fabricação, instalação e manutenção. Ademais, pode operar de forma contínua e sob condições extremas e ambientes corrosivos, além de alcançar elevadas eficiências (Misiulia et al., 2020).

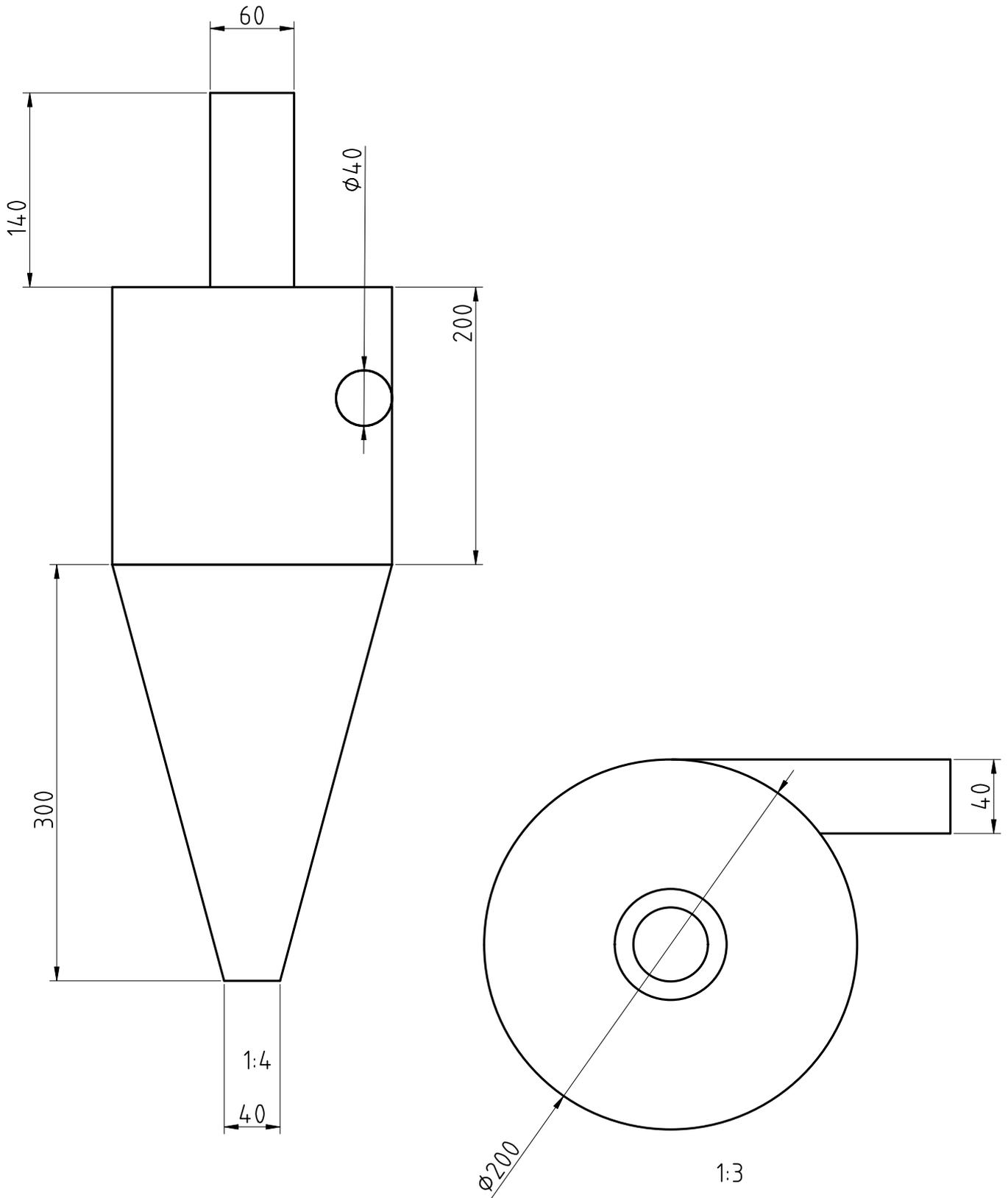
A eficiência de um ciclone é determinada principalmente pela eficiência de coleta e queda de pressão. Diversas pesquisas apontam que esses parâmetros e o campo de fluxo no interior do equipamento são diretamente afetados pelas suas dimensões características (Yao et al., 2021; Shastri et al., 2021; Venkatesh et al., 2020). Apesar da estrutura simples, o fluxo rotatório do fluido e suas partículas no interior deste equipamento é complexo, o que dificulta o estudo da relação entre suas dimensões e sua eficiência (Yao et al., 2021). Os modelos teóricos ou semi-empíricos já foram cogitados para esta investigação, entretanto por se utilizarem de diferentes suposições e hipóteses simplificadoras, esses métodos levam a resultados significativamente diferentes da realidade. Enquanto isso, os modelos estatísticos se mostraram extremamente difíceis para prever a função de correlação mais apropriada para ajustar os dados experimentais (Elsayed e Lacor, 2010).

Diante desse cenário, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem sido amplamente aplicada para prever as características do campo de fluxo e as trajetórias das partículas dentro do ciclone, fornecendo dados coerentes com aqueles medidos experimentalmente

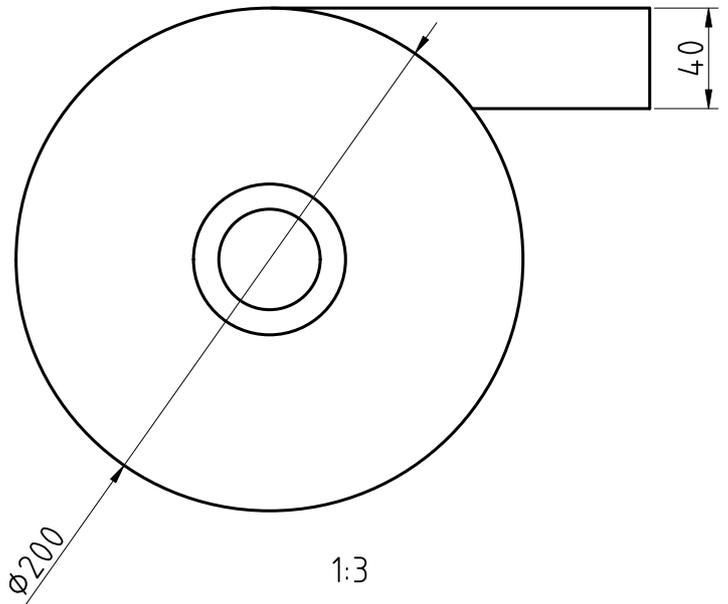
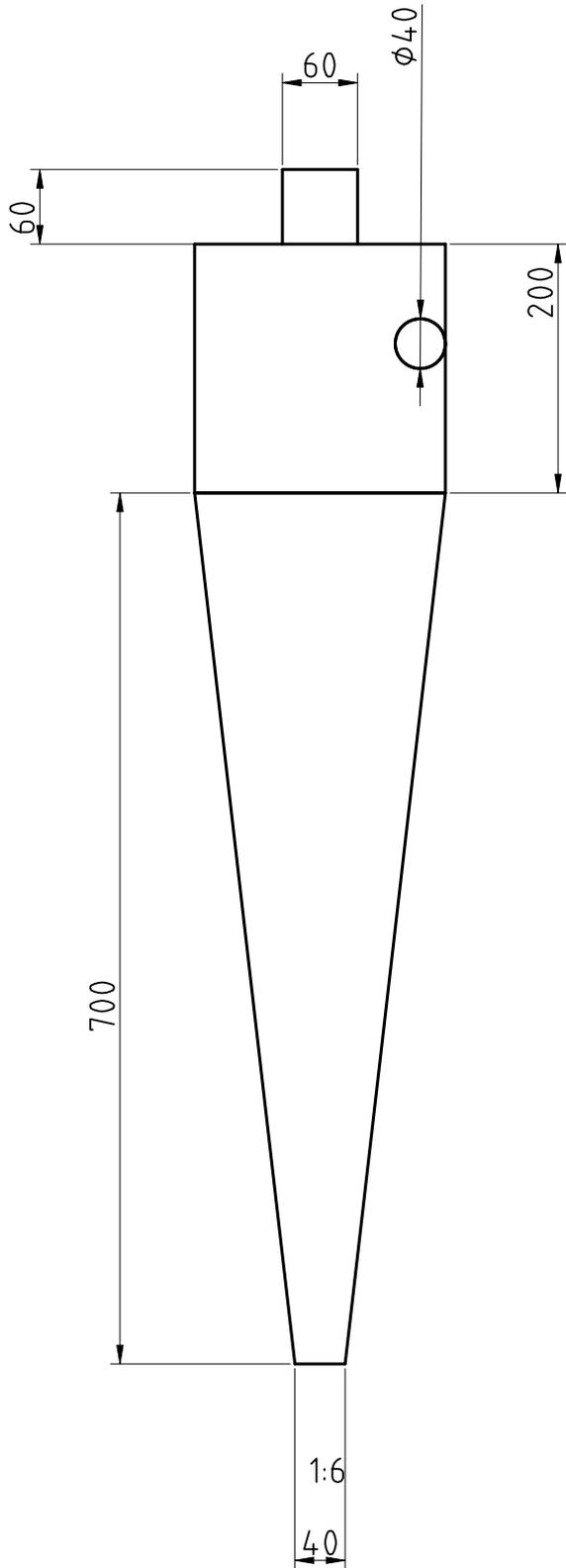
Deste modo, o presente estudo tem por objetivo avaliar a influência das dimensões características: alturas da seção cônica e cilíndrica e os diâmetros do *overflow* e do *underflow*

10. ANEXO I

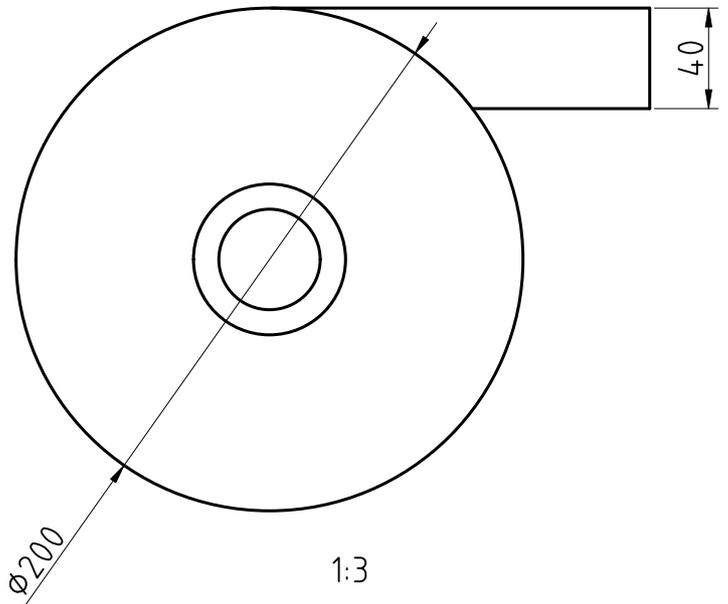
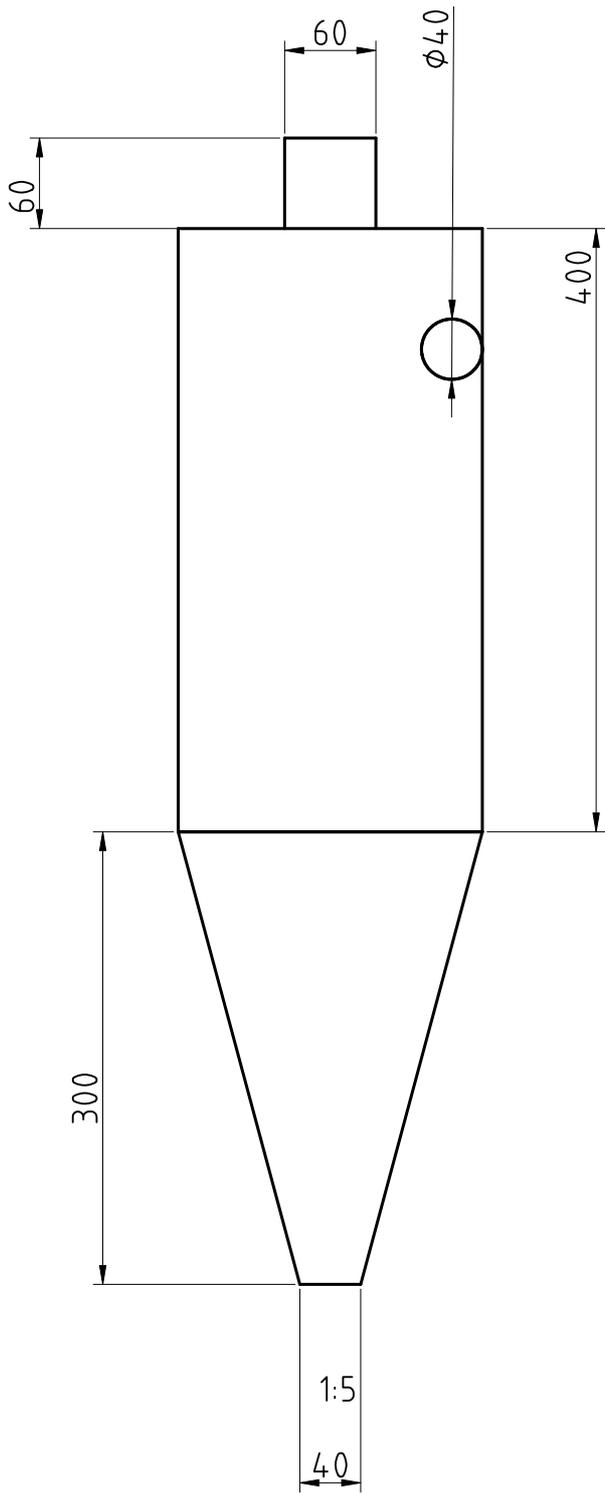
Projetos de separadores ciclônicos



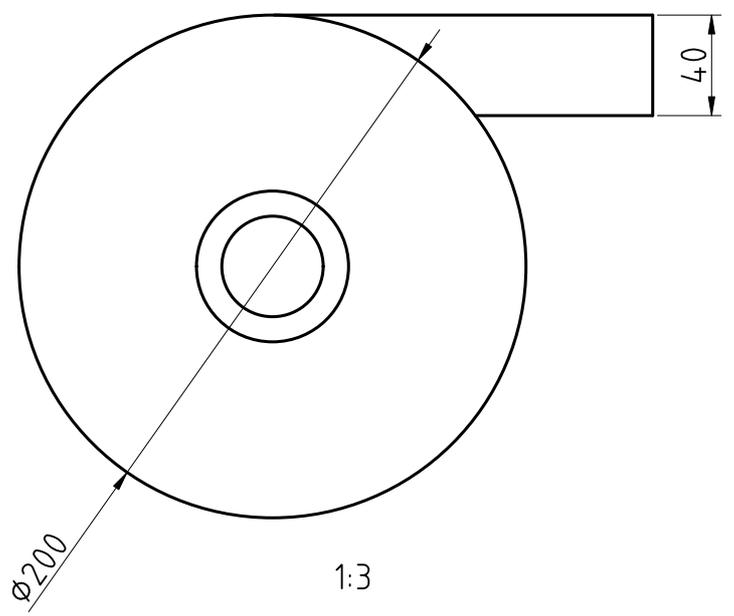
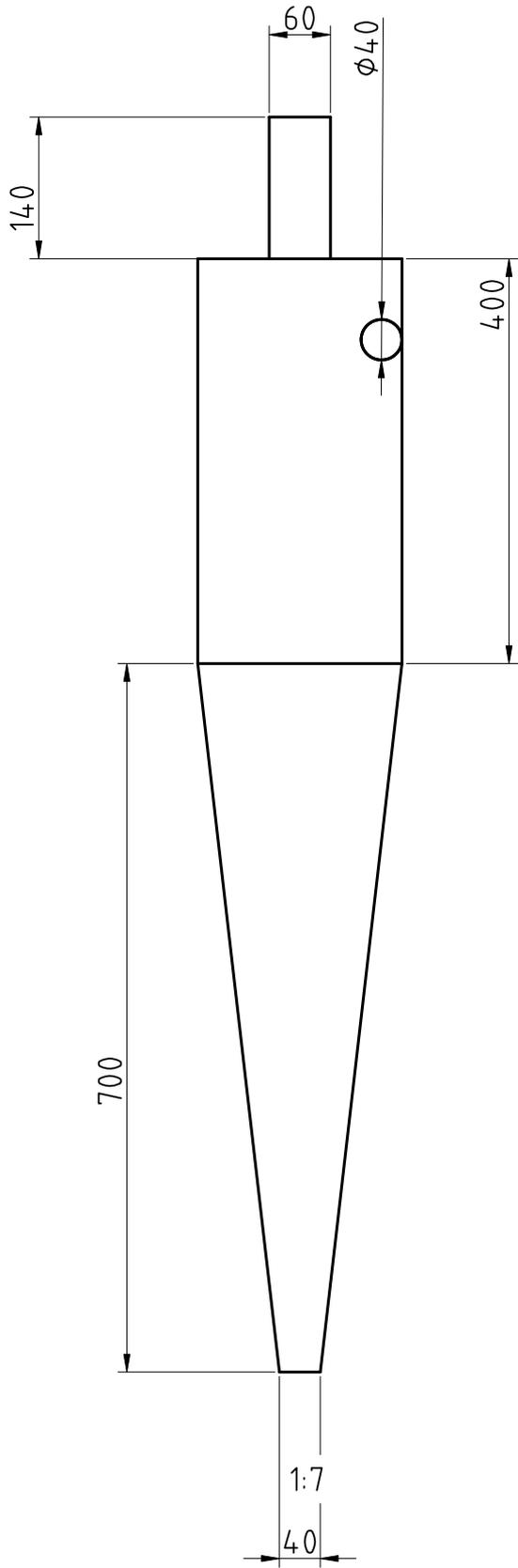
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 01</h2> <p style="text-align: center;">DESCRIÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01



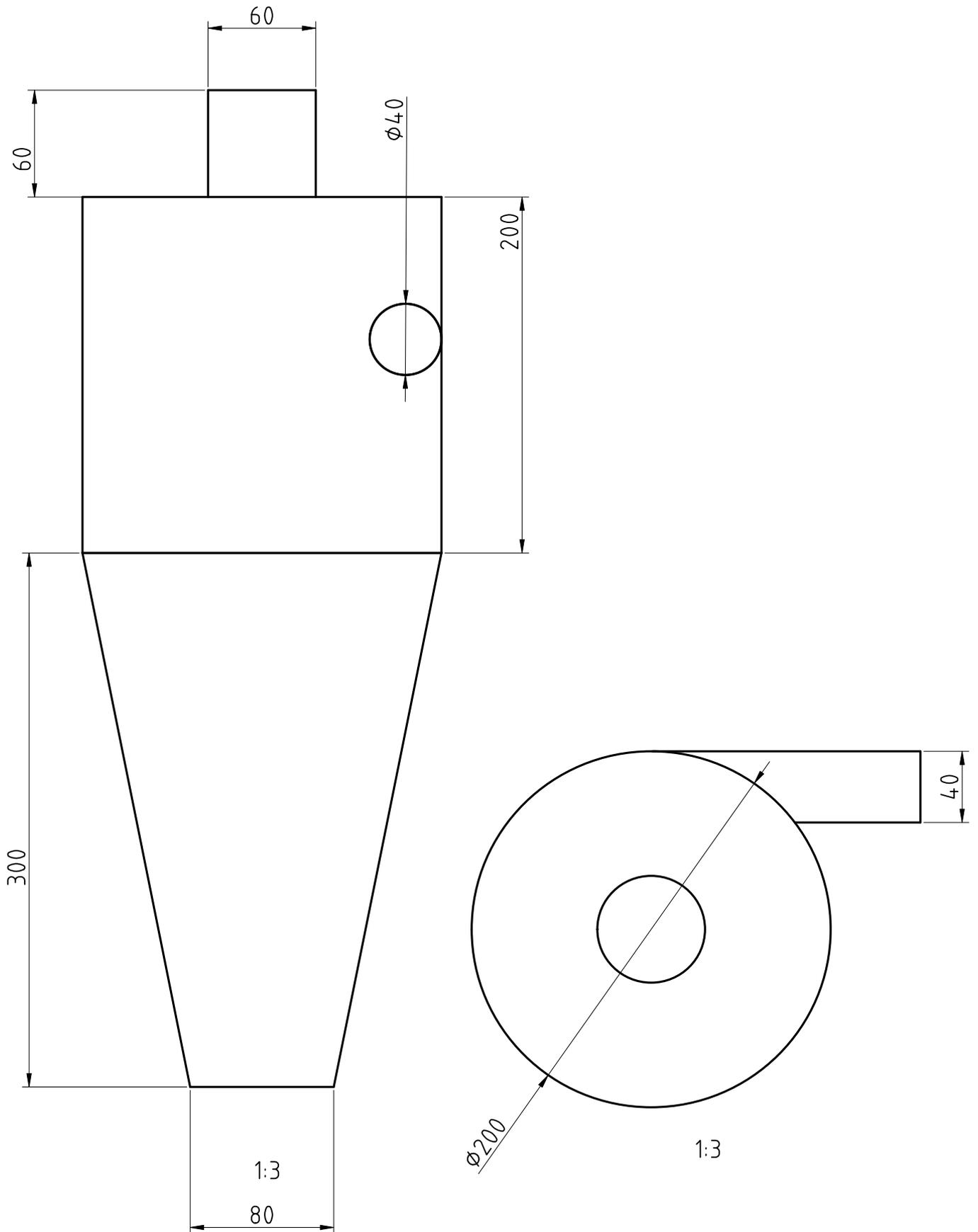
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 02 DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				REV.	01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1



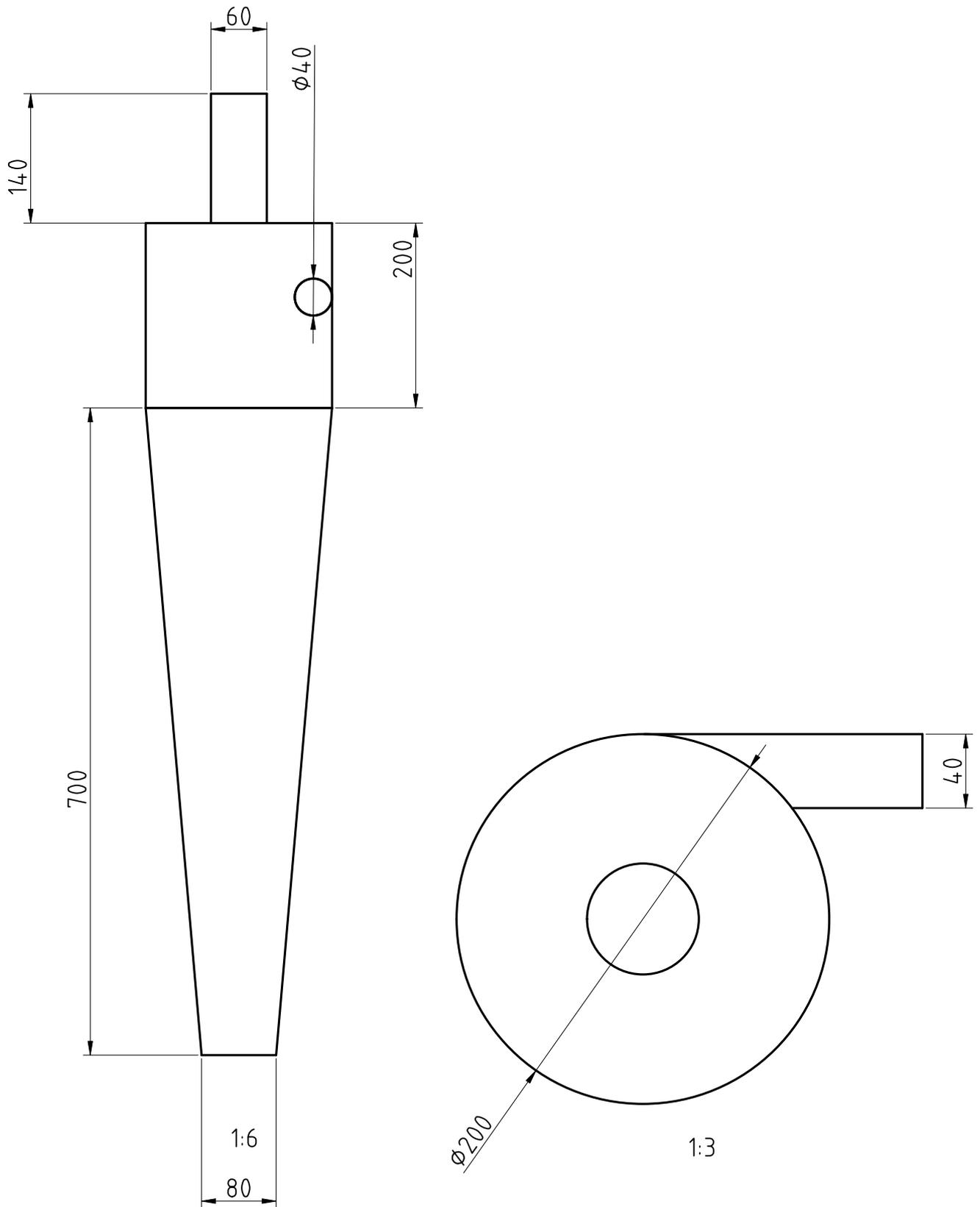
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 03 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01



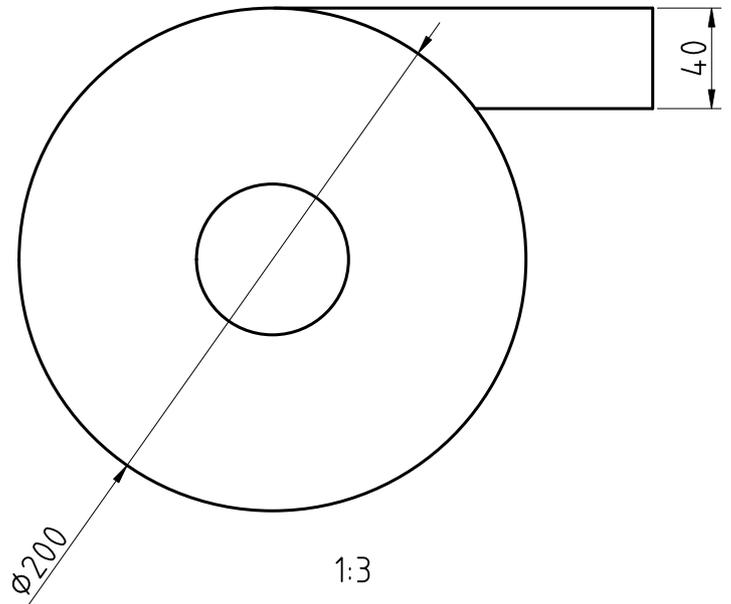
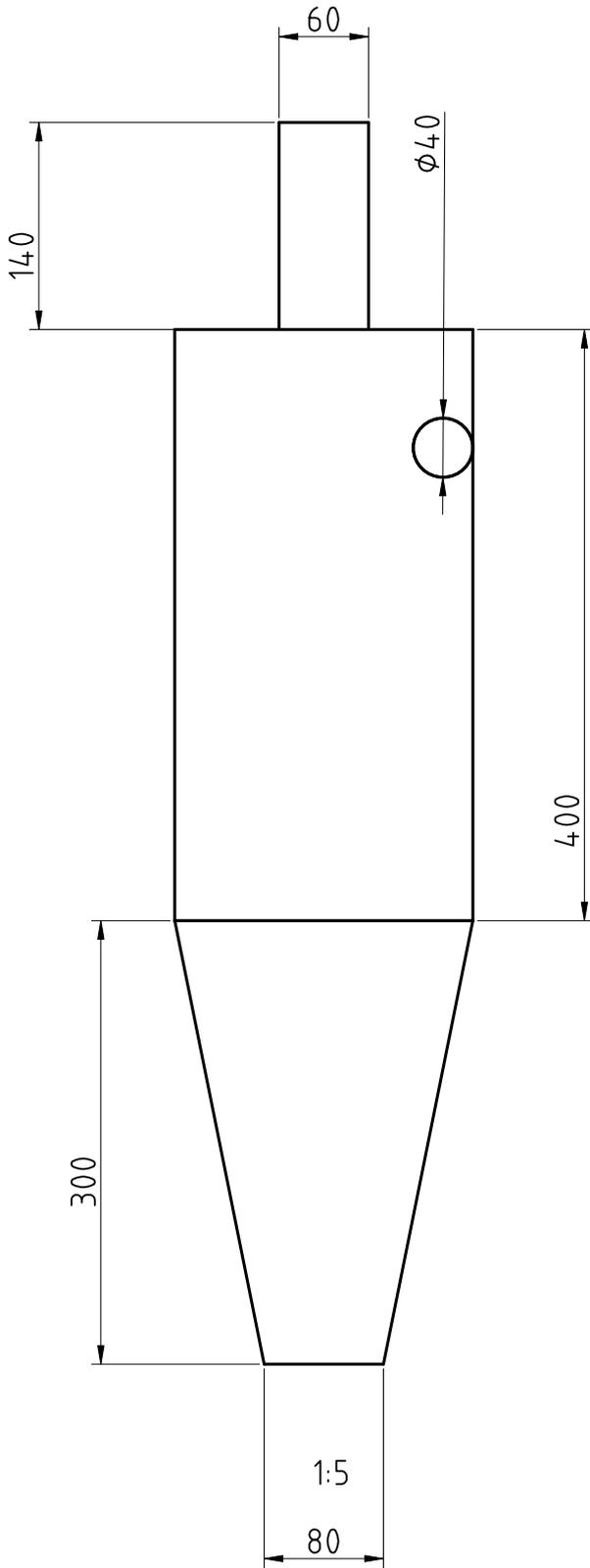
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 04 DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF	
						REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET 1 on 1



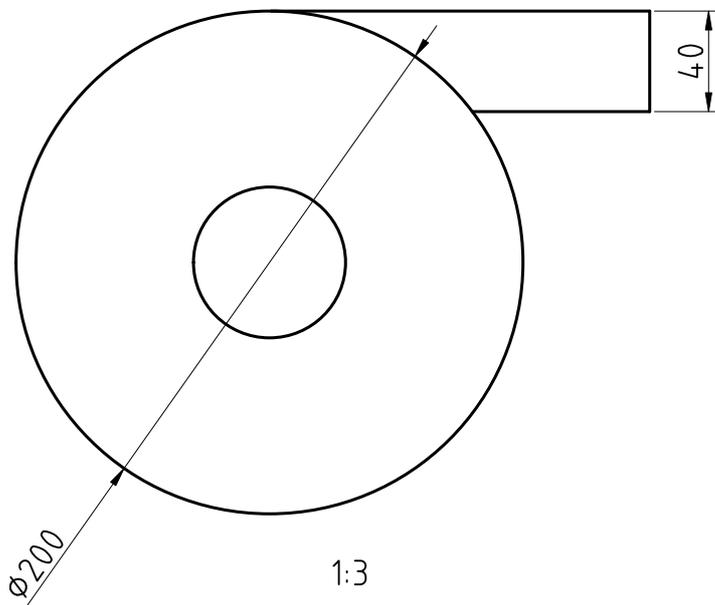
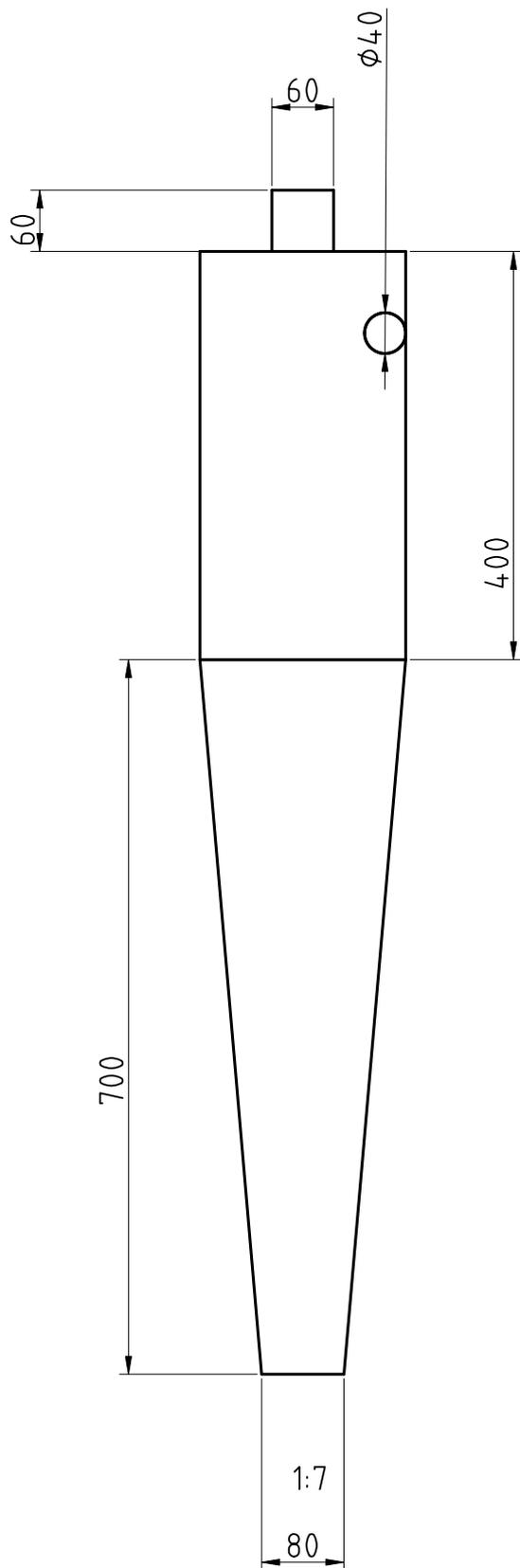
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 05 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE / VOLUME / SURFACE
					SHEET 1 on 1



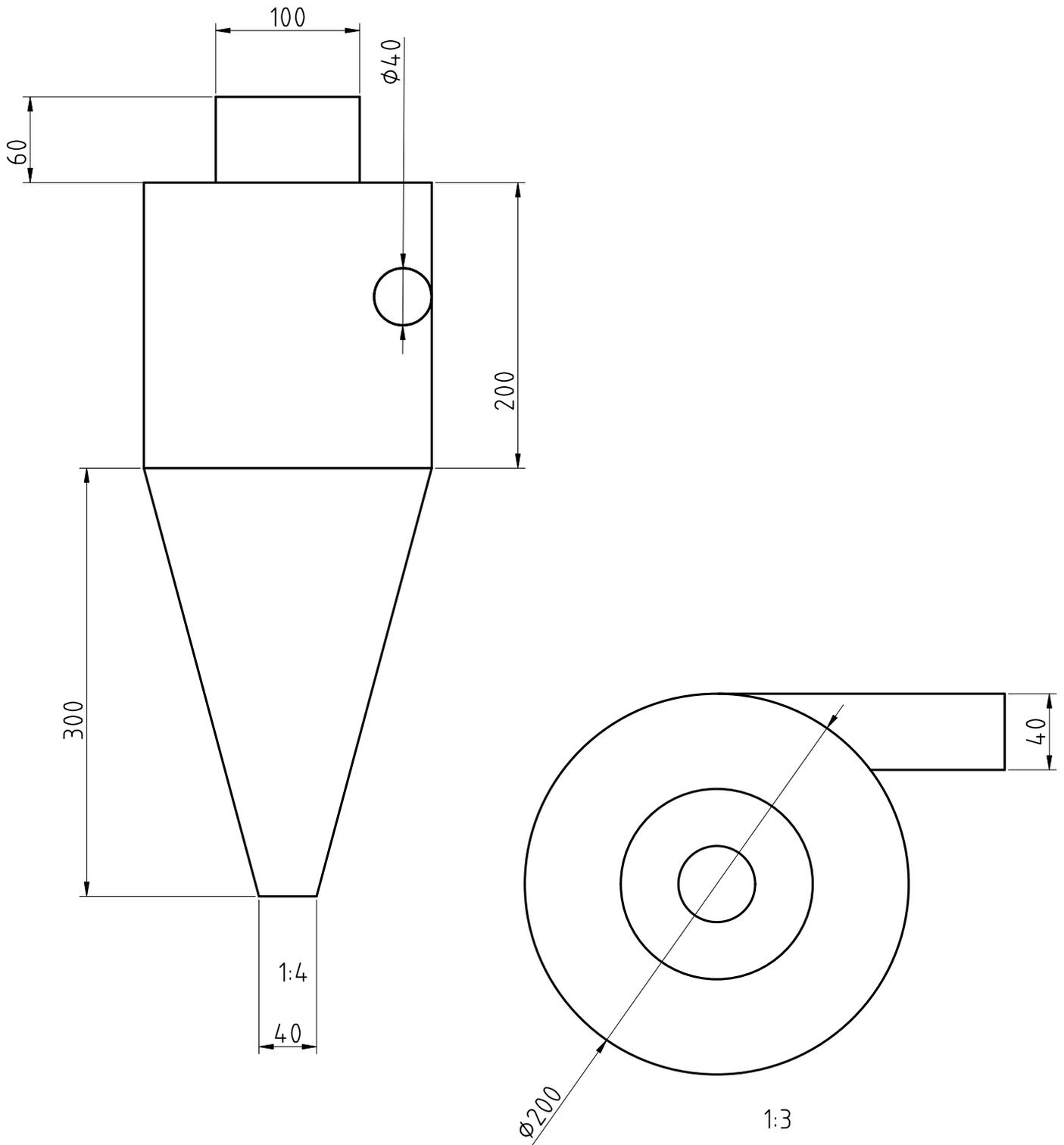
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 06 DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
					SHEET 1 on 1



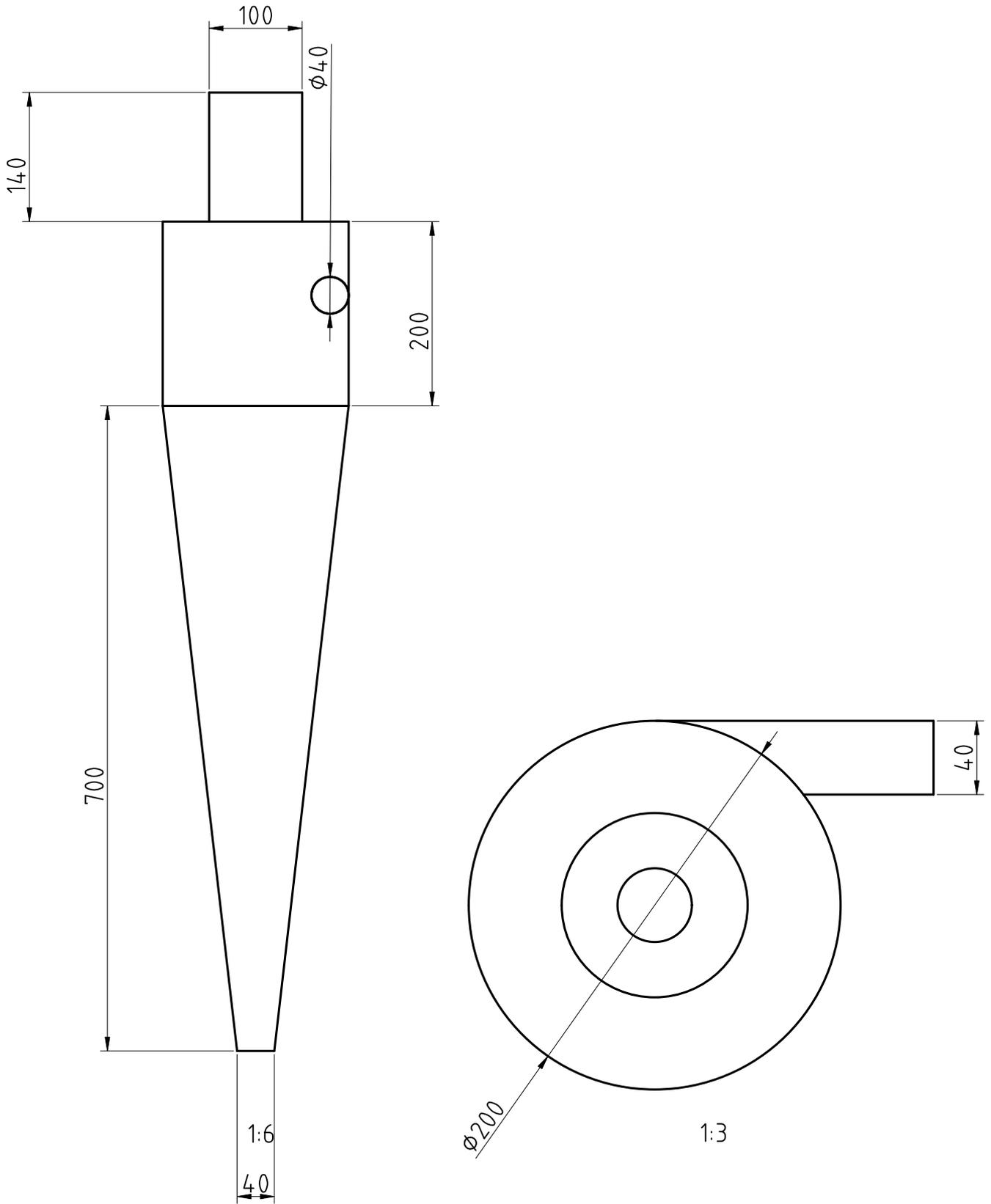
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 07</h2> <p style="text-align: center;">DESCRICAÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01



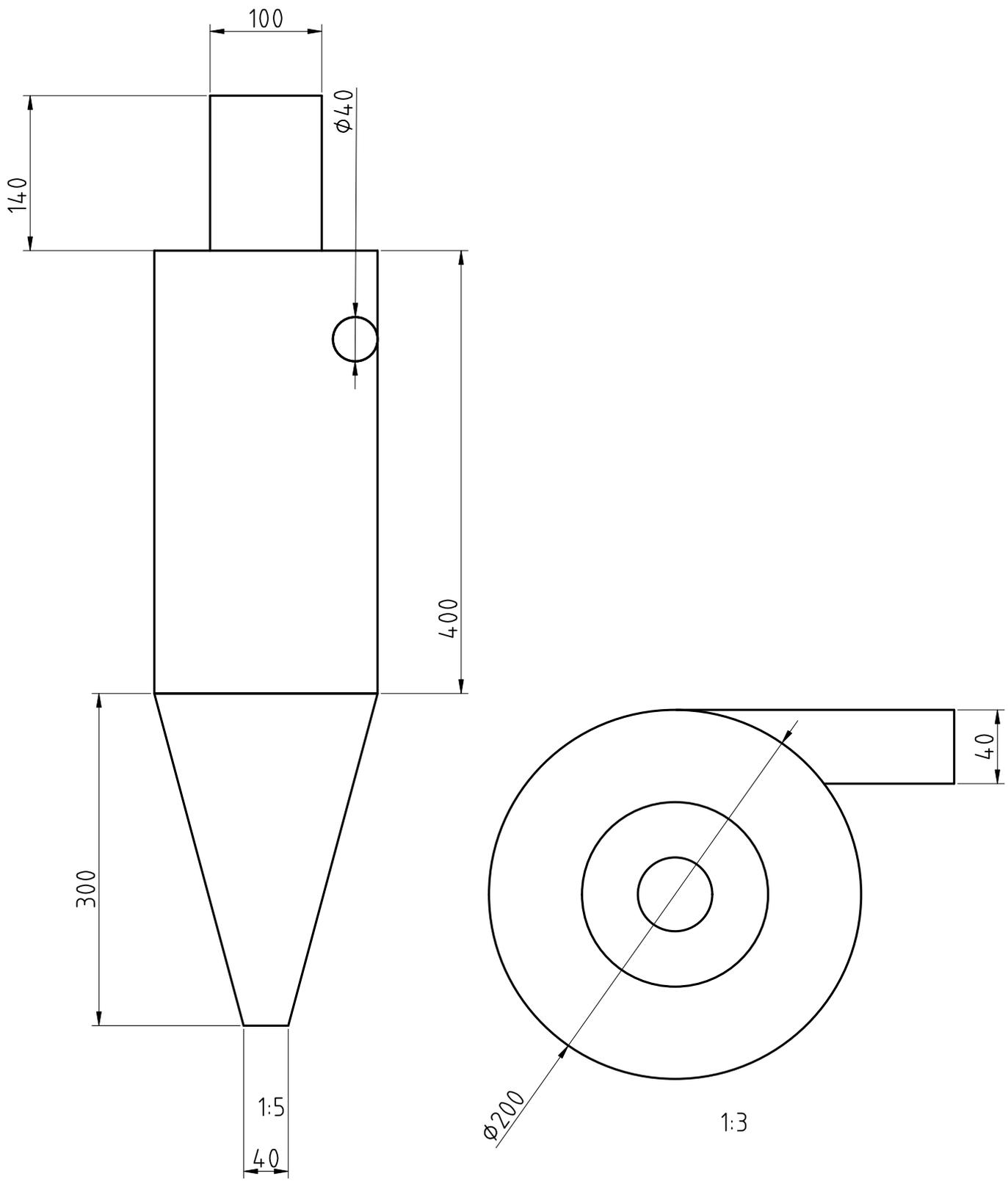
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 08 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				REV. 01	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET 1 on 1	



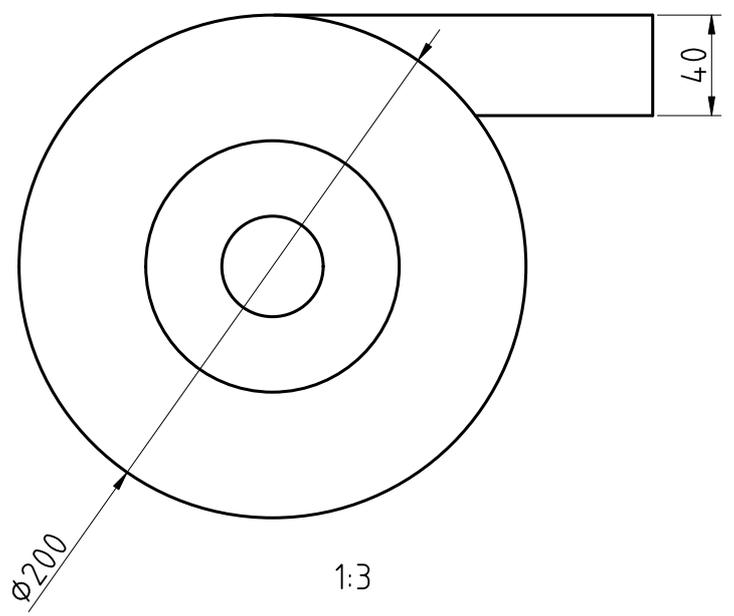
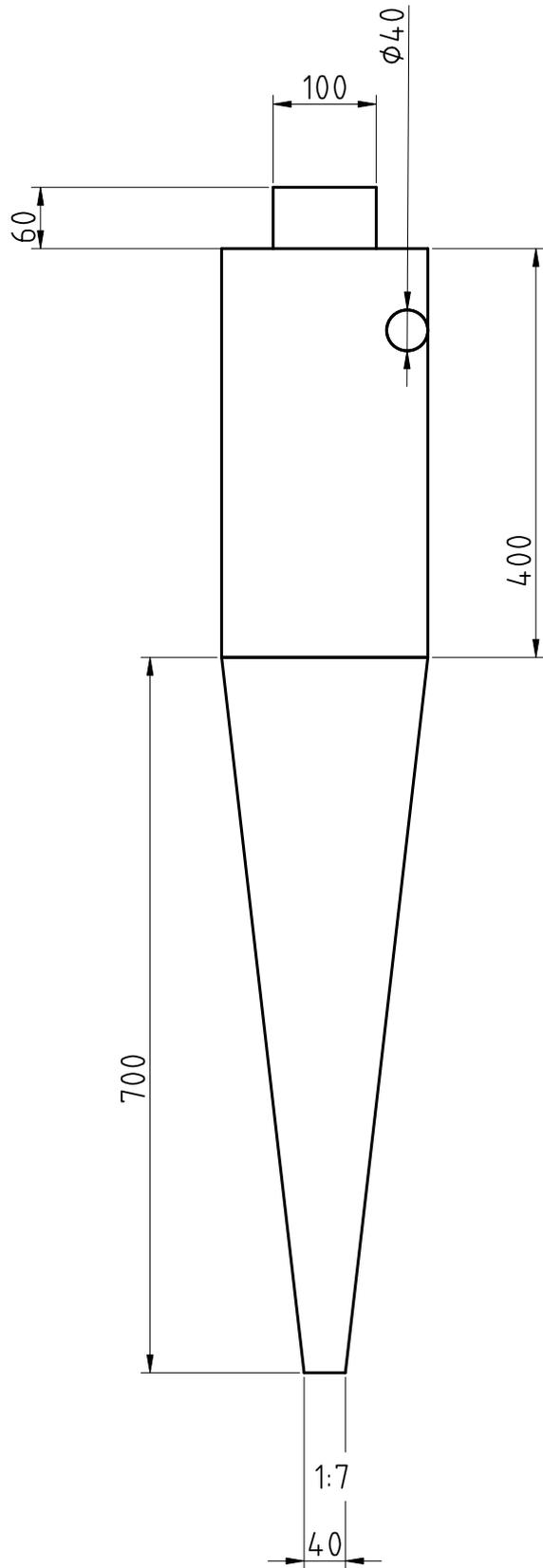
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 09 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
					SHEET 1 on 1



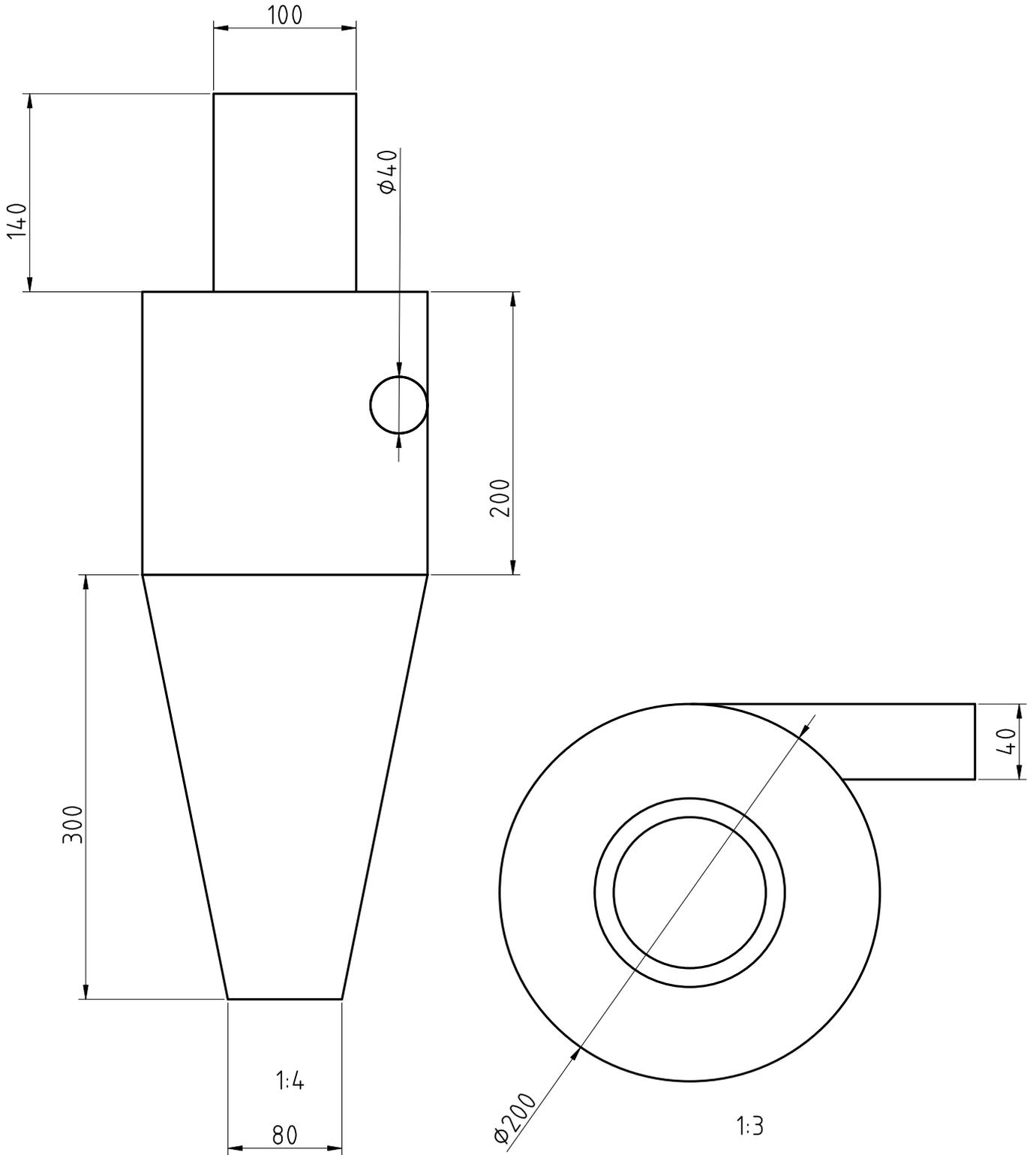
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 10 DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
					SHEET 1 on 1



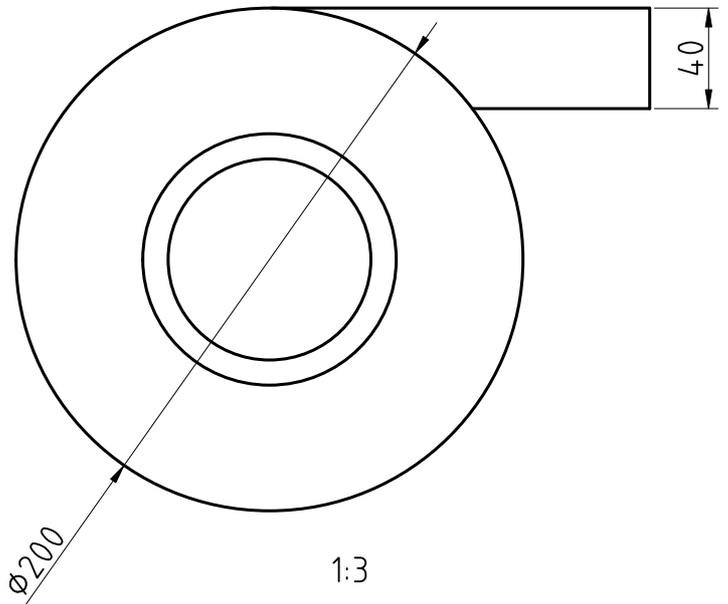
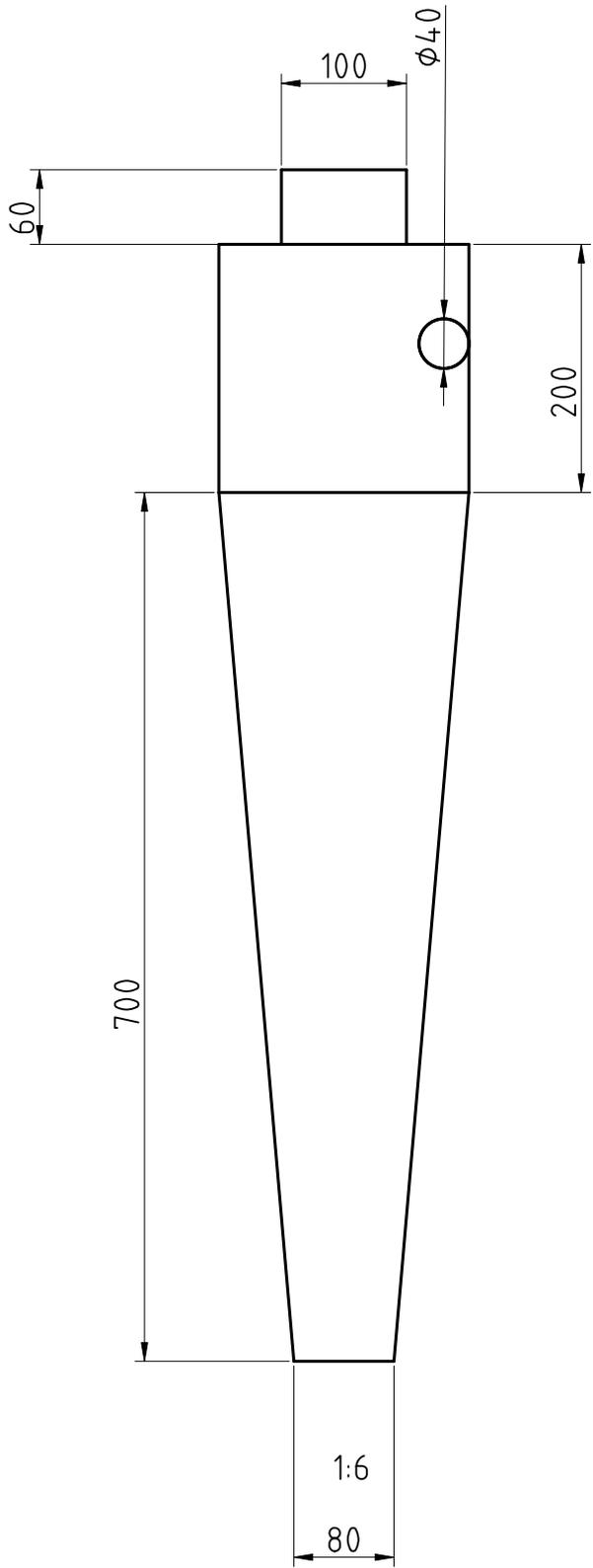
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 11</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				REV.	01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1



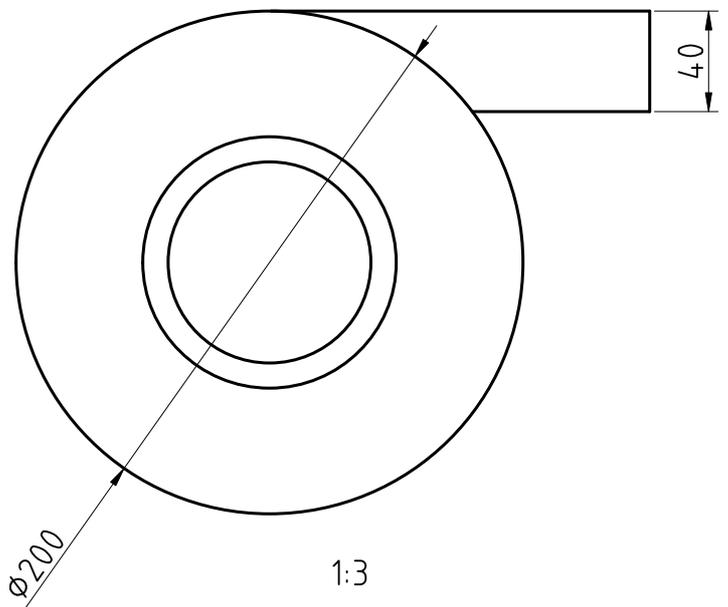
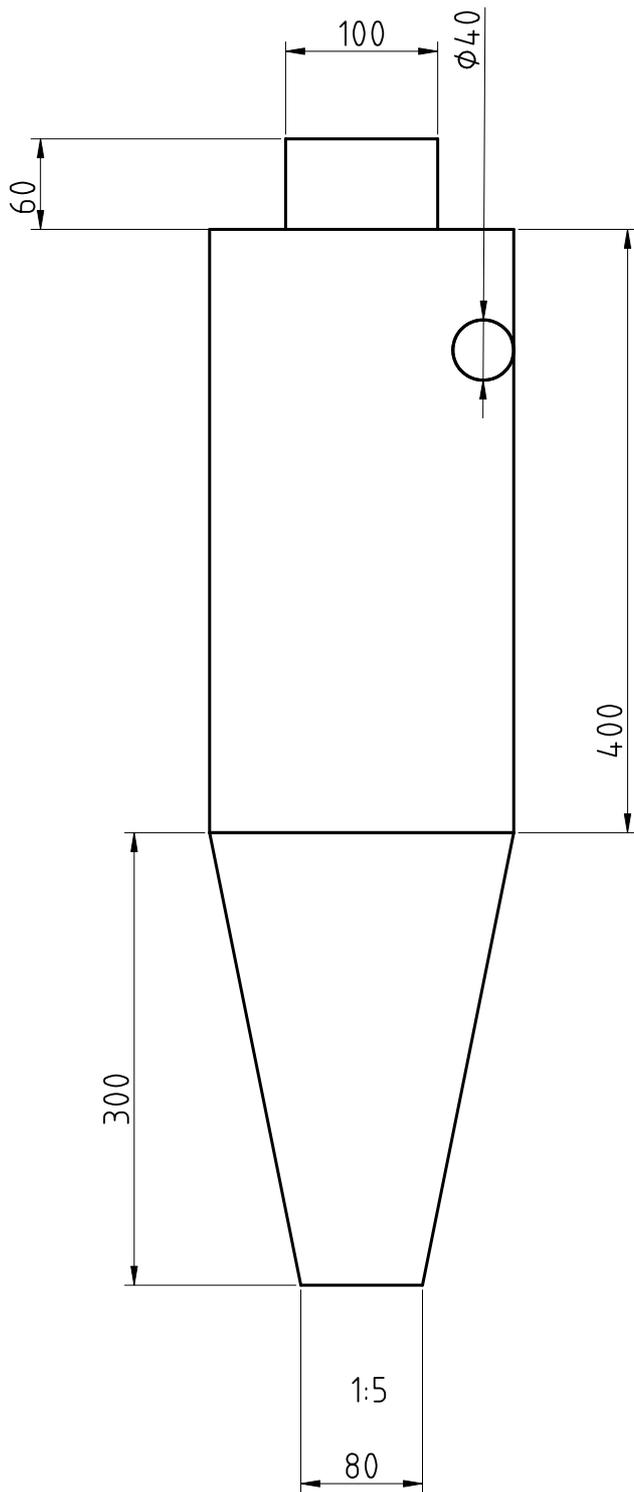
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 12 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
					SHEET 1 on 1



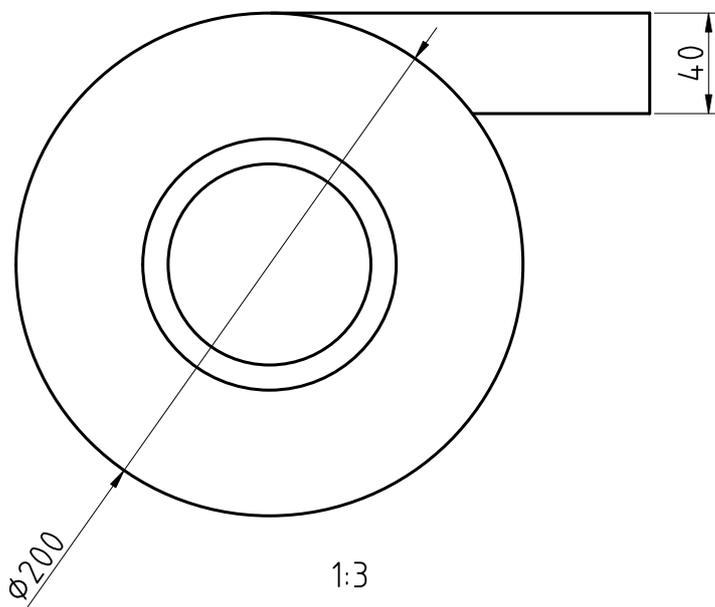
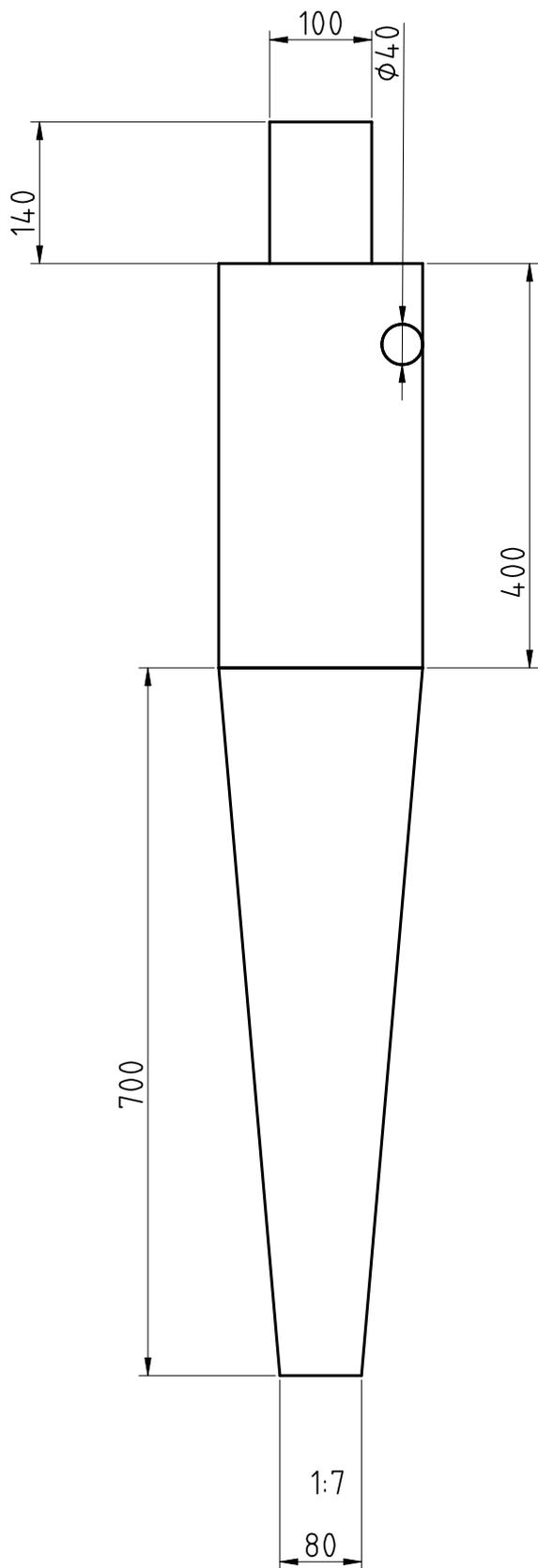
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 12</h2> <p style="text-align: center;">DESCRIÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE / VOLUME / SURFACE
					SHEET 1 on 1



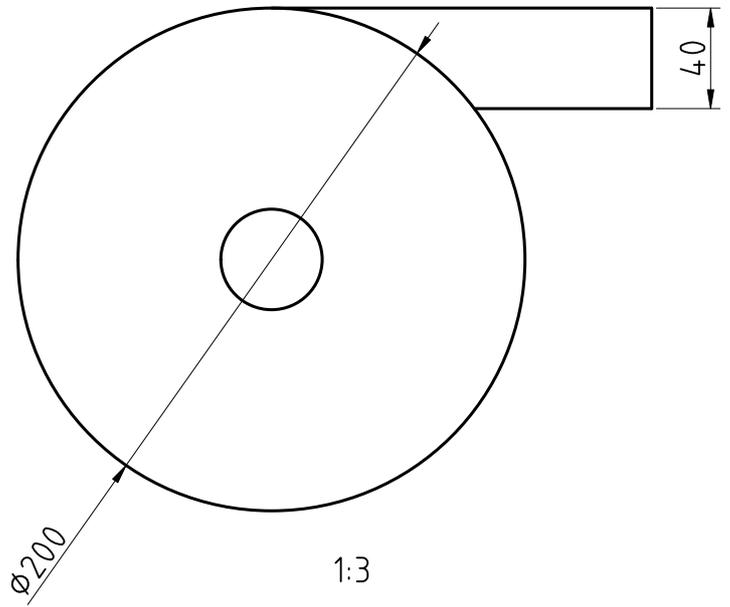
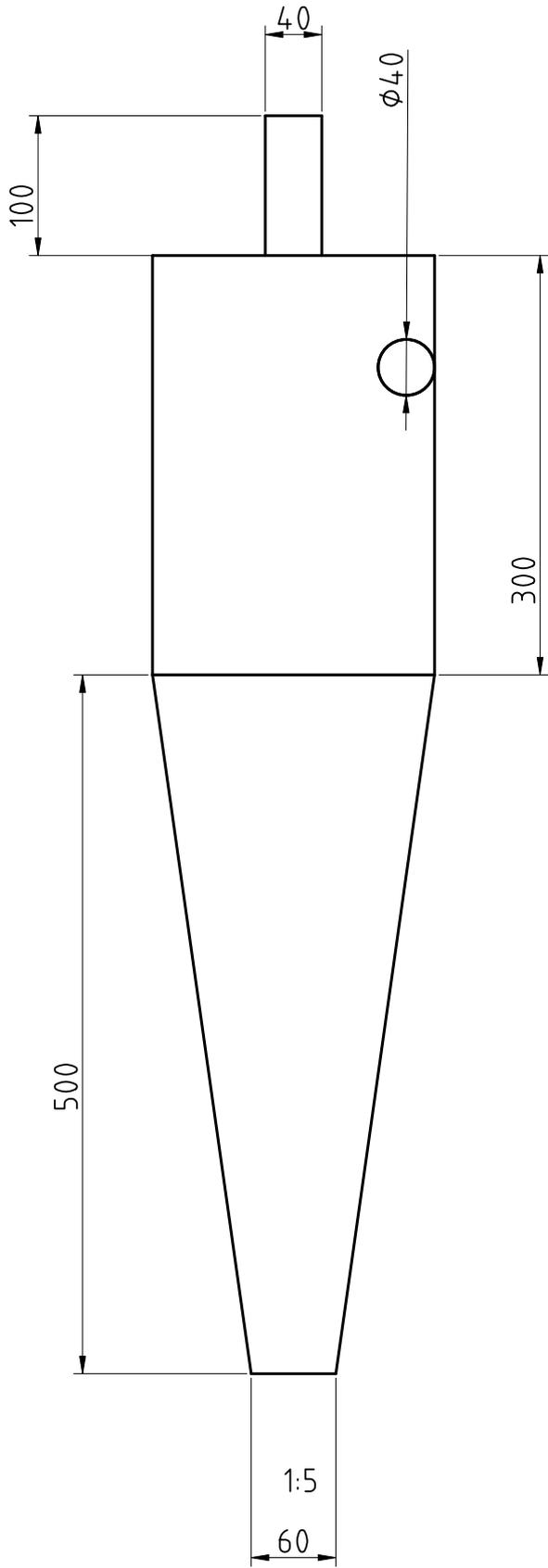
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 14 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
					SHEET 1 on 1
					REV. 01



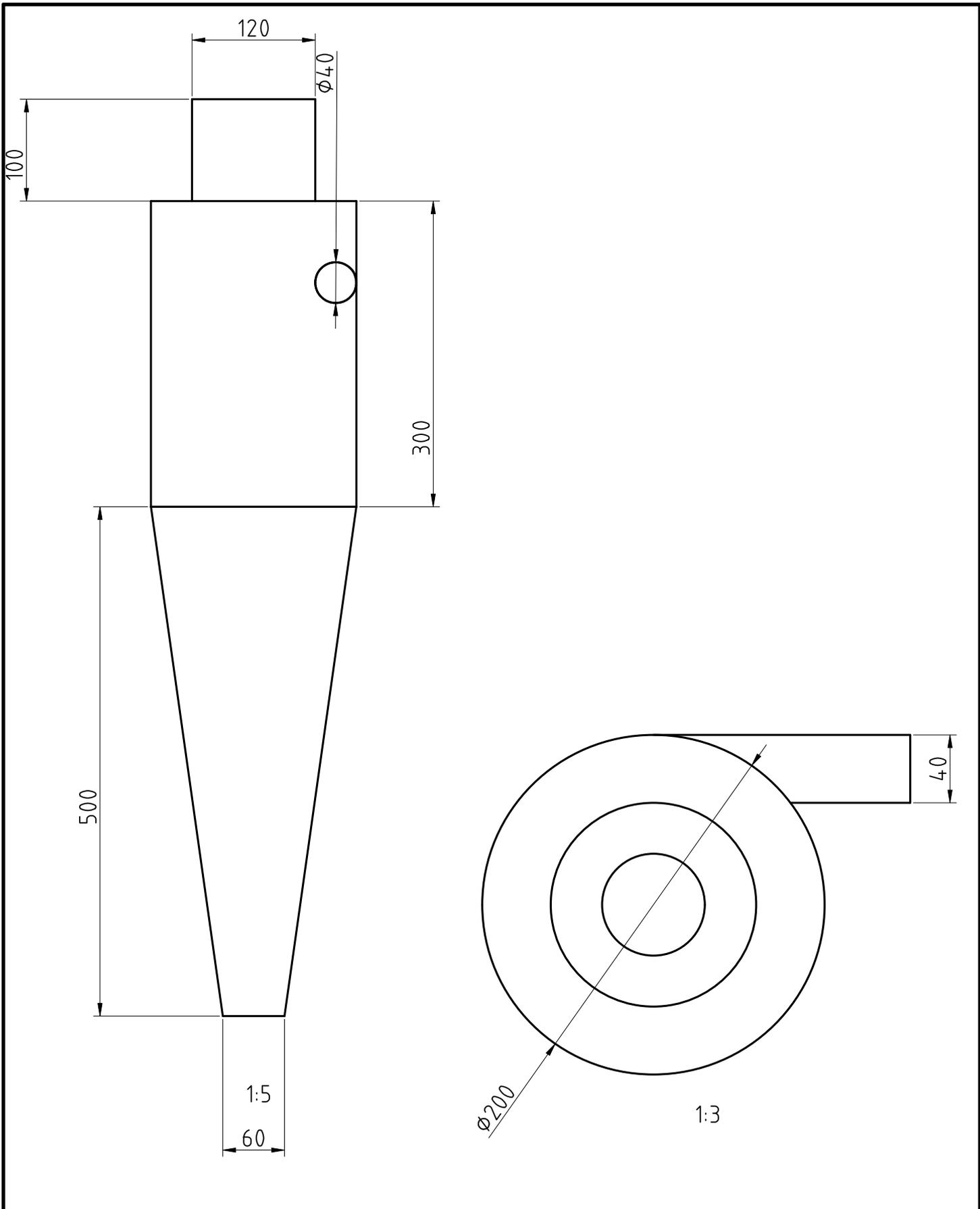
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 15</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF	
				REV.	01	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET 1 on 1



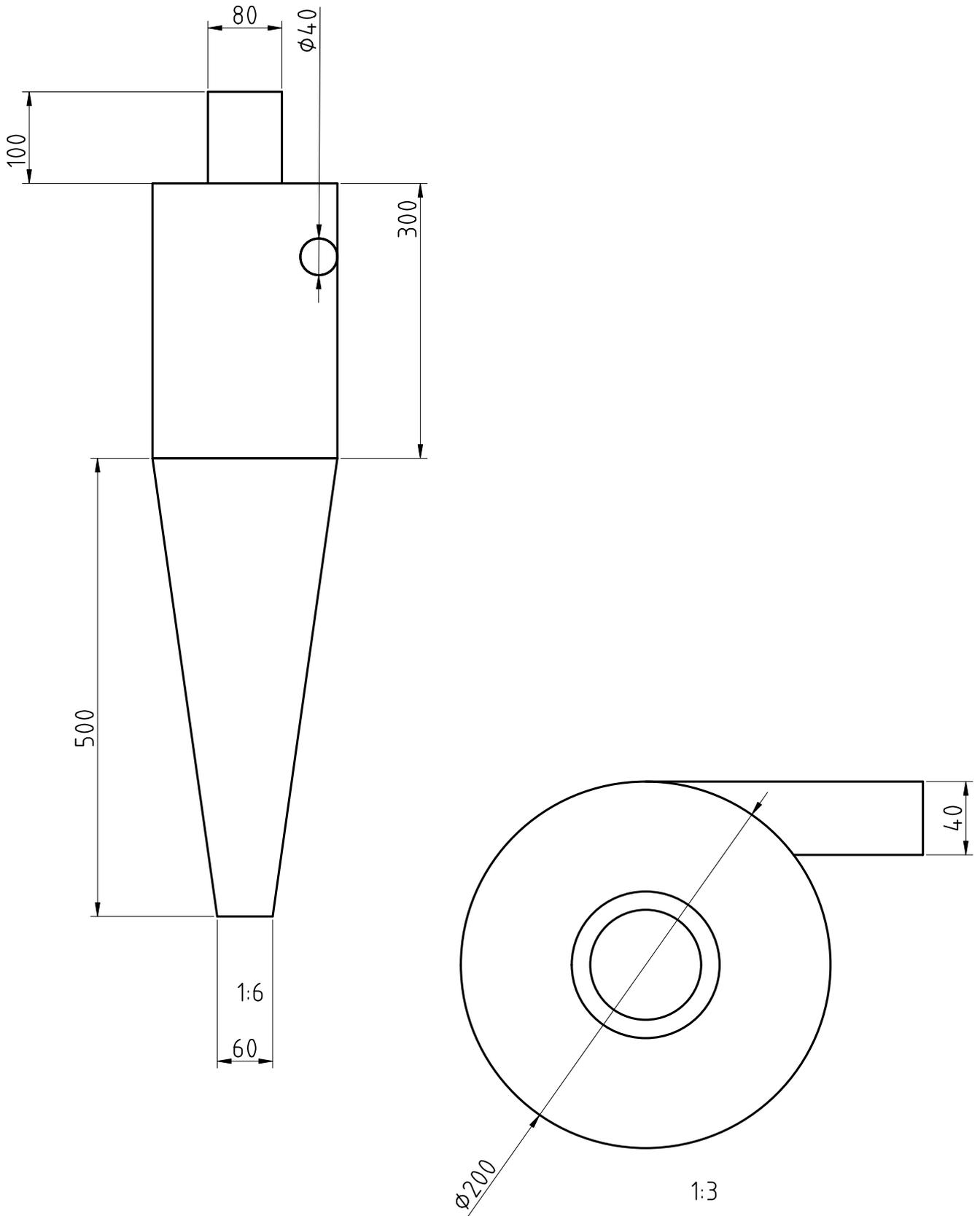
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 16	
ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
DO NOT CHANGE SCALE						
Angle de projection ISO						
	MATERIALS		FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV.	01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET 1 on 1



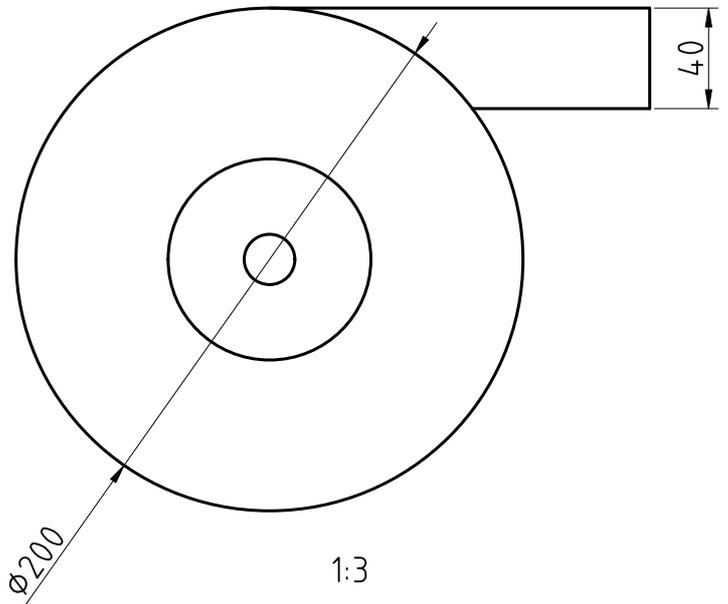
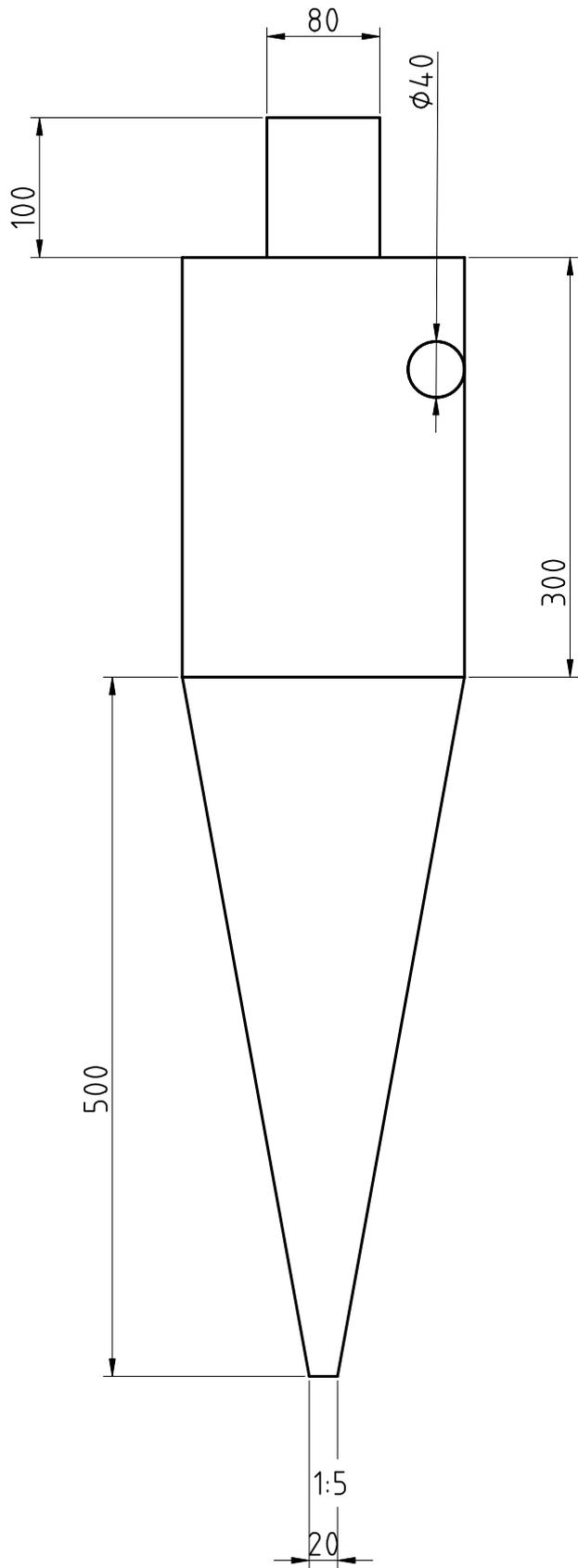
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 17 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF	
				AA		
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET
						1 on 1
						REV. 01



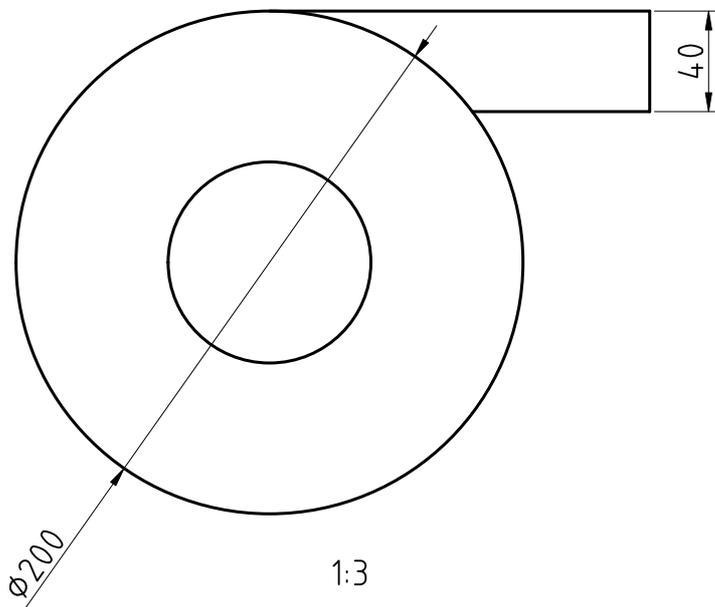
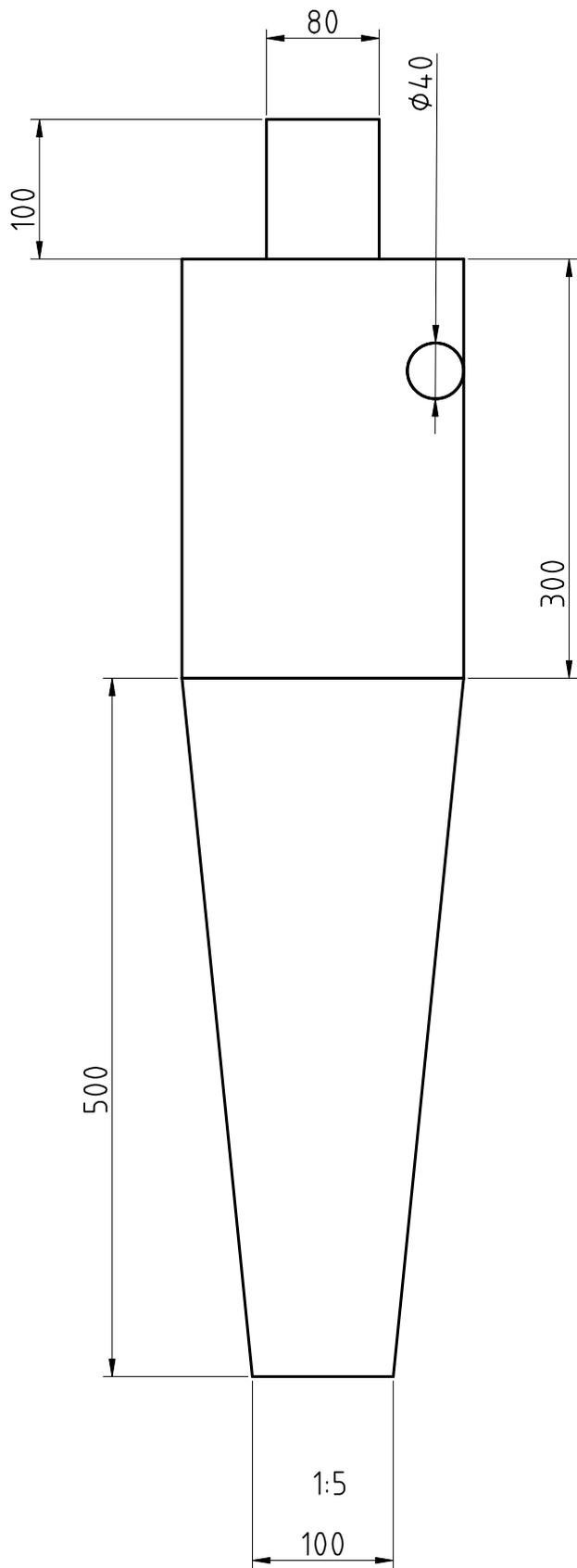
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 18 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
					REV. 01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET 1 on 1	



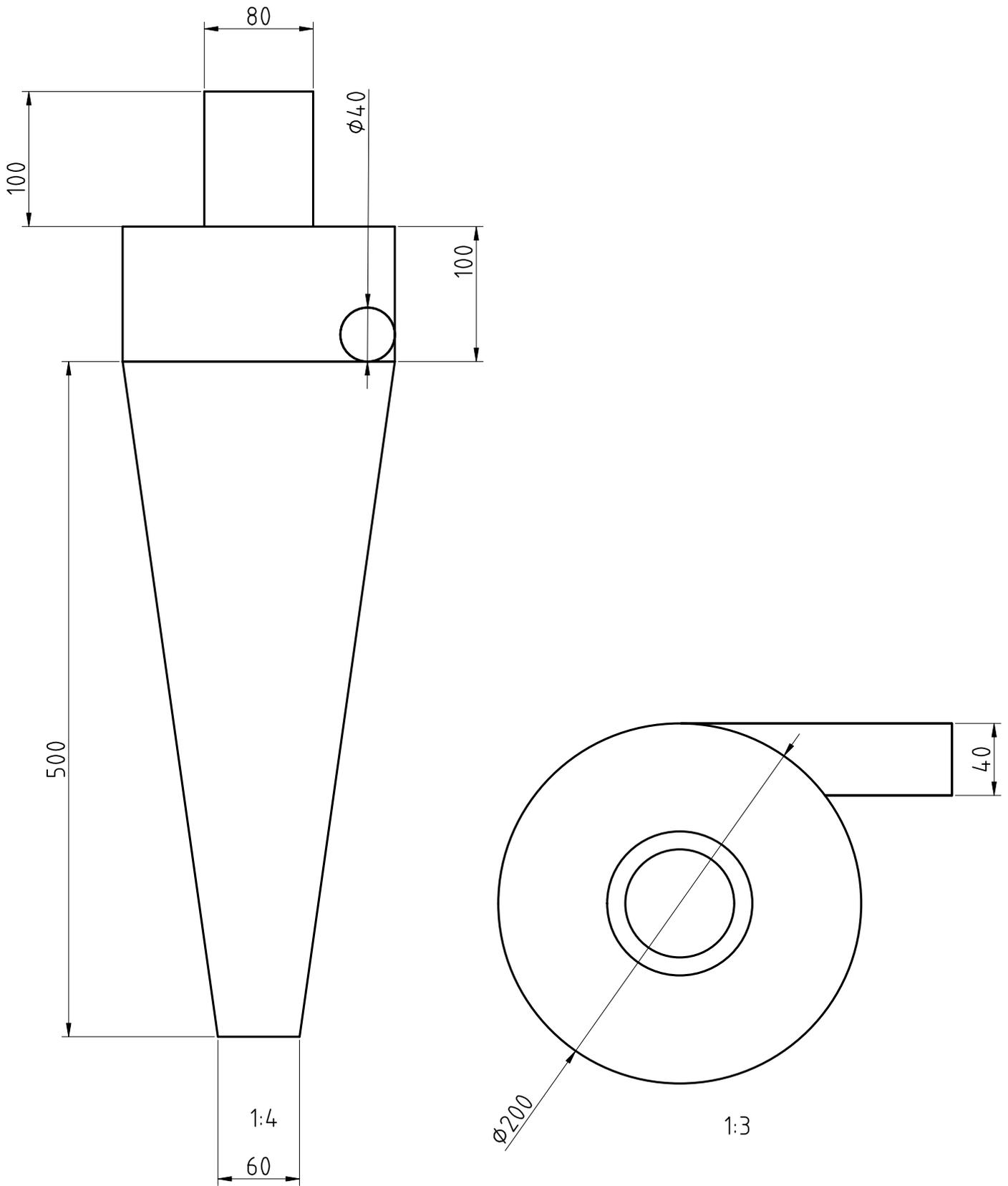
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION $= \pm$ DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 27 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				REV. 01	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET 1 on 1	



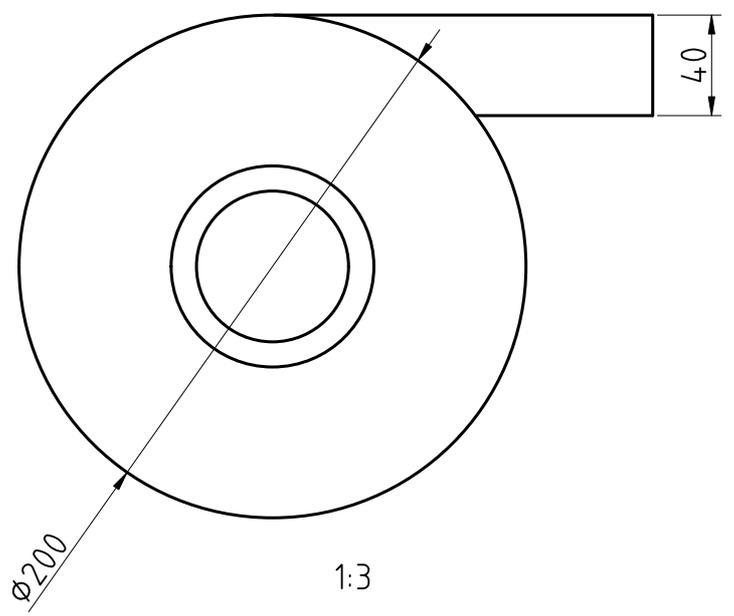
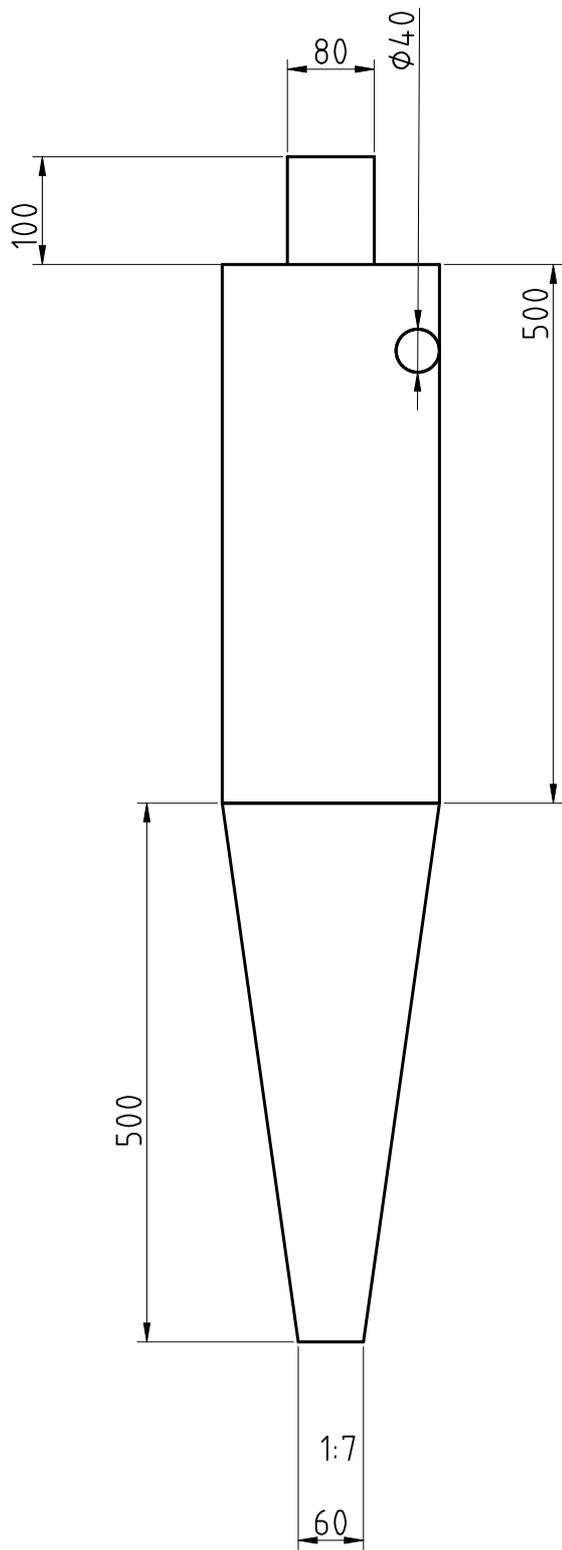
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 19</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF	
					REV. 01	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET 1 on 1



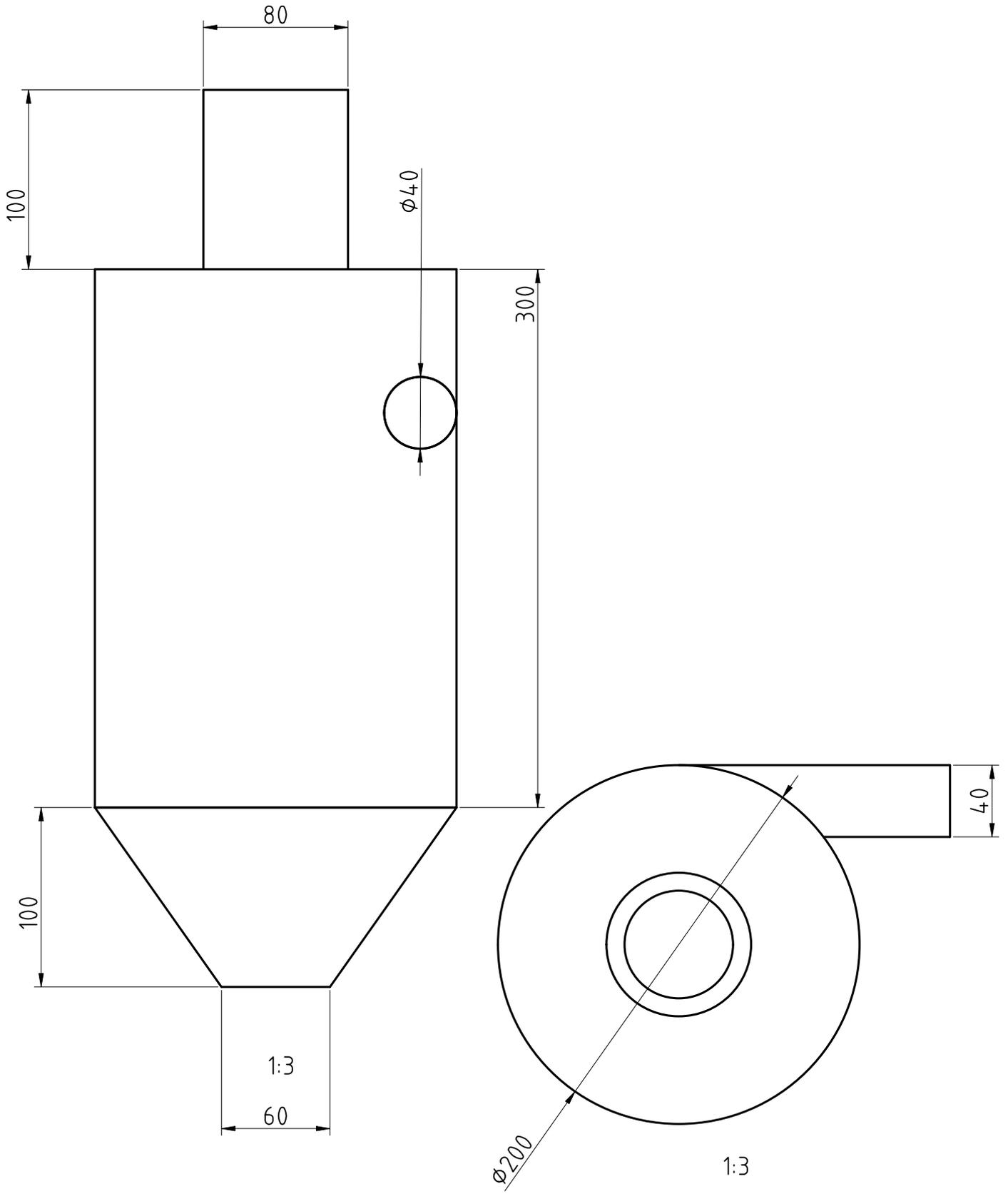
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 20	
ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
DO NOT CHANGE SCALE					SIZE	DRAWING REF
Angle de projection ISO						
	MATERIALS		FENCE		REV.	01
					LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET		1 on 1

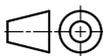


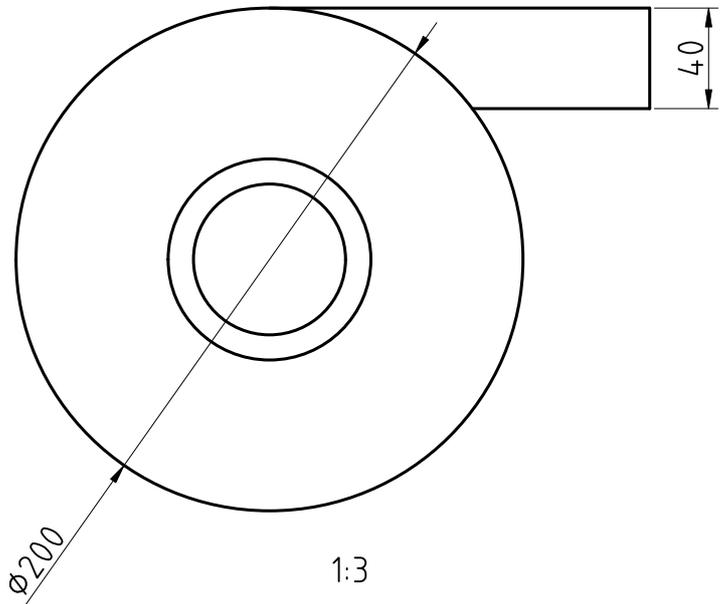
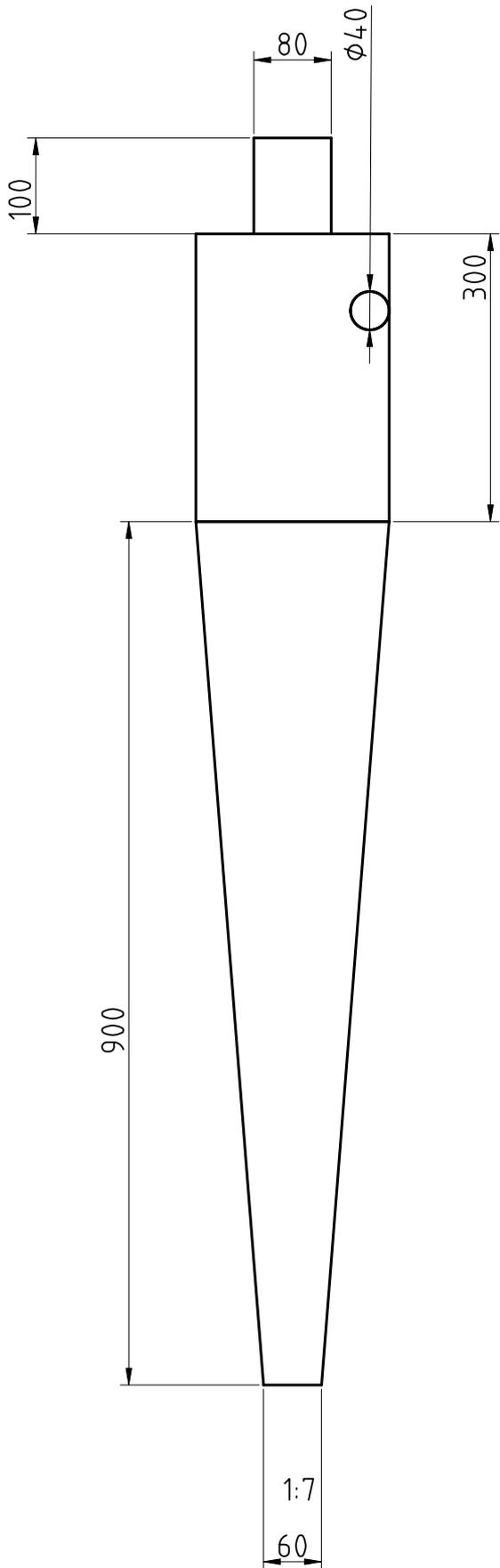
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 21</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	REV. 01
					SHEET 1 on 1	



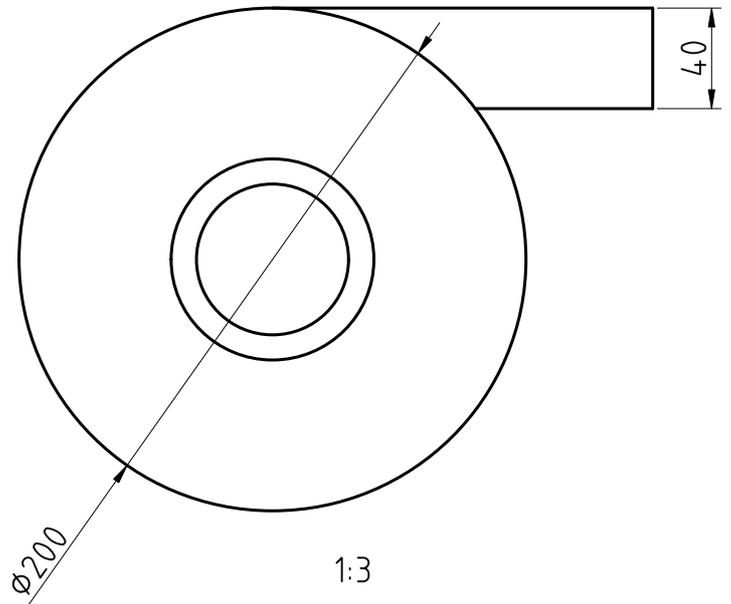
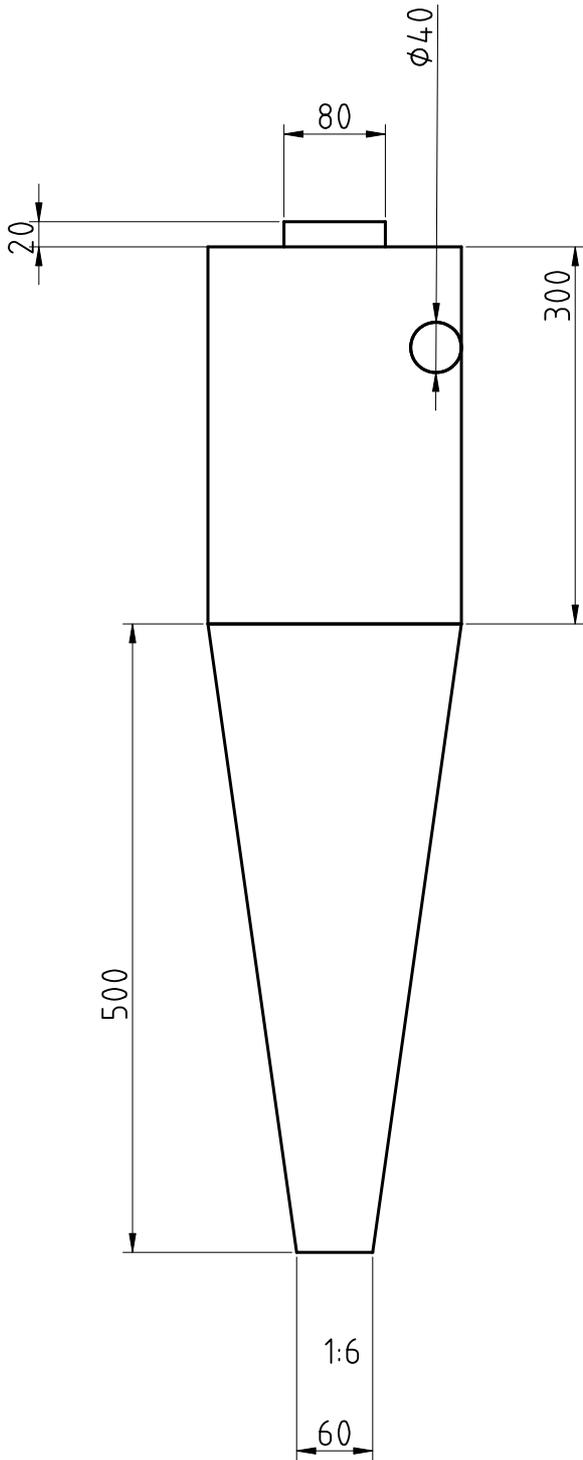
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 22</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01



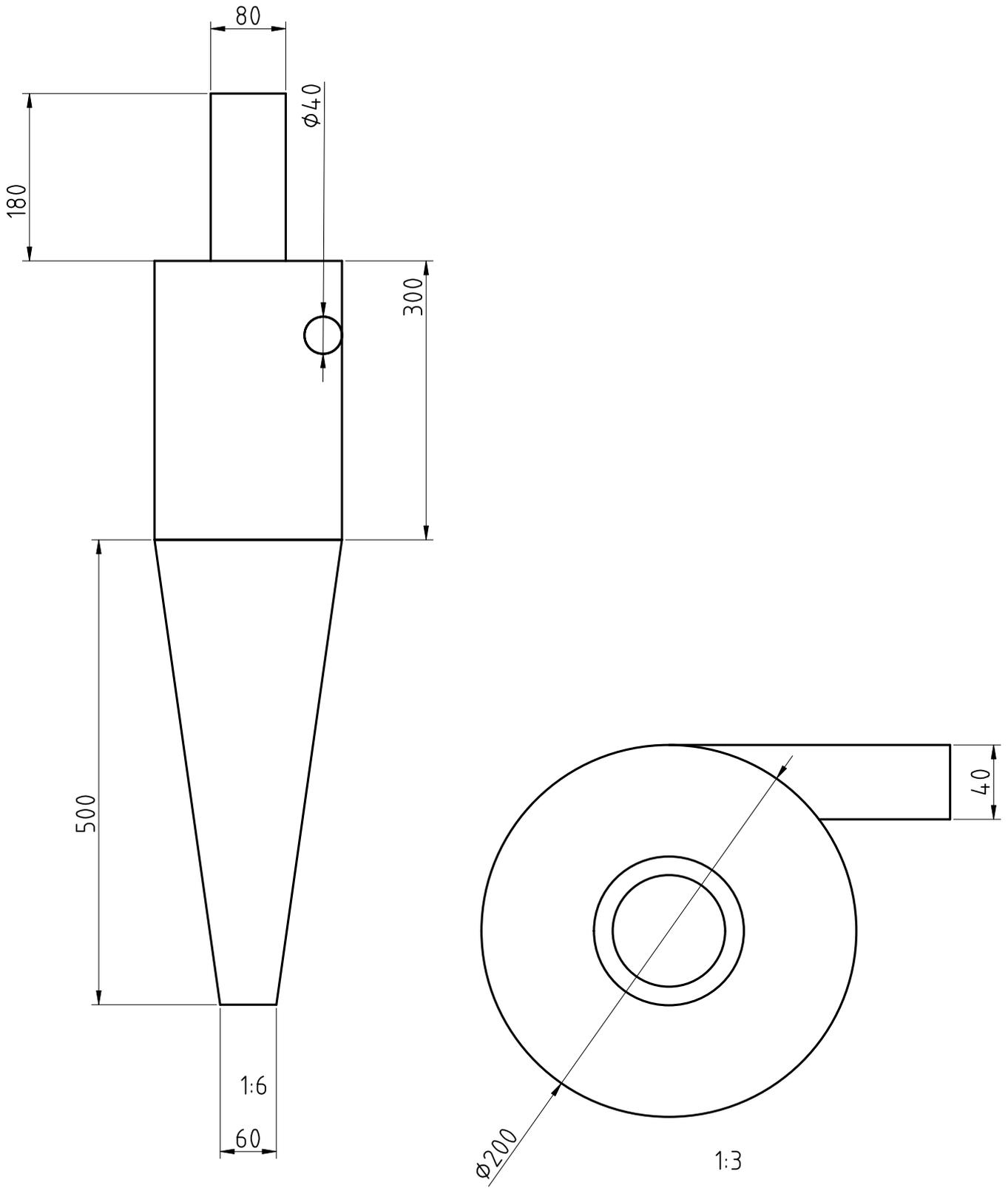
ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 23</h2> <p style="text-align: center;">DESCRIÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01

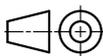


ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO 		NAME	SIGNATURE	DATE	<h2 style="text-align: center;">Separador Ciclônico 24</h2> <p style="text-align: center;">DESCRÇÃO</p> <p style="text-align: center;">Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.</p>
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				AA	
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1
					REV. 01



ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 25 DESCRIÇÃO Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.	
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23		
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	SIZE	DRAWING REF
	MATERIALS	FENCE		LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE	SHEET 1 on 1



ALL DIMENSIONS NOT SPECIFIED ARE IN: mm ANGLE $\angle = \pm^\circ$ DIMENSION = \pm DO NOT CHANGE SCALE Angle de projection ISO		NAME	SIGNATURE	DATE	Separador Ciclônico 26 Descrição Separador ciclônico construído para simulação numérica em CFD.
	Drawn	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Checked	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	Approved	Luiz Oliveira		2022-11-23	
	MATERIALS	FENCE		SIZE	DRAWING REF
				REV.	01
				LADDER	SIZE/VOLUME/SURFACE
				SHEET	1 on 1



TERMO DE AUTORIZAÇÃO

Graduação – Especialização – Mestrado – Doutorado – Memorial acadêmico – Relatório científico/Pós-doutorado

Na qualidade de titular dos direitos autorais deste trabalho, concedo ao Repositório Institucional da Universidade Federal de Alagoas, doravante nomeado RI/UFAL, o direito não-exclusivo de depositá-lo em sua base de dados (<http://www.repositorio.ufal.br>) e de distribuí-lo mundialmente, na íntegra e sem ressarcimento dos direitos autorais, conforme as permissões abaixo assinaladas, como também, de acordo com a Lei n. 9.610/98, **para fins não comerciais, leitura, impressão, download e demais usos que se fizerem necessários para a divulgação da produção científica brasileira a partir desta data.**

1 Tipo do trabalho

<input type="checkbox"/>	Dissertação + Produto Educacional
<input type="checkbox"/>	Dissertação
<input type="checkbox"/>	Tese
<input type="checkbox"/>	Trabalho de Conclusão de Curso (graduação)
<input type="checkbox"/>	Trabalho de Conclusão de Curso (especialização)
<input type="checkbox"/>	Memorial Acadêmico
<input type="checkbox"/>	Relatório Científico/Pós-doutorado

2 Identificação do trabalho:

1º Autor(a)	
Lattes¹	
2º Autor(a)²	
Lattes¹	
Orientador(a)	
Lattes³ Orientador(a)	
Coorientador(a)	

1 Este campo deve ser **obrigatoriamente** preenchido com o link do currículo Lattes do(a) autor(a), no caso de **relatórios científicos de pós-doutorado, trabalhos de conclusão de curso (TCC) oriundos de pós-graduação lato sensu (especialização), teses, dissertações e memoriais acadêmicos**; sendo **opcional** para TCC provenientes de cursos de graduação.

2 Em caso de coautoria (mais de um autor) ou autoria coletiva (vários autores), todos os nomes devem ser informados, assim como os respectivos currículos Lattes (informação **obrigatória** para **dissertação e tese**).

3 Este campo deve ser **obrigatoriamente** preenchido com o link do currículo Lattes do(a) orientador(a), no caso de **relatórios científicos de pós-doutorado, TCC oriundos de pós-graduação (lato sensu), TCC provenientes de graduação, dissertações e teses**. Este item **não se aplica** a memoriais acadêmicos.



Membros da Banca:

1º Membro	
2º Membro	
3º Membro	
4º Membro	
5º Membro	

Data da Defesa:	
------------------------	--

Título do trabalho no idioma original:

--

Palavras-chave no idioma original:

--

Título do trabalho em outro idioma (quando houver):

--

Palavras-chave em outro idioma (quando houver):

--



Curso de graduação/Programa de pós-graduação/Unidade:

--

Agência de fomento (Capes, CNPq, Fapeal, etc.) / Preencha quando houver e informe qual:

--

4 Informação de acesso ao documento:

Liberação para publicação:	Total	<input type="checkbox"/>
	Embargado ⁴	<input type="checkbox"/>

Em caso de acesso embargado, justifique no campo abaixo:

--

5 Endereço do depositante para contato:

Logradouro:	<input type="text"/>		
Nº <input type="text"/>	Compl.: <input type="text"/>	CEP:	<input type="text"/>
Cidade: <input type="text"/>	Estado: <input type="text"/>		
Tel.(s): <input type="text"/>			
E-mail: <input type="text"/>			
Data de entrega do documento: <input type="text"/>			

4 O embargo poderá ser mantido por até 01 (um) ano a partir da data de entrega do documento, informada no termo de autorização, salvo o resumo e os metadados (elementos referenciais) que ficarão sempre disponibilizados, em cumprimento à Portaria nº 13/2006 da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). A prorrogação do prazo do embargo deverá ser feita no transcurso do primeiro ano do embargo, sendo necessária a justificativa junto ao RI/UFAL. A falta do requerimento da prorrogação do embargo dentro do prazo mencionado resultará na liberação imediata e automática de todo o conteúdo da produção científica.



Declaro, para os devidos fins, que:

O documento entregue é meu trabalho original, sobre o qual ainda detenho o direito exclusivo de dispor dos direitos autorais, sem infringir direitos de terceiros.⁵

O documento fornecido se trata da versão final do trabalho, devidamente corrigida conforme as recomendações da banca examinadora (quando for o caso).

O documento entregue contém material de titularidade de terceiros, para o qual foi(ram) obtida(s) a(s) devida(s) autorização(ões) do(s) detentor(es) dos direitos autorais com o fim licenciar o documento conforme as permissões atribuídas. O material de titularidade de terceiros está devidamente identificado e expresso no documento entregue.⁶

O documento fornecido foi elaborado com base em trabalho financiado/apoiado por instituição de fomento, sendo todas as obrigações estipuladas no contrato ou acordo integralmente cumpridas.⁷

No documento submetido não há divulgação de dados sensíveis, estando o trabalho em conformidade com as disposições da Lei Geral de Proteção de Dados (Lei n. 13.709/2018).⁸

Declaro, por fim, que estou ciente de que o conteúdo submetido é de minha inteira responsabilidade.

Assinatura do(a) depositante

5 Esse item deve ser assinalado quando o documento possuir apenas um(a) autor(a).

6 Esse item deve ser assinalado quando o documento possuir mais de um(a) autor(a).

7 Esse item deve ser assinalado sempre que o trabalho tiver o financiamento de alguma agência de fomento.

8 Saiba sobre o conteúdo da LGPD em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm