



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**COMPORTAMENTO DO HIDROCICLONE FILTRANTE FRENTE ÀS
MODIFICAÇÕES NO DIÂMETRO DE *UNDERFLOW* E NO TUBO DE
*VORTEX FINDER***

Uberlândia - MG - Brasil
2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**COMPORTAMENTO DO HIDROCICLONE FILTRANTE FRENTE ÀS
MODIFICAÇÕES NO DIÂMETRO DE *UNDERFLOW* E NO TUBO DE
*VORTEX FINDER***

Celso Augusto Koboldt de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo

Co-orientador: Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno

**Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.**

Uberlândia - MG - Brasil
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A447c Almeida, Celso Augusto Koboldt de, 1977-

Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de *underflow* e no tubo de *vortex finder* / Celso Augusto Koboldt Almeida. - 2008.

89 f. : il.

Orientadores: Marcos Antônio de Souza Barrozo, João Jorge Ribeiro Damasceno.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Separação (Tecnologia) - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza. II. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.066

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, 10 DE MARÇO DE 2008.

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
(Orientador – PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(Co-orientador – PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. Jader Martins
(UFOP)
(hydroclean)

À pessoa responsável por me tornar quem sou. Esta mesma pessoa que sempre esteve comigo nos momentos mais críticos, compartilhou das minhas alegrias e que me incentiva a continuar em busca de meus ideais. Exemplo de esforço, dedicação, garra, afeto... e que tenho o privilégio e orgulho de chamar de mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me direcionado nesta trajetória de enriquecimento do conhecimento científico.

Aos Professores Orientadores e amigos Marcos Antônio de Souza Barrozo, Luiz Gustavo Martins Vieira e João Jorge Ribeiro Damasceno pela maneira dedicada, disciplinada, profissional e humana que souberam transmitir tão bem para a realização desta dissertação.

Aos membros da banca, Carlos Henrique Ataíde e Jader Martins, pelas sugestões dadas para melhoria desta dissertação.

À minha mãe Maria da Graça e minha irmã Isabel Arice, pelo apoio incondicional.

Aos alunos de graduação Beatriz Cristina, Diogo César, Diovanina e Juliana, pela responsabilidade, dedicação, esforço e companheirismo que foram de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

À minha namorada Patrícia Carolina, pelo auxílio, incentivo e apoio nos momentos mais críticos deste trabalho.

Aos funcionários e demais professores da FEQ/UFU, em especial, ao Anísio pelo fornecimento dos materiais necessários para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade.

Aos meus amigos Edu Alves, Rodrigo Tomaz, Leandro Cardoso Rafael Bruno e Luciano Tamiozzo por compartilhar das alegrias e dificuldades.

À Capes, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Símbolos	iv
Resumo	vi
<i>Abstract</i>	vii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 – Família de hidrociclones	05
2.2 – Funcionamento de um hidrociclone	05
2.3 – Modelos Clássicos de Separação	06
2.4 – Equacionamento Empírico- Os Grupos Adimensionais	07
2.5 – Hidrociclone Filtrante	09
2.6 – Fluidodinâmica Computacional (CFD)	21
2.6.1–Modelos de Turbulência	21
2.6.1.1 – Modelo RSM (<i>Reynolds Stress Model</i>)	24
2.6.2 – Modelagem para escoamentos multifásicos	25
2.6.2.1 – O Modelo da Fase Discreta	27
2.6.3 – Equações do movimento e da continuidade utilizadas nas simulações bidimensionais em hidrociclones através do <i>software</i> Fluent®	28
2.6.4 – Técnicas e Métodos de Solução Numérica	30
2.6.5 – CFD em Hidrociclones e Outros Estudos Recentes	32
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 – Material Particulado	35
3.2 – Os hidrociclones	36
3.3 – Unidade Experimental	39
3.4 – Procedimento Experimental	41

3.5 – Cálculo das Grandezas Associadas a Hidrociclones.....	42
3.6 – Metodologia para as Simulações Numéricas.....	45
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 – Comparação do Comportamento do Hidrociclone Convencional (HC ₁₁) com o Hidrociclone Filtrante (HF ₁₁).....	49
4.2 – Efeito do Comprimento do Tubo de <i>Vortex Finder</i> (ℓ) na Separação com o Hidrociclone Filtrante (HF ₁₁).....	52
4.3 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> (D _u) na Separação com o Hidrociclone Filtrante....	57
4.4 – Análise Estatística para o Hidrociclone Filtrante HF ₁₁	62
4.4.1 – Influência das Variáveis no Número de Euler (Eu).....	62
4.4.2 – Influência das Variáveis na Razão de Líquido (R _L).....	63
4.4.3 – Influência das Variáveis no diâmetro de corte (d ₅₀).....	64
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
APÊNDICE.....	71
Apêndice A – Dados Experimentais Para Otimização do Hidrociclone H ₁₁	72
Apêndice B – Hidrociclones Convencionais – Simulações em CFD.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Principais dimensões características de um hidrociclone.....	02
Figura 1.2 –	Trajetória das partículas no interior de um hidrociclone.....	02
Figura 2.1 –	Perfis experimentais de velocidade tangencial obtidos por DABIR (1983) e simulações por CFD realizadas por VIEIRA (2006).....	18
Figura 2.2 –	Resultados de VIEIRA (2006) para o número de Euler.....	19
Figura 2.3 –	Resultados de VIEIRA (2006) para o diâmetro de corte.....	19
Figura 2.4 –	Comparação entre os números de Euler e as eficiências totais de coleta para os hidrociclones filtrantes na queda de pressão de $1,5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (VIEIRA, 2006).....	20
Figura 3.1 –	Curva de distribuição granulométrica da rocha fosfática obtida experimentalmente pela técnica de difração de raios <i>laser</i> e a previsão dela pelo modelo RRB.....	36
Figura 3.2 –	Foto dos diferentes comprimentos de <i>vortex finder</i> (12, 21 e 30 mm) e diâmetro de <i>underflow</i> (3, 4 e 5 mm) utilizados para os hidrociclones HC ₁₁ e HC ₁₁	37
Figura 3.3–	Cone Convencional (1) e Filtrante (2), travas mecânicas (3), duto de <i>underflow</i> (4) e de alimentação (7), cilindros (6) e duto de <i>overflow</i> dos equipamentos (Hidrociclones HC ₁₁ e HF ₁₁) utilizados para o estudo da separação sólido-líquido.....	39
Figura 3.4 –	Unidade Experimental.....	40
Figura 3.5 –	Simetria (a), malha (b) e células computacionais (c) para os hidrociclones...	46
Figura 4.1 –	Números de Euler (Eu) para os hidrociclones HC ₁₁ e HF ₁₁ com D _u e ℓ de 5 e 21 mm, respectivamente.....	49
Figura 4.2 –	Perfis de pressão Total (P) para os hidrociclones convencional (HC ₁₁) e filtrante (HF ₁₁) com D _u e ℓ iguais a 5 e 21 mm, respectivamente, operando com $Q = 301 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	50
Figura 4.3 –	Diâmetros de Corte (d ₅₀) para os hidrociclones HC ₁₁ e HF ₁₁ com D _u e ℓ de 4 e 12 mm, respectivamente.....	51
Figura 4.4 –	Velocidade radial (u) simulada em função da posição radial para os hidrociclones convencional e filtrante (com D _u = 4 mm e ℓ = 12 mm).....	52
Figura 4.5 –	Números de Euler (Eu) do hidrociclone filtrante HF ₁₁ em função do comprimento do <i>vortex finder</i> (D _u = 5 mm).....	53

Figura 4.6 –	Perfil de Pressão Total (P) dos hidrociclones filtrantes (HF ₁₁) com D _u = 5 mm, montados com comprimento do tubo de <i>vortex finder</i> de $\ell = 12$ mm (a); $\ell = 21$ mm (b) e $\ell = 30$ mm (c).....	54
Figura 4.7 –	Diâmetros de corte (d ₅₀) do hidrociclone filtrante HF ₁₁ em função do comprimento do <i>vortex finder</i> (D _u = 3 mm).....	55
Figura 4.8–	Razão de líquido (R _L) frente a variações do comprimento de <i>vortex finder</i> para um diâmetro de <i>underflow</i> de 5 mm.....	56
Figura 4.9–	Velocidade axial (w) simulada dos hidrociclones filtrantes (HF ₁₁) com D _u = 4 mm, com comprimento do tubo de <i>vortex finder</i> de $\ell = 12$ mm (a); $\ell = 21$ mm (b) e $\ell = 30$ mm (c) operando na mesma vazão de alimentação (304 cm ³ *s ⁻¹).....	57
Figura 4.10–	Números de Euler (Eu) do hidrociclone HF ₁₁ em função do tamanho do diâmetro de <i>underflow</i> para um <i>vortex finder</i> fixo de 30 mm.....	58
Figura 4.11–	Resultados das simulações em CFD para o perfil de Pressão Total dos hidrociclones filtrantes com $\ell = 21$ mm e D _u = 5 mm (a); D _u = 4 mm (b) e D _u = 3 mm (c).....	59
Figura 4.12–	Razão de Líquido (R _L) em função das dimensões do diâmetro de <i>underflow</i> para um <i>vortex finder</i> de 21 mm.....	60
Figura 4.13–	Resultados das simulações em CFD para velocidade axial ascendente (w) dos hidrociclones filtrantes com $\ell = 30$ mm e D _u = 5 mm (a); D _u = 4 mm (b) e D _u = 3 mm (c).....	60
Figura 4.14–	Diâmetros de Corte (d ₅₀) em função das dimensões do diâmetro de <i>underflow</i> para um <i>vortex finder</i> de 21 mm.....	61
Figura 4.15–	Superfícies de Resposta para o Número de Euler (Eu) em função de D _u (X ₁) e ℓ (X ₂) para o hidrociclone HF ₁₁	62
Figura 4.16–	Superfícies de Resposta para a Razão de Líquido (R _L), de acordo com o par D _u (X ₁) e ℓ (X ₂), para o hidrociclone HF ₁₁	63
Figura 4.17–	Superfícies de Resposta para diâmetro de corte (d ₅₀), de acordo com o par D _u (X ₁) e ℓ (X ₂), para o hidrociclone HF ₁₁	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Matriz de Planejamento para a construção e estudo dos hidrociclones (filtrantes e convencionais) segundo Vieira (2006).....	16
Tabela 3.1 –	Composição química das partículas rocha fosfática (Fonte: Fosfertil - Ultrafertil - Catalão).....	35
Tabela 3.2 –	Relações Geométricas dos hidrociclones convencional (HC_{11}) e filtrante (HF_{11}) utilizados neste trabalho.....	37
Tabela 3.3 –	Matriz Planejamento de experimentos para as variáveis D_u e ℓ no estudo dos hidrociclones HF_{11} e HF_{11}	38

LISTA DE SÍMBOLOS

B_c	dimensão do duto de entrada do ciclone	[L]
C_v	concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
C_{vu}	concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
C_w	concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
C_{wu}	concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
C_{y50}	número característico no ciclone	[-]
d_p	diâmetro da partícula	[L]
d_{Stk}	diâmetro de Stokes	[L]
d_{50}	diâmetro de corte	[L]
d_{50}	diâmetro de corte reduzido	[L]
D_c	diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone	[L]
D_i	diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone	[L]
D_o	diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone	[L]
D_u	diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[L]
Eu	número de Euler	[-]
g	aceleração gravitacional	[LT ⁻²]
G	eficiência granulométrica	[-]
G'	eficiência granulométrica reduzida	[-]
G_m	taxa mássica de fluido	[MT ⁻¹]
H	altura do tronco de cone	[L]
HC	hidrociclone convencional	[-]
HF	hidrociclone filtrante	[-]
h	altura do tronco de cilindro	[L]
K	constante adimensional da equação de projeto para hidrociclones	[-]
K_m	permeabilidade do meio filtrante	[L ²]
ℓ	comprimento do <i>vortex finder</i>	[L]
L	comprimento do hidrociclone	[L]
L_1	comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone	[L]
η	eficiência total	[-]
η	eficiência total reduzida	[-]
P	pressão do fluido	[ML ⁻¹ T ⁻²]
Q_F	velocidade intersticial de filtrado	[LT ⁻¹]
Q	vazão volumétrica de alimentação do hidrociclone	[L ³ T ⁻¹]
Q_F	vazão volumétrica de filtrado	[L ³ T ⁻¹]
Q_u	vazão volumétrica de <i>underflow</i>	[L ³ T ⁻¹]
Re	número de Reynolds	[-]
R_L	razão de líquido	[-]
R_m	resistência do meio filtrante	[L ⁻¹]
Stk_{50}	número de Stokes	[-]
t	tempo	[T]
T	tempo de residência da partícula	[T]
u	velocidade radial de fluido	[LT ⁻¹]
u_c	velocidade da suspensão com base na parte cilíndrica do hidrociclone	[LT ⁻¹]
u_r	velocidade da partícula na direção radial	[LT ⁻¹]
v	velocidade tangencial do fluido	[LT ⁻¹]
v_i	velocidade da partícula no duto de alimentação	[LT ⁻¹]
v_z	velocidade da partícula na direção axial	[LT ⁻¹]
X	fração mássica de partículas na alimentação cujo diâmetro é inferior a d_{Stk}	[-]

X_u	fração mássica de partículas no <i>underflow</i> cujo diâmetro é inferior a d_{stk}	[-]
z	posição axial	[-]
w	velocidade axial do fluido	[LT ⁻¹]
W	vazão mássica de alimentação	[MT ⁻¹]
W_s	vazão mássica de sólidos na alimentação do hidrociclone	[MT ⁻¹]
W_{su}	vazão mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[MT ⁻¹]
W_u	vazão mássica da corrente de <i>underflow</i>	[MT ⁻¹]
α	resistividade da torta	[ML ⁻¹]
δ_{ij}	delta de Kronecher	[-]
$-\Delta P$	queda de pressão do hidrociclone	[ML ⁻¹ T ⁻²]
μ	viscosidade do fluido puro	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
θ	ângulo da parte cônica do hidrociclone	[°]
ρ	densidade do fluido puro	[ML ⁻³]
ρ_u	densidade do sólido	[ML ⁻³]
$\rho_{a\ lim}$	densidade da suspensão na alimentação	[ML ⁻³]
ρ_u	densidade da suspensão no <i>underflow</i>	[ML ⁻³]

RESUMO

Hidrociclones filtrantes são equipamentos similares aos hidrociclones convencionais, exceto pelo fato de possuírem uma região cônica filtrante. Desta forma, durante o funcionamento deste separador, além das correntes de alimentação, *underflow* e *overflow*, comumente observadas, a região cônica porosa produz líquido pelo processo de filtração. Apesar da baixa vazão de filtrado, é uma constatação experimental que a filtração na região cônica de um hidrociclone é capaz de diminuir o número de Euler e aumentar a eficiência de coleta de material particulado neste tipo de separador centrífugo. Neste contexto, Vieira (2006) obteve um hidrociclone de geometria otimizada, denominado de HF₁₁, utilizando técnicas de CFD validadas por dados experimentais. Este hidrociclone filtrante otimizado permitiu a conciliação de baixos números de Euler com altas eficiências de coleta. A fim de dar continuidade aos estudos mencionados anteriormente, este trabalho teve como objetivos a análise da influência do comprimento do *vortex finder* e do diâmetro de *underflow* sobre o processo de separação sólido-líquido no hidrociclone filtrante HF₁₁ e similar convencional HC₁₁. Através das técnicas de planejamento fatorial, medidas experimentais e fluidodinâmica computacional foi possível analisar a influência do *vortex finder* e do diâmetro de *underflow* sobre a separação sólido-líquido. A partir da análise anterior, foi verificado que o número de Euler e o diâmetro de corte foram inversamente proporcionais às variações de diâmetro de *underflow*. Por sua vez, o número de Euler comportou-se diretamente proporcional frente às modificações de *vortex finder*. Verificou-se ainda, que em se tratando da influência do comprimento do *vortex finder* sobre o diâmetro de corte, valores intermediários desta variável geométrica foram os que proporcionaram as maiores eficiências de coleta de material particulado. Concluiu-se então, que a combinação ideal entre o diâmetro de *underflow* e o comprimento de *vortex finder* num hidrociclone filtrante dependerá dos interesses técnico-operacionais de cada usuário. Portanto, considerando a faixa experimental utilizada neste trabalho, se a prioridade do usuário for prever a classificação por tamanho de partículas, um diâmetro de *underflow* e um comprimento de *vortex finder* de 5 e 21 mm, respectivamente, seriam os mais indicados. Porém, se o objetivo for unicamente concentrar a corrente de *underflow* em sólidos, seriam indicados um diâmetro de *underflow* e um comprimento de *vortex finder* de 3 e 12 mm, respectivamente.

Palavras-chave: Separador, Hidrociclones, Filtração, Fluidodinâmica Computacional (CFD).

ABSTRACT

Filtering hydrocyclones are similar equipments to the conventional hydrocyclone except by the fact they have filtering conical region. In this way, during the operation of this equipment, besides the feed streams, the underflow and the overflow, observed commonly, the porous conical region produces liquid by the filtration process. The filtration in the conical region of the hydrocyclone is able to reduce the Euler number and increase the particulate material collection efficiency in this type of centrifugal separator, verified by the experimental results, despite the low filtered rate. In this context, VIEIRA (2006) obtained a hydrocyclone with optimal geometry, denominated HF₁₁, using techniques of CFD validated by experimental data. This optimal filtering hydrocyclone allowed to obtain results with low Euler numbers and high collection efficiencies. In order to give continuity to the studies mentioned previously, this work is aimed at examining the influence of the vortex finder length and the underflow diameter about the solid-liquid separation process in the filtering hydrocyclone HF₁₁ and in the conventional hydrocyclone similar HC₁₁. Through the techniques of factorial planning, of the experimental results and of the computational fluidodynamic, was possible analyze the influence of the vortex finder and of the underflow diameter about the solid-liquid separation. From the previous analysis, was verified that the Euler number and the cut diameter were inversely proportional to the variations of the underflow diameter. On the other hand, the Euler number was straightly proportional to the modifications of the vortex finder. About the influence of the vortex finder length on the cut diameter, also it was observed that intermediate values of this geometrical variable provided the biggest particulate material collection efficiencies. Therefore, the ideal combination between the underflow diameter and the vortex finder length in a filtering hydrocyclone will depend of the technical-operational interests of each user. Considering the experimental interval utilized in this work, if the priority of the user is to know the classification by particle size, a underflow diameter and a vortex finder length of 5 and 21 mm, respectively, would be the appropriate. However, if the objective is only to concentrate the underflow current in solids, would be appropriate a underflow diameter and a vortex finder length of 3 and 12 mm, respectively.

Keywords: Separator , Hydrocyclones, Filtration, Computational Fluidodynamic (CFD).

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos utilizados no processo de separação sólido-líquido ou líquido-líquido. Do ponto de vista de operação e investimento, tais equipamentos oferecem um dos meios mais baratos de separação, justamente por serem equipamentos simples e de fácil construção, sendo basicamente constituídos de uma parte cilíndrica acoplada a uma região cônica.

Somente a partir da metade do século XIX, os hidrociclones começaram a ser utilizados como uma importante alternativa no processo de separação sólido-fluido, devido a uma grande aplicabilidade na indústria de extração e processamento mineral. A partir de então, inúmeros estudos científicos foram realizados promovendo a divulgação deste tipo de equipamento. Sendo que, atualmente, este equipamento é um dos mais utilizados em separação sólido-líquido em diversos setores da indústria química. Devido ao seu grande potencial de aplicação, inúmeras configurações de hidrociclones, denominadas de famílias, têm sido propostas e estudadas nos últimos anos. Essas famílias são caracterizadas pelas relações geométricas entre as principais dimensões e o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone.

O emprego de uma determinada família de hidrociclones em um processo depende da necessidade de equipamentos com um alto poder classificador (baseado no tamanho das partículas coletadas) ou com grande poder concentrador (baseado na concentração da suspensão de fundo). Esses equipamentos apresentam altas eficiências de separação quando aplicados a materiais particulados com tamanhos na faixa de 5 a 400 μm . Essa versatilidade permite como foi dito anteriormente, sua aplicação nos mais variados processos de separação sólido-líquido, tais como: a classificação seletiva, a deslamagem, o espessamento, o fracionamento, a pré-concentração, a recuperação de líquidos, entre outros. Estes benefícios tornaram os hidrociclones, um dos equipamentos mais utilizados tanto na separação sólido - fluido quanto na separação líquido-líquido, podendo ser encontrados em diversos setores industriais: têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico etc.

A Figura 1.1 apresenta um dos hidrociclones estudados no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

(LSP/FEQUI/UFU). Nesta figura podem ser vistas as principais dimensões geométricas de um hidrociclone convencional.

Na separação em hidrociclones, a suspensão é alimentada em uma entrada tangencial localizada na parte cilíndrica do equipamento. Na parte superior da região cilíndrica existe um tubo concêntrico, denominado de *vortex finder*, onde é retirada a corrente da solução diluída, denominada de *overflow*. Há ainda um orifício inferior na parte cônica, responsável pelo direcionamento da suspensão concentrada (*underflow*), dotada de partículas maiores.

A Figura 1.2 apresenta um esquema com a trajetória simplificada da suspensão no interior de um hidrociclone convencional. A suspensão alimentada tangencialmente ao cilindro provoca um movimento rotacional gerando acelerações centrífugas, atuantes diretamente nas partículas presentes na suspensão. Assim, partículas maiores e mais densas movimentam-se em direção à parede do equipamento, na qual um movimento em espiral descendente as conduz até a saída da parte cônica (*underflow*). Conseqüentemente partículas menores e menos densas migram em sentido ao centro do equipamento, adquirindo um movimento espiral ascendente, até serem conduzidas à saída superior da parte cilíndrica (*overflow*).

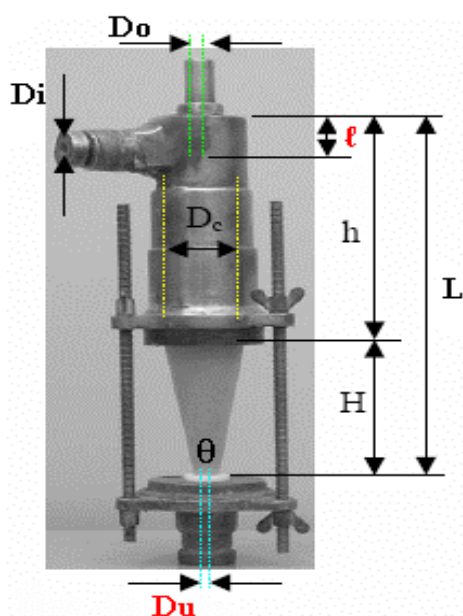


Figura 1.1- Principais dimensões características de um hidrociclone.

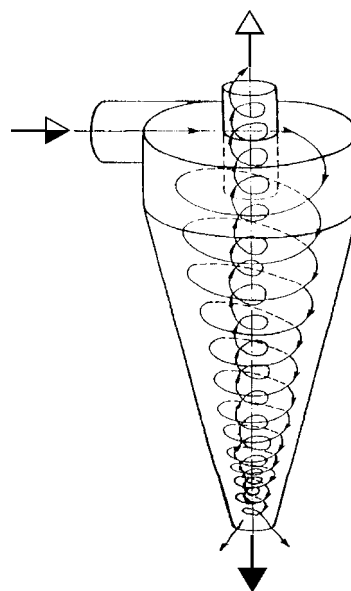


Figura 1.2 - Trajetória das partículas no interior de um hidrociclone.

Em virtude da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) estar localizada no Triângulo Mineiro, no qual há importantes indústrias de processamento mineral, estudos relacionados a hidrociclones sempre foram de interesse do Grupo de Pesquisa em Sistemas

Particulados (GSP/UFU). Estes estudos sempre visaram à redução de custos operacionais e a elevação do potencial de separação. Com esse intuito, pesquisadores do GSP/FEQUI/UFU propuseram a incorporação de um cone permeável a um hidrociclone de geometria convencional. A incorporação de uma parede filtrante na região cônica originou um tipo de separador inédito, denominado de hidrociclone filtrante, tornando-se então objeto de pedido de patente (INPI - 014070002272).

Desde o trabalho pioneiro em 1989 (BARROZO *et al.*, 1989) diversos estudos (SOUZA, 1999; VIEIRA, 2001; ARRUDA, 2003) foram realizados com o hidrociclone filtrante, utilizando as geometrias de algumas das famílias clássicas de hidrociclones (Bradley, Rietema, Krebs e CBV-Demco). Em todos estes trabalhos foram comparados os desempenhos do hidrociclone convencional com o novo equipamento (hidrociclone filtrante). Os resultados destes trabalhos mostraram a incorporação da parede filtrante no hidrociclone proporcionava menores números de Euler, ou seja, menores custos energéticos. O uso de outras famílias mostrou que o equipamento filtrante poderia diminuir o diâmetro de corte, ou seja, aumentar a eficiência.

Visando encontrar uma geometria ótima para o novo equipamento (hidrociclone filtrante) que pudesse combinar, em um único equipamento, as vantagens da diminuição do número de Euler com as do aumento da eficiência de coleta, VIEIRA 2006 desenvolveu um estudo, empregando relações geométricas que cobriam toda a faixa das famílias usadas comercialmente. Para esta otimização, VIEIRA (2006) estudou a performance de hidrociclones filtrantes, segundo relações geométricas advindas da técnica de planejamentos de experimentos. Este autor também utilizou a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) no intuito de simular o escoamento interno nos hidrociclones filtrantes e convencionais a fim de obter particularidades do escoamento em virtude da filtração.

VIEIRA 2006 estudou a influência das seguintes variáveis geométricas: diâmetro da alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), comprimento total do hidrociclone (L) e o ângulo do tronco de cone (θ). Para o estudo da influência dessas variáveis, 25 diferentes hidrociclones convencionais e filtrantes foram construídos e as respectivas performances foram analisadas. Os resultados deste autor mostraram que o equipamento filtrante teve (em maior ou menor intensidade) um desempenho superior ao hidrociclone convencional. O desafio era encontrar a geometria ótima.

Conjugando os dados experimentais e simulados VIEIRA (2006) concluiu que o hidrociclone filtrante de configuração denominada HF₁₁ ($D_i/D_c = 0,26$; $D_o/D_c = 0,22$; $L/D_c = 6,9$ e $\theta = 11,2^\circ$) foi o equipamento que apresentou o melhor desempenho. O referido

hidrociclone filtrante (HF₁₁) conseguiu conciliar baixos números de Euler com altas eficiências totais de coleta.

Porém em seu trabalho VIEIRA (2006) não estudou a influência do diâmetro de *underflow* (D_u) e do comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*). Em todas as 25 geometrias estudadas por VIEIRA (2006) os níveis destas variáveis geométricas foram mantidos constantes e iguais a: $D_u = 5 \text{ mm}$ e $\ell = 1,2 \text{ cm}$.

Com o objetivo de dar continuidade ao ótimo trabalho de VIEIRA (2006) o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência do diâmetro de *underflow* (D_u) e do comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*) na performance do hidrociclone filtrante HF₁₁ pré-definido por Vieira (2006).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Famílias de hidrociclones

Os hidrociclones são classificados em famílias, cada qual sendo caracterizada por um conjunto de separadores que mantém entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica.

As proporções existentes entre as dimensões geométricas estão diretamente relacionadas com o desempenho do hidrociclone. A respeito desse fato, sabe-se, que hidrociclones, dotados de uma região cilíndrica relativamente grande, são equipamentos que oferecem uma maior capacidade volumétrica, enquanto as que têm a parte cônica de maior dimensão induzem a uma maior eficiência de coleta.

Dentre as famílias clássicas podem ser citadas como exemplo a de Bradley, Rietema, Krebs, CBV/Demco, Hi-Klone, Mosley, RW, Warman.

2.2 Funcionamento de um hidrociclone

No topo da parte cilíndrica do hidrociclone é introduzida tangencialmente uma alimentação dotada de energia de pressão, fazendo com que o fluido desenvolva no interior do hidrociclone um movimento rotacional. Este movimento rotacional do fluido ao longo de seu percurso gera acelerações centrífugas atuantes nas partículas presentes no meio, forçando-as a mover em direção à parede do equipamento.

Desta maneira, quanto mais o fluido adentra na parte cônica do hidrociclone maiores são as componentes da velocidade do fluido (axial, radial e tangencial), visto que a seção disponível do escoamento vai se reduzindo. Considerando que apenas uma parcela da suspensão alimentada é eliminada pelo orifício *underflow*, devido a sua dimensão relativamente pequena, tem-se uma parcela não descarregada que migra em sentido ao centro do eixo do equipamento, formando, assim, um vórtice interno ascendente com movimento rotacional contrário ao criado pelo primeiro vórtice (VIEIRA, 2006).

O escoamento da suspensão em hidrociclones é complexo e pode ser decomposto em três componentes: axial, radial e tangencial. A componente tangencial desse escoamento mostra-se altamente relevante porque é a responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento atuantes em um hidrociclone. Estas mantêm a parede ausente de acúmulo de sólidos, enquanto as forças centrífugas, dependentes da posição axial e radial no hidrociclone, são as diretamente responsáveis pela coleta de uma determinada partícula. A transferência da quantidade de movimento de uma componente para outra é constantemente executada, principalmente quando o fluido se aproxima do orifício de *underflow*, onde este, com movimento rotacional, vai cedendo energia simultaneamente para as componentes radial e axial (SCHAPEL; CHASE, 1998).

A coleta de partículas para um hidrociclone tem como forças atuantes aquelas decorrentes do movimento rotacional do fluido, pelo empuxo (devido à diferença de densidade do fluido e partícula) e pelo arraste (inerente ao escoamento envolvendo mais de uma fase). Deste modo são consideradas coletadas as partículas que conseguirem atingir a parede. No escoamento, as partículas maiores experimentam uma maior força centrífuga, sendo direcionadas à parede. As menores não terão tempo para alcançar a parede, serão arrastadas para o vórtice interno e descarregadas no *overflow*.

Segundo SOUZA *et al.*, (2000) há particularidades no escoamento dos fluidos que merecem ser mencionadas. Há tais como: um pequeno curto-circuito que ocorre no topo do hidrociclone devido aos gradientes de pressão e às bordas de escoamento causadas pela diferença de tamanho entre o *vortex finder* e o turbilhão interno.

Existem ainda, a tendência de aparecer um vórtice interno de ar (*air core*) ao longo do eixo central do hidrociclone, mas que, geralmente, é destruído pela adição de contrapressão ou pela faixa de operação na qual o hidrociclone é manuseado (VIEIRA, 2006).

2.3 Modelos Clássicos de Separação

Os modelos de separação em hidrociclones tentam através de considerações teóricas, descrever a forma como uma determinada partícula é classificada. De acordo com as hipóteses adotadas, os principais modelos existentes podem ser situados em quatro grupos principais: Modelo da Órbita de Equilíbrio, Modelo Populacional, Modelo do Escoamento Bifásico Turbilhonar e o Modelo do Tempo de Residência (SVAROVSKY, 1984).

O Modelo da Órbita de Equilíbrio é baseado no conceito de raio de equilíbrio, originalmente proposto por (DRIESSEN ; CRINER, 1950). De acordo com este conceito, as

partículas de mesmo tamanho posicionam-se em uma órbita radial de equilíbrio no hidrociclone onde suas velocidades terminais de sedimentação no campo centrífugo são iguais à velocidade radial do líquido no sentido do eixo do equipamento.

O Modelo Populacional foi proposto por FAHLSTROM (1960), que sugeriu que o diâmetro de corte seria influenciado pelo diâmetro do orifício de *underflow* e pela distribuição granulométrica da alimentação. Este autor afirmou que o efeito populacional na saída do *underflow* pode afetar a correlação de forças a tal ponto que o diâmetro de corte poderia ser estimado a partir da recuperação de massa no *underflow*. As informações estabelecidas através desta teoria não produziram resultados quantitativos, servindo, entretanto, para explicar diversas observações qualitativas da operação com hidrociclones.

A chamada teoria turbilhonar não se configura como um modelo propriamente dito e deve ser sempre usada em conjunção com os outros modelos. Este pressuposto leva em consideração o efeito da turbulência no processo de separação. Este efeito modifica o perfil de velocidades, o que altera as características do equipamento como separador.

O Modelo do Tempo de Residência é a fonte para o embasamento de muitas equações semi-empíricas que são utilizadas na literatura para a previsão de performance de hidrociclones. Este modelo supõe que dada partícula chegará até a parede, e, portanto, será separada, quando seu tempo de residência no interior do hidrociclone for maior ou igual ao tempo necessário para que esta partícula movimente-se radialmente do ponto de entrada, no equipamento, até a parede.

2.4- Equacionamento Empírico - Os grupos Adimensionais

A descrição matemática da operação de hidrociclones é bastante complexa. Uma alternativa para a abordagem do fenômeno é a utilização de equações empíricas ou semi-empíricas com o auxílio de grupos adimensionais. Este procedimento tem sido muito utilizado em trabalhos da literatura envolvendo hidrociclones.

Segundo SVAROVSKY (1984) as variáveis importantes para o caso de suspensões em que o líquido é um fluido Newtoniano são d'_{50} , D_c , Q , ρ , $\Delta\rho = \rho_s - \rho$, μ , C_v , R_L , $(-\Delta P)$.

Selecionando-se o núcleo (D_c , Q , ρ) pelo teorema π de Buckingham são obtidos os seguintes grupos (SOUZA, 1999):

$$\pi_1 = \frac{d'_{s0}}{D_c} \quad \pi_2 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \pi_3 = \frac{\mu D_c}{Q\rho} \quad \pi_4 = \frac{2.(-\Delta P)}{\rho u_c^2}$$

sendo: $u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2}$ (2.1)

Combinando-se os grupos adimensionais π_1 , π_2 e π_3 , obtém-se um outro grupo, denominado número de Stokes (Stk_{50}). O adimensional π_4 é denominado número de Euler (Eu). Substituindo Q em termos da velocidade do fluido (Equação 2.1), obtém-se através do adimensional π_3 o número de Reynolds (Re).

Portanto, os grupos adimensionais mais importantes segundo SVAROVSKY (1984) seriam:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)u_c d_{s0}'^2}{18\mu D_c} \quad (2.2)$$

$$Eu = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{D_c u_c \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Os três grupos adimensionais anteriores, juntamente com C_v e R_L , são normalmente correlacionados da seguinte forma:

$$Stk_{50}Eu = f(Re, R_L, C_v) \quad (2.5)$$

Para o estabelecimento de uma correlação como a mostrada acima, um cuidadoso trabalho experimental é requerido. A função $f(Re, R_L, C_v)$ é obtida estudando-se os efeitos de cada grupo adimensional no processo (SOUZA, 1999). Diversas correlações foram propostas na literatura utilizando esta metodologia (SVAROVSKY, 1984; SILVA & MEDRONHO, 1986 e SILVA & MEDRONHO, 1988).

Uma outra abordagem empírica muito utilizada em estudos de hidrociclones é a proposta por MASSARANI (1989). Este célebre pesquisador propôs as seguintes correlações para hidrociclones:

Diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) na separação centrífuga:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0.5} f(R_L) g(C_v) \quad (2.6)$$

$$\text{sendo: } f(R_L) = \frac{I}{I + 1,73R_L} \quad (2.7)$$

$$g(C_v) = \exp(4,5C_v) \quad (2.8)$$

Para a relação volumétrica de líquido:

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (2.9)$$

Por esta metodologia os parâmetros das equações anteriores (K , B , C) são estimados para cada família de hidrociclones.

2.5 O Hidrociclone Filtrante

Como já mencionado, o hidrociclone filtrante é objeto de pedido de patente da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Este novo equipamento diferencia-se do hidrociclone convencional, apenas pela presença da parte cônica permeável. Sendo assim, ocorre a existência de uma corrente de filtrado, gerada pelo processo de filtração na região cônica do hidrociclone, além das correntes de *underflow* e *overflow*.

O primeiro trabalho sobre hidrociclones filtrantes foi conduzido por BARROZO et al. (1992). Com o objetivo de comparar o novo equipamento ao convencional de mesmas dimensões, o desempenho de ambos em termos de capacidade, eficiência de coleta e diâmetro de corte foi estudado naquele trabalho. Dois hidrociclones (convencional e filtrante) foram construídos segundo as proporções geométricas de Bradley e com seção cilíndrica de 30 mm de diâmetro. O material usado na confecção da parte cônica do hidrociclone filtrante foi um tecido filtrante de *nylon*.

Um fato importante observado neste trabalho pioneiro foi que o filtrado era constituído de água pura e não se registrou a formação de torta sobre a parede cônica, em função da alta velocidade da suspensão no interior do equipamento.

Os resultados deste primeiro trabalho mostraram que o hidrociclone filtrante apresentou acréscimos nas vazões volumétricas de operação em relação ao convencional operando nas mesmas condições. No intervalo de quedas de pressão estudado – de 0,55 a 2,25 kgf*cm⁻² – elevações percentuais de até 40 % na capacidade de operação foram atingidas. Observou-se, também, uma redução na eficiência de coleta, que, entretanto, tendia a tornar-se menos relevante com o aumento da queda de pressão.

Adotando a sistemática de MASSARANI (1989) para a descrição matemática de operação de hidrociclones, os resultados relativos ao hidrociclone filtrante estudado por BARROZO *et al.* (1992) foram correlacionados através das equações seguintes:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,039 \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{I}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_v) \quad (2.10)$$

$$Eu = 5313 \quad (2.11)$$

VIEIRA (1997) propôs a continuidade do trabalho com hidrociclones filtrantes de Bradley, nas mesmas condições operacionais e geométricas do trabalho anterior (BARROZO *et al.*, 1992). O material utilizado foi sulfato de bário (barita) e a região cônica filtrante passou a ser constituída por um tecido de polipropileno.

Assim como o hidrociclone filtrante de *nylon*, o hidrociclone filtrante de polipropileno apresentou as mesmas características acarretadas pela presença da parede filtrante ao ser comparado ao hidrociclone convencional.

VIEIRA (1997) também utilizou a sistemática de MASSARANI (1989) e propôs as seguintes equações para o hidrociclone filtrante de Bradley com meio cônico de polipropileno.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,047 \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{I}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_v) \quad (2.12)$$

$$R_L = 0,80 \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{0,49} \quad (2.13)$$

$$Eu = 4265 \quad (2.14)$$

SOUZA (1999) propôs para os hidrociclones filtrantes de Bradley, uma metodologia que incorpora a resistência do meio filtrante. Para isto, foram estudados dois hidrociclones filtrantes de Bradley nas mesmas condições operacionais de um equipamento convencional, sendo utilizados dois meios filtrantes de diferentes permeabilidades e confeccionados com partículas de bronze sinterizadas.

Logo, SOUZA (1999) incorporou-se às variáveis clássicas utilizadas no estudo de hidrociclones, aquelas também características do processo de filtração, sendo que neste trabalho apenas a resistência do meio filtrante (R_m) foi considerada, já que não havia formação de torta.

SOUZA (1999) verificou que os hidrociclones filtrantes de Bradley sempre promoveram um aumento na vazão volumétrica de alimentação em relação ao hidrociclone convencional de Bradley de mesmas proporções geométricas. Este autor observou que este acréscimo de capacidade de operação era proporcional à raiz quadrada do quociente queda de pressão/resistência do meio filtrante.

SOUZA (1999) também observou que o número de Euler para os hidrociclones filtrantes de Bradley era uma função da resistência do meio filtrante, da razão de líquido e das características geométricas do equipamento. Este autor propôs uma equação empírica para esta relação.

Os resultados obtidos por SOUZA (1999) o conduziram-no a concluir que para a geometria de Bradley, os diâmetros de corte reduzidos obtidos em operações envolvendo hidrociclones filtrantes foram maiores que aqueles obtidos na operação com o hidrociclone convencional de Bradley, tendo como consequência menores valores de eficiência de coleta. A possível explicação que o autor encontrou na época para este fenômeno foi devido a migração da corrente de suspensão do vórtice externo para o interno, que provoca turbulência, redução nas razões de líquido e maior arraste de sólidos pela corrente de *overflow*. Este efeito de “mistura” seria, segundo o autor, mais pronunciado para meios mais permeáveis.

A partir de dados experimentais obtidos em seu estudo, SOUZA (1999) propôs o seguinte equacionamento para a performance de hidrociclones filtrantes de Bradley relacionando-a diretamente com a resistência do meio filtrante.

$$Q = Q_{conv} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{(-\Delta P)}{\mu}} f(R_m) \quad (2.15)$$

$$Eu = \frac{I}{\left(\frac{I}{\sqrt{Eu_{conv}}} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{8\rho}{\mu\pi^2 D_c^4}} f(R_m) \right)^2} \quad (2.16)$$

$$f(R_m) = \frac{2\pi e(L - L_l)}{R_m \ln \left(1 + \frac{4e}{D_c + D_{inf}} \right)} \quad (2.17)$$

$$R_L = \frac{1}{1,69 - 8,66 \cdot 10^{-6} (R_m D_c)^{0,5}} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{\exp(-0,69 + 1,06 \cdot 10^{-21} (R_m D_c)^2)} \quad (2.18)$$

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,0640 \pm 0,0042) \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} (1 - R_L)^2 \quad (2.19)$$

Posteriormente, VIEIRA (2001) estudou a influência do meio filtrante em hidrociclones da família Rietema. Nesse estudo, três cones filtrantes de diferentes resistências à filtração e feitos de bronze sinterizado foram submetidos às mesmas condições operacionais que os hidrociclones de Bradley estudados por BARROZO *et al.* (1992) e SOUZA (1999), possibilitando assim, a comparação dos resultados obtidos com essas duas famílias de hidrociclones. Nesse estudo, também foi realizada a determinação experimental da resistência à filtração em todos os meios filtrantes utilizados.

Nesse estudo, VIEIRA (2001) observou acréscimos nos valores das razões de líquido dos hidrociclones filtrantes de Rietema em relação ao seu convencional, levando a correntes de *underflow* mais diluídas. Entretanto, como consequência do fato anterior, foram observados, nas mesmas condições de vazão volumétrica de um hidrociclone convencional, decréscimos nos valores de diâmetro de corte reduzido e, portanto maiores eficiências de coleta.

Este autor (VIEIRA, 2001) observou também que os hidrociclones filtrantes de Rietema apresentavam, nas mesmas condições de queda de pressão de um hidrociclone convencional de Rietema, acréscimos para os números de Euler.

Assim VIEIRA (2001), comparando os seus resultados com aqueles obtidos por SOUZA (1999), concluiu que, a geometria do tronco de cone filtrante era extremamente importante no processo de separação sólido-líquido em hidrociclones filtrantes. De acordo com o ângulo de abertura do tronco de cone, o hidrociclone filtrante apresentaria um

determinado desempenho por manter uma maior ou menor distância entre os vórtices livre e forçado.

O autor atribuía o fato de os hidrociclones filtrantes de Bradley manterem uma menor abertura para o tronco de cone (9°) durante a separação, com uma interferência mais pronunciada do vórtice forçado sobre a região do vórtice livre, promovendo o arraste de líquido e de partículas desta região para a corrente de *overflow*. Por conseguinte haveria uma diminuição da razão de líquido, responsável pelos decréscimos na eficiência total e pelos acréscimos sofridos pela vazão volumétrica de alimentação (aumento do número de Euler). Como os hidrociclones filtrantes de Rietema possuíam uma maior abertura do tronco de cone (20°), acreditava-se que, durante a operação, haveria uma maior distância entre os vórtices livre e forçado. Conseqüentemente, o líquido e as partículas presentes no vórtice livre estariam menos propensos a serem arrastados pelo vórtice forçado e estariam mais propensas a manterem-se naquela região, até alcançarem a corrente de *underflow*.

VIEIRA (2001) também utilizou a sistemática de MASSARANI (1989) para propor um conjunto de equações relacionadas aos hidrociclones filtrantes de Rietema. Assim com SOUZA (1999), VIEIRA (2001) também incorporou nas suas equações a resistência do meio filtrante :

$$R_L = \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{1,66 \pm 0,07} (R_m D_c)^{0,092 \pm 0,006} \quad (2.20)$$

$$Eu = Re^{(0,63 \pm 0,02)} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{(-0,73 \pm 0,08)} \quad (2.21)$$

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,036 \pm 0,001) \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + (0,51 \pm 0,12) R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.22)$$

ARRUDA *et al.* (2002) utilizaram a geometria de Krebs em seus estudos com os hidrociclones filtrantes, este hidrociclone tinha ângulo do cone, $\theta = 12,7^\circ$, intermediário àqueles até então utilizados. Constataram que nas mesmas condições operacionais de um hidrociclone convencional de Krebs, a incorporação do meio filtrante praticamente não influenciou na performance desse tipo de família. Quando comparados entre as demais

famílias, os hidrociclones filtrantes de Krebs tiveram números de Euler próximos àqueles verificados para os hidrociclones filtrantes de Rietema.

ARRUDA *et al.*, (2002) notaram ainda, que dentre as três famílias de hidrociclones filtrantes até então estudadas (Bradley, Rietema e Krebs), a de Krebs apresentou os menores diâmetros de corte reduzido por causa das maiores razões de líquido e de vazões volumétrica de alimentação.

Seguindo a mesma sistemática dos últimos trabalhos anteriores ao seu, ARRUDA *et al.* (2002) também propuseram um conjunto de equações para os hidrociclones filtrantes de Krebs, apresentadas a seguir:

$$R_L = \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{0,9678} (R_m D_c)^{-0,0450} \quad (2.23)$$

$$Eu = Re^{0,6064} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{-0,9748} \quad (2.24)$$

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,0295 \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 1,307 R_L} e^{(4,5 C_v)} \quad (2.25)$$

ARRUDA (2003) estudou hidrociclones filtrantes segundo a geometria Demco, caracterizados por terem um cone com idênticas dimensões da família Rietema. Este autor observou que a presença do meio filtrante não provocou modificações relevantes na performance do hidrociclone Demco, assim como foi observado com a geometria Krebs e ao contrário do que havia sido constatado para os equipamentos das famílias Bradley e Rietema.

Comparando os seus resultados com aqueles oriundos dos trabalhos anteriores ARRUDA (2003) concluiu que o efeito do meio filtrante na performance dos hidrociclones diminui à medida que a relação entre a área lateral do cone filtrante e a área lateral da parte cilíndrica se aproxima da unidade. Foi verificado que quando essa relação é maior que a unidade, como no caso dos hidrociclones Bradley, ocorre um aumento significativo na vazão volumétrica de alimentação e, por conseqüência, decréscimos no número de Euler. Quando a relação entre as áreas é menor que a unidade, como ocorre para o hidrociclone Rietema, verifica-se uma redução na vazão, com conseqüente aumento do número de Euler.

Os resultados da comparação dos resultados de ARRUDA (2003) com os estudos anteriores, ainda conduziram a este autor concluir que os números de Euler dos hidrociclones

filtrantes Demco foram os menores dentre todos os equipamentos estudados, com valores próximos àquele observados para o hidrociclone convencional de Rietema. Verificou-se também, que tais equipamentos conduziam aos maiores diâmetros de corte reduzido, revelando o poder concentrador do equipamento.

ARRUDA (2003) propôs também equações empíricas para o hidrociclone filtrante estudado por ele, utilizando grupos adimensionais segundo a abordagem de COELHO e MEDRONHO (2001). Estas equações são apresentadas a seguir.

$$Stk_{50}Eu = 0,0055 \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{0,0075} \left(\frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,921} \left[\ln \left(\frac{l}{R_L} \right) \right]^{1,417} e^{(-2,264C_v)} \quad (2.26)$$

$$Eu = 2408 D_c^{-1,017} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{0,179} \left[\frac{D_c}{L-l} \right]^{-1,317} Re^{-0,626} e^{(0,72C_v)} \quad (2.27)$$

$$R_L = 0,0477 \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{0,919} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{0,988} Eu^{-0,27} (R_m D_c)^{0,209} \quad (2.28)$$

$$d'_{50} = \frac{5,072 D_c^{1,351}}{D_c^{0,263} (L-l)^{1,251}} \left[\frac{\mu \rho Q}{(\rho_s - \rho)} \right]^{0,139} \left[\ln \left(\frac{l}{R_L} \right) \right]^{0,373} \exp(8,438 C_v) \quad (2.29)$$

$$Q = 0,0036 D_c^{0,0072} D_i^{0,476} (D_o^2 - D_u^2)^{0,574} (L-1)^{-0,176} \mu^{0,0144} \rho^{-0,014} \Delta P^{0,418} \exp(-1,9 \cdot 10^{-5} C_v) \quad (2.30)$$

O último estudo, anterior ao presente trabalho, que foi realizado na FEQUI/UFU tratando do tema hidrociclones filtrantes foi a tese de VIEIRA (2006). Este trabalho foi muito interessante, pois o autor conseguiu sintetizar em seu trabalho toda a análise das famílias anteriormente estudadas e, além disso, buscou encontrar uma geometria ótima para o hidrociclone filtrante.

O principal objetivo de VIEIRA (2006) era encontrar uma geometria de hidrociclone filtrante que combinasse, em um único equipamento, as vantagens da diminuição do número de Euler com as do aumento da eficiência de coleta (ou diminuição do diâmetro de corte). Para tanto, VIEIRA 2006 desenvolveu um estudo, empregando relações geométricas que cobriam toda a faixa das famílias usadas comercialmente.

No seu trabalho VIEIRA 2006 estudou a influência das seguintes variáveis geométricas: diâmetro da alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), comprimento total do

hidrociclone (L) e o ângulo do tronco de cone (θ). Para o estudo da influência dessas variáveis, 25 diferentes hidrociclones filtrantes foram construídos, tendo as suas geometrias definidas com o auxílio da técnica do planejamento fatorial de experimentos. É importante salientar que de acordo com VIEIRA (2006) outros 25 hidrociclones de iguais dimensões ao hidrociclone filtrante foram confeccionados, porém sem a presença do meio cônico filtrante, para efeito de comparação entre os equipamentos convencional e filtrante. As relações geométricas dos 25 hidrociclones filtrantes e convencionais estudados por VIEIRA (2006) encontram-se apresentados na Tabela 2.1.

Devido a grande quantidade de equipamentos requeridos pelo Planejamento experimental definido pelo autor, os 25 equipamentos de cada configuração foram obtidos por meio da construção individual das partes essenciais de cada hidrociclone e posterior acoplamento.

VIEIRA (2006) optou, para a construção da seção cônica filtrante, por um material constituído de partículas de bronze sinterizadas. A escolha desse material deveu-se principalmente ao fato de que os cones feitos de bronze sinterizado forneciam estruturas rígidas, permitindo o aproveitamento de toda a área filtrante durante o acoplamento no hidrociclone filtrante, distintamente daquilo que ocorre quando materiais poliméricos são utilizados (*nylon* e *polipropileno*).

Tabela 2.1 – Matriz de Planejamento para a construção e estudo dos hidrociclones (filtrantes e convencionais) segundo VIEIRA (2006).

Configuração	D_i/D_c	D_o/D_c	L/D_c	θ (°)
1	0,16	0,22	4,7	11,2
2	0,16	0,22	4,7	17,8
3	0,16	0,22	6,9	11,2
4	0,16	0,22	6,9	17,8
5	0,16	0,32	4,7	11,2
6	0,16	0,32	4,7	17,8
7	0,16	0,32	6,9	11,2
8	0,16	0,32	6,9	17,8
9	0,26	0,22	4,7	11,2
10	0,26	0,22	4,7	17,8
11	0,26	0,22	6,9	11,2
continua				

continuação				
12	0,26	0,22	6,9	17,8
13	0,26	0,32	4,7	11,2
14	0,26	0,32	4,7	17,8
15	0,26	0,32	6,9	11,2
16	0,26	0,32	6,9	17,8
17	0,13	0,27	5,8	14,5
18	0,29	0,27	5,8	14,5
19	0,21	0,19	5,8	14,5
20	0,21	0,35	5,8	14,5
21	0,21	0,27	3,9	14,5
22	0,21	0,27	7,6	14,5
23	0,21	0,27	5,8	9,0
24	0,21	0,27	5,8	20,0
25 (4 Réplicas)	0,21	0,27	5,8	14,5

Além do extenso estudo experimental VIEIRA (2006), buscou-se também no seu trabalho, um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos no escoamento sólido-fluído no interior de um hidrociclone, através da aplicação subsidiária de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no rol de hidrociclones contidos no seu trabalho. Para isso, simulações numéricas bidimensionais foram empregadas para a determinação de algumas características do escoamento fluidodinâmico desses separadores. As simulações numéricas foram conduzidas através do *software* comercial Fluent® (FLUENT INC., 2003), cuja licença fora adquirida pela Faculdade de Engenharia Química da UFU.

A validação da metodologia utilizada nas simulações realizadas por VIEIRA (2006) foi realizada por meio da comparação dos resultados simulados com os dados experimentais de DABIR (1983), que efetuou medidas de perfis de velocidade do fluido no interior de um hidrociclone, através de anemometria a *laser doppler*.

A comparação dos dados experimentais de DABIR (1983) com as simulações de VIEIRA (2006) mostraram boa concordância como mostra a Figura 2.1. Esta figura mostra as medidas experimentais de velocidade tangencial (DABIR, 1983), ao longo da direção radial, a 6 cm e a 18 cm a partir do topo do hidrociclone, em diferentes números de Reynolds, via técnica LDA (*Laser Doppler Anemometer*), assim como os perfis simulados de velocidade

tangencial obtidos no trabalho de VIEIRA (2006) pelas técnicas de fluidodinâmica computacional.

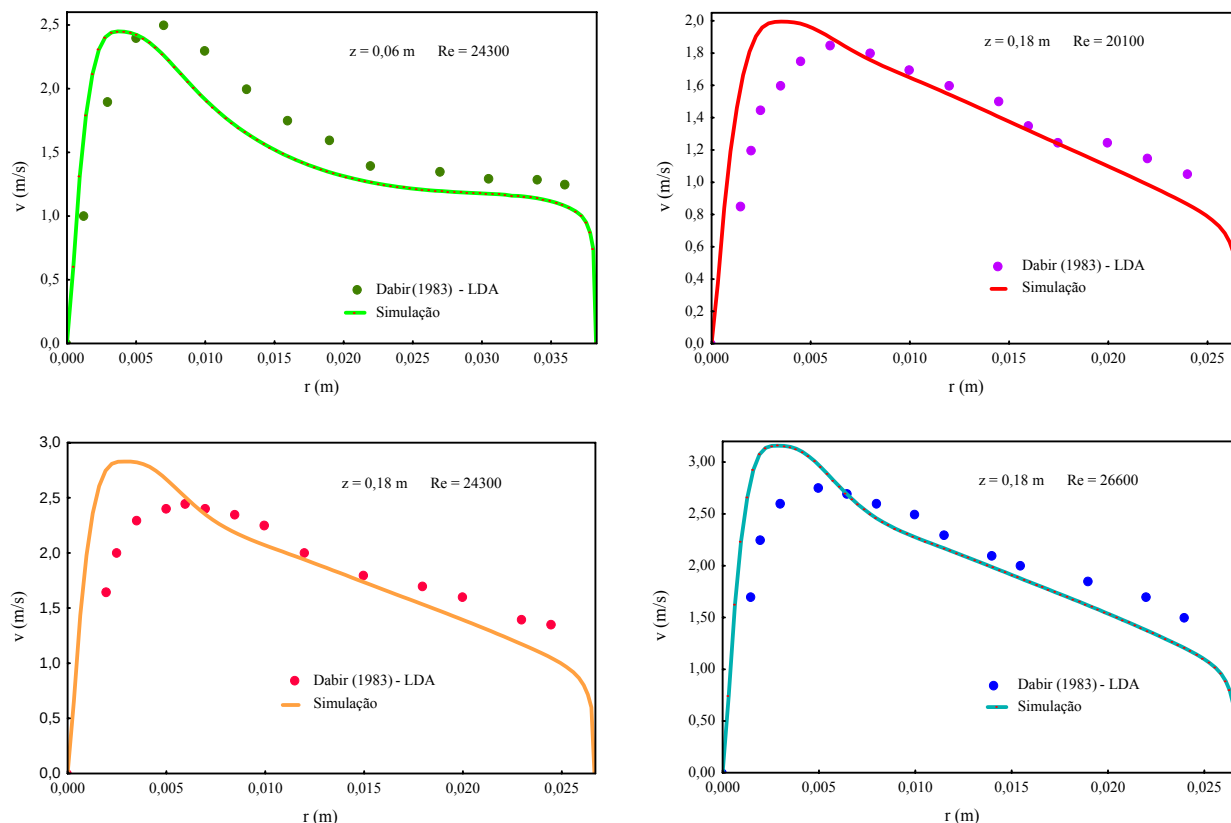


Figura 2.1 – Perfis experimentais de velocidade tangencial obtidos por DABIR (1983) e simulações por CFD realizadas por VIEIRA (2006).

Uma vez validada a metodologia utilizada nas simulações em CFD, VIEIRA (2006) analisou a influência de cada variável geométrica estudada por ele (diâmetro da alimentação, diâmetro de *overflow*, comprimento total do hidrociclone e o ângulo do tronco de cone) no processo de separação em hidrociclones filtrantes, por meio das simulações de CFD realizadas no *software* Fluent[®] 6.2.

Por meio deste estudo de simulação computacional, bem como através dos dados experimentais, VIEIRA (2006) obteve as seguintes conclusões em relação à influência das variáveis: um incremento no diâmetro de alimentação (D_i) no hidrociclone filtrante (mantidas constantes as demais dimensões geométricas) proporcionou um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação do equipamento e pouco interferiu na performance de separação. Por sua vez, um incremento no diâmetro de *overflow* (D_o) no hidrociclone filtrante (mantidas constantes as demais dimensões geométricas) proporcionou um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação do equipamento e diminuiu a eficiência total de coleta. Já um

incremento no comprimento total (L) do hidrociclone filtrante (mantidas constantes as demais dimensões geométricas) teve influência apenas sobre a capacidade do equipamento, o qual numa mesma queda de pressão conseguiu processar volumes mais expressivos de suspensões. E por fim, um decréscimo no ângulo do tronco de cone (θ) dos hidrociclones filtrantes (mantidas constantes as demais dimensões geométricas) não desempenhou influência significativa sobre a capacidade do equipamento, mas favoreceu a eficiência total de coleta em virtude das maiores razões de líquido e menores velocidades radiais.

VIEIRA (2006) comparou o desempenho dos hidrociclones filtrantes e convencionais em todas as 25 geometrias estudadas. A Figura 2.2 mostra os resultados do número de Euler e a Figura 2.3 do diâmetro de corte (d_{50}).

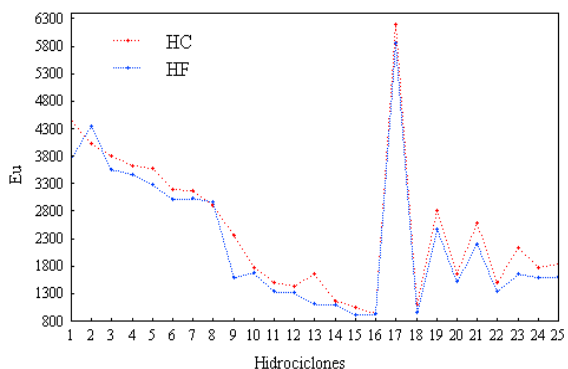


Figura 2.2- Resultados de VIEIRA (2006) para o número de Euler.

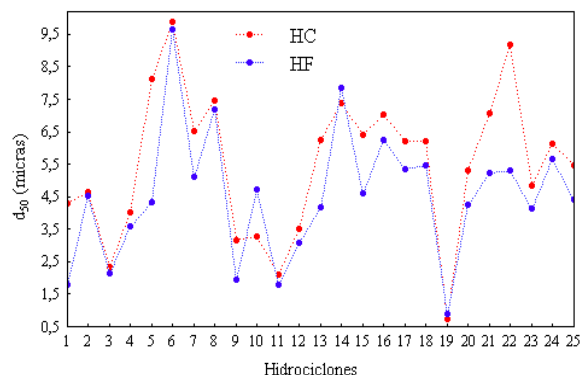


Figura 2.3- Resultados de VIEIRA (2006) para o diâmetro de corte.

Os resultados de VIEIRA (2006) mostram que, salvo raras exceções, os hidrociclones filtrantes apresentaram decréscimos nos valores de número de Euler em relação aos análogos separadores convencionais (Figura 2.2). As simulações em CFD também confirmaram tal situação. Para explicar este resultado o autor inferiu que à medida em que o líquido próximo à parede do hidrociclone filtrante era retirado, mesmo que em proporções ínfimas, fez com que o sistema tenha demandado uma quantidade maior de fluido no duto de alimentação.

Os resultados de VIEIRA (2006) também indicaram que a filtração foi em regra, um fenômeno benéfico no processo de separação (Figura 2.3), pois nas mesmas condições operacionais dos hidrociclones convencionais, os hidrociclone filtrantes apresentaram menores valores de diâmetro de corte (maiores eficiências de coleta). Para explicar este fato, os resultados de CFD foram de fundamental importância. O autor observou que houve um menor efeito de mistura na base do cone e um menor arraste radial de líquido em direção ao eixo do equipamento. Ele acreditava que, em comparação a um hidrociclone convencional, uma partícula de determinado tamanho teria maior probabilidade de permanecer na camada

limite (próxima à parede) e a partir daí, ser coletada na corrente de *underflow* com maior facilidade.

Como o objetivo principal do trabalho de VIEIRA (2006) era a otimização, ou seja, encontrar relações geométricas nas quais os hidrociclones filtrantes conseguissem associar baixos números de Euler com altas eficiências de coleta, este autor utilizou técnicas estatísticas (superfície de resposta e análise canônica) para este fim. A Figura 2.4 a seguir mostra os resultados de VIEIRA (2006) para o número de Euler e eficiência de coleta das 25 geometrias estudadas.

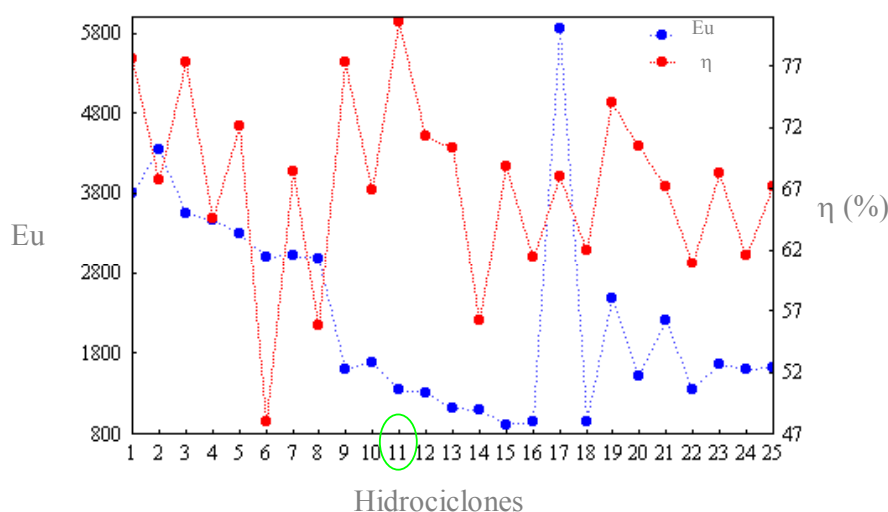


Figura 2.4 – Comparação entre os números de Euler e as eficiências totais de coleta para os hidrociclones filtrantes na queda de pressão de $1,5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (VIEIRA, 2006).

Os resultados da análise estatística realizada por VIEIRA (2006) indicaram que dentre todas as geometrias estudadas aquela que apresentou os melhores resultados foi o denominado hidrociclone filtrante HF₁₁. A Figura 2.4 mostra claramente que o hidrociclone HF₁₁ foi aquele que apresentou o melhor desempenho (associou baixos números de Euler com altas eficiências de coleta). As relações geométricas deste hidrociclone filtrante otimizado foram as seguintes: 0,26; 0,22; 6,9 e 11,2° para D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c e θ , respectivamente.

A continuação do ótimo trabalho de VIEIRA (2006) passa necessariamente pelo estudo das variáveis geométricas que este autor não incluiu na sua análise, ou seja, o diâmetro do *underflow* e o comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*). Foi, portanto esta a principal motivação da presente dissertação.

2.6 – Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Como mencionado anteriormente, a presente dissertação teve como motivação os ótimos resultados obtidos por VIEIRA (2006) e a possibilidade de ampliar os resultados estudando desta feita a influência do diâmetro do *underflow* e o comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*).

A técnica de CFD pioneiramente utilizada em hidrociclones na FEQUI/UFU por VIEIRA (2006) será também uma ferramenta a ser usada na presente dissertação. Isto se deve as excelentes possibilidades de análise que a mesma pode oferecer, potencializando a interpretação dos resultados experimentais. Em função disso será feita a seguir, uma breve revisão bibliográfica sobre o tema CFD, tendo como base o trabalho de VIEIRA (2006).

Somente a partir de 1990 houve aumento dos estudos relacionados à fluidodinâmica utilizando técnicas de CFD aplicadas a engenharia. A este fato atribui-se aos melhoramentos de capacidade de processamento computacional (uma técnica até então recente e cara), ao desenvolvimento de algoritmos mais robustos para a solução das equações diferenciais parciais envolvidas no fenômeno e à proposição de modelos mais elaborados para representar a fase dispersa. Atualmente, os trabalhos de CFD têm sido cada vez mais comuns devido ao ótimo potencial desta técnica na explicação dos fenômenos fluidodinâmicos nas mais diversas áreas.

Antes de comentar sobre a aplicação das técnicas de CFD em hidrociclones, devem ser feitas algumas considerações básicas a respeito do fenômeno de turbulência, tendo em vista o bom entendimento da aplicação dessa importante ferramenta.

2.6.1 Modelos de Turbulência

Sabe-se que as Equações de Navier-Stokes são suficientes para modelar escoamentos em qualquer regime e valor do número de Reynolds. Entretanto quanto maior o número de Reynolds, mais largo se torna o espectro de energia associado ao escoamento. Como as maiores estruturas são reguladas pela geometria do problema, grandes valores de Reynolds implicam em altas frequências ou estruturas viscosas muito pequenas. Conseqüentemente para calculá-las, faz-se necessário o uso de malhas cada vez mais refinadas, o que implicaria em altos custos computacionais (VIEIRA, 2006).

Os escoamentos turbulentos são caracterizados pelas flutuações da velocidade do fluido no tempo e espaço. A resolução direta das equações de transporte instantâneas de

Navier-Stokes forneceria ao engenheiro uma riqueza imensurável de detalhes acerca do fenômeno (RAJAMANI ; HSIEH, 1991). Todavia, a resolução completa dessas equações instantâneas é ainda limitada por questões de ordem tecnológica, principalmente para escoamentos em complexas geometrias e dotados de altos números de Reynolds (HINZE, 1975).

A maneira mais adequada para solucionar as limitações citadas anteriormente, consiste na manipulação das equações de Navier-Stokes, na forma de um grupo de equações médias ou de um rol de equações filtradas. Independentemente da metodologia a ser considerada, surgem novos termos que devem ser modelados, tornando inevitável o emprego de modelos de turbulência (PERICLEOUS, 1987).

A escolha de modelos de turbulência depende de algumas considerações: as características norteadoras do escoamento, a prática estabelecida para uma específica classe de problema, o nível de precisão requerido, a disponibilidade dos recursos computacionais, o total de tempo disponível para a simulação, etc.

Atualmente a modelagem de escoamentos turbulentos pode ser orientada através de duas tendências: a primeira referente à simulação numérica do comportamento médio dos escoamentos turbulentos (modelagem estatística clássica) e a segunda guiada na simulação numérica de grandes escalas, onde as grandes estruturas são resolvidas explicitamente e as menores modeladas (modelagem sub-malha).

Neste contexto, os modelos de turbulência podem ser classificados segundo a dependência ou não do conceito de viscosidade turbulenta. Salienta-se que a viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento (no espaço e tempo) e não do fluido (viscosidade molecular).

Para os modelos de turbulência dependentes da viscosidade turbulenta têm-se Modelos a Zero, Uma e a Duas Equações de Transporte. Na categoria dos Modelos a Zero Equações de Transporte podem ser enquadrados o Modelo de Mistura de Prandtl e o *Large Eddy Simulation* (LES), que não adicionam ao sistema nenhuma equação de transporte para a viscosidade turbulenta. Na categoria dos Modelos a Uma Equação de Transporte podem ser citados o Modelo Spalart-Allmaras e o Modelo k-L, onde a energia cinética turbulenta (k) é calculada pela solução de uma equação de transporte adicional, a passo que o comprimento característico (L) é estimado para cada problema em análise. Finalmente, na categoria dos Modelos a Duas Equações de Transporte, estão inclusos os Modelos k- ϵ e os Modelos k- ω , nos quais duas equações de transporte são deduzidas e resolvidas (VIEIRA, 2006).

Já os modelos de turbulências que não dependem da viscosidade turbulenta são classificados em Modelos a Zero Equações de Transporte e Modelos a Seis Equações de Transporte. Na primeira categoria, inclui o Modelo das Tensões Algébricas (ASM), onde as tensões turbulentas são relacionadas algebricamente com as componentes médias da velocidade. Por fim, na última categoria está inserido o modelo *Reynolds Stress Model* (RSM), dotado de seis equações de transporte, cada qual representando uma das componentes do tensor de Reynolds (VIEIRA, 2006).

Equações médias de Navier-Stokes são conhecidas como RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) e representam as grandezas médias do escoamento, com todas as escalas de turbulência sendo modeladas. Este tipo de aproximação reduz o esforço computacional sendo aplicado tanto para escoamentos transientes como permanentes (Equações 2.31 e 2.32):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2.32)$$

onde $(-\rho \overline{u_i' u_j'})$ simboliza efeitos de turbulência, os quais são denominados tensores de Reynolds e necessitam de modelos de turbulência para descrevê-los, tudo no sentido de “fechar” a Equação (2.32).

Assim, um método comumente empregado para relacionar os tensores de Reynolds com a média dos gradientes de velocidade do escoamento, consiste na hipótese de Boussinesq (HINZE, 1975), representada pela Equação (2.33).

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.33)$$

A hipótese de Boussinesq tem sido fonte de inspiração para inúmeros modelos de turbulência, entre os quais estão compreendidos o Modelo Spalart-Allmaras, o Modelo k- ϵ e o Modelo k- ω . Em todos, a viscosidade turbulenta é considerada como um escalar e posta na dependência da energia cinética turbulenta (k), da taxa de dissipação de turbulência (ϵ) ou da taxa específica de dissipação (ω). A diferença entre tais modelos de turbulência foca-se na forma de como k, ϵ ou ω são modeladas. Contudo a hipótese de Boussinesq torna-se falha ao

considerar a viscosidade turbulenta como uma grandeza escalar isotrópica, o que em termos práticos, não é observada (VIEIRA, 2006).

Por conseguinte, no intuito de se modelar cada um dos tensores de Reynolds surge uma outra abordagem baseada no modelo dos tensores de Reynolds (RSM- *Reynolds Stress Model*), onde há uma equação de transporte para modelar especificadamente cada um dos tensores de Reynolds (VIEIRA, 2006). Para este tipo de abordagem, considerando escoamentos bidimensionais, cinco equações de transporte adicionais são necessárias. Para os casos em que as simulações se procedem tridimensionalmente sete equações de transporte adicionais devem ser resolvidas.

VIEIRA (2006) destaca que o modelo dos tensores de Reynolds (RSM) é evidentemente superior para as situações em que a anisotropia de turbulência tem um efeito dominante no escoamento médio do fluido, principalmente naqueles escoamentos dotados de altas vorticidades, como acontecem nos hidrociclones.

Neste trabalho será utilizado o modelo RSM, como modelo de turbulência, já que este é aquele que a literatura recomenda (tendo em vista os aspectos mencionados anteriormente) para a aplicação em estudo de hidrociclones. Sendo assim a seguir será apresentada uma breve descrição deste modelo.

2.6.1.1 -Modelo RSM (*Reynolds Stress Model*)

Como mencionado anteriormente, o modelo RSM (Proposto por LAUNDER *et al.*, 1975) desconsidera a hipótese de isotropia do escoamento, introduzindo para cada um dos tensores de Reynolds, uma equação de transporte específica para o fechamento das equações RANS. O modelo RSM possui em relação aos demais modelos de turbulência, um maior potencial para modelar escoamentos em geometrias complexas (VIEIRA, 2006).

Matematicamente, o RSM apresenta a resolução de tensores individuais de Reynolds $(\overline{u_i' u_j'})$ através do uso de equações diferenciais de transporte, no intuito de fechar a equação do movimento quando apresentada na forma de equação de RANS. Assim a equação de transporte exata para transporte dos tensores de Reynolds $(\rho \overline{u_i' u_j'})$ é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{usu} \quad (2.34)$$

onde: C_{ij} representa a convecção, $D_{T,ij}$ a difusão turbulenta, $D_{L,ij}$ a difusão molecular, P_{ij} a produção de tensão, G_{ij} a produção de flutuação, ϕ_{ij} a tensão devido à contribuição da pressão, ε_{ij} a dissipação, F_{ij} a produção pela rotação do sistema e S_{usu} um termo fonte definido pelo usuário.

É importante destacar que os termos $D_{T,ij}$; G_{ij} ; ϕ_{ij} e ε_{ij} precisam ser modelados no sentido de fechar o conjunto de equações.

Seguindo o raciocínio acima, para o termo $D_{T,ij}$ tem-se a modelagem de acordo com o modelo generalizado da difusão gradiente, proposto por DALY *et al.* (1970). Já o termo que acopla pressão-tensão (ϕ_{ij}) é modelado seguindo as propostas de GIBSON *et al.* (1978), FU *et al.* (1987) e LAUNDER (1989).

Porém se o RSM é aplicado a escoamentos próximos a parede usando um tratamento de parede melhorado, o termo pressão-tensão (ϕ_{ij}) precisa ser modificado seguindo as sugestões de LAUNDER *et al.* (1989).

Ainda neste contexto tem-se o termo G_{ij} que devido a flutuações pode ser modelado da seguinte forma:

$$G_{ij} = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \left(g_i \frac{\partial T}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \text{ sendo } Pr_t = 0,85 \quad (2.35)$$

Por fim o tensor de dissipação (ε_{ij}) é modelado segundo a Equação (2.36).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2}(P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \quad (2.36)$$

Para a Equação (2.36) a taxa de dissipação escalar (ε) pode ser calculada por intermédio da equação de transporte do modelo k- ε padrão, conforme proposta de LAUNDER *et al.* (1972).

2.6.2- Modelagem para escoamentos multifásicos

Em geral os escoamentos em hidrociclones não são exclusivamente monofásicos, havendo também a presença de outras fases, quer sejam sólidas (partículas) ou gasosas (*air*

core). Todavia o conhecimento das particularidades da fluidodinâmica do sistema é extremamente importante para projeto e otimização deste tipo de equipamento. Para um melhor entendimento, serão apresentados os principais modelos multifásicos presentes na literatura tendo como referência considerações elaboradas por VIEIRA (2006).

A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pode ser compreendida pela abordagem Euler-Lagrange e/ou Euler-Euler.

Seguindo a abordagem Euler-Lagrange, a fase discreta é tratada de forma lagrangeana. Assim deve-se modelar a fase contínua pela resolução das equações médias de Navier-Stokes (RANS), e utilizar as informações fluidodinâmicas previamente levantadas, como dados de entrada para a descrição do comportamento da fase discreta. É importante observar que esse tipo de abordagem é válido para os casos em que a fase secundária (discreta) ocupa uma pequena fração volumétrica do sistema.

Para a abordagem Euler-Euler, considera-se que as diferentes fases do sistema se interpenetram. Como o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo volume de outra, surge então, o conceito de fração volumétrica de fase. Estas são consideradas como funções contínuas no tempo e no espaço, cuja soma de todas, equivale à unidade. Desta forma, equações de conservação para cada uma das fases, são apresentadas para modelar o escoamento multifásico. Informações adicionais sobre relações constitutivas de cunho empírico ou teórico, são necessárias.

A FLUENT INC. (2007) disponibiliza por intermédio do *software* Fluent[®] três distintos modelos multifásicos, segundo a abordagem Euler-Euler, a saber: o Modelo Volume de Fluido (VOF), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano.

O Modelo VOF (*Volume of Fluid*) é uma Técnica de localização de interfaces aplicadas a malhas eulerianas fixas. Deve ser empregado para escoamentos nos quais existe uma posição de interface bem definida entre dois ou mais fluidos imiscíveis. Este tipo de modelagem é comumente aplicado a escoamentos onde existe estratificação, superfícies livres em tanques agitados, movimento de grandes bolhas num líquido, movimento de líquido em comportas de represas ou em valas, quebra de jatos de líquido, *air core* em hidrociclones (VIEIRA, 2006).

O modelo de mistura foi elaborado para duas ou mais fases (fluido ou partícula), sendo ambas tratadas como fluidos contínuos interpenetrantes. Este modelo calcula as equações de transporte para a mistura e dita velocidades relativas para descrever as fases dispersas. É aconselhado para sistemas na qual a fração volumétrica da fase discreta não ultrapasse o patamar de 10%. As aplicações para o modelo de mistura são para escoamentos dotados de

pequenas bolhas, ciclones, hidrociclones, transportadores pneumáticos ou hidráulicos (VIEIRA, 2006).

O modelo Euleriano pode ser considerado o mais complexo dos modelos multifásicos usados pelo Fluent[®]. Este modelo é baseado na resolução de um conjunto de n-equações de momento e continuidade de acordo como o número de fases incorporadas ao sistema. No modelo Euleriano o acoplamento é realizado por intermédio da pressão e dos coeficientes de transferência entre as fases. Quando as fases são partículas e fluidos, o escoamento recebe a nomenclatura de escoamento multifásico euleriano granular, ao passo que se as fases envolvidas forem apenas fluidos, denomina-se de escoamento multifásico não-granular euleriano. Este modelo tem sido usado com êxito na FEQUI/UFU no estudo da fluidodinâmica de diversas configurações do leito de jorro (DUARTE, 2006).

No trabalho de VIEIRA (2006) foi utilizado também um modelo de Fase Discreta, tendo em vista a descrição do escoamento da fase particulada (trajetórias das partículas) e cálculo das respectivas eficiências. Este modelo é recomendado para as condições de suspensões diluídas que era o caso do referido trabalho. Sendo assim no tópico a seguir será feita uma breve descrição do Modelo de Fase discreta.

2.6.2.1- O Modelo de Fase Discreta

Modelos de Fase Discreta podem ser aplicados a sistemas na qual a fração volumétrica da fase discreta é pequena (sistemas diluídos com $\alpha_d < 12\%$). Em relação à trajetória das partículas (entendidas como bolhas, gotas, pequenas estruturas sólidas etc.) podem ser associados os efeitos de turbulência, considerando as flutuações instantâneas ou médias da velocidade da fase contínua (VIEIRA, 2006).

As trajetórias das partículas podem ser preditas através da integração da equação do movimento, na qual está contemplado o balanço entre as principais forças atuantes sobre a fase discreta, conforme descreve a Equação (2.37) para uma direção axial x em coordenadas cartesianas.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2.37)$$

onde: u representa a velocidade da fase fluida, u_p a velocidade da partícula, ρ a densidade do fluido, ρ_p a densidade da partícula, e o termo $F_D(u - u_p)$ representa as forças de arraste por unidade de massa de partícula, sendo representado por:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2.38)$$

com d_p caracterizando o diâmetro característico da partícula.

Outras variáveis como C_D (coeficiente de arraste) podem ser calculadas por correlações como por exemplo: MORSI e ALEXANDER (1972) e HAIDER e LEVENSPIEL (1989).

Na Equação (2.37), F_x representa todas as forças adicionais que podem atuar sobre a trajetória da partícula.

2.6.3-Equações do movimento e da continuidade utilizadas nas simulações bidimensionais em hidrociclones através do software Fluent®

Por intermédio do software Fluent® é possível resolver equações de conservação de massa e movimento independente do tipo de escoamento. Porém, variáveis devem ser adicionadas a estas equações sempre que houver escoamentos envolvendo transferência de calor, compressibilidade ou turbulência, a fim de tornar o fenômeno devidamente previsto (VIEIRA, 2006).

A equação da conservação de massa (equação da continuidade), válida tanto para escoamentos incompressíveis quanto compressíveis é apresentada a seguir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = Sm \quad (2.39)$$

Verifica-se que o termo que aparece no lado direito da equação acima (Sm) representa a massa adicionada para a fase contínua por causa da dispersão da segunda fase.

Para geometrias bidimensionais (admitida para os hidrociclones), a equação da continuidade pode ser escrita conforme a Equação (2.40):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w) + \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{\rho u}{r} = Sm \quad (2.40)$$

sendo x e r as coordenadas axial e radial; e w , u e v as velocidades axial, radial e tangencial do fluido respectivamente.

A equação do movimento para um referencial fixo pode ser decrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.41)$$

onde p representa a pressão estática, $\bar{\bar{\tau}}$ o tensor resultante do escoamento, $\rho \vec{g}$ e $\vec{F}$ são as forças gravitacionais e de campo respectivamente.

O tensor $\bar{\bar{\tau}}$ pode ser descrito pela Equação (2.42):

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.42)$$

sendo μ é a viscosidade molecular, I o tensor unitário e o segundo termo do segundo membro da equação é o efeito da dilação de volume.

Para hidrociclones, admitindo geometria bidimensional com simetria de eixo, as equações as do movimento para as componentes axiais, radiais e tangenciais do fluido podem ser escritas, como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho w w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u w) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho w u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u u) = \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \right) \right] - 2 \mu \frac{u}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} \nabla \cdot \vec{v} + \rho \frac{v^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho w v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u v) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) \right] - \rho \frac{uv}{r} \quad (2.45)$$

onde: $\nabla \cdot \bar{v}$ pode ser descrito como:

$$\nabla \cdot \bar{v} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \quad (2.46)$$

2.6.4- Técnicas e Métodos de Resolução Numéricas

Devido a uma grande quantidade de equações diferenciais apresentadas nos tópicos acima é imprescindível a aplicação de métodos matemáticos para sua resolução. Neste contexto a solução para uma determinada variável de interesse (ϕ), é conhecida apenas em alguns pontos do domínio (nós), devido à transformação das equações diferenciais em equações algébricas pela técnica de discretização, os quais destacam-se para este tipo de resolução: Método das Diferenças Finitas e pelo Método dos Elementos Finitos, e por fim o Métodos dos Volumes Finitos (VIEIRA, 2006).

No método das diferenças finitas, os valores das variáveis são calculados somente em nós específicos da malha, inexistindo qualquer descrição de comportamento entre um nó e outro. Geralmente é aplicado às malhas irregulares.

Método dos Elementos Finitos os valores de uma variável são calculados em pontos específicos da malha, sendo que funções de interpolação são posteriormente utilizadas para descrevê-los entre os respectivos pontos. Geralmente é empregado para malhas regulares.

No Métodos dos Volumes Finitos a solução resultante possibilita a conservação integral de quantidades de massa, momento e energia, satisfeitas sobre qualquer grupo de volumes de controle e, sobretudo, no domínio inteiro (PATANKAR, 1980).

A técnica de Volumes Finitos que é a recomendada para este estudo e por este método, o domínio do escoamento é dividido em inúmeros volumes de controle, cada qual recebendo em sua posição central, um ponto de interesse da malha. A seguir ocorre a integração das equações de transporte em cada volume de controle perante aproximações apropriadas, resultando num conjunto de equações algébricas. Assim a este conjunto de equações algébricas, acabam sendo incorporadas informações resultantes de outros volumes de controle adjacentes àquele sob análise, devido aos termos convectivos e difusivos inerentes às equações de transporte (MALISKA, 1995). Logo os termos convectivos e difusivos destas

equações algébricas devem ser compartilhados entre os volumes de controle adjacentes mediante técnicas de interpolação (VIEIRA 2006).

Conforme descrito por VIEIRA (2006) o software Fluent[®] disponibiliza para fim de técnicas de interpolação os meios: Diferenças Centrais (FLUENT INC., 2005), *Upwind* de Primeira e Segunda Ordem (Barth e Jespersen, 1989), *Power Law* (Patankar, 1980) e *Quick* (Leonard e Mokhtari, 1990). Já para o acoplamento da pressão com a velocidade, o *software* disponibiliza as rotinas SIMPLE, SIMPLEC e PISO, descritos a seguir:

- SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Um dos algoritmos mais empregados no acoplamento pressão-velocidade (PATANKAR e SPALDING, 1972). O acoplamento é efetuado através de uma relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração de velocidade.
- SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*). Diferencia-se do anterior apenas na expressão responsável pela correção da pressão (VANDOORMAAL ; RAITHBY, 1984).
- PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Satisfaz de maneira mais adequada os balanços de momento após as correções de pressão (FERZIEGER ; PERIC, 1996).

Por fim, através do Fluent[®] são apresentados vários esquemas de interpolação para a pressão (FLUENT INC., 2007).

- Esquema de Interpolação Padrão. Por este esquema os valores de pressão nas faces dos volumes de controle são interpolados através dos coeficientes da equação do movimento. É indicado onde a variação de pressão entre os centros das células computacionais não é tão brusca (VIEIRA, 2006).
- Esquema Linear de Interpolação. A pressão é calculada na face como a média dos valores entre as células fronteiriças.
- Esquema de Interpolação de Segunda Ordem. Pode ser usado com a ressalva de que não haja escoamentos com gradientes de pressão descontínuos (devido à presença de meio poroso) ou uso de modelos multifásicos (VOF e Mistura).
- Esquema de Forças de Campo Equilibradas. Calcula-se a pressão na fase, assumindo que o gradiente normal da diferença entre a pressão e as forças de campo, seja constante (VIEIRA, 2006).

Acrescido as informações acima pode-se ainda aplicar às interpolações de pressão o esquema *PRESTO* (*PREssure STaggering Option*).

Ainda no domínio Fluent[®] tem-se a resolução das equações de transporte que pode ser conduzida mediante esquemas numéricos segregados ou acoplados. Observa-se que tanto por um método como pelo outro, o Fluent[®] tem como base o Método dos Volumes Finitos.

2.6.5- CFD em Hidrociclones e Outros Estudos Recentes

Um dos primeiros estudos de CFD aplicado à hidrociclone foi realizado por PERICLEOUS (1987). Este autor utilizou um modelo bidimensional centrado nas equações de Navier-Stokes para mistura sólido-líquido, onde a modelagem dos tensores de Reynolds foi conduzida pela adoção de um modelo isotrópico com fundamento na teoria do comprimento de Prandtl. A técnica dos volumes finitos foi empregada na resolução das equações diferenciais parciais pertinentes. O autor utilizou o código comercial PHOENICS.

RAJAMANI *et al.* (1991) utilizaram uma modelagem para previsão do escoamento no interior de hidrociclones tratando como um caso bidimensional. As condições de assimetria foram analisadas, sendo que os autores concluíram que essas condições podem ser aplicadas na região situada logo abaixo do tubo de alimentação do hidrociclone.

DYAKOWSKI *et al.* (1995) propuseram um método de predição do tamanho e forma do *air core* em hidrociclone mediante a resolução das equações de transporte. Foram levadas em consideração as características da suspensão (viscosidade molecular e tensão superficial) bem como as condições operacionais (vazão) e geométricas do hidrociclone. As simulações apresentaram o tamanho do *air core* como diretamente proporcional à vazão de alimentação do hidrociclone e inversamente proporcional à viscosidade da suspensão.

AVEROUS *et al.* (1997) utilizou o código Fluent[®] para o estudo da fluidodinâmica de hidrociclones do tipo Acrílico. Estes autores concluíram que dentro da seção cônica do hidrociclone, as flutuações radiais de turbulência eram capazes de transportar as partículas da região da parede para a do *air core*, interferindo na separação.

SOUZA (2003) em uma tese de doutorado estudou a fluidodinâmica de um hidrociclone segundo a geometria Rietema através da Simulação de Grandes Escalas ou *Large Edge Simulation* (LES). Este autor desenvolveu o seu mestrado na FEQUI/UFU trabalhando experimentalmente com os hidrociclones filtrantes de Bradley (SOUZA, 1999). Neste trabalho de doutorado SOUZA (2003) utilizou uma abordagem em que as estruturas turbilhonares grandes e anisotrópicas seriam resolvidas diretamente e as estruturas menores

(submalha) seriam modeladas. Assim como VIEIRA (2006), SOUZA (2003) validou a sua metodologia de simulação por meio dos dados experimentais de DABIR (1983). Os resultados simulados apresentaram boa concordância com os dados experimentais de DABIR (1983).

Como mencionado anteriormente, VIEIRA (2006) utilizou o *software* Fluent[®] para simular por CFD a fluidodinâmica de 25 configurações de hidrociclones convencionais e filtrantes. As simulações em CFD mostraram que a presença da filtração durante o processo de hidrociclonagem foi capaz de reduzir o movimento espiralado do fluido no interior do equipamento, amortecendo-o, bem como foi responsável por minorar a componente tangencial do fluido no vórtice externo. Apesar da diminuição da velocidade tangencial nos hidrociclones filtrantes, pôde-se concluir que houve uma menor intensidade de mistura principalmente próxima à saída do orifício de *underflow*, o que certamente influenciou na performance de coleta de partículas.

DELGADILLO e RAJAMANI (2007) também utilizaram *software* Fluent[®] para explorar e comparar o desempenho de seis geometrias alternativas de hidrociclones, com uma geometria convencional. O objetivo era manipular a hidrodinâmica para atingir a classificação desejada. A estratégia *Large Edge Simulation* (LES), ou simulações em grandes escalas, foi utilizada para o fechamento da turbulência, sendo que o método de busca de partículas Lagrangeano foi usado para prever a classificação da partícula. O balanço de massa e a curva de classificação foram as variáveis usadas para avaliar o desempenho de cada um dos novos projetos. Estes autores concluíram que a otimização da classificação do desempenho através da modificação da geometria padrão pode ser alcançada pelo uso da técnica de CFD.

WANG e YU (2007) apresentaram um estudo de simulação do fluxo gás-líquido em hidrociclones com diferentes formatos de *vortex finder*. O fluxo turbulento de gás e líquido foi modelado usando o Modelo das Tensões de Reynolds (RSM), e a interface entre o líquido e o núcleo de ar, usando o Modelo de Volume de Fluido Multifásico. Os resultados mostraram que a eficiência de separação diminuiu para partículas pequenas e aumentou relativamente para partículas maiores, com o aumento do comprimento do *vortex finder*. Os autores justificaram este resultado pelo efeito do fluxo curto circuito. Os autores indicaram que um hidrociclone com *vortex finder* de formato “manta” pode aumentar consideravelmente o desempenho do hidrociclone. Com este novo projeto, a queda de pressão pode reduzir cerca de 10% e aumentar a eficiência de coleta para partículas finas.

MARTINEZ *et al.* (2007) estudaram o efeito do comprimento do *vortex finder* em dois hidrociclones de tamanhos diferentes. Este autor concluiu que a profundidade em que a ponta do *vortex finder* é colocada influencia enormemente a eficiência do hidrociclone. O valor

ótimo para esta variável foi encontrado por estes autores como sendo aquele correspondente a uma razão de 0,1 para a relação entre o comprimento do *vortex finder* e o comprimento total do hidrociclone. Os autores ainda inferiram que para comprimentos muito pequenos do *vortex finder*, o curto circuito gerado na parte superior do hidrociclone evita uma separação adequada. Do mesmo modo, quando a profundidade do *vortex finder* é excessiva, um substancial decréscimo na eficiência pode ser observado, devido a redemoinhos gerados no fundo do hidrociclone. Por fim condições de eficiência menores foram encontradas quando a profundidade do *vortex finder* é próxima da junção entre a parte cilíndrica e a parte cônica, onde altas turbulências podem aparecer devido à ação simultânea dos dois fenômenos: a mudança de trajetória pela entrada na parte cônica e a turbulência associada ao próprio *vortex finder*.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material Particulado

O material particulado escolhido para estudo foi a rocha fosfática. Este material foi adotado neste trabalho por ser um produto regional de importante valor econômico. A composição do minério fosfatado empregado nesse trabalho foi obtida através de uma análise de raios X realizada pela empresa Fosfertil-Ultrafertil de Catalão e pode ser vista na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Composição química das partículas rocha fosfática (Fonte: Fosfertil-Ultrafertil-Catalão).

Constituinte	% Total
P ₂ O ₅	28,27
Fe ₂ O ₃	3,66
SiO ₂	30,34
CaO	37,80
Al ₂ O ₃	7,68
MgO	0,99
BaO	0,03
SrO	0,54
TiO ₂	0,61
F	1,79

A densidade do material particulado (rocha fosfática) foi determinada pela técnica de picnometria a Hélio realizada na Universidade Federal de São Carlos, cujo valor encontrado foi equivalente a $2,987 \pm 0,0009 \text{ g/cm}^3$. A distribuição granulométrica desse material foi obtida pela técnica de difração de raios *laser* e pode ser vista na Figura 3.1.

O modelo RRB, dado pela Equação (3.1), foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para o pó de rocha fosfática utilizado nesse trabalho, com coeficiente de correlação quadrático de 0,998.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{d_p}{12,88}\right)^{0,81}} \quad (3.1)$$

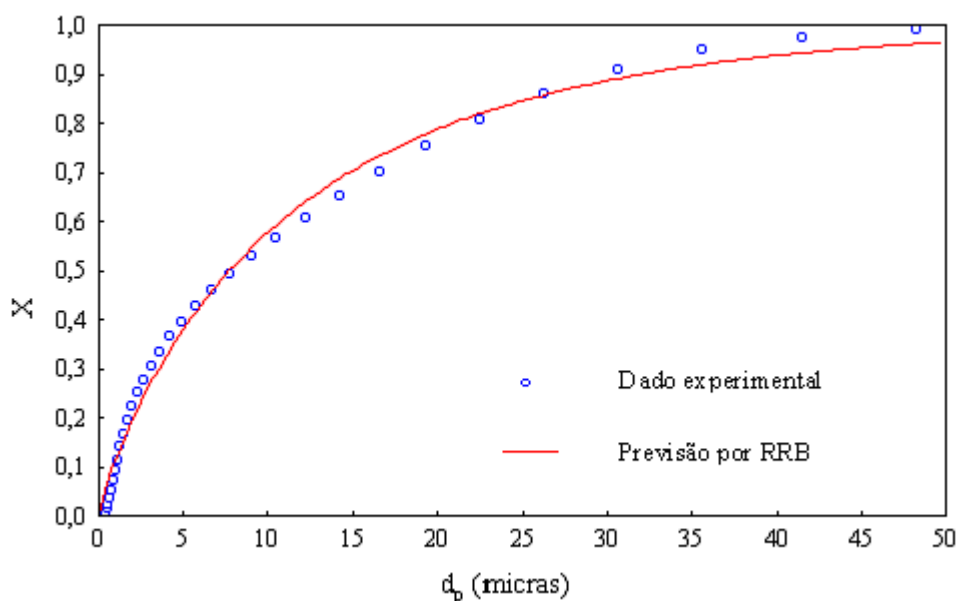


Figura 3.1 – Curva de distribuição granulométrica da rocha fosfática obtida experimentalmente pela técnica de difração de raios *laser* e a previsão dela pelo modelo RRB.

3.2 - Os hidrociclones

Conforme mencionado no Capítulo I desta Dissertação, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência do diâmetro de *underflow* (D_u) e do comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*) na performance do hidrociclone filtrante. Para tanto foi utilizada como geometria a configuração que foi otimizada por VIEIRA (2006), conforme descrito no Capítulo II, ou seja, o hidrociclone filtrante denominado HF₁₁. Lembrando que VIEIRA (2006) manteve os níveis do diâmetro de *underflow* (D_u) e do comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*) em valores fixos.

Visando à comparação do desempenho dos equipamentos convencionais e filtrantes, foram realizados experimentos com dois hidrociclones de idênticas dimensões, o primeiro com um cone permeável (HF₁₁) e o segundo com um cone maciço (HC₁₁), ambos equipamentos com diâmetro da parte cilíndrica (D_c) igual a 30 mm.

Os cones filtrantes foram manufacturados pela Indústria e Comércio de Filtros e Materiais Sinterizados Ltda, METALSINTER, empresa brasileira situada na cidade de São Paulo, a qual trabalha com uma grande variedade de produtos correlacionados a essa área. O cone poroso do hidrociclone tinha os seguintes valores para porosidade, permeabilidade e espessura de 10%; $6,63 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ e 2,5 mm, respectivamente. As principais relações geométricas utilizadas para os hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁ são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Relações Geométricas dos hidrociclones convencional (HC₁₁) e filtrante (HF₁₁) utilizados neste trabalho.

D_i/D_c	D_o/D_c	L/D_c	θ
0,26	0,22	6,93	11,2°

Neste trabalho foram utilizados três distintos níveis para cada um dos fatores estudados (diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*). No que tange aos diâmetros de *underflow* foram utilizados as dimensões de 3, 4 e 5 mm. Já para o comprimento do *vortex finder* foram utilizadas as dimensões de 12, 21 e 30 mm. A figura 3.2 apresenta os diferentes comprimentos de *vortex finder* e diâmetros de *underflow* utilizados para o estudo da separação sólido-líquido.



Figura 3.2 – Foto dos diferentes comprimentos de *vortex finder* (12, 21 e 30 mm) e diâmetros de *underflow* (3, 4 e 5 mm) utilizados para os hidrociclones HF₁₁ e HC₁₁.

Na execução dos experimentos, cada nível das variáveis supracitadas foram combinadas entre si sob a forma de um planejamento de experimentos, conforme ilustra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Matriz Planejamento de experimentos para as variáveis D_u e ℓ no estudo dos hidrociclones HF₁₁ e HF₁₁.

D_u	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
ℓ	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1

Vale ressaltar, que na Tabela 3.3 cada variável está representada sob a forma codificada, nos termos das equações 3.1 e 3.2.

$$X_1 = \frac{D_u - 4}{1} \quad (3.1)$$

$$X_2 = \frac{\ell - 2,1}{9} \quad (3.2)$$

Os equipamentos utilizados nesta dissertação tiveram seu sistema de montagem modular, idêntico ao trabalho de VIEIRA (2006). Sendo assim, foram confeccionados individualmente o duto de alimentação, os tubos de *overflow*, o cilindro, os diâmetros de *underflow* e os troncos de cones, tanto impermeável quanto filtrante. O cilindro foi construído de tal forma a permitir o acoplamento dos tubos de *overflow* e alimentação através de um sistema de rosca, bem como o encaixe do cone filtrante pela parte inferior. Com exceção do Tronco de Cone Poroso e dos diâmetros de *underflow* que foram feitos a partir de partículas de bronze sinterizadas e teflon, respectivamente, todas as demais peças foram manufaturadas com latão. Finalmente cada cone (poroso ou maciço) era unido ao cilindro e à base, contendo os diâmetros de *underflow*, através de um sistema de travas mecânicas, como ilustra a Figura 3.3 abaixo:

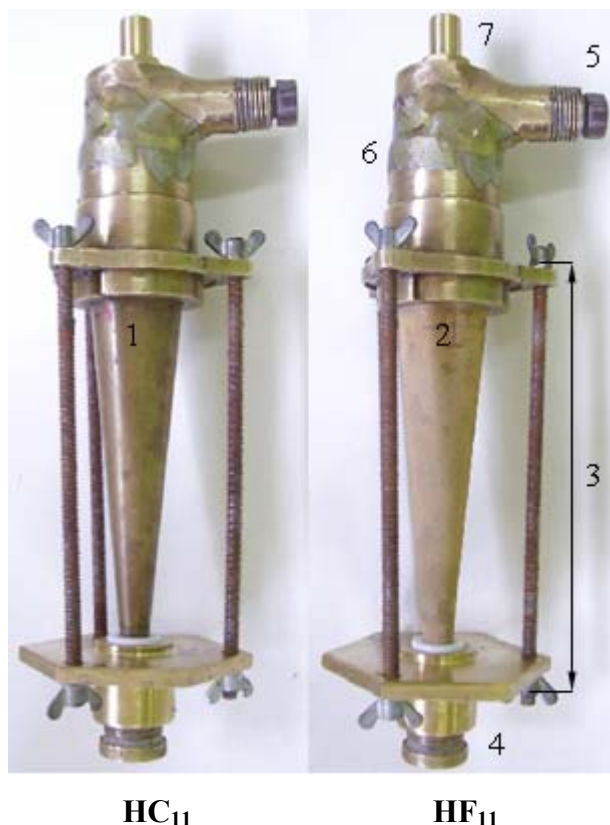


Figura 3.3 – Cone Convencional (1) e Filtrante (2), travas mecânicas (3), duto de *underflow* (4) e de alimentação (7), cilindros (6) e duto de *overflow* dos equipamentos (Hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁) utilizados para o estudo da separação sólido-líquido.

Os equipamentos utilizados nesta dissertação tiveram o seu sistema de montagem idêntico ao do trabalho de VIEIRA (2006). Sendo assim, foram confeccionados individualmente os dutos de alimentação, os tubos de *overflow*, os cilindros e os troncos cones, tanto impermeáveis quanto filtrantes. Os cilindros foram construídos de tal forma a permitir o acoplamento dos tubos de *overflow* e alimentação através de um sistema de rosca, bem como o encaixe do cone filtrante pela parte inferior. Os materiais utilizados na manufatura das partes maciças foi o latão.

3.3 A Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada neste trabalho, montada no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LSP/FEQUI/UFU) foi construída por meio de recursos de um projeto FAPEMIG. Esta unidade foi a mesma utilizada no trabalho de VIEIRA (2006) e será descrita a seguir.

A Figura 3.4 mostra uma fotografia da unidade experimental consta de um tanque de 250 litros (1), responsável pelo armazenamento da suspensão. A suspensão era homogeneizada por um agitador mecânico acoplado a um motor de 0,5 cv (2), sendo que para potencializar esta homogeneização foram instaladas duas chicanas no tanque de suspensão. A bomba da unidade era do tipo helicoidal com uma potência de 5 cv (3). Esta bomba tem como vantagem em relação às bombas centrífugas, utilizada nos primeiros trabalhos relativos aos hidrociclones filtrantes (BARROZO *et al.*, 1989; SOUZA, 1999; VIEIRA *et al.* 1997, VIEIRA, 2001; ARRUDA *et al.* 2002; ARRUDA, 2003), o fato de garantir condições de vazão e queda de pressão mais estável.



Figura 3.4 - Unidade Experimental.

Pode ser observado na Figura 3.4, que a tubulação que sai do recalque da bomba é dividida em duas correntes: na parte inferior existe uma linha de *bypass*, que ajuda no controle da vazão e na homogeneização da suspensão; e na parte superior tem-se a linha de alimentação do hidrociclone. Cabe ressaltar que na mesma unidade eram realizados os experimentos com os hidrociclones convencionais e filtrantes, já que os mesmos eram facilmente substituídos.

Anteriormente a entrada de alimentação do hidrociclone foi instalado um manômetro de Bourdon digital para se efetuar leituras de queda de pressão no hidrociclone. Durante os ensaios todas as correntes efluentes do hidrociclone filtrante (*underflow*, *overflow* e filtrado) e do convencional (*underflow*, *overflow*) eram retornadas ao tanque de armazenamento.

3.4 Procedimento Experimental

Uma vez definida previamente a configuração de hidrociclone a ser utilizada nos ensaios, de acordo com a matriz de Planejamento de Equipamentos (Tabela 3.3) o mesmo era montado e inserido na unidade.

Para cada linha da Matriz de Planejamento, tanto para as configurações filtrantes com como convencionais, quatro níveis de queda de queda de pressão (0,9; 1,2; 1,5 e 1,8 kgf*cm⁻²) foram utilizados nos ensaios experimentais.

A concentração volumétrica de material particulado (rocha fosfática) na suspensão de alimentação foi de aproximadamente 1% em um volume de 200 L de suspensão. Para a realização dos ensaios experimentais, primeiro a suspensão do tanque era homogeneizada pelo agitador e, em seguida, acionada a bomba helicoidal para o início da operação. Com o auxílio das válvulas gaveta e globo, regulava-se a quantidade de suspensão a ser enviada diretamente ao hidrociclone filtrante até atingir a queda de pressão desejada.

Uma vez o sistema estando ajustado nas condições operacionais desejadas, iniciava-se as medidas experimentais. A vazão volumétrica de alimentação, *overflow*, *underflow* e filtrado foram medidas através de técnicas gravimétricas (balanças com precisão de $\pm 0,01$ g).

Salvo para a corrente de filtrado que era isenta de sólidos, a determinação das concentrações mássicas das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow* eram feitas pela coleta de amostras, cujas massas eram medidas, antes e após o encaminhamento à estufa (permanência de 24 horas à temperatura de 80°C).

Para medida da distribuição granulométrica das correntes de alimentação e de *underflow*, foram coletadas pequenas amostras dessas correntes em cada ensaio, sendo as análises realizadas utilizando o equipamento *Malvern Mastersizer*.

O *Malvern Mastersizer* é um equipamento muito utilizado em diversos laboratórios por apresentar medidas precisas de distribuição granulométrica de um conjunto de partículas dispersas no ar ou em líquidos. Este equipamento utiliza a técnica da difração de raios *laser* para a análise do tamanho de partículas. O mesmo consta de um circuito fechado de bombeamento e um agitador. Assim a suspensão a ser analisada é conduzida para uma

pequena câmara no interior do equipamento, onde um feixe de *laser* incide perpendicularmente ao escoamento. Ao incidir sobre a amostra, cada *laser* sofre um desvio em função do tamanho das partículas que encontrara no meio. Cada desvio é interpretado por um sistema de detectores que atribui determinado tamanho à partícula na forma de um diâmetro volumétrico ($dp = dv$).

É importante salientar que as amostras analisadas no *Mastersizer* receberam um tratamento prévio. Este tratamento consistia primeiramente na calibração do sistema ótico, através da medida do “branco” (água destilada e dispersante) que serviu como referencial para todas as demais medidas. O dispersante utilizado foi o hexametáfosfato de sódio (Calgon), numa concentração aproximada de 1 grama por litro de suspensão.. A seguir transferiu-se a amostra para um béquer diluindo-a com água destilada até aproximadamente 500 mL. Aplicou-se por aproximadamente 30 s um banho ultra-sônico para romper os possíveis aglomerados de partículas que existiam na amostra, conjuntamente com o dispersante, que por sua vez, mantia as partículas afastadas umas das outras, evitando nova aglomeração.

Após os tratamentos descritos anteriormente iniciou-se as análises mediante ao uso do *software* de aquisição e tratamento de dados experimentais da *Malvern Mastersizer*. As informações obtidas deste *software* foram enviadas a uma planilha eletrônica na forma de diâmetros de partículas e suas correspondentes frações mássicas acumulativas. Por fim, os parâmetros do modelo RRB foram estimados através da técnica de regressão não linear por meio do *software* Statistica.

3.5 Cálculo de Grandezas Associadas a Hidrociclones

Neste tópico será abordado o procedimento pelo qual as principais medidas experimentais (queda de pressão, vazão mássica, concentração mássica e distribuições granulométricas) foram manipuladas para obtenção das principais respostas associadas ao estudo da performance e otimização de todas as configurações dos hidrociclones convencional (HC_{11}) e filtrante (HF_{11}), nos diversos níveis de diâmetro de *underflow* e do comprimento do tubo de *overflow* (*vortex finder*). As variáveis calculadas foram a concentração volumétrica, a vazão volumétrica, a razão de líquido, a eficiência total, a eficiência total reduzida, a eficiência granulométrica, a eficiência granulométrica reduzida, o diâmetro de corte, e o diâmetro de corte reduzido.

As concentrações volumétricas foram calculadas a partir do conhecimento das concentrações mássicas (obtidas por gravimetria) e das densidades de fluido e material (obtidas por picnometria) conforme mostram as equações 3.3 e 3.4:

$$C_v = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_w} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.3)$$

$$C_{vu} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_{vu}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.4)$$

O cálculo para as vazões volumétricas das correntes de *underflow* e *overflow* deu-se através das vazões mássicas (medidas) e das densidades das respectivas correntes (Equações 3.5 e 3.6).

$$Q_u = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (3.5)$$

$$Q_o = \frac{W_o}{\rho_o} \quad (3.6)$$

nas quais ρ_u e ρ_o são respectivamente as densidades das suspensões do *underflow* e *overflow* obtidas das concentrações medidas experimental e das densidades do fluido e do sólido, conforme as expressões 3.7 e 3.8:

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wu} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (3.7)$$

$$\rho_o = \frac{\rho}{1 - C_{wo} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (3.8)$$

A Eficiência Total (η), que leva em conta todos os sólidos coletados no *underflow* foi calculado pela Equação (3.9), a qual representa a relação entre a vazão mássica de sólidos no *underflow* pela vazão mássica na alimentação.

$$\eta = \frac{C_{wu}}{C_w} \frac{W_u}{W} \quad (3.9)$$

A Eficiência Total Reduzida (η'), que considera os sólidos coletados no *underflow* exclusivamente pelo efeito do campo centrífugo (descontando-se o denominado “efeito T”), foi obtida pela Equação (3.10).

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (3.10)$$

na qual a Razão de Líquido (R_L), que mede a relação do líquido que sai no *underflow* pelo líquido alimentado no hidrociclone, calculada pela Equação (3.11):

$$R_L = \frac{Q_u (1 - C_{vu})}{Q (1 - C_v)} \quad (3.11)$$

A Eficiência Granulométrica, relacionada ao poder de separação do hidrociclone em relação a um tamanho específico de partícula, pode ser obtida pelo produto da eficiência total pela relação entre a distribuição de frequência das partículas das correntes de *underflow* pela corrente de alimentação (Equação 3.12):

$$G = \eta \frac{d \frac{X_u}{d_p}}{\frac{dX}{d_p}} \quad (3.12)$$

Semelhante definição é apresentada para a Eficiência Granulométrica Reduzida, na qual novamente se negligencia o “efeito T”, por motivos já esclarecidos anteriormente, conforme equação (3.13):

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (3.13)$$

O diâmetro de corte (d_{50}) e o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) representam o diâmetro de uma partícula separada com uma eficiência granulométrica ou granulométrica reduzida (respectivamente) de 50%. Estes parâmetros são usados para definir o poder de classificação de um hidrociclone em uma determinada condição operacional.

Uma vez calculadas as distribuições granulométricas da alimentação e do *underflow*, cada qual devidamente representada pelo modelo RRB, devem as mesmas ser utilizadas no cálculo do diâmetro de corte reduzido, por intermédio da Equação (3.14), à medida que G' assume o valor de 0,5.

$$\frac{\eta \left\{ \frac{\left(\frac{d_p}{d_u} \right)^{nu} nu \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_u} \right)^{nu} \right]}{\left(\frac{d_p}{d_u} \right)^{na} na \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_a} \right)^{na} \right]} \right\} - R_L}{1 - R_L} - 0,5 = 0 \quad (3.14)$$

na qual d_a e d_u correspondem ao parâmetro $D_{63,2}$ do modelo RRB para a alimentação e *underflow* respectivamente. Os termos *nu* e *na* representam o parâmetro n do modelo RRB para a alimentação e *underflow*, respectivamente.

A Equação (3.14) é uma expressão não-linear, cuja solução analítica na variável diâmetro da partícula (d_p) inexistente. Logo, a obtenção do diâmetro de corte reduzido deve ser feita numericamente. Para tanto, analogamente aos trabalhos anteriores (VIEIRA, 2006 e outros) foi implementado neste trabalho, um algoritmo no *software* Maple para a obtenção deste parâmetro.

Procedimento análogo pode ser usado para o cálculo do diâmetro de corte, bastando utilizar a eficiência granulométrica, em vez da granulométrica reduzida.

3.6 Metodologia para as Simulações Numéricas

A metodologia utilizada nas simulações foi a mesma utilizada por VIEIRA (2006). As simulações numéricas foram conduzidas através do *software* comercial Fluent[®] (FLUENT

INC., 2003), onde a estrutura base da malha utilizada provém da utilização do *software* comercial Gambit® (FLUENT INC., 2005). Todavia, foi por intermédio do Gambit® que uma malha computacional foi manufaturada para que domínio de escoamento dos hidrociclones fosse devidamente simulado pelo Fluent®.

Para a malha computacional foi possível considerar uma redução considerável do número de células computacionais nas simulações bidimensionais, devido ao fato dos hidrociclones possuírem um eixo de simetria. Isto se deve ao fato de que na operação de um hidrociclone, o escoamento de uma parte é praticamente idêntico àquele verificado para a outra. Assim, torna-se necessário, então, a confecção da malha apenas para uma das metades do hidrociclone.

Por sua vez a construção bidimensional da malha deu-se inicialmente pela escolha de um eixo xy, em que foram utilizadas algumas considerações impostas pelo programa. Uma delas prima impõe que o eixo de simetria do equipamento coincida com o eixo x. A outra atenta para que o domínio da malha esteja definido numa região onde os valores de y sejam positivos. Maiores detalhes podem ser visualizados na Figura 3.5.

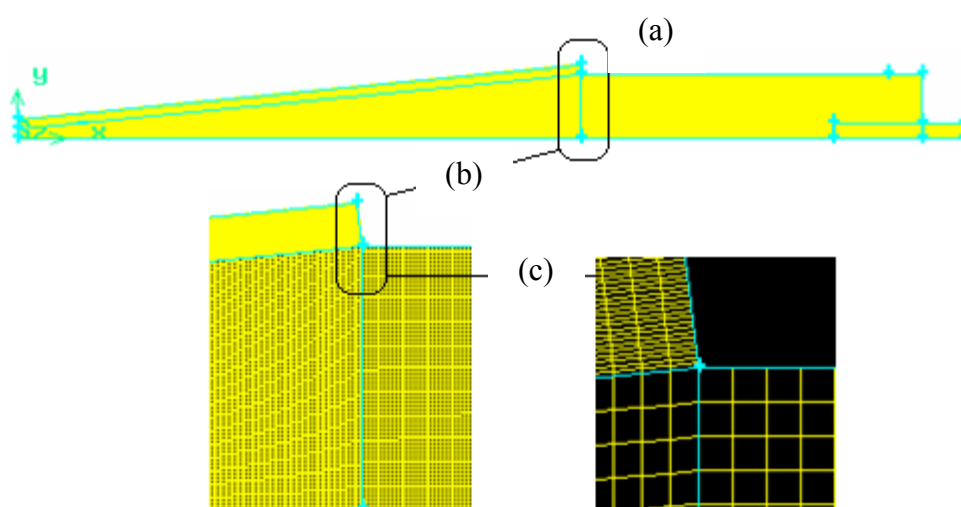


Figura 3.5 – Simetria (a), malha (b) e células computacionais (c) para os hidrociclones.

Adotada as considerações acima, o próximo passo foi definir as dimensões do equipamento através de coordenadas xy. Logo definido todos os pontos (*vortexts*), continuou-se o procedimento no intuito de que todos os pontos fossem ligados através de segmentos de retas denominados de *edges*. Por conseguinte, um espaço delimitado por um conjunto de *edges* denominou-se de *face*. Nesta etapa o usuário estabelece o tipo de fluido (monofásico ou mistura) ou sólido (estruturas rígidas internas ao escoamento) utilizados na simulação. Por

fim, um conjunto de faces deu origem aos volumes, os quais representaram por inteiro todo o domínio a ser simulado (volume do interior e do meio filtrante do hidrociclone).

É importante mencionar que para confecção da malha computacional foi escolhida dentre outras, células do tipo quadrangulares.

Assim numa determinada *face*, cada *edge* recebeu um determinado número de pontos, os quais a princípio representavam a dimensão de um dos lados de cada célula computacional. O número de pontos escolhido foi de tal modo que não exigisse grande esforço computacional, e ao mesmo tempo tivesse um número de células computacionais que representasse bem o sistema (90000 a 120000 células). O Gambit[®] permitiu ainda, o refinamento da malha próximo às paredes a fim de melhor representar os efeitos de camada limite (forças viscosas atuantes), o que foi feito neste trabalho.

Consequentemente, foi atribuída a cada *edge* um tipo de fronteira, para que as mesmas estivessem aptas a receberem as condições de contorno necessárias para a consecução da simulação. Para o hidrociclone, utilizando a nomenclatura fornecida pelo Gambit[®] por exemplo, as paredes foram denominadas de *wall*, a entrada de *velocity inlet*, as saídas (*underflow*, *overflow* e filtrado) de *pressure outlet*, o cone de *porous zone* (quando poroso) e de *solid* (quando impermeável), as divisórias internas de *interior* e o eixo de simetria de *axis*.

Por fim, fez-se a transferência da malha do Gambit[®] para o Fluent[®].

No ambiente Fluent[®] foi de fundamental importância, fornecer as condições de contorno adequadas. Logo na entrada do equipamento, denominada *velocity inlet* eram fornecidos ao programa os valores das componentes da velocidade do fluido (axial, radial e tangencial). A seguir, serão apresentadas algumas ressalvas para o cálculo das respectivas velocidades:

- Para a componente axial da velocidade (w_e) do fluido foi definido o valor zero, pois o líquido foi introduzido no separador na direção radial e não de seu eixo de simetria (axial).
- A componente radial da velocidade (u_e) do fluido foi calculada com base na transformação teórica da entrada dos hidrociclones (essencialmente assimétrica) em uma entrada bidimensional simétrica (Equação 3.15).

$$u_e = \frac{Q}{\pi D_i D_c} \quad (3.15)$$

- A componente tangencial (v_e) do fluido foi calculada, considerando as dimensões do tubo de alimentação do hidrociclone (Equação 3.15). Porém houve necessidade de mencionar ao pacote numérico, o fato de que o espaço da simulação foi regido pela simetria e por escoamento rotacional do fluido (*Axisymmetric Swirl*).

$$v_e = \frac{4Q}{\pi D_i^2} \quad (3.16)$$

Ainda considerando o ambiente Fluent[®], foi informado ao mesmo apenas a existência de um fluido (água), bem como uma coordenada onde a pressão do sistema estivesse bem caracterizada (*pressure gauge*). O centro da saída do *overflow* foi escolhido, cuja pressão nele equivaleu à pressão atmosférica. Logo o programa passou a adotar nos cálculos, uma pressão relativa, considerada como a diferença da pressão de qualquer ponto do sistema pela pressão posta no referencial. Ao se considerar o cone filtrante para os hidrociclones simulados, as seguintes informações adicionais foram exigidas pelo Fluent[®]: espessura, permeabilidade, porosidade e a direção de escoamento do filtrado, a fim de que as características do processo de filtração pudessem ser incorporadas durante as simulações.

Na seqüência seguiram-se as simulações numéricas considerando apenas um regime permanente de escoamento e ausência de formação de *air core*.

Em relação aos modelos de turbulência, foi utilizado o modelo RSM (*Reynolds Stress Model*), pois conforme discutido no Capítulo II é o que melhor representa o escoamento em hidrociclones.

Por sua vez, ao se considerar os esquemas de interpolação da pressão, foi aplicado o esquema *PRESTO!* enquanto para o acoplamento do binômio pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo *SIMPLE*. No que tange às demais variáveis fluidodinâmicas, optou-se pela escolha de esquemas de interpolação do tipo *UPWIND*, quer sejam de primeira ou segunda ordem.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Comparação do Comportamento do Hidrociclone Convencional (HC₁₁) com o Hidrociclone Filtrante (HF₁₁)

Nesta seção serão apresentados, comparados e discutidos alguns resultados típicos obtidos experimentalmente e por simulação (CFD) para os hidrociclones filtrantes (HF₁₁) e convencionais (HC₁₁), ambos de mesma configuração. Lembrando que, conforme fora mencionado nos capítulos anteriores, estas configurações (HF₁₁ e HC₁₁) foram aquelas otimizadas por VIEIRA (2006), sem verificar, no entanto, o efeito do diâmetro de *underflow* (D_u) e do comprimento do tubo de *vortex finder* (ℓ), os quais serão analisados oportunamente na seção 4.2

Sendo assim, alguns resultados experimentais típicos da comparação do desempenho das configurações convencionais e filtrantes serão apresentados neste tópico. Cabe ressaltar que a mesma tendência encontrada nos resultados aqui apresentados são observadas também nas outras configurações estudadas nesta dissertação. A Figura 4.1, a seguir mostra os resultados experimentais encontrados para o Número de Euler para os hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁, sendo montados com D_u e ℓ nas dimensões de 5 e 21 mm, respectivamente.

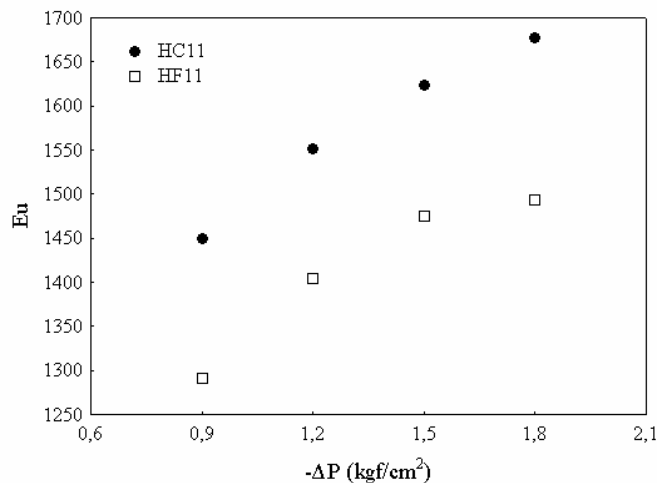


Figura 4.1: Números de Euler (Eu) para os hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁ com D_u e ℓ de 5 e 21 mm, respectivamente.

Os resultados da Figura 4.1 mostram que a filtração sempre foi um fenômeno benéfico para a separação em hidrociclones. Independente da combinação de D_u e ℓ adotada nas outras

configurações, esta tendência também foi observada. O número de Euler da configuração filtrante sempre se manteve em níveis inferiores do que aqueles observados para a configuração convencional, demonstrando que nas mesmas condições operacionais do equipamento convencional, o separador filtrante requer um menor consumo de energia para prover a separação sólido-líquido.

Os resultados obtidos por simulação (CFD) confirmam a análise anterior, conforme pode ser observado na Figura 4.2. Esta figura mostra os perfis simulados de pressão para os hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁, exemplificados com D_u e ℓ nas dimensões de 5 e 21 mm, respectivamente. Observa-se nesta figura que os níveis de pressão no hidrociclone convencional (HC₁₁) são superiores ao do hidrociclone filtrante (HF₁₁), ambos operando numa vazão de alimentação equivalente a $(301 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$. Os valores simulados do número de Euler para o hidrociclone filtrante foram também, como consequência, inferiores ao do convencional.

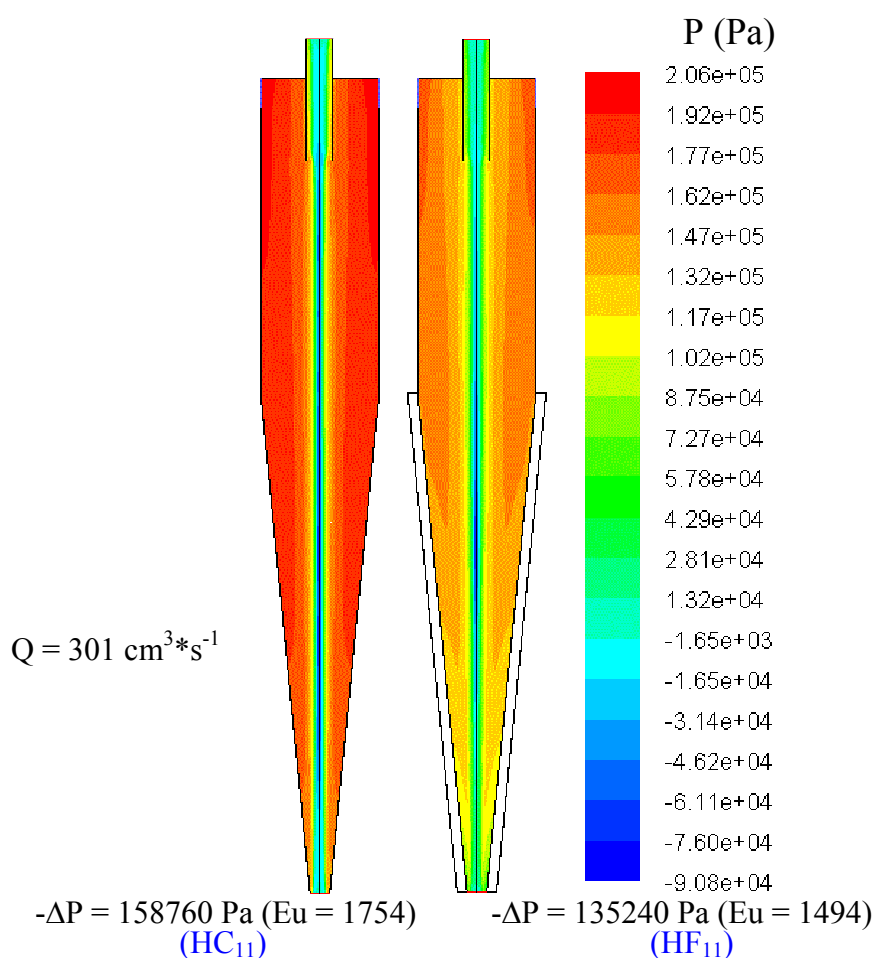


Figura 4.2: Perfis de pressão Total (P) para os hidrociclones convencional (HC₁₁) e filtrante (HF₁₁) com D_u e ℓ iguais a 5 e 21 mm, respectivamente, operando com $Q = 301 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tendo em vista a comparação do potencial de separação das configurações convencionais e filtrantes, na Figura 4.3 são apresentados resultados experimentais dos diâmetros de corte (d_{50}) para o par de hidrociclone (filtrante e convencional) com D_u e ℓ de 4 e 12 mm, respectivamente. Cabe novamente ressaltar que a tendência encontrada nos resultados desta figura foi também observada para os demais hidrociclones montados, independentemente das possíveis combinações entre D_u e ℓ .

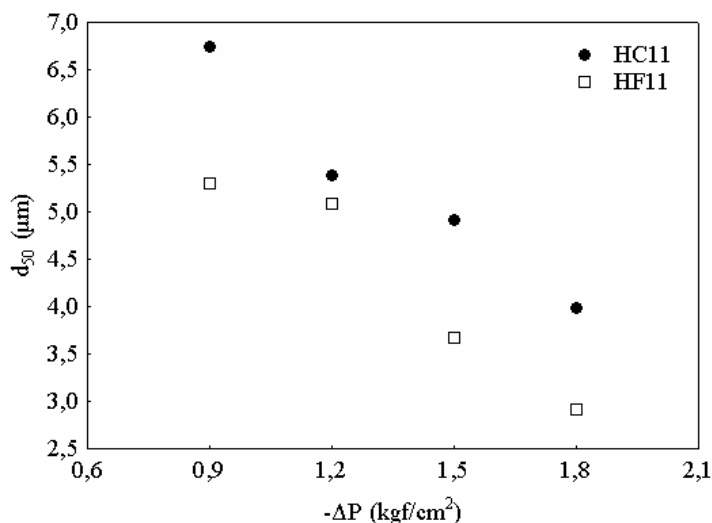


Figura 4.3: Diâmetros de Corte (d_{50}) para os hidrociclones HC₁₁ e HF₁₁ com D_u e ℓ de 4 e 12 mm, respectivamente.

Os resultados da Figura 4.3 mostram também que a filtração foi um fenômeno vantajoso para a separação, pois nas mesmas condições operacionais do hidrociclone HC₁₁, o hidrociclone HF₁₁ apresentou menores diâmetros de corte, ou seja, uma maior eficiência de coleta de partículas. Uma justificativa para tal comportamento pode ser obtida à luz da Fluidodinâmica Computacional no que tange às velocidades radiais na região cônica de cada equipamento.

Neste sentido a figura 4.4 mostra os resultados da velocidade radial, obtidos por simulação para os hidrociclones com $D_u = 4$ mm e $\ell = 12$ mm. Estes resultados simulados da velocidade radial do fluido foram obtidos próximos à parede cônica, tanto para o hidrociclone filtrante HF₁₁, quanto para o hidrociclone convencional HC₁₁, ambos calculados numa posição axial a 4 cm a partir do orifício de *underflow*. O sinal negativo indicou apenas que o fluido escoava da parede para o centro do hidrociclone filtrante.

Observa-se nos resultados da Figura 4.4 que a retirada de fluido pelos poros do cone filtrante fez com que os gradientes de velocidade radial próximos à parede, diminuíssem em relação aos da configuração convencional. Sendo assim, no equipamento filtrante houve uma

menor migração radial de líquido em direção ao eixo do equipamento. Em comparação ao hidrociclone convencional de mesma configuração geométrica, uma partícula de determinado tamanho certamente teria maior probabilidade de permanecer na camada limite (próxima à parede) e a partir daí, ser coletada na corrente de *underflow* com maior facilidade no hidrociclone filtrante, tendo assim maiores eficiências de coleta e menores diâmetros de corte.

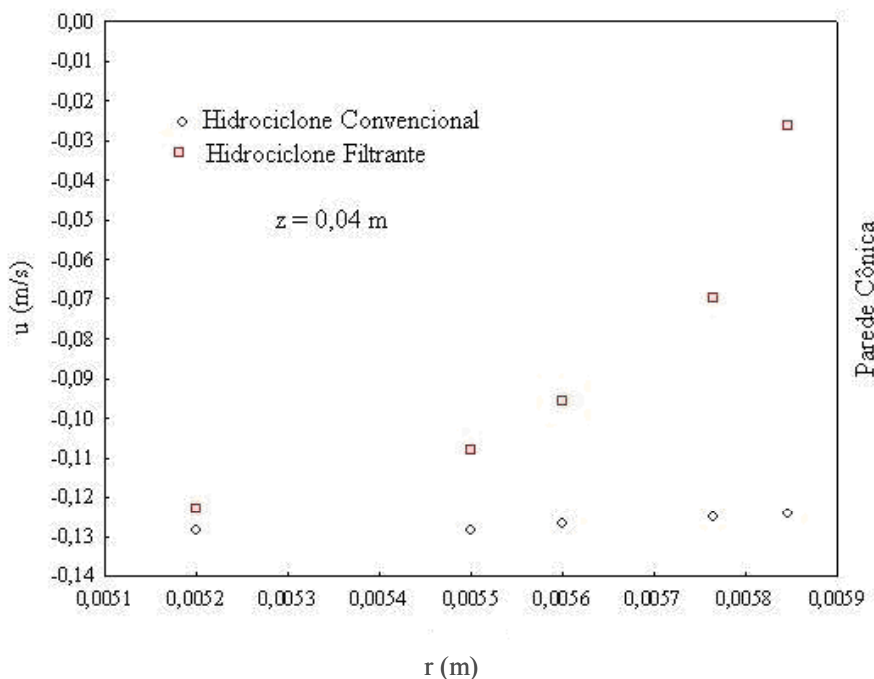


Figura 4.4: Velocidade radial (u) simulada em função da posição radial para os hidrociclones convencional e filtrante (com $D_u = 4$ mm e $\ell = 12$ mm).

Confirmado o melhor desempenho da configuração filtrante (HF_{11}) em relação à convencional (HC_{11}), independente da combinação entre D_u e ℓ e nas seções subsequentes serão discutidos os efeitos destas variáveis no desempenho do hidrociclone filtrante (HF_{11}), visando encontrar os níveis ideais para as respostas número de Euler e diâmetro de corte, conjunta ou separadamente.

4.2 – Efeito do Comprimento do Tubo de Vortex Finder (ℓ) na Separação com o Hidrociclone Filtrante (HF_{11})

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente e por simulação (CFD), tendo em vista a análise do efeito do comprimento do tubo de *vortex finder* (ℓ) sobre o desempenho do hidrociclone filtrante (HF_{11}).

A Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o número de Euler, sendo o hidrociclone filtrante (HF₁₁) montado com $D_u = 5$ mm e nos três níveis do comprimento do tubo de *vortex finder* (12 mm, 21 mm e 30 mm).

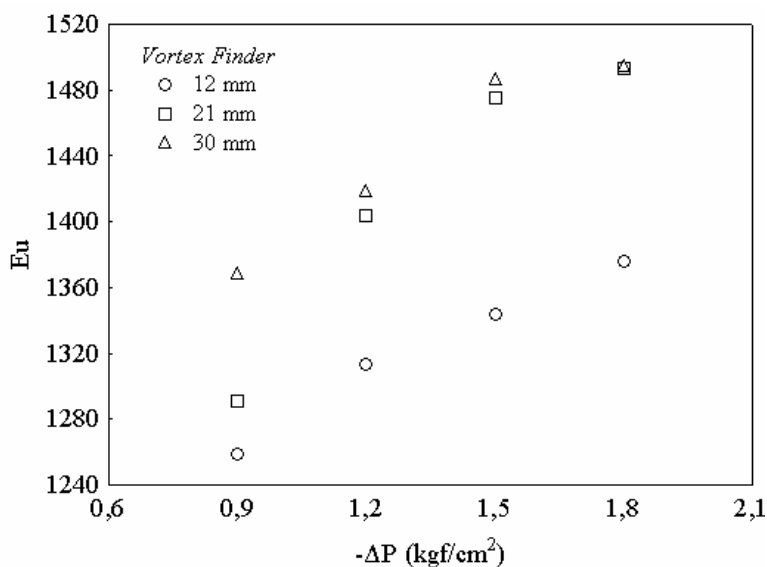


Figura 4.5 : Números de Euler (Eu) do hidrociclone filtrante HF₁₁ em função do comprimento do *vortex finder* ($D_u = 5$ mm).

Os resultados experimentais da Figura 4.5 mostram que, à medida que o comprimento do *vortex finder* aumenta, há um incremento no número de Euler do hidrociclone filtrante. Significa dizer que maiores comprimentos de *vortex finder* ofereceram uma maior resistência ao escoamento do fluido no interior do equipamento. Esta tendência do efeito do comprimento do *vortex finder* também foi observada nos hidrociclones HF₁₁ montados com os outros níveis de D_u .

A Figura 4.6 mostra os resultados das simulações em CFD do perfil de pressão total para os hidrociclones filtrantes (HF₁₁) montados com $D_u = 5$ mm e nos três níveis do comprimento do tubo de *vortex finder* ($\ell = 12$ mm, 21 mm e 30 mm), operando com uma mesma vazão de alimentação ($304 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Observa-se que o hidrociclone filtrante com o maior valor de ℓ (30 mm) apresenta os maiores níveis de pressão interna, e conseqüentemente também os maiores valores de número Euler simulados. Este resultado simulado confirma a análise feita anteriormente para os resultados experimentais, ou seja, à medida que o comprimento do *vortex finder* aumenta, há um incremento no número de Euler do hidrociclone filtrante.

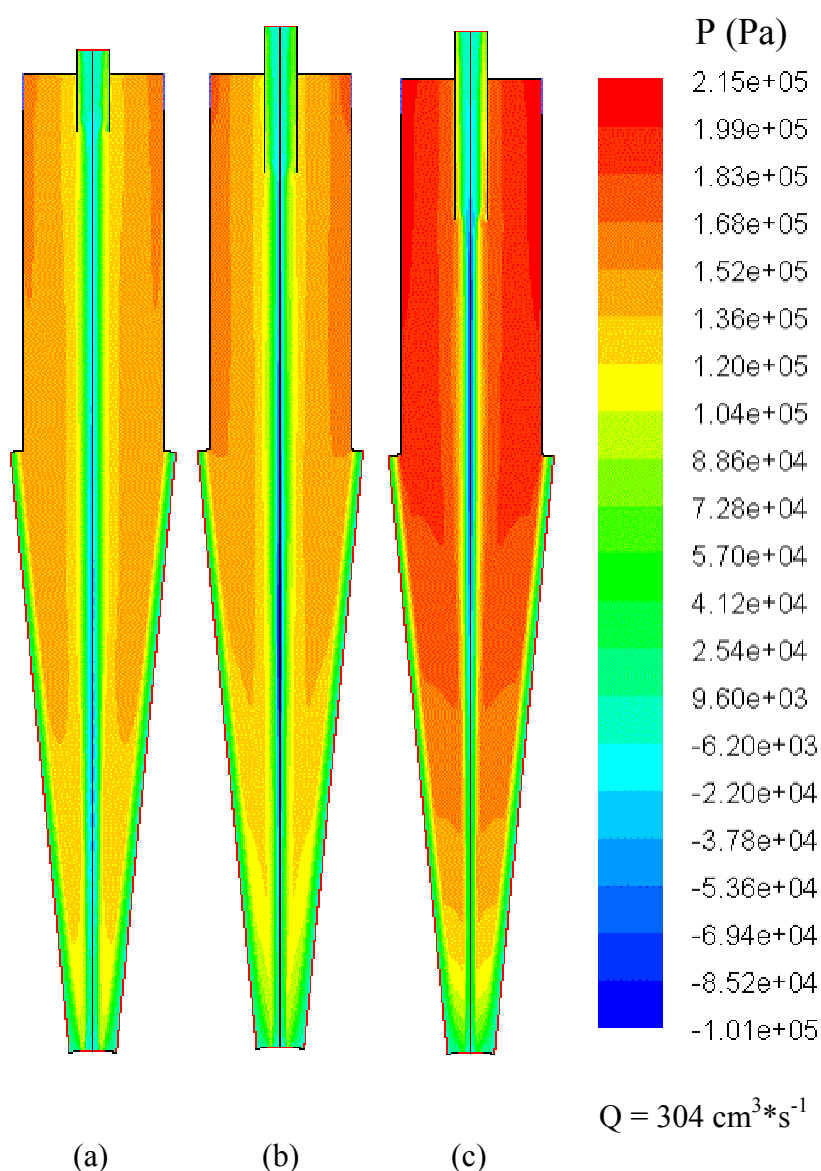


Figura 4.6: Perfil de Pressão Total (P) dos hidrociclones filtrantes (HF₁₁) com $D_u = 5 \text{ mm}$, montados com comprimento do tubo de *vortex finder* de 12 mm (a); 21 mm (b) e 30 mm (c).

Uma outra resposta que deve ser analisada, tendo em vista a verificação do efeito do comprimento do tubo de *vortex finder* no potencial de separação do equipamento é o diâmetro de corte. A Figura 4.7 apresenta os resultados experimentais para o diâmetro de corte (d_{50}) com o hidrociclone filtrante HF₁₁ montado com D_u de 3 mm e nos três níveis do comprimento do tubo de *vortex finder* (12 mm, 21 mm e 30 mm). Cabe ressaltar novamente, que a tendência observada nessas configurações foi também constatada nas demais configurações, ou seja, para os outros valores de D_u (4 e 5 mm).

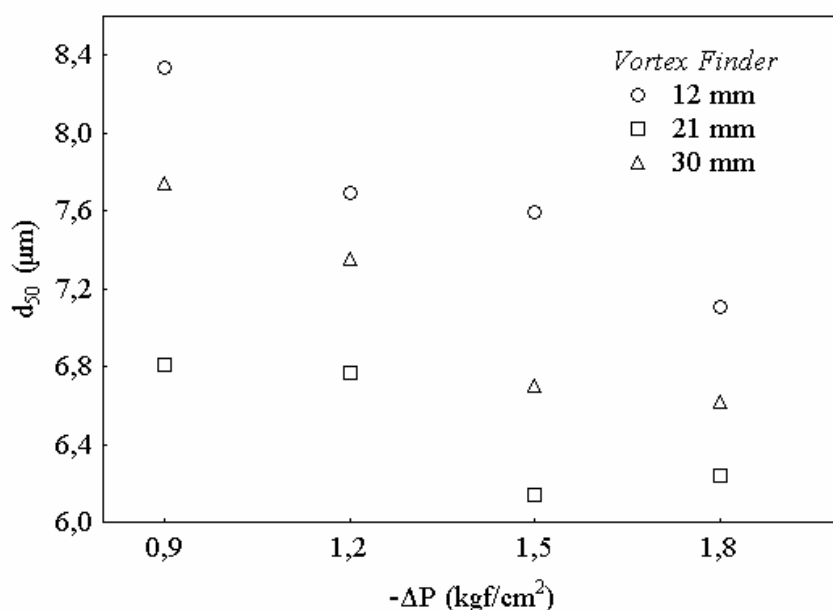


Figura 4.7: Diâmetros de corte (d_{50}) do hidrociclone filtrante HF₁₁ em função comprimento do *vortex finder* ($D_u = 3$ mm).

Pela Figura 4.7 percebe-se que os diâmetros de corte do hidrociclone HF₁₁ atingem valores mínimos (consequentemente eficiências máximas) quando valores intermediários de *vortex finder* são utilizados. Ressalta-se que tanto pequenos quanto grandes comprimentos de *vortex finder* prejudicam a separação das partículas pelo equipamento. Na primeira hipótese (menor ℓ), acredita-se que há favorecimento do fenômeno de curto circuito entre a alimentação e o *overflow*, arrastando consigo um número maior de partículas, contribuindo assim para a obtenção dos maiores diâmetros de corte (menores eficiências). Na segunda hipótese (maior ℓ), acredita-se que comprimentos maiores de *vortex finder* são responsáveis também pela coleta de um número maior de partículas no *overflow*, haja vista a possibilidade de interrupção de prováveis migrações de partículas do vórtice interno para o vórtice externo (que iriam para a corrente de *underflow*), aumentando assim o diâmetro de corte. Logo, um comprimento intermediário de *vortex finder* minimizaria simultaneamente os fenômenos de curto circuito (entre a alimentação e o tubo de *overflow*) e a interrupção da migração de partículas (entre o vórtice interno e externo), proporcionando uma maior coleta de material particulado na corrente de *underflow* (menores diâmetros de corte).

O efeito do comprimento do *vortex finder* na razão de líquido pode ser visualizado na Figura 4.8. Os resultados desta figura referem-se ao hidrociclone filtrante HF₁₁ com diâmetro de *underflow* de 5 mm, entretanto, para as outras configurações (3 e 4 mm), a mesma tendência foi observada. Pode ser constatado nos resultados experimentais da Figura 4.8 que a

variação do comprimento do *vortex finder* (ℓ) não afetou a razão de líquido (R_L). Este resultado reforça a análise anterior, ou seja, como a razão de líquido não foi influenciada pela variação de ℓ o efeito do comprimento do *vortex finder* no diâmetro de corte, foi no sentido de modificar o curto circuito entre a alimentação e o *overflow* (menor ℓ) e a inibição da migração de partículas do vórtice interno para o externo (maior ℓ).

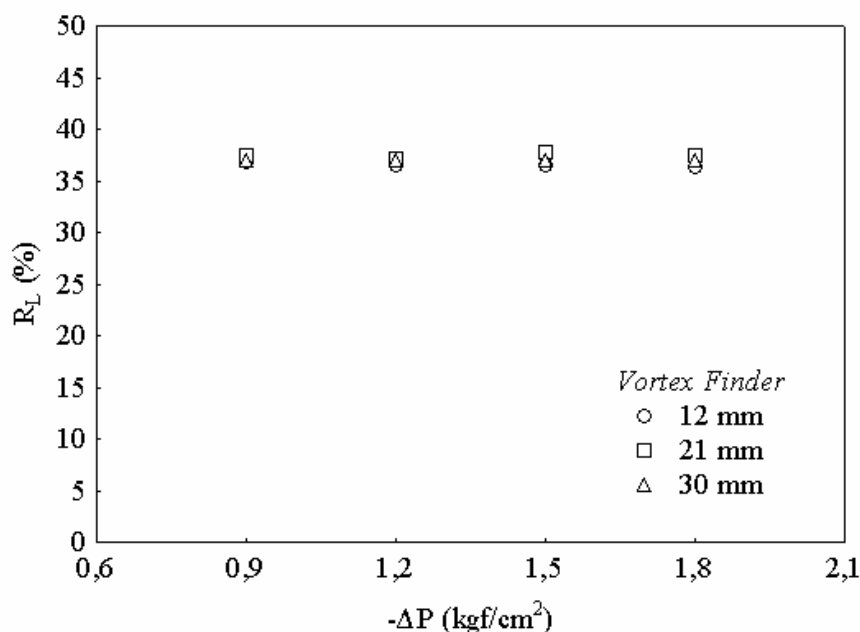


Figura 4.8: Razão de líquido (R_L) frente a variações do comprimento de *vortex finder* para um diâmetro de *underflow* de 5 mm.

O efeito insignificante do comprimento de *vortex finder* na razão de líquido (R_L) pode ser observado também por meio das simulações em CFD. A Figura 4.8 apresenta os perfis simulados de velocidade axial (w) para as três configurações do hidrociclone filtrante com D_u fixo (4 mm), e ℓ variável (12 mm, 21 mm e 30 mm), operando na mesma vazão de alimentação ($304 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Nesta figura são apresentadas apenas as velocidades axiais negativas, ou seja, aquelas correspondentes a corrente descendente nos três hidrociclones HF₁₁ (em consonância com o eixo de orientação do Sistema – Figura 3.5).

Os resultados simulados da Figura 4.9 mostram que, independente do valor do comprimento de *vortex finder*, as quantidades de fluido que migram para a corrente de *underflow* nas três configurações são praticamente idênticas. Este fato fez com que os valores de R_L simulados apresentassem valores também muito próximos para os três níveis de ℓ utilizados. Desta forma, os resultados experimentais e simulados apresentaram

comportamento semelhante, comprovando, assim, o desprezível efeito de ℓ sobre a razão de líquido.

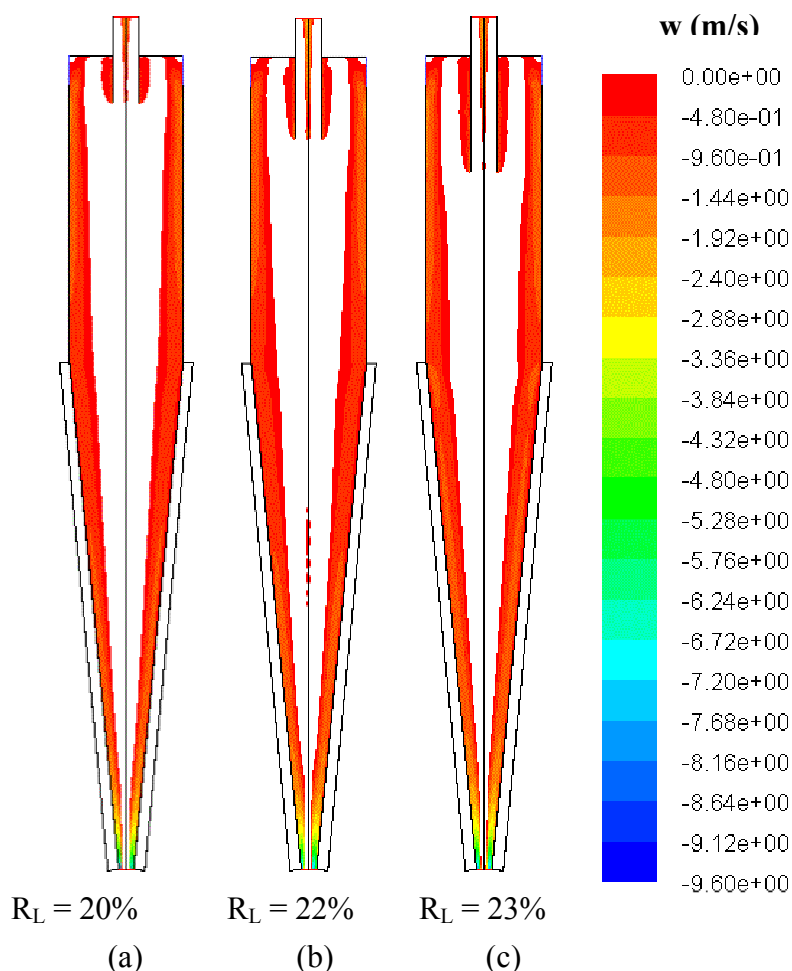


Figura 4.9 – Velocidade axial (w) simulada dos hidrociclones filtrantes (HF₁₁) com $D_u = 4$ mm, e comprimentos do tubo de *vortex finder* de 12 mm (a); 21 mm (b) e 30 mm (c), operando na mesma vazão de alimentação ($304 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

4.3 – Efeito do diâmetro de *underflow* (D_u) na Separação com o Hidrociclone Filtrante (HF₁₁).

No hidrociclone HF₁₁, a segunda variável foi o diâmetro de *underflow*. Conforme mencionado no Capítulo III, foram utilizados três níveis para este fator, ou seja, 3 mm, 4 mm e 5 mm.

A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o número de Euler, sendo o hidrociclone filtrante (HF₁₁) montado com ℓ fixo de 30 mm e três dimensões de diâmetro de *underflow*. A tendência observada do efeito do diâmetro de *underflow* também

foi constatada para os demais hidrociclones HF₁₁ montados a partir de outros valores de comprimento de *vortex finder*.

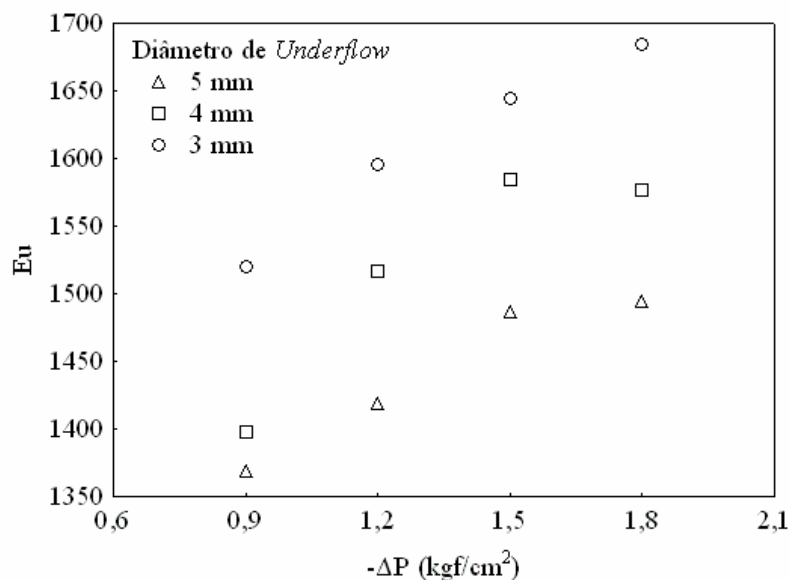


Figura 4.10: Números de Euler (Eu) do hidrociclone HF₁₁ em função do tamanho do diâmetro de *underflow* para um *vortex finder* fixo de 30 mm.

Observa-se pela Figura 4.10 que o número de Euler foi maior quando menores diâmetros de *underflow* foram utilizados, ou seja, pequenos valores de diâmetro de *underflow* impuseram maiores resistências ao escoamento da suspensão no interior do equipamento. Logo, sendo o número de Euler uma variável associada ao consumo de energia, implica que maiores diâmetros de *underflow* são mais interessantes, pois resultam em menores demandas energéticas (numa mesma vazão volumétrica proporcionam menores queda de pressão).

Da mesma forma que os resultados experimentais, as simulações fluidodinâmicas também confirmaram tais constatações. Para tanto, a Figura 4.11 apresenta as simulações do perfil de pressão total para o hidrociclone filtrante HF₁₁ com $\ell = 21$ mm, em três configurações, cada uma associada a um diferente diâmetro de *underflow*, $D_u = 5$ mm (Fig. 4.11 –a); $D_u = 4$ mm (Fig. 4.11 –b) e $D_u = 3$ mm (Fig. 4.11 –c). A vazão de alimentação nos três casos foi a mesma ($Q = 290 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Os resultados desta figura mostram que para o menor valor de D_u (3 mm) os níveis de pressão no interior do hidrociclone filtrante foram mais elevados, ou seja foi obtido um maior número de Euler simulado. Os menores níveis de pressão e Número de Euler simulados foram obtidos para o maior D_u (5 mm).

Desta forma, os resultados experimentais e simulados mostraram que as menores demandas energéticas são obtidas para os maiores valores de D_u .

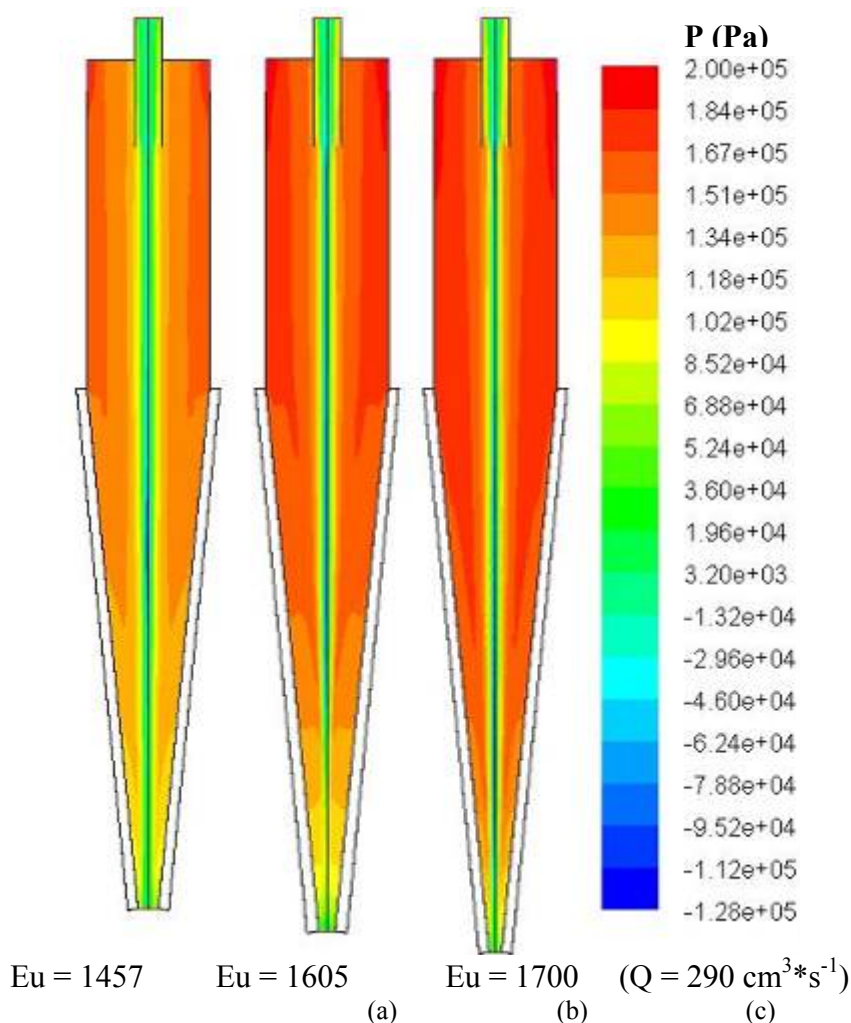


Figura 4.11: Resultados das simulações em CFD para o perfil de Pressão Total dos hidrociclones filtrantes com $\ell = 21 \text{ mm}$ e $e = 5 \text{ mm}$ (a); $D_u = 4 \text{ mm}$ (b) e $D_u = 3 \text{ mm}$ (c)

A seguir é apresentado o efeito dos diâmetros de *underflow* na quantidade de líquido que foi descarregada pela corrente de concentrado, ou seja, na razão de líquido. A Figura 4.12 apresenta os valores experimentais das razões de líquido (R_L) para o hidrociclone HF₁₁ operando com um *vortex finder* de 21 mm de comprimento. O mesmo comportamento observado nesta figura pode ser estendido para os comprimentos de *vortex finder* de 12 e 30 mm.

Diferente da outra variável estudada (comprimento de *vortex finder*) o diâmetro do *underflow* apresentou um efeito significativo na razão de líquido. Menores diâmetros de *underflow* fez com que o equipamento apresentasse menores quantidades de líquido descarregadas na corrente *underflow*. Tal fato certamente teve implicação direta na capacidade de classificação do material particulado, como será apresentado mais adiante.

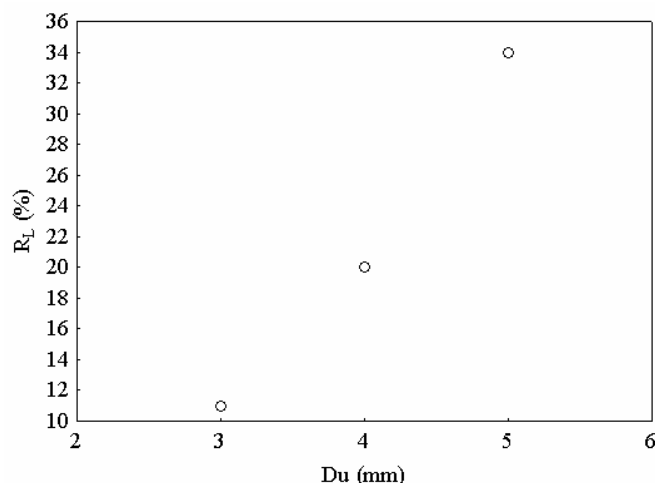


Figura 4.12: Razão de Líquido (R_L) em função das dimensões do diâmetro de *underflow* para um *vortex finder* de 21 mm.

Os resultados das simulações em CFD vieram a confirmar a tendência observada pelos resultados experimentais, conforme pode ser visto na Figura 4.13. Esta figura mostra as simulações para velocidade axial positiva (correntes ascendentes) do hidrociclone filtrante HF₁₁ com ℓ de 30 mm, para e diâmetros de *underflow* variáveis, todos na vazão volumétrica de $290 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

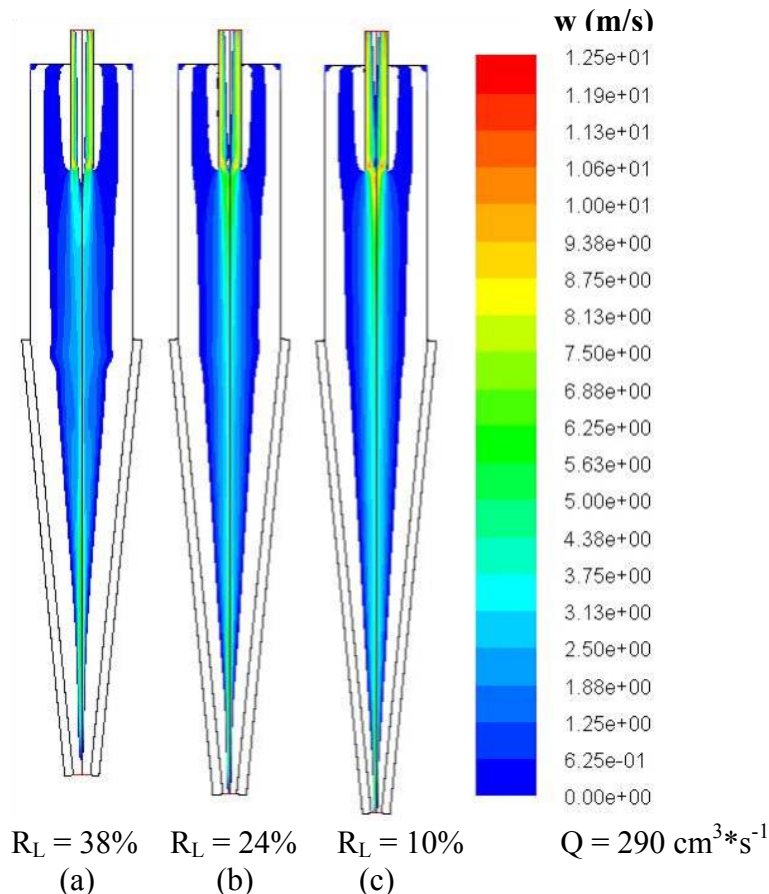


Figura 4.13: Resultados das simulações em CFD para velocidade axial ascendente (w) dos hidrociclones filtrantes com $\ell = 30 \text{ mm}$ e $D_u = 5 \text{ mm}$ (a); $D_u = 4 \text{ mm}$ (b) e $D_u = 3 \text{ mm}$ (c).

Os resultados simulados da Figura 4.13 mostram que para o maior valor de D_u (5 mm) a quantidade de fluido ascendente é menor e, conseqüentemente a razão de líquido é maior, ou seja, o mesmo comportamento encontrado para os dados experimentais.

Este comportamento de D_u afetando a razão de líquido tem também uma influência direta no poder de classificação das partículas no hidrociclone filtrante, pois quanto maior o valor da razão de líquido, maior também será o arraste de partículas para a corrente de *underflow* e, conseqüentemente, menores serão os diâmetros de corte. Os resultados experimentais apresentados na Figura 4.14 confirmam esta expectativa, ou seja, os menores diâmetros de corte foram obtidos para a configuração com o maior diâmetro de *underflow* ($D_u = 5$ mm).

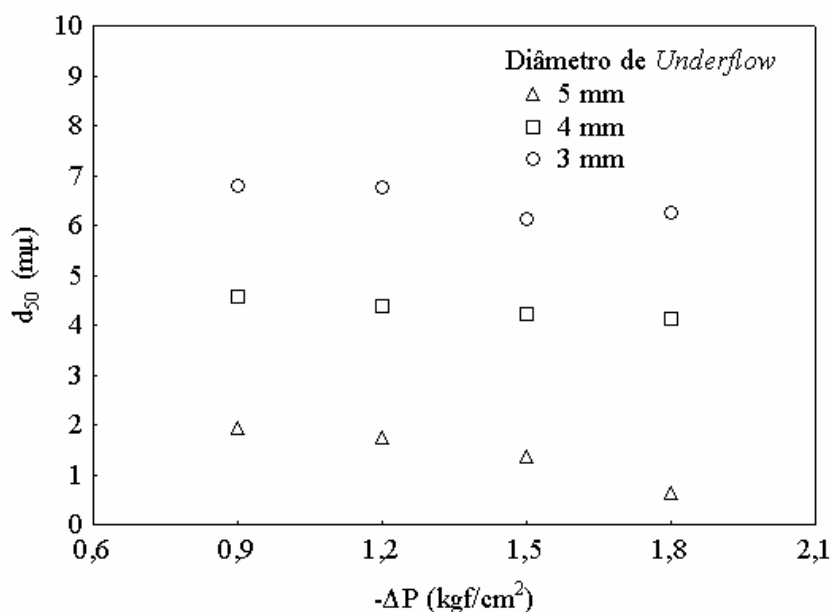


Figura 4.14: Diâmetros de Corte (d_{50}) em função das dimensões do diâmetro de *underflow* para um *vortex finder* de 21 mm.

Enfim, o diâmetro de *underflow* (D_u) e o *vortex finder* (ℓ) são variáveis importantes no desempenho dos hidrociclone filtrante HF₁₁, os níveis ideais para estas variáveis vão depender das funções específicas do equipamento (classificador ou concentrador), conforme o interesse de cada usuário. Na seqüência, os resultados experimentais obtidos serão tratados pela técnica da superfície de resposta (MYERS, 1976), visando encontrar os níveis recomendados para cada possível aplicação.

4.4 – Análise Estatística para o Hidrociclone Filtrante HF₁₁

4.4.1- Influência das Variáveis no Número de Euler (Eu)

Através dos resultados experimentais coletados, realizou-se uma regressão múltipla a fim de se obter uma superfície de resposta para o número de Euler em função das variáveis diâmetro de *underflow* (D_u) e comprimento do *vortex finder* (ℓ) para o hidrociclone HF₁₁. A equação empírica ajustada é apresentada a seguir ($R^2 = 0,8095$).

$$Eu = 1653 - 50 X_1 + 85 X_2 - 104 X_1^2 - 96 X_2^2 \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1 e nas demais apresentadas para as outras respostas as variáveis estudadas (diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*) foram colocadas na forma codificada (adimensional), conforme as Equações 4.2 e 4.3:

$$X_1 = (D_u - 4 \text{ mm}) / 1 \text{ mm} \quad (4.2)$$

$$X_2 = (\ell - 21 \text{ mm}) / 9 \text{ mm} \quad (4.3)$$

A Figura 4.15 mostra a superfície de resposta para o número de Euler, referente à Equação 4.1, função do diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder* sob a forma codificada.

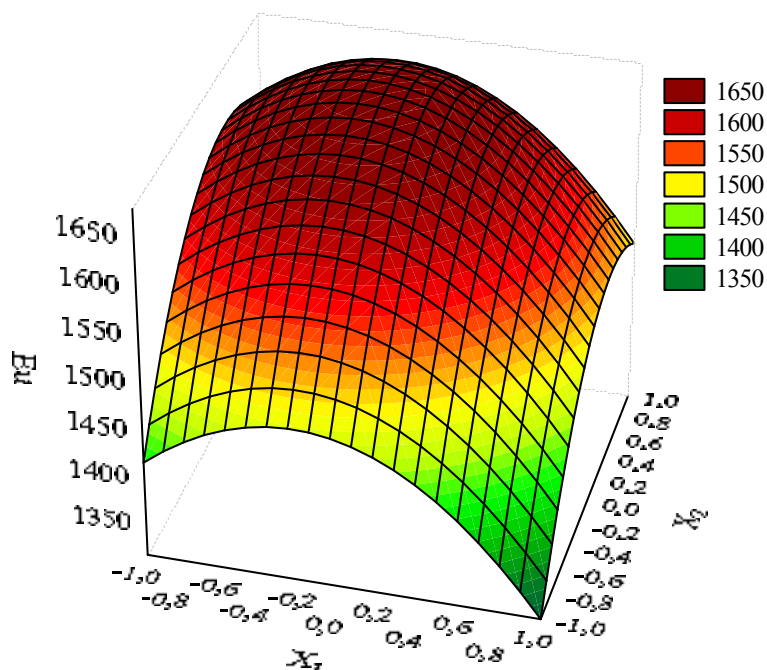


Figura 4.15 – Superfícies de Resposta para o Número de Euler (Eu) em função de D_u (X_1) e ℓ (X_2) para o hidrociclone HF₁₁.

Os resultados da Figura 4.15 confirmam as análises feitas anteriormente, ou seja, os menores números de Euler são obtidos para os maiores valores de D_u . Menores orifícios de *underflow* oferecem maior resistência ao escoamento exigindo menores capacidades volumétricas de alimentação numa mesma queda de pressão, o que resulta em maiores valores de Eu . As melhores condições tendo em vista a maior eficiência energética (menor Euler) são obtidos para o maior valor de D_u e o menor do comprimento do *vortex finder* (ℓ).

4.4.2- Influência das Variáveis na Razão de Líquido (R_L)

Analogamente, por meio dos resultados experimentais coletados, realizou-se uma regressão múltipla a fim de se obter uma superfície de resposta para Razão de Líquido, em função das duas variáveis independentes estudadas. A equação empírica ajustada é apresentada na Equação 4.4 a seguir ($R^2 = 0,9980$), sendo que as variáveis foram colocadas na forma adimensionalizada (Equações 4.2 e 4.3).

$$R_L = 22,68 + 13,54X_1 + 1,39X_2 - 1,08X_1X_2 + 2,03X_1^2 - 1,59X_2^2 \quad (4.4)$$

A Figura 4.16 apresenta a superfície de resposta para a razão de líquido em função das variáveis estudadas (diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*) na forma codificada.

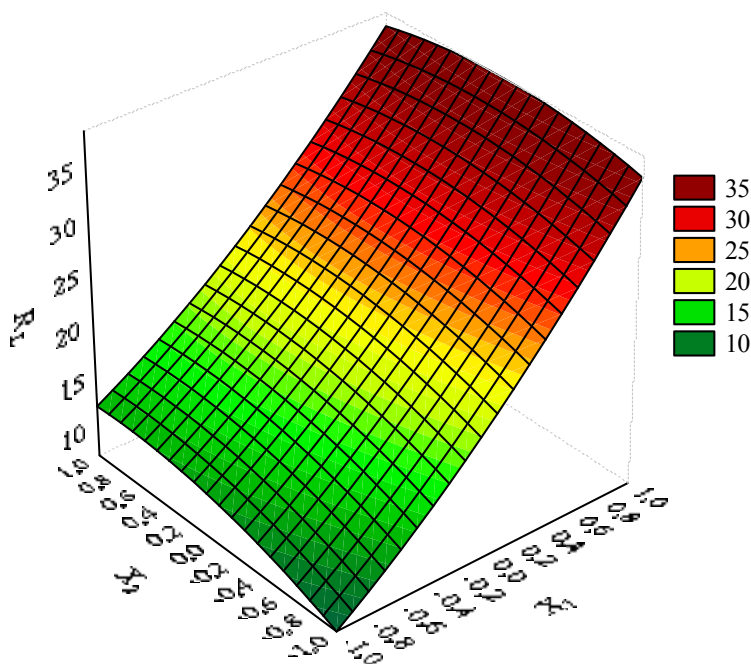


Figura 4.16 - Superfícies de Resposta para a Razão de Líquido (R_L), de acordo com o par D_u (X_1) e ℓ (X_2), para o hidrociclone HF₁₁.

Os resultados da Figura 4.16 também confirmam as análises feitas nas seções anteriores, ou seja, a razão de líquido é muito mais sensível à variação do diâmetro de *underflow* (D_u) do que a do comprimento do *vortex finder* (ℓ). Quanto maior o valor de D_u , maior será a quantidade de líquido que sai pela corrente de concentrado, e consequentemente maior é o valor de R_L .

A utilização de dimensões adequadas do par D_u e ℓ na busca de uma razão de líquido adequada vai depender das características de aplicação do equipamento no processo de separação sólido-líquido. Logo, baseado nos pressupostos, se o interesse é a obtenção de um equipamento com melhor poder classificatório, deve-se optar por um hidrociclone que resulte nas maiores razões de líquido possíveis, ou seja, maiores valores de D_u são recomendados. Entretanto se a finalidade é a obtenção de um equipamento que concentre a suspensão alimentada, deve-se escolher um hidrociclone com menores níveis do diâmetro de *underflow* (pequenos valores de razão de líquido).

4.4.3- Influência das Variáveis no diâmetro de corte (d_{50})

Seguindo o mesmo procedimento das respostas anteriores, ajustou-se uma equação empírica para diâmetro de corte, em função das duas variáveis em análise. A equação empírica ajustada é apresentada na Equação 4.5 a seguir ($R^2 = 0,9907$), sendo que as variáveis foram colocadas na forma adimensionalizada (Equações 4.2 e 4.3).

$$d_{50} = 3,58 - 2,61X_1 - 0,268X_2 + 0,162X_1X_2 + 0,50X_1^2 + 0,175X_2^2 \quad (4.5)$$

A Figura 4.17 apresenta a superfície de resposta para diâmetro de corte (Equação 4.5) em função das variáveis estudadas (diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*) na forma codificada. Pela análise da Figura 4.17 nota-se uma influência bem mais significativa do diâmetro de *underflow* sobre o diâmetro de corte (d_{50}), em comparação à influência do comprimento do *vortex finder*. Portanto, se o intuito é obter valores mínimos de diâmetro de corte (maiores eficiências) deve-se utilizar no equipamento os maiores diâmetros de *underflow* possíveis.

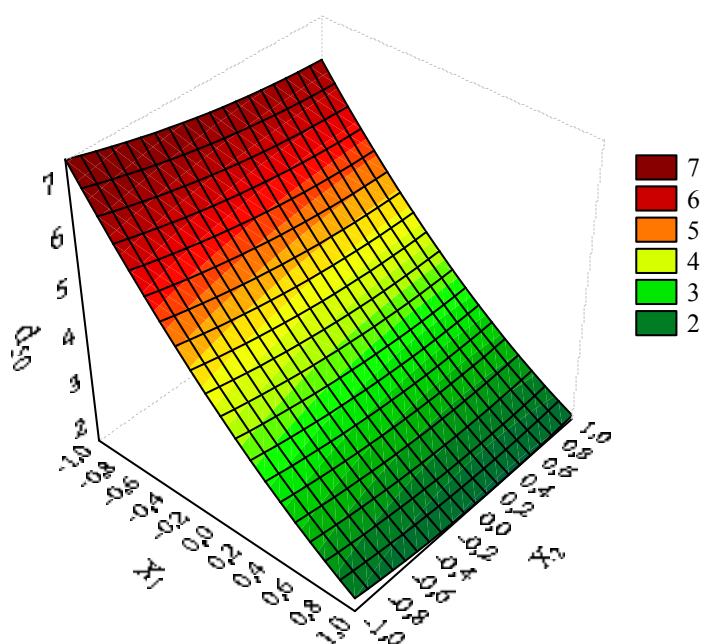


Figura 4.17 - Superfícies de Resposta para diâmetro de corte (d_{50}), de acordo com o par D_u (X_1) e l (X_2), para o hidrociclone HF₁₁.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados experimentais e advindos de simulações fluidodinâmicas mostraram que o número de Euler da configuração filtrante sempre se manteve em níveis inferiores àqueles observados para a configuração convencional, denotando que nas mesmas condições operacionais o separador filtrante requer uma menor demanda de energia.

Os resultados obtidos neste trabalho também mostraram que a filtração sempre foi um fenômeno benéfico para a separação, pois nas mesmas condições operacionais do hidrociclone convencional (HC₁₁), o hidrociclone filtrante (HF₁₁) apresentou menores diâmetros de corte que refletem em maiores eficiências de coleta.

Em relação à influência das variáveis estudadas foi observado que à medida que o comprimento do *vortex finder* aumentava, havia um incremento no número de Euler do hidrociclone filtrante. Por sua vez, os diâmetros de corte do hidrociclone HF₁₁ atingiram valores mínimos, ou seja, eficiências máximas, quando níveis intermediários de *vortex finder* foram utilizados. Entretanto, os resultados mostraram que, independentemente do valor do comprimento de *vortex finder*, as quantidades de fluido que descarregados na corrente de *underflow* eram quase que idênticas, ou seja, a razão de líquido não era influenciada por esta variável (ℓ). Todos estes resultados foram observados tanto nos resultados experimentais como nas simulações em CFD.

O estudo da influência da variável diâmetro do *underflow* (D_u) mostrou que o número de Euler foi maior quando menores D_u foram empregados, implicando que maiores diâmetros de *underflow* são mais interessantes, pois resultam em menores custos energéticos. Diferentemente da outra variável estudada (comprimento de *vortex finder*) o diâmetro do *underflow* apresentou um efeito significativo na razão de líquido (R_L). Maiores diâmetros de *underflow* conduziram a maiores níveis de razão de líquido. O comportamento do diâmetro de *underflow* sobre o líquido teve também uma influência direta no poder de classificação das partículas no hidrociclone filtrante, pois quanto maior for a quantidade de líquido descarregada no produto de fundo é a quantidade de partículas arrastada para a corrente de *underflow* e, conseqüentemente, menores serão os diâmetros de corte.

A análise estatística utilizada confirmou as conclusões supra-citadas. Sendo assim, este estudo mostrou que o diâmetro de *underflow* (D_u) e o *vortex finder* (ℓ) são variáveis muito importantes no desempenho dos hidrociclone filtrante HF₁₁. Os níveis ideais para estas variáveis vão depender das funções específicas de aplicação de cada equipamento (classificador ou concentrador), segundo a discricionariedade de cada usuário. Desta forma, se o equipamento for usado como classificador (o que é muito comum), dentre os níveis utilizados neste estudo, recomenda-se o diâmetro de *underflow* de 5 mm e o comprimento do *vórtex finder* de 21 mm. Por outro lado, se o objeto for apenas concentrar a corrente de underflow em sólidos, recomenda-se o diâmetro de *underflow* e comprimento de *vortex finder* de 30 e 12 mm, respectivamente.

Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados e da experiência adquiridas neste trabalho, é sugerida a utilização de um cilindro filtrante, podendo assim ter tanto o cone e o cilindro filtrantes, ou apenas um dos dois. Este trabalho já está em fase inicial no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da UFU (LSP/FEQUI/UFU).

Uma outra sugestão seria a utilização de vácuo na parte externa da parede filtrante para incrementar a força motriz de separação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVEROUS, J. and FUENTES, R., “Advances in the Numerical Simulation of Hydrocyclone Classification”, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 36, n. 5, p. 309-314, 1997.
- BARBOSA, E.A., KOBOLDT, C.A., VIEIRA, L.G.M., DAMASCENO, J.J.R. and BARROZO, M.A.S., “Avaliação do Comportamento de Hidrociclones Filtrantes de Krebs”, XXX Encontro Nacional sobre Escoamentos em Meios Porosos, São Carlos, 2002.
- BARBOSA, E.A., “Performance de Hidrociclones Filtrantes com geometria Demco”, Qualificação para Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, 2003.
- BARTH, T.J and JESPERSEN, D. “The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes”, Technical Report AIAA-89-0366, AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
- BATCHELOR, G.K., “An Introduction to Fluid Dynamics”, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1967.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E. and LIGHTFOOT, E.N., “Transport Phenomena”, New York, John Wiley & Sons, 1961.
- BOYSAN, F.; AYERS, W.H. and SWITHENBANK, J., “A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design”, Trans. IChemE, Vol. 60, p.222-230, 1982.
- CHOUDHURY, D., “Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling”, Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107, 1993.
- DABIR, B., “Mean Velocity Measurements in a 3”- Hydrocyclone using Laser Doppler Anemometry”, Doctor Thesis, Chemical Engineering Department, Michigan State University, East Lansing, MI, 1983.
- DELGADILLO, J. A. and RAJAMANI, R. K. “Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics”, Int. J. Miner. Process, Vol. 84, p. 252-261, 2007.
- DYAKOWSKI, T and WILLIAMS, R.A., “Modelling Turbulent Flow within a Small-Diameter Hydrocyclone”, Chem. Eng. Sc., Vol. 48, n. 6, p. 1143-1152, 1993.
- DYAKOWSKI, T and WILLIAMS, R.A., “Prediction of Air-Core Size and Shape in a Hydrocyclone”, Int. J. Miner. Process, Vol. 43, p. 1-14, 1995.
- FERZIEGER, J.L. and PERIC, M., “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
- HAIDER, A. and LEVENSPIEL, “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles”, Powder Technology, Vol. 58, p. 63-70, 1989.
- HINZE, J.O., “Turbulence”, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.

LANNA, A.E., BARROZO, M.A.S. e DAMASCENO, J.J.R., “Estudo de Desempenho de um Hidrociclone Filtrante”, Revista Ciência & Engenharia, Uberlândia, p.175-186, 1992.

LANNA, A. E. ; DAMASCENO, J J R ; BARROZO, M. A. S. . Estudo de Um Hidrociclone com Paredes Filtrantes. In: XVII Encontro Sobre Escoamentos em Meios Porosos, 1989, São Carlos. Anais do XVIII ENEMP, 1989. v. II. p. 149-157.

LAUNDER, B.E. and SPALDING, D.B., “Lectures in Mathematical Models of Turbulence”, Academic Press, London, England, 1972.

LAUNDER, B.E., REECE, G.J. and RODI, W., “Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure”, J. Fluid Mech., Vol. 68, n.3, p. 537-566, 1975.

LEONARD, B.P. and MOKHTARI, S. “ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow”, NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center, 1990.

MALHOTRA, A., BRANION, R.M.R. and HAUPTMANN, E.G., “Modelling the Flow in a Hydrocyclone”, Canadian J. Chem. Eng., Vol. 72, p. 953-960, 1994.

MALISKA, C.R., “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas”, ed. LTC, Rio de Janeiro, 1995.

MARTINEZ, L.F., LAVÍN, A.G., MAHAMUD, M.M., BUENO, J. L., “Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation.” Chemical Engineering and Processing, Vol.47, p. 192-199, 2008.

MASSARANI, G., “Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones II”, XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos, p.125-136, 1989.

MENTER, F.R., “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, AIAA Journal, Vol. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.

MINKOWYCZ, W.J, SPARROW, E.M., SCHNEIDER, G.E and PLECTHER, R.H., “Handbook of Numerical Heat Transfer”, Ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.

MORSI, S.A. and ALEXANDER, A.J., “An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems”, J. Fluid Mech., Vol. 55, n. 2, p. 193-208, 1972.

PATANKAR, S.V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Ed. Hemisphere Pub. Co., NY, 1980.

PATANKAR, S.V. and SPALDING, D.B., “A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, p. 1789, 1972.

PERICLEOUS, K.A., “Mathematical Simulation of Hydrocyclone”, Appl. Math. Modelling, Vol. 11, p. 242-255, 1987.

SCHAPPEL, S.C., CHASE, G.G. “Modeling of Hydrocyclone Flows with Permeable Walls”. Advances in Filtration and Separation Technology, Vol. 11, p. 33-36, 1998.

SILVEIRA-NETO, A., “Turbulência nos Fluidos Aplicada”, Apostila, UFU, Uberlândia-MG, 2001.

SOUZA, F.J., “Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante”, Dissertação de Mestrado, 85p., UFU, Uberlândia, 1999.

SOUZA, F.J., NETO, A.S. and BARROZO, M.A., “Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos em Hidrociclones com Modelagem Submalha”, II Escola Brasileira de Primavera de transição e Turbulência – ETT 2000, Uberlândia-MG, p.358-368, 2000.

SOUZA, F. J. ; SILVEIRA NETO, A. . Simulation of Turbulent Flow in a Rietema Hydrocyclone. In: II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2003, Rio de Janeiro. Anais do II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - em CD-ROM, 2003.

SPALART, P. and ALLMARAS, S., “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, Technical Report AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.

SVAROVSKY, L., “Solid-Liquid Separation”, 2nd Edition, Butterworths, London. 1981.

SVAROVSKY, L. “Hydrocyclone”, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK. 198p., 1984.

VANDOORMAAL, J.P. and RAITHBY, G.D. “Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows”, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, p. 147-163, 1984.

VIEIRA, L.G.M., “Análise da Separação Sólido-Líquido em um Hidrociclone Filtrante”, Relatório de Iniciação Científica. PIBIC/CNPq-UFU. Uberlândia. 1997.

VIEIRA, L.G.M, “Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema”, Dissertação de Mestrado, 141p., UFU, Uberlândia, MG, 2001.

VIEIRA, L. G. M. (2006), Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrante. PPG-EQ/UFU, Uberlândia – MG, 297p. (tese de doutorado).

WANG, B., YU, A. B. “Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder”, Chemical Engineering Journal, Vol.135, p.33-42, 2008.

WILCOX, D.C., “Turbulence Modeling for CFD”, DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.

Apêndice A

Dados Experimentais Para Otimização do Hidrociclone H₁₁

Hidrociclone HC₁₁ Du = 3 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	258	3,83	1327	12520	9,33	9,73	60,60	59,03	1,06	-
1,2	291	3,49	1392	14116	8,53	8,87	63,40	62,08	1,06	-
1,5	317	3,33	1464	15392	8,33	8,65	64,36	63,13	1,06	-
1,8	354	3,09	1410	17178	7,71	8,02	64,79	63,67	1,06	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 3 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	274	7,11	1179	13284	8,34	8,99	65,49	62,85	1,06	0,0946
1,2	309	7,01	1236	14982	7,69	8,39	66,29	63,75	1,06	0,1285
1,5	346	6,73	1234	16763	7,59	8,26	66,39	63,96	1,06	0,1511
1,8	369	6,82	1300	17892	7,11	7,74	67,77	65,41	1,06	0,1614

Hidrociclone HC₁₁ Du = 4 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	244	18,28	1484	11841	6,75	9,02	67,94	60,77	1,04	-
1,2	268	18,47	1641	13001	5,39	7,82	69,57	62,67	1,04	-
1,5	292	18,29	1723	14186	4,92	6,98	71,59	65,23	1,04	-
1,8	320	18,00	1732	15499	3,98	5,77	72,89	66,94	1,04	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 4 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	248	20,27	1440	12018	5,30	7,64	71,89	64,74	1,04	0,0908
1,2	279	20,22	1513	13538	5,08	7,52	72,09	65,01	1,04	0,1470
1,5	309	19,85	1542	14997	3,67	5,73	73,24	66,61	1,04	0,1554
1,8	332	20,29	1609	16082	2,92	4,75	76,82	70,92	1,04	0,1773

Hidrociclone HC₁₁ Du = 5 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	251	33,47	1407	12158	3,09	8,11	68,61	52,67	0,85	-
1,2	284	33,00	1464	13765	2,94	7,24	69,61	54,64	0,85	-
1,5	313	32,07	1502	15192	2,10	6,58	70,00	55,83	0,85	-
1,8	334	32,68	1587	16193	1,86	5,54	72,32	58,59	0,85	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 5 mm ℓ = 1,2 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	265	36,75	1259	12853	2,34	5,57	78,81	66,50	1,00	0,138
1,2	300	36,51	1313	14532	2,29	4,98	78,71	66,47	1,00	0,158
1,5	331	36,57	1344	16062	1,81	4,99	80,64	69,48	1,00	0,180
1,8	358	36,40	1376	17390	1,71	4,60	82,58	72,62	1,00	0,222

Hidrociclone HC₁₁ Du = 3 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	234,96	10,8	1602	11396	9,96	11,3	61,10	56,39	0,97	-
1,2	259,58	10,8	1749	12590	9,59	11,11	61,98	57,39	0,97	-
1,5	286,39	10,5	1797	13891	8,93	10,62	59,47	54,71	0,97	-
1,8	297,12	10,9	2003	14411	10,40	12,17	59,39	54,41	0,97	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 3 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	241,15	12,4	1520	11697	6,81	8,10	67,41	62,70	0,97	0,1041
1,2	270,12	12,4	1616	13102	6,77	8,02	66,19	61,4	0,97	0,12
1,5	300,22	12,1	1635	14562	6,14	7,57	65,77	61,05	0,97	0,170
1,8	322,59	12,4	1699	15647	6,24	7,56	65,91	61,09	0,97	0,1868

Hidrociclone HC₁₁ Du = 4 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	236,3	21,1	1583	11461	4,92	7,41	69,69	61,55	1,08	-
1,2	264,61	20	1707	12747	4,91	7,58	68,29	60,23	1,08	-
1,5	288,51	20	1770	13993	4,69	6,99	69,27	61,62	1,08	-
1,8	317,14	20	1758	15383	3,80	6,04	69,57	62,12	1,08	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 4 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	243,25	22	1473	11881	4,56	7,15	69,74	60,10	1,01	0,12
1,2	270,37	22	1612	13114	4,38	7,18	69,92	61,30	1,01	0,14
1,5	299,77	22	1640	14540	4,23	6,92	71,28	63,18	1,01	0,18
1,8	322,85	22	1696	15659	4,14	6,91	73,25	65,57	1,01	0,24

Hidrociclone HC₁₁ Du = 5 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	246,91	35,12	1450	11976	2,14	7,89	70,76	54,94	0,977	-
1,2	275,61	34,68	1552	13368	1,92	6,90	72,00	57,13	0,977	-
1,5	301,26	34,80	1624	14612	1,75	6,08	74,19	60,73	0,977	-
1,8	324,74	34,79	1677	15751	1,44	5,16	75,05	61,76	0,977	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 5 mm ℓ = 2,1 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	262	37,39	1291	12695	1,94	7,31	74,20	58,79	0,96	0,1287
1,2	290	37,13	1404	14052	1,75	6,44	74,86	60,0	0,96	0,1481
1,5	316	37,86	1475	15329	1,37	5,96	76,42	62,04	0,96	0,1833
1,8	344	37,4	1493	16693	0,64	4,55	76,84	62,55	0,96	0,2490

Hidrociclone HC₁₁ Du = 3 mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	235,05	10	1600	11415	8,89	10,16	66,90	63,26	0,926	-
1,2	255,09	10,7	1812	12373	7,22	8,43	72,64	69,37	0,926	-
1,5	280	9,9	1868	13620	7,20	8,29	73,46	70,54	0,926	-
1,8	305,25	9,79	1897	14805	5,94	7,00	73,04	70,11	0,926	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 3 mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	241	12	1520	11696	7,74	9,21	70,6	66,57	0,988	0,1073
1,2	271,72	11,7	1596	13179,7	7,35	8,72	70,82	66,96	0,988	0,1397
1,5	299	11,5	1644,76	14518	6,70	8,11	70,86	67,07	0,988	0,1735
1,8	323,92	11,5	1685	15711	6,62	7,92	70,90	67,1	0,988	0,2152

Hidro ciclone HC₁₁ Du = 4 mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	242,77	20,9	1500	11775	6,14	9,17	73,67	66,69	1,10	-
1,2	269,81	21,1	1619	13086	6,22	8,89	75,67	69,15	1,10	-
1,5	295,80	20,51	1684	14347	6,20	8,86	74,75	68,23	1,10	-
1,8	318,86	21,4	1739	15466	5,94	8,30	79,59	74,02	1,10	-

Hidro ciclone HF₁₁ Du = 4mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	251,50	23	1398	12199	3,41	5,89	69,4	60,23	0,978	0,1053
1,2	278,71	23	1517	13518	3,25	5,51	73,85	65,94	0,978	0,1336
1,5	304,85	23	1585	14786	3,19	5,17	74,61	67,07	0,978	0,1557
1,8	334,81	23	1577	16239	3,04	4,98	75,47	68,19	0,978	0,1909

Hidrociclone HC₁₁ Du = 5mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	243,65	37	1489	11818	2,89	8,60	75,66	61,07	0,997	-
1,2	276,49	37	1542	13410	1,54	5,81	78,76	66,13	0,997	-
1,5	308	35	1553	14939	2,32	6,71	79,54	68,71	0,997	-
1,8	330,91	35	1614	16050	0,48	2,54	83,24	74,17	0,997	-

Hidrociclone HF₁₁ Du = 5 mm ℓ = 3,0 cm

-ΔP (kgf/cm²)	Q (cm³/s)	R_L (%)	Eu	Re	d₅₀ (μm)	d'₅₀ (μm)	η (%)	η' (%)	C_{VA} (%)	F (cm³/s)
0,9	254,13	37	1369	12326	1,87	6,82	72,72	56,67	0,964	0,1073
1,2	288,24	37	1419	13981	1,81	6,67	74,30	59,31	0,964	0,1397
1,5	314,75	37	1487	15266	1,57	5,80	75,79	61,60	0,964	0,1735
1,8	343,92	37	1495	16681	1,28	4,86	76,58	62,80	0,964	0,2152

Apêndice B

Hidrociclones Convencionais

-Simulações em CFD-

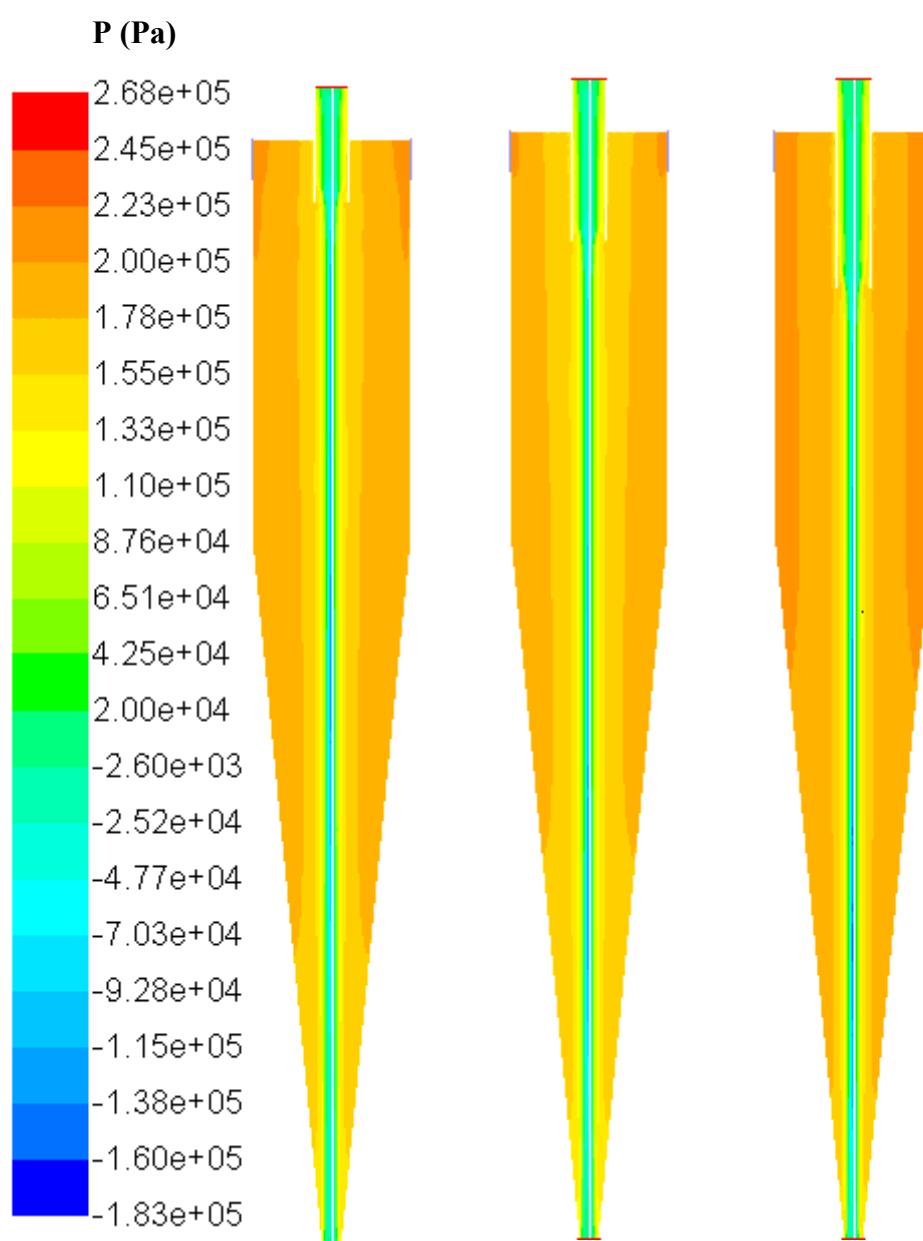


Figura A1-Perfis de Pressão Total (Pa) do Hidrociclone HC₁₁ com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 4 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

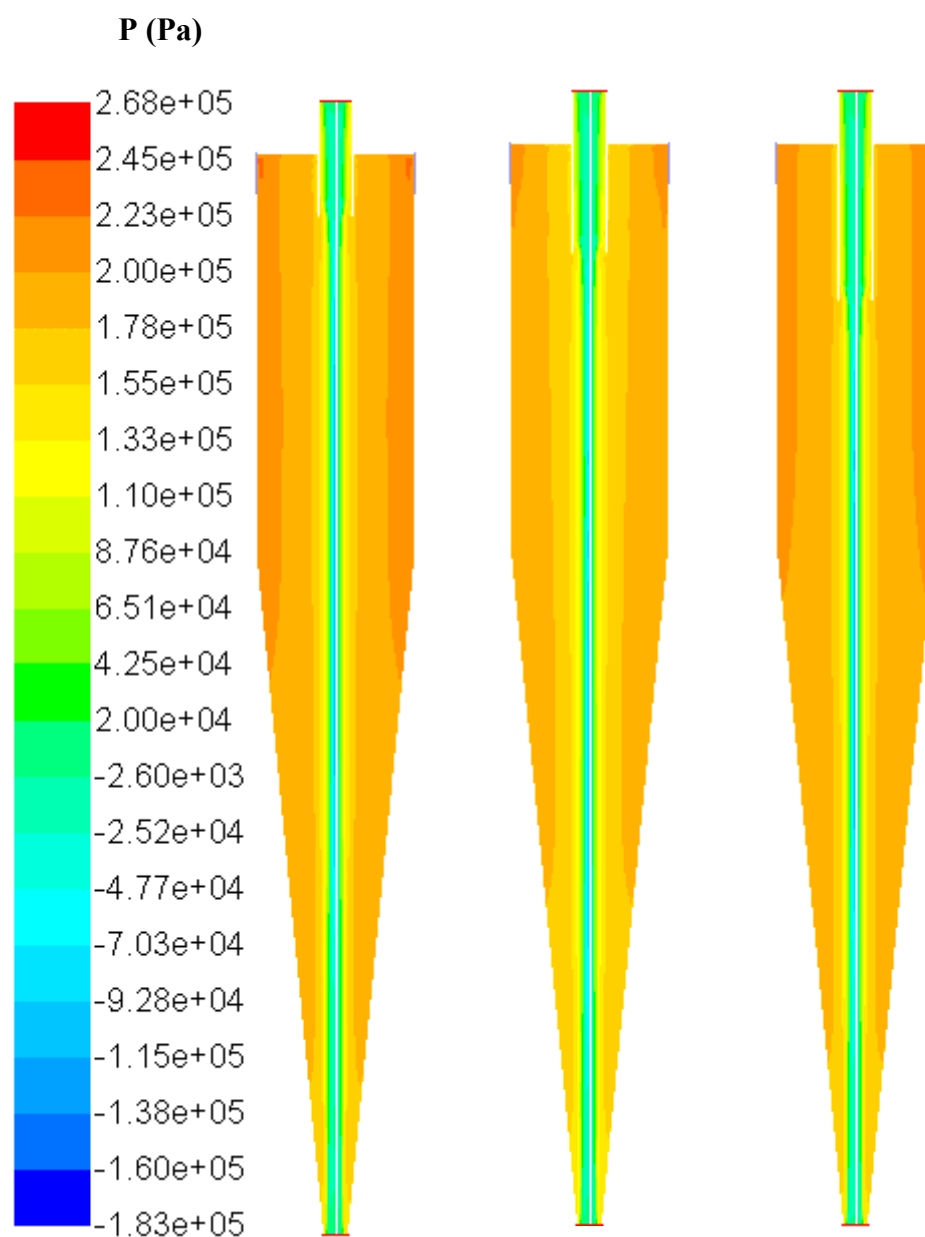


Figura A2-Perfis de Pressão Total (Pa) do Hidrociclone HC₁₁ com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 5 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

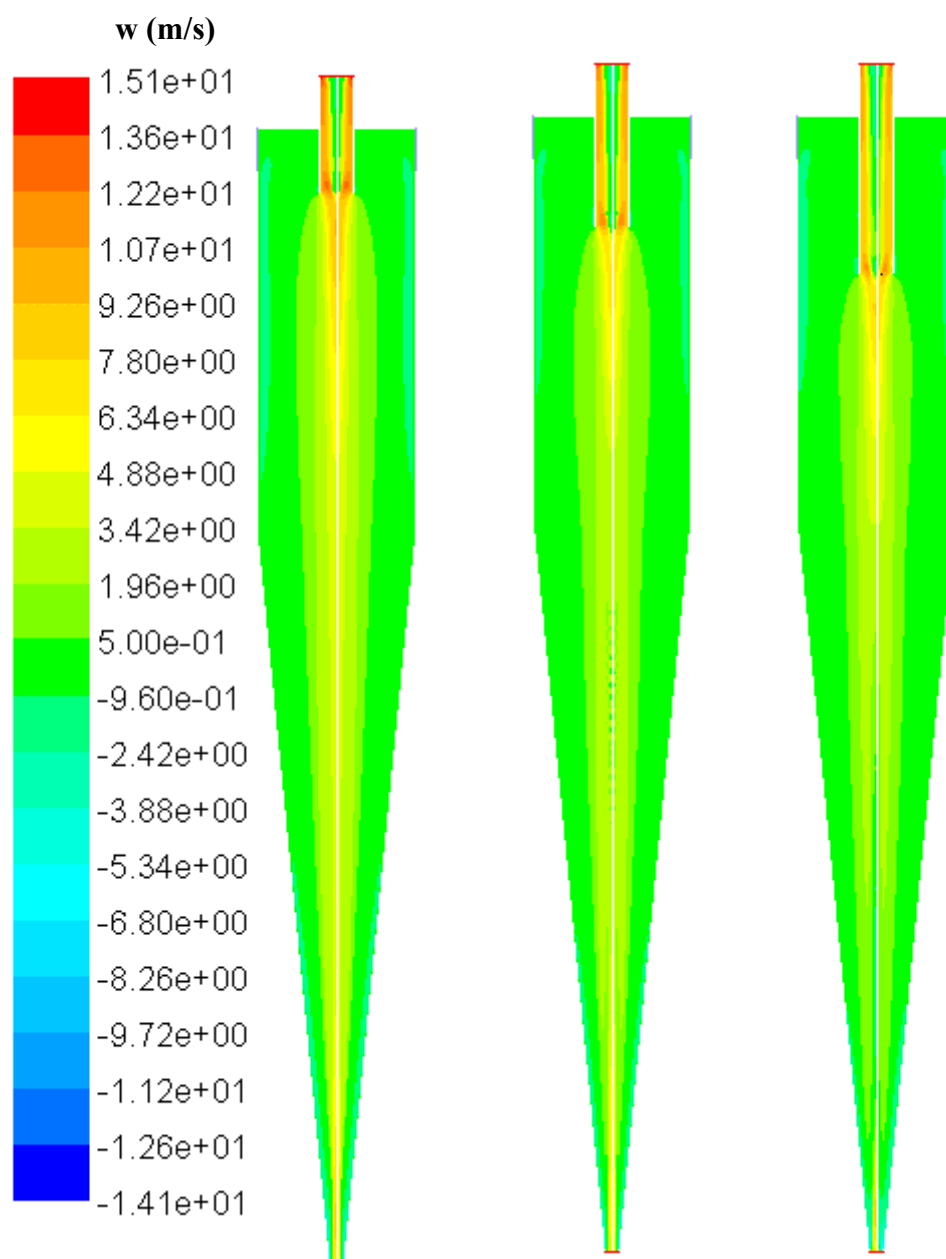


Figura A3-Velocidade Axial (w) do Hidrociclone HC₁₁ com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 3 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

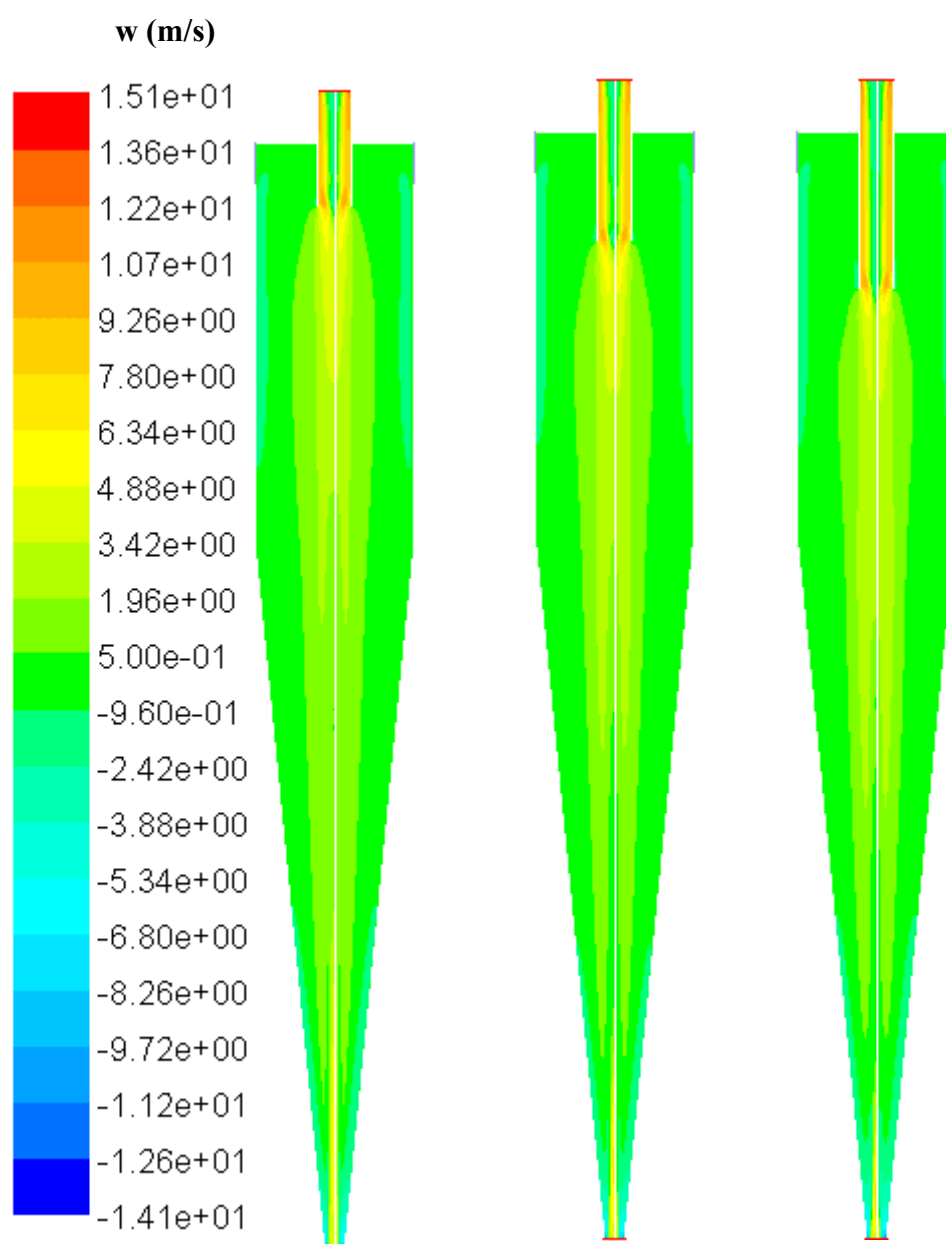


Figura A4-Velocidade Axial (w) do Hidrociclone HC₁₁ com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 4 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

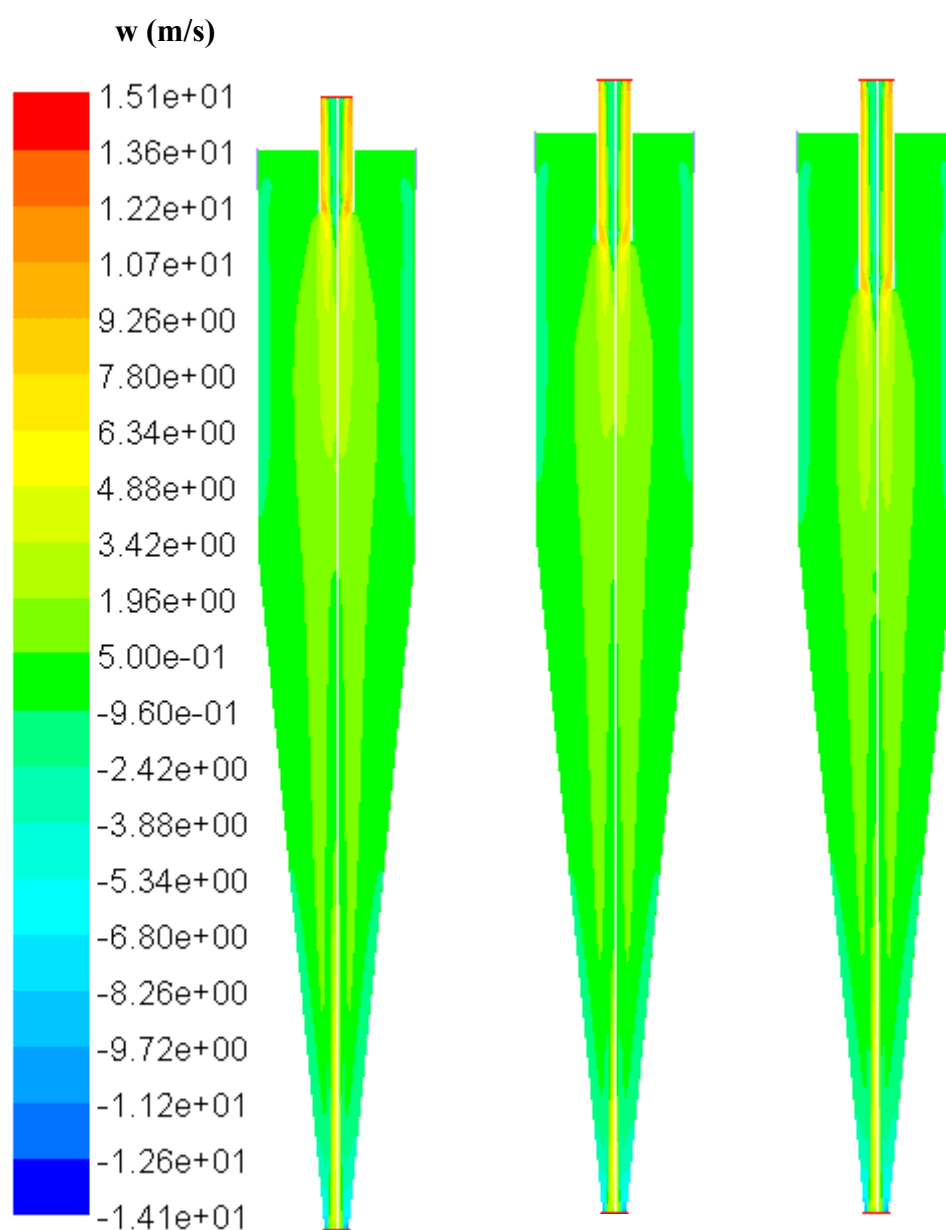


Figura A5-Velocidade Axial (w) do Hidrociclone HC₁₁ com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 5 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

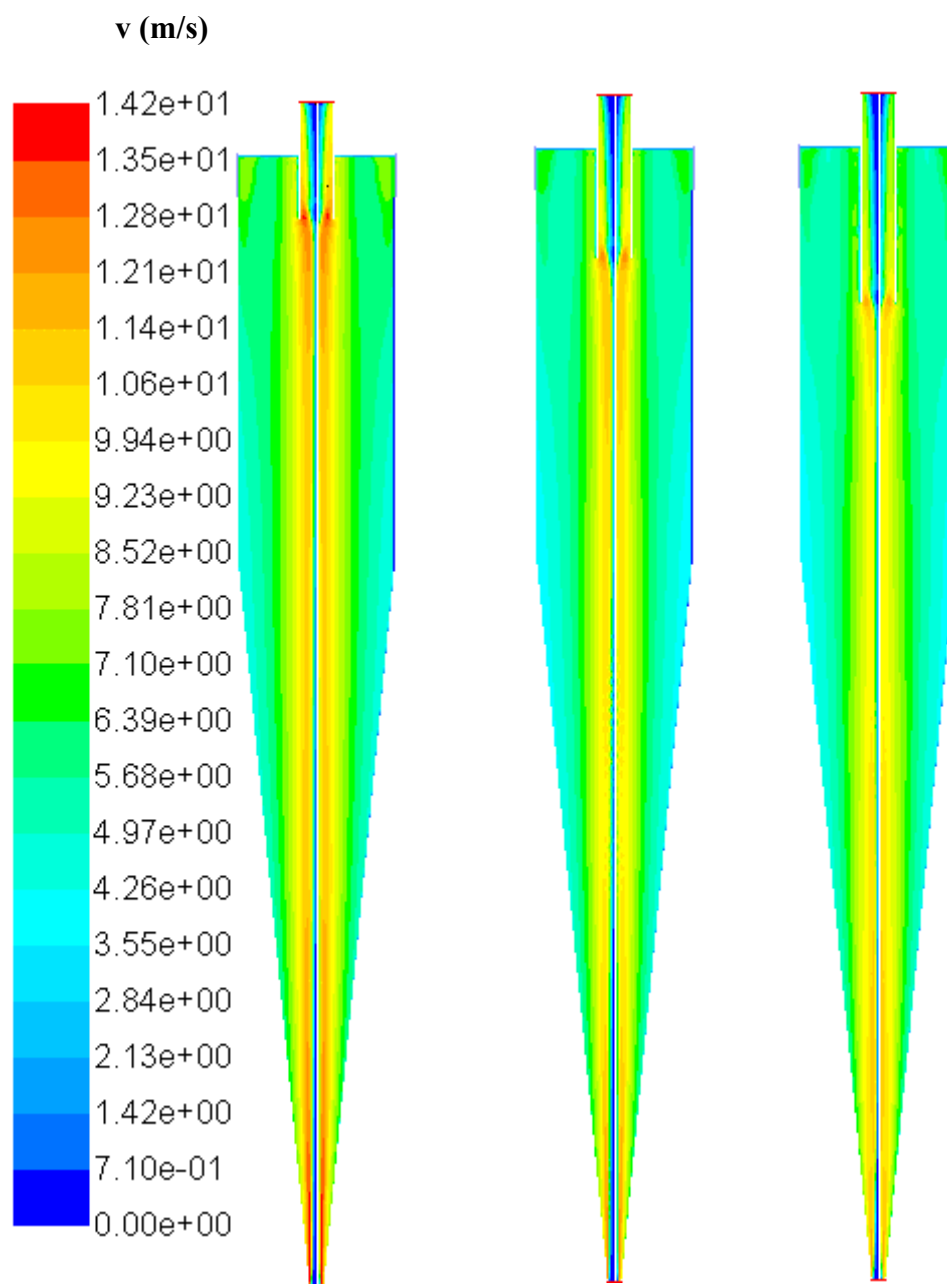


Figura A6-Velocidade Tangencial (v) do Hidrociclone HC_{11} com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 3 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

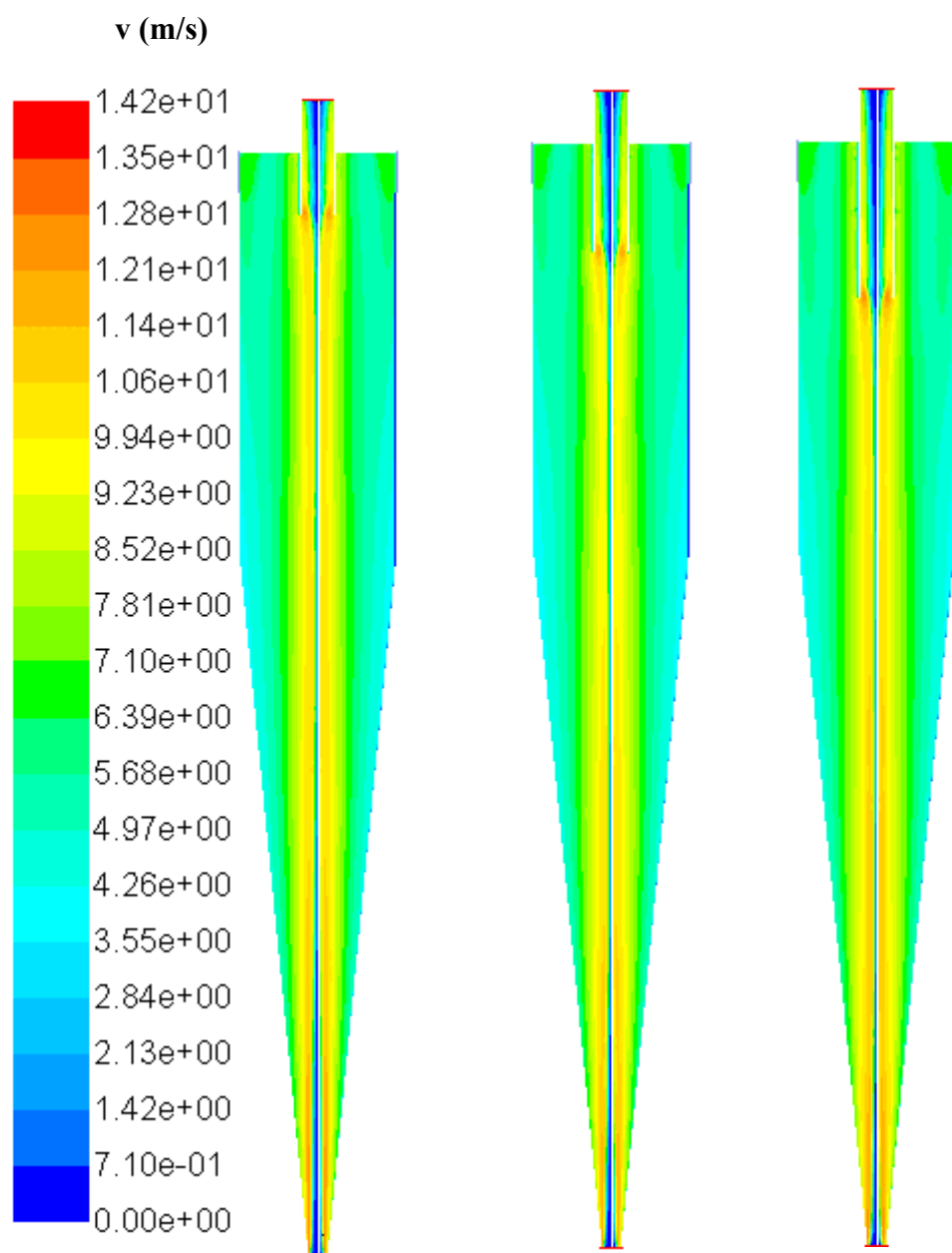


Figura A7-Velocidade Tangencial (v) do Hidrociclone HC_{11} com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 4 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.

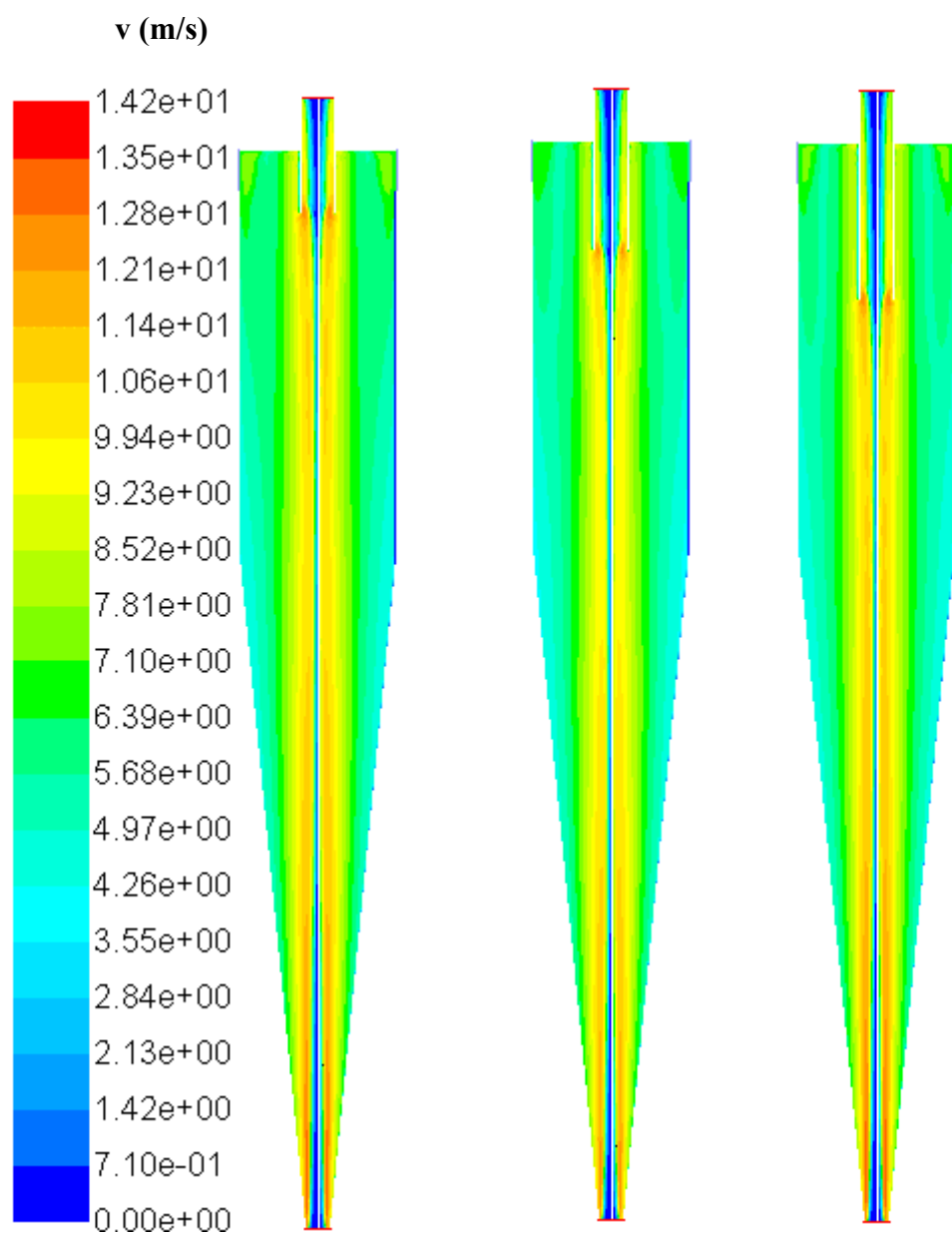


Figura A8-Velocidade Tangencial (v) do Hidrociclone HC_{11} com Diâmetro de *underflow* (D_u) igual a 5 mm e comprimentos de *vortex finder* (ℓ) igual a 12, 21 e 30 mm respectivamente.