



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA



Incorporação de um Cilindro Filtrante na Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones

Juliana Maria da Fonseca Façanha

Uberlândia - MG
2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Incorporação de um Cilindro Filtrante na Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones

Juliana Maria da Fonseca Façanha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, Área de Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG
2012

Incorporação de um Cilindro Filtrante na Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para qualificação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química em 24/02/2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador - PPG-EQ/UFU

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Co-Orientador - PPG-EQ/UFU

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
PPG-EQ/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
PPG-EQ/UFU

Eng. Dr. Nilson José Fernandes
Copebrás - Anglo American plc

DEDICATÓRIA

A Deus, que me sustentou em todos os momentos, ensinando-me, guardando-me e forjando o meu caráter.

Aos meus pais, que dedicaram suas vidas ao nosso sustento, a nos ensinar e principalmente a nos amar.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Marco Aurélio e Eliene, que por toda a vida me educaram e com seu amor me encorajaram a continuar e nunca negaram apoio. Ao meu irmão, Marco Jr. que com seu jeito maroto peculiar de ser e sua maneira irreverente, arranca sorrisos de quem convive com ele, e comigo é claro que não é diferente.

Ao meu orientador Luiz Gustavo, pelos ensinamentos nas mais diversas áreas do conhecimento, que me abriram a cabeça e me fizeram enxergar além da Engenharia Química; e também pelo apoio logístico e pessoal durante todo o período que trabalhamos juntos; da mesma forma, ao professor Marcos Barrozo por contribuir com minha formação profissional. Ao professor Luis Cláudio, por todos os ensinamentos e apoio.

À amiga Diana Almeida, que foi meu ombro amigo durante todo esse período e que me ensinou a enxergar além dos moldes do conhecimento técnico. À minha amiga de longa data, Livia Tizzo, que mesmo longe continua a cultivar um carinho e amizade reconfortantes. À Milla Pereira, à Beatriz Hasegawa e à Virginia Bastos pelo apoio incondicional, também deixo meu reconhecimento.

Aos amigos do laboratório Danylo, Bia, Carol, Diogo, Dyrney, Ricardinho, Isabele, Gláucia, Jânio, Kássia, Mariana, Marcão que se alegraram com minhas brincadeiras, ficaram em dúvida quando eu ainda precisava decidir, ficaram com dor de cabeça por causa do moinho de bolas e por todos os momentos em que eles foram meus amigos.

Às alunas de IC e IC-jr Loyane, Yasmin, Maria Tereza, Déborah e Natalia, que trabalharam exemplarmente com a equipe. A elas e aos demais ICs do laboratório pois todos ensinaram com suas perguntas e questionamentos, e a cada dia me faziam enxergar o quanto eu amo a Engenharia Química.

À Cecília, ao Silvino e ao Édio que sempre me atenderam com cordialidade e presteza, ajudando-me muito durante o trabalho. Aos professores da FEQUI que sempre me trataram com educação e distinção. Aos demais colegas e funcionários da FEQUI que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Não menos importante, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro durante todo o meu trabalho.

Estas coisas vos tenho dito para que tenhais paz em mim. No mundo, passais por aflições; mas tende bom ânimo; eu venci o mundo.

(João 16.33)

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Simbologia	xv
Resumo	xvii
Abstract	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Funcionamento de um Hidrociclone	7
2.2 Modelos de Separação	8
2.3 Abordagem por meio de Números Adimensionais	9
2.4 Hidrociclones Convencionais e Princípio das mudanças	11
2.5 Hidrociclones Não Convencionais	15
2.5.1 Hidrociclones Filtrantes	19
3 Materiais e Metodologia	31
3.1 Metodologia Experimental	31

3.1.1	Material Particulado	31
3.1.2	Os Hidrociclones	32
3.1.3	Unidade Experimental	34
3.1.4	Procedimento Experimental	36
3.1.5	Cálculo das Grandezas Associadas aos Hidrociclones	37
4	Resultados e Discussão	41
4.1	Efeito do Posicionamento do Meio Filtrante em Seções Distintas do Hidro- cyclone	41
4.2	Análise da Influência da Permeabilidade no Desempenho dos Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes	49
5	Conclusão e Sugestões	59
5.1	Principais Conclusões	59
5.2	Sugestões para Futuros Trabalhos	62
	Referências Bibliográficas	67
	Apêndice A	69
	Resultados Experimentais para os Hidrociclones	69
	Apêndice B	77
	Determinação da Porosidade e Permeabilidade dos Cilindros Filtrantes	77
B.1	Determinação da Porosidade dos Cilindros Filtrantes	79
B.2	Determinação da Permeabilidade dos Cilindros Porosos	80

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema de um hidrociclone e as principais correntes do equipamento . . .	2
1.2	Hidrociclone convencional (a), hidrociclone filtrante (b) e destaque do filtrado que deixa a matriz porosa (c)	3
2.1	Principais dimensões de projeto de um hidrociclone - Adaptado (SVAROVSKY, 1984)	12
2.2	Hidrociclone para separação líquido-líquido em fase dispersa com duas entradas tangenciais e duas seções cônicas. (SVAROVSKY, 1984)	13
2.3	Hidrociclone modificado, com presença de uma parede porosa para injeção de ar: (a) Flotação mineral, (b) Projeto modificado para flotação de dispersões óleo-água - (SVAROVSKY, 1984)	14
2.4	Hidrociclone para retirada de gás de petróleo cru - (SVAROVSKY, 1984) . .	15
2.5	Hidrociclone comercial <i>Cyclowash</i> patenteado e comercializado por Krebs Engineers (HONAKER et al., 2001)	16
2.6	(a) Esquema de um hidrociclone com três correntes de produto. (b) Corte transversal do equipamento mostrando características internas e regiões (A, B, C) nas quais é mais provável encontrar um tipo de partícula (OBENG; MORRELL, 2003)	18
2.7	Hidrociclone “elétrico” desenvolvido por Pratarn et al. (2005)	18
2.8	Perfis de velocidade tangencial simulados por Vieira (2006) via CFD em comparação com os dados experimentais de Dabir (1983) para diferentes posições axiais (z) e números de Reynolds (Re)	26
2.9	Comparação dos dados de Euler e Eficiência de Separação simulados para os hidrociclones filtrantes à pressão de 147 kPa (VIEIRA, 2006)	29

3.1	Curva de distribuição granulométrica dos sólidos alimentados e ajuste previsto pelo modelo RRB	32
3.2	Hidrociclones: a) convencional (HCon), b) cilíndrico-filtrante (HCiF) e c) cônico-filtrante (HCoF)	34
3.3	Unidade experimental de hidrocyclonagem	35
3.4	Detalhe sobre a agitação e homogeneização da suspensão de rocha fosfática	35
4.1	Valores para vazão de alimentação para os hidrociclones convencional (HCon), cônico-filtrante (HCoF) e cilíndrico-filtrante (HCiF-k ₁)	42
4.2	Número de Euler para os hidrociclones convencional, cônico e cilíndrico filtrantes	43
4.3	Resultados de R_L para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante	44
4.4	Valores de eficiência total reduzida (η') para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante	45
4.5	Valores de diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) para os hidrociclones convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante	47
4.6	Curvas de Eficiência Total (η) para os hidrociclones HCoF e HCiF para uma distribuição granulométrica fina	47
4.7	Curvas de Eficiência Total (η) para os hidrociclones HCoF e HCiF para uma distribuição granulométrica grossa	48
4.8	Vazões de filtrado em função das permeabilidades dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes após procedimento de colmatção	49
4.9	Valores experimentais de vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclones das modalidades HCiF e HCon	50
4.10	Vazões de alimentação obtidas experimentalmente em função da permeabilidade da parede cilíndrica dos hidrociclones para cada queda de pressão avaliada	51
4.11	Resultados experimentais de número de Euler para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3	52
4.12	Valores experimentais de Número de Euler em função da permeabilidade da parede cilíndrica para as quedas de pressão avaliadas	52
4.13	Resultados experimentais de Razão de Líquido para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3	53
4.14	Valores experimentais de Razão de Líquido em função da permeabilidade da seção cilíndrica nas quedas de pressão estudadas	54

4.15	Resultados experimentais de Eficiência Total Reduzida para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3	55
4.16	Resultados experimentais de Diâmetro de Corte Reduzido para os hidrociclones convencional e filtrantes - k_1 , k_2 e k_3	55
4.17	Valores experimentais de Eficiência Total Reduzida (η') em função da permeabilidade da seção cilíndrica para todas as quedas de pressão estudadas	56
4.18	Valores experimentais de Diâmetro de Corte Reduzido (d'_{50}) em função da permeabilidade da seção cilíndrica para todas as quedas de pressão estudadas	57

LISTA DE TABELAS

2.1	Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones conhecidas (SVAROVSKY, 1984)	12
2.2	Lista de famílias de hidrociclones com grande abertura de cone (SVAROVSKY, 1984)	13
2.3	Matriz de planejamento para confecção dos hidrociclones e realização dos experimentos (VIEIRA, 2006)	25
2.4	Relações geométricas para o hidrociclone otimizado proposto por Vieira (2006)	28
3.1	Relações geométricas para o hidrociclones	32
3.2	Propriedades das matrizes porosas cilíndricas e cônica.	33
A.1	Resultados experimentais para o hidrociclone convencional - HCon	71
A.2	Resultados experimentais para hidrociclone cônico-filtrante (HCoF)	71
A.3	Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de menor permeabilidade (HCiF - k_1)	71
A.4	Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta, referentes aos dados experimentais obtidos para o HCoF- k_1 para todos os valores de queda de pressão	72
A.5	Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCoF- k_1 em todas as quedas de pressão	72
A.6	Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de permeabilidade intermediária (HCiF - k_2)	73

A.7	Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta, referentes aos dados experimentais obtidos para o HCiF-k ₂ para todos os valores de queda de pressão	73
A.8	Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCiF-k ₂ em todas as quedas de pressão	74
A.9	Resultados experimentais para hidrociclone cilíndrico-filtrante de maior permeabilidade (HCiF - k ₃)	74
A.10	Valores de intervalo com 95% de confiança para cada resposta, referentes aos dados experimentais obtidos para o HCiF-k ₃ para todos os valores de queda de pressão	75
A.11	Valores para desvio padrão para os resultados experimentais do HCiF-k ₃ em todas as quedas de pressão	75
B.1	Dimensões geométricas e massas M ₁ e M ₂ dos cilindros	79
B.2	Valores calculados de V _T , V _b , V _s e ϵ	80
B.3	Valores experimentais para vazão volumétrica de filtrado para cada matriz porosa função da queda de pressão	82
B.4	Valores para Ψ e para k para HCiF-k ₁ e HCiF-k ₂	82
B.5	Valores de vazão de filtrando em função da queda de pressão experimental, para estimativa da permeabilidade do cilindro poroso do hidrociclone HCiF-k ₃	83
B.6	Valores para Ψ e para k para HCiF-k ₃	83

SIMBOLOGIA

A	constante característica de uma família de hidrociclones	[-]
B	constante característica de uma família de hidrociclones	[-]
C	constante característica de uma família de hidrociclones	[-]
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_{wo}	concentração mássica de sólidos na corrente de <i>overflow</i>	[-]
C_{wu}	concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
d_{50}	diâmetro de corte	[L]
d_{50}	diâmetro de corte reduzido	[L]
$d_{63,2}$	parâmetro do modelo RRB	[L]
d_p	diâmetro volumétrico da partícula	[L]
D_a	diâmetro do duto de alimentação	[L]
D_c	diâmetro da seção cilíndrica do hidrociclone	[L]
D_o	diâmetro do orifício de <i>overflow</i>	[L]
D_u	diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[L]
e	espessura do meio filtrante	[L]
Eu	número de Euler	[-]
F	vazão volumétrica de filtrado	[L ³ T ⁻¹]
G	eficiência granulométrica	[-]
G'	eficiência granulométrica reduzida	[-]
HCiF - k_i	hidrociclone cilíndrico filtrante de permeabilidade k_i	[-]
HCoF	hidrociclone cônico filtrante	[-]
HCon	hidrociclone convencional	[-]
K	constante característica de uma família de ciclones/hidrociclones	[-]
k_i	permeabilidade das matrizes cilíndricas filtrantes	[L ²]
k	permeabilidade de um meio filtrante	[L ²]
l	comprimento do <i>vortex finder</i>	[L]
L	comprimento total do hidrociclone	[L]
L_1	comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone	[L]
M_1	massa do cilindro sinterizado antes do processo de colmatação	[M]

(*Continua na próxima página*)

M_2	massa do cilindro sinterizado depois do processo de colmatção	[M]
n	parâmetro do modelo RRB	[-]
Q_a	vazão volumétrica de suspensão na corrente de alimentação	[L ³ T ⁻¹]
Q_o	vazão volumétrica de suspensão na corrente de <i>overflow</i>	[L ³ T ⁻¹]
Q_u	vazão volumétrica de suspensão na corrente 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	[-]
u_c	velocidade da suspensão com base na seção reta cilíndrica do hidrociclone	[LT ⁻¹]
V_b	volume de bronze sinterizado contido no cilindro colmatado	[L ³]
V_s	volume de rocha fosfática contido no cilindro colmatado	[L ³]
V_T	volume da matriz cilíndrica sinterizada	[L ³]
X	fração mássica de partículas na alimentação cujo diâmetro é inferior ao d_{Stk}	[-]
X_u	fração mássica de partículas no underflow cujo diâmetro é inferior ao d_{Stk}	[-]
X_i	variáveis das equações de ajuste de superfície de resposta	[-]
W	vazão mássica de suspensão na corrente de alimentação	[MT ⁻¹]
W_{su}	vazão mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[MT ⁻¹]
W_u	vazão mássica de suspensão na corrente de <i>underflow</i>	[MT ⁻¹]
z	posição axial no interior do hidrociclone	[L]
α	resistividade da torta	[M ⁻¹ L]
ϵ	porosidade do meio filtrante	[-]
$-\Delta P$	queda de pressão no hidrociclone	[ML ⁻¹ T ⁻²]
μ	viscosidade do fluido	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
η	eficiência total	[-]
η'	eficiência total reduzida	[-]
π_i	pi grupo segundo o teorema de Buckingham	[-]
ρ	densidade do líquido	[ML ⁻³]
ρ_o	densidade da suspensão na corrente de <i>overflow</i>	[ML ⁻³]
ρ_s	densidade do sólido	[ML ⁻³]
ρ_{susp}	densidade da suspensão	[ML ⁻³]
ρ_u	densidade da suspensão na corrente de <i>underflow</i>	[ML ⁻³]
$\Delta\rho$	diferença entre a densidade do sólido e a densidade do fluido	[ML ⁻³]
θ	ângulo de abertura da parte cônica do hidrociclone	[°]

Hidrociclones são equipamentos que separam uma fase discreta (sólido, líquido ou gás) de uma fase contínua (líquido) por meio da geração de um campo centrífugo. Propostas para a modificação desse equipamento com intuito de alavancar seu desempenho sempre estiveram presentes na literatura. Seguindo essa tendência, o grupo de pesquisa de sistemas particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia desenvolveu diversos estudos com um hidrociclone cuja a seção cônica fora substituída por uma matriz cônica permeável, dando origem ao hidrociclone cônico-filtrante (HCoF). Dessa maneira, o intuito desta dissertação foi dar continuidade aos trabalhos realizados por esse grupo de pesquisa ao incorporar uma parede cilíndrica permeável, dando origem ao hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF), fazendo assim uma comparação entre os equipamentos cônico-filtrante (HCoF), cilíndrico-filtrante (HCiF) e convencional (HCon). Todos os equipamentos foram manufaturados segundo a geometria otimizada proposta por Vieira (2006). Ademais objetivou-se avaliar como a permeabilidade da matriz porosa cilíndrica influenciava o desempenho do hidrociclone HCoF. Os resultados mostraram que a associação da filtração com a hidrociclonagem foi benéfica, pois para os hidrociclones filtrantes o número de Euler decresceram, em média, 17% para o HCoF e 22% para o HCoF em relação ao similar convencional. Para suspensões contendo partículas de granulometria “fina”, o HCoF seria a melhor opção, pois apresenta maiores eficiências dentre todos os equipamentos, no entanto, se fosse utilizado uma suspensão com partículas “grossas”, o HCoF seria o equipamento mais indicado, por apresentar altas eficiências de separação e conseguir processar mais suspensão por unidade de tempo. No que tange a influência da permeabilidade, os principais resultados indicam que não é vantajoso o emprego de meios porosos muito permeáveis ($k > 3,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), já que em termos de separação seriam idênticos ou piores que o convencional. No entanto, em se tratando de suspensões contendo partículas de maior granulometria, os hidrociclones cilíndrico-filtrantes de permeabilidades intermediária e menor poderiam ser empregados, pois obtiveram números de Euler menores que o convencional, 31 e 22%, respectivamente. Em suma, pôde-se concluir que há influência do posicionamento da matriz filtrante no desempenho dos hidrociclones filtrantes, bem como há influência da permeabilidade no desempenho dos hidrociclones HCoF.

ABSTRACT

Hydrocyclones are equipments that separate a discrete phase (solid, liquid, gas) from a continuous phase (liquid) in a centrifugal field. Several proposals of modified hydrocyclones have always been presented by literature. In this context, the particulate system research group from Chemical Engineering College of Federal University of Uberlandia carried on several studies with hydrocyclones whose conical sections have been replaced by filtering conical section, which resulted in the conical-filtering hydrocyclone (CoFH). Hence, the main purpose of this dissertation was to continue in this branch of research now proposing the replacement of the cilindrical section by a filtering cilindrical one, which resulted in cilindrical-filtering hydrocyclone (CyFH) and thus comparing both non conventional equipments with the conventional hydrocyclone (CH). All of these hydrocyclones were manufactured according to the optmized geometry proposed by Vieira (2006). Furthermore, another purpose of this research was to assess how the permeability of the porous media influenced the performance of cilindrical filtering hydrocyclone. The results showed that associating filtration with hydrocyclone processing was beneficial, considering that for both filtering hydrocyclones the Euler number diminished, in average, 17% for the CoFH and 22% for the CyFH compared with the conventional equipment. For suspensions containing fine particles, the CoFH could be considered the best option, because it presents the highest separation efficiency among all hydroyclones tested. Nevertheless, if suspensions containing coarse particles were processed, the CyFH would be the most indicated for the process, for presenting high separation efficiency and also be able to process more suspension per unit time. Regarding the influence of permeability, the main results indicate that it is not an advantadge to employ highly permeable porous media, because in terms of separation they would be identical or even worse than the conventional hydrocyclone. However, considering suspensions containing coarse particles, the cylindrical-filtering hydrociclones with intermediate or lower permeabilities could be employed, due to the fact that they would reach high separation efficiencies combined with high processing capacity. Summarizing, it could be concluded that the settlement of the filtering medium influenced the performance of cylindrical-filtering hydrocyclones, as well as the permeability showed to influence the performance of this hydrocyclone.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos que realizam separação sólido-líquido, líquido-líquido, gás-líquido, sólido-líquido-gás em campo centrífugo. Surgiram há mais de um século com intuito de separar areia da água e, após um período de baixa utilização, ressurgiu como importante peça no processo de separação das indústrias extrativistas e mineral. Atualmente, são empregados em diversos setores da indústria além daqueles anteriormente citados. Podem ser mencionados os setores petroquímico, de petróleo, de alimentos, têxtil e de tratamento de efluentes. Tal versatilidade está ligada ao fato do hidrociclone ter uma construção simples e financeiramente menos dispendiosa, não possuir partes móveis e, assim ter uma manutenção menos onerosa que outros separadores, como a centrífuga. Ademais, possuem alta capacidade de processamento e podem operar em uma ampla faixa de pressão. Por fim, são equipamentos que separam com eficiência partículas na faixa de 5 a 400 μm . Podem ser empregados em processos de deslamagem, espessamento, classificação de partículas de acordo com tamanho/densidade, retirada de gotas de óleo ou gás do líquido de interesse.

São equipamentos construídos a partir do acoplamento de um tronco de cone a uma parte cilíndrica, na qual está situado um duto tangencial através do qual se alimenta uma suspensão de interesse. Há um outro duto coaxial à seção cilíndrica por onde parte da suspensão contendo as partículas mais finas (ou menos densas) deixa o hidrociclone, formando a corrente de *overflow*. Na parte mais estreita do tronco de cone há um orifício por onde o restante da suspensão contendo as partículas grossas (ou mais densas) deixa o equipamento, chamado de orifício de *underflow*. A Figura 1.1 mostra o esquema de um hidrociclone e suas principais correntes.

Devido à tamanha aplicabilidade, vários estudos surgiram com intuito de propor equa-

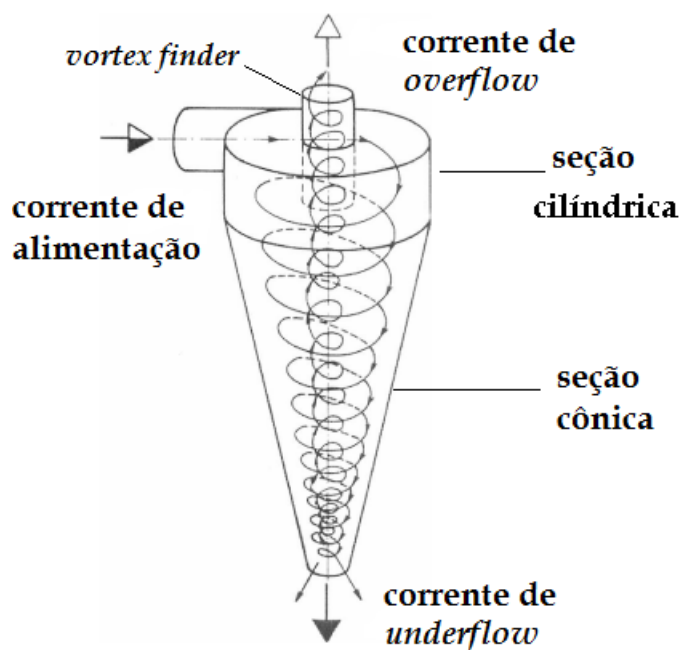


Figura 1.1: Esquema de um hidrociclone e as principais correntes do equipamento.

ções de projeto, avaliando as variáveis que tinham influência sobre o desempenho do equipamento. Houve trabalhos empíricos, semi-empíricos que levavam em conta variáveis geométricas (diâmetros da seção cilíndrica, de alimentação, de *underflow* e *overflow*, comprimento do hidrociclone) e operacionais (queda de pressão, concentração da suspensão alimentada). Dentre os trabalhos empíricos, a abordagem por grupos adimensionais é bem posta e podem ser citados os trabalhos de Rietema (1961), Medronho e Svarovsky (1984), Massarani (1989). Coelho e Medronho (2001) propuseram uma metodologia pela abordagem de números adimensionais para prever o desempenho de hidrociclones sem necessidade de ajuste de parâmetros para cada conjunto de dados experimentais.

Apesar de grande versatilidade, cada indústria tem demandas específicas e, dessa maneira, foram realizadas modificações nos hidrociclones para atender melhor às necessidades de seus processos. Dentre essas modificações, está a criação de equipamentos não convencionais, quer seja mudando a geometria dos hidrociclones, quer seja agregando uma outra operação unitária ao processo de hidrociclonagem, ou ainda, outro tipo de modificação que seja alheia ao modelo de hidrociclone inicialmente concebido.

Nesse contexto, o grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia - LSP/FEQUI/UFU iniciou estudos com um equipamento não-convencional com a finalidade de comparar o seu desempenho com aquele apresentado pelo equipamento convencional de mesma geometria. O separador proposto foi o hidrociclone filtrante, que consistia em substituir a parede maciça da seção cônica por uma outra manufaturada com material permeável.

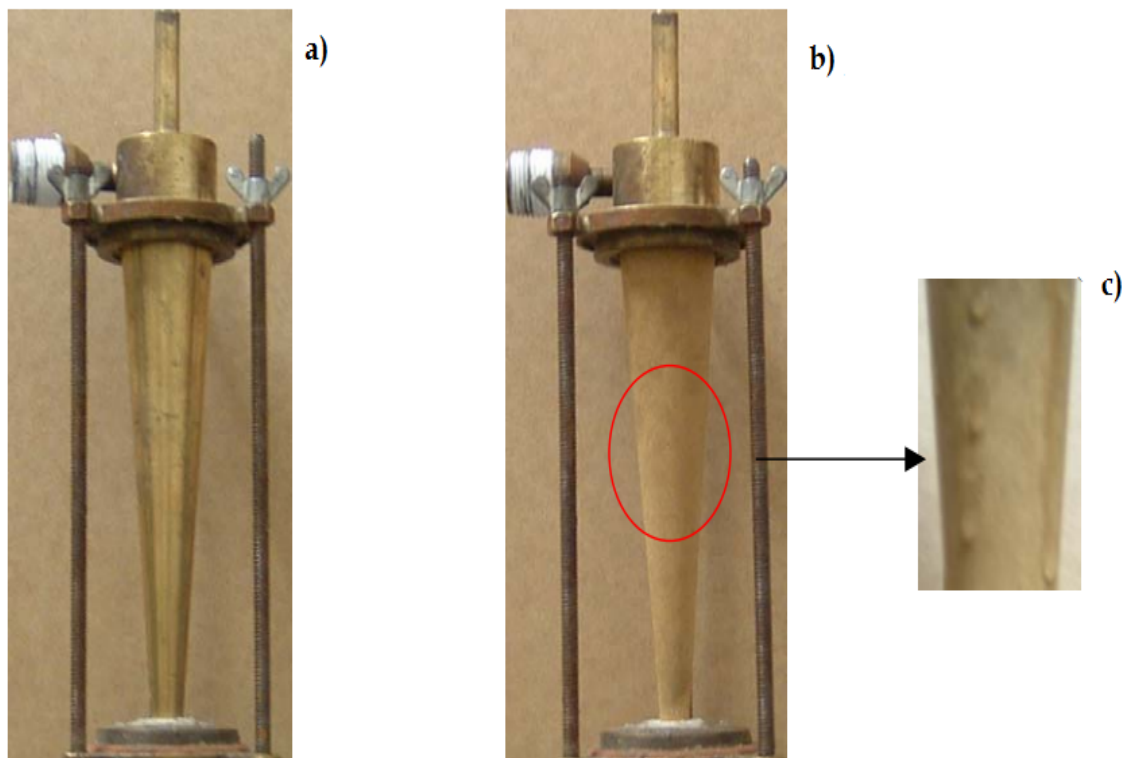


Figura 1.2: Hidrociclone convencional (a), hidrociclone filtrante (b) e destaque do filtrado que deixa a matriz porosa (c).

A Figura 1.2 mostra o equipamento convencional (a) e o filtrante (b) lado a lado. Em destaque (c), está a corrente adicional devido à modificação proposta.

O hidrociclone filtrante foi inspirado pelo trabalho de Damasceno e Massarani (1986), Henrique et al. (1987), que propuseram a substituição do fundo maciço de um sedimentador por um outro composto de material poroso. Neste estudo, observaram que o equipamento de fundo filtrante demandava uma área de sedimentação menor que a necessitada pelo equipamento convencional, sugerindo que associar a filtração a outros processos de separação poderia ser vantajoso.

Isso posto, Lanna et al. (1992) iniciaram estudos com hidrociclones filtrantes segundo a geometria Bradley, utilizando como meio filtrante um tecido de nylon. Obtiveram resultados interessantes no que tange ao desempenho do equipamento filtrante frente ao convencional. Observou-se que a inserção de uma parede porosa, em substituição à parede maciça, ao hidrociclone aumentou a capacidade de processamento e, por conseguinte, levou à diminuição do número de Euler, que está associado aos custos de energia com bombeamento. Outras características importantes notadas foram a diminuição da razão de líquido e da eficiência de coleta em relação ao hidrociclone convencional.

Vieira (1997) deu continuidade aos estudos envolvendo o hidrociclone Bradley filtrante, modificando a matriz filtrante. Em seu trabalho, utilizou um meio filtrante de polipropileno. Verificou que os resultados que obteve foram análogos aos obtidos por Lanna et al. (1992), diferindo somente quanto à ordem de grandeza.

Posteriormente, Souza (1999) propôs uma metodologia que pudesse descrever de forma mais geral o desempenho de hidrociclones filtrantes, estudando, além dos meios porosos de nylon e propileno, um outro manufaturado com partículas de bronze sinterizado. Diante dos resultados obtidos, pôde incorporar às equações de projeto e desempenho, a resistência do meio filtrante. O autor sugeriu, com base no desempenho apresentado pelos hidrociclones filtrantes, que estes poderiam ser uma opção no setor industrial, já que consumiam menos energia e tinham uma capacidade de processamento maior.

Estudos de hidrociclones filtrantes com diferentes geometrias, tais como Rietema, Demco e Krebs, também foram realizados no LSP/FEQUI/UFU. Em sua dissertação de mestrado, Vieira (2001) avaliou o desempenho de um hidrociclone filtrante segundo a geometria Rietema e também comparou o desempenho deste com aquele apresentado pelo equipamento convencional de mesma geometria. Verificou que a filtração influenciava o desempenho do hidrociclone filtrante Rietema, culminando em aumento da vazão de alimentação para uma mesma queda de pressão estudada, analogamente ao que foi observado para o hidrociclone Bradley, no entanto, diferentemente deste, o hidrociclone filtrante Rietema apresentou maior eficiência de coleta. Sendo assim, o pesquisador sugeriu que havia uma influência concomitante da geometria e da filtração no desempenho de hidrociclones filtrantes.

Arruda et al. (2002) estudaram como a inserção de um meio filtrante modificava o desempenho de um hidrociclone segundo a geometria Krebs. Em seguida, foi tema de trabalho de Arruda (2003) avaliar o desempenho do hidrociclone Demco filtrante. Para ambas as geometrias foi observado que a filtração não exerceu um papel tão significativo quanto aquele apresentado para as geometrias Bradley e Rietema, pois ambos equipamentos filtrante e convencional obtiveram eficiência de separação e outras respostas semelhantes.

Diante dos resultados obtidos, constatou-se a necessidade de encontrar uma geometria ótima que pudesse conjugar altas eficiências de separação e baixo custo energético. Foi nesse intuito que Vieira (2006), em sua Tese de Doutorado pela FEQUI/UFU, realizou um estudo lançando mão de técnicas de Planejamento de Experimentos, análise canônica e otimização, incluindo combinação de variáveis geométricas e operacionais. Além da obtenção de uma geometria ótima, o autor também utilizou simulações em CFD com intuito dessas lhe ajudarem a explicar o desempenho de hidrociclones filtrantes frente aos convencionais.

A partir do equipamento de geometria otimizada encontrado por Vieira (2006), Almeida (2007) investigou a influência de outras variáveis geométricas não contempladas pelo trabalho anterior, no desempenho de hidrociclone filtrante. Estudou a influência do comprimento do *vortex finder* e do diâmetro de *underflow*, encontrando que os hidrociclones que tinham valores intermediários propostos para estas variáveis, apresentaram melhor desempenho.

Embora haja diversos estudos com hidrociclones filtrantes, todos centraram o foco em um equipamento cuja seção filtrante era a cônica. Dito isso, avaliar como o posicionamento da matriz filtrante influencia o desempenho dos hidrociclones filtrantes é necessário. Dessa forma, este trabalho propõe o estudo com um hidrociclone que a parede da seção cilíndrica seja formada por uma matriz filtrante e a parede da seção cônica seja maciça, resultando em um outro equipamento chamado hidrociclone cilíndrico-filtrante.

1.1 Objetivos

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram:

1. Avaliar a influência do posicionamento da matriz porosa em diferentes seções do hidrociclone (cônica ou cilíndrica) e comparar os resultados obtidos com aqueles apresentados pelo hidrociclone convencional, por meio de ensaios experimentais envolvendo os três hidrociclones: cônico-filtrante (**HCoF**), cilíndrico-filtrante (**HCiF**) e convencional (**HCon**).
2. Avaliar, para o hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF), como a variação da permeabilidade da parede cilíndrica influenciava o processo de hidrociclonagem.

2.1 Funcionamento de um Hidrociclone

O hidrociclone consiste de uma seção cilíndrica acoplada a uma seção cônica. O princípio de separação desse equipamento é a sedimentação centrífuga, isto é, as partículas suspensas são submetidas a uma aceleração centrífuga que as separa do fluido. Tal aceleração é gerada pela alimentação da suspensão tangencial através da entrada situada na parte superior do cilindro e o resultado é um intenso movimento rotacional desenvolvido dentro do equipamento. Parte do líquido contendo as frações finas das partículas é descarregado pelo orifício de *overflow*, situado na parte superior da parte cilíndrica, e a porção do líquido contendo as partículas grosseiras deixa a seção cônica do equipamento pelo orifício de *underflow* (SVAROVSKY, 2000).

O escoamento interno no hidrociclone é complexo e a distribuição das velocidades pode ser descrita por três componentes: axial, tangencial e radial. A componente tangencial é uma das mais importantes, pois é responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento que atuam em um hidrociclone. É por causa desta componente que não há formação de torta nas paredes internas dos hidrociclones filtrantes. As componentes radial e axial (dependendo da posição no interior do equipamanento) são responsáveis pela coleta de partículas. A transferência de quantidade de movimento de uma componente para a outra é constante, em especial próximo ao orifício de *underflow* já que o fluido cede energia do movimento rotacional para as componentes radial e axial da velocidade (SCHAPEL; CHASE, 1998).

A coleta de partículas em um hidrociclone é determinada pelo balanço de forças que

atuam nestas. Podem ser citadas as forças de empuxo (pela diferença de densidade da partícula e do líquido) e de arraste, e o balanço dessas fornece a velocidade terminal da partícula que depende de seu tamanho e de sua forma, além das propriedades do fluido. Dessa maneira, uma partícula é dita coletada quando consegue atingir a parede do equipamento, sendo direcionadas para o *underflow* enquanto aquelas que permaneceram no vórtice interno são descarregadas pelo *overflow* (SCHAPEL; CHASE, 1998).

Ainda em relação ao escoamento interno de hidrociclones, relata-se a particularidade da formação de um pequeno curto-circuito na parte superior do equipamento devido aos gradientes de pressão e às bordas de escoamento por causa da diferença de tamanho entre o vórtice interno e o comprimento do *vortex finder* (SOUZA et al., 2000). Por fim, pode-se notar, além das características supracitadas, que devido ao escoamento turbilhonar, pode haver a formação de uma região de pressão negativa no interior do equipamento permitindo a formação de uma coluna de ar interna chamada de *air core*, que pode ser destruída pela adição de contrapressão ou pela faixa operacional que o hidrociclone atua (VIEIRA, 2006).

2.2 Modelos de Separação

Os modelos de separação são abordagem teóricas que tentam descrever o funcionamento dos hidrociclones levando em conta as variáveis principais do processo. De acordo com a abordagem podem ser divididos em quatro grupos básicos: teoria da Órbita de Equilíbrio, teoria do Tempo de Residência, teoria do Escoamento Bifásico Turbilhonar e teoria do Modelo Populacional (SVAROVSKY, 2000).

Teoria da Órbita de Equilíbrio - Baseada no conceito de raio de equilíbrio originalmente proposto por Driessen (1951) e Criner (1950), considera que uma partícula de um tamanho específico ficará em uma órbita de equilíbrio no hidrociclone aonde a sua velocidade terminal radial é igual à velocidade radial do líquido. Partículas cujas velocidades são menores que a velocidade terminal do líquido são arrastadas para o vortex interno e coletadas na corrente de *overflow*.

Teoria do Tempo de Residência - Nessa teoria, assume-se que não há condições de equilíbrio e considera a possibilidade de uma partícula atingir a parede do hidrociclone no tempo de residência do equipamento. Foi sugerida primeiramente por Rietema (1961) que assumiu uma distribuição homogênea das partículas em toda seção da alimentação. Dessa maneira, uma partícula seria coletada se conseguisse atingir a parede do equipamento em um tempo menor que o tempo de residência do hidrociclone. E o diâmetro de corte seria o tamanho da partícula que, entrando

precisamente no centro do tubo de alimentação, atingiria a parede no exato tempo de residência.

Modelo Populacional - Inicialmente proposto por Fahlstrom (1960), sugere que o diâmetro de corte é, principalmente, função do diâmetro do orifício de *underflow* e da distribuição granulométrica da alimentação. O autor postulou que seria possível estimar o diâmetro de corte da partícula baseando-se na recuperação de sólidos do *underflow* devido ao efeito populacional. O modelo é plausível, contudo não em razão da hipótese proposta pelo autor, o que gerou outros estudos posteriores que conseguiram melhores explicações para o fenômeno e embasamento para o modelo (BLOOR et al., 1980).

Modelo Bifásico Turbilhonar É uma teoria baseada no efeito da turbulência, que é inerente ao escoamento em hidrociclones, sobre os perfis de velocidade do fluido no interior do equipamento e foi base para estudos da literatura como os de Bloor e Ingham (1975), e Schubert e Neese (1980), Duijn e Rietema (1982). No primeiro estudo, os autores realizaram um estudo mais aprofundado do fenômeno de turbulência, utilizando a teoria de mistura de Prandtl para um escoamento monofásico, encontrando assim, perfis de velocidade, levando em conta a variação da turbulência em relação a distância radial. No estudo subsequente, os autores propuseram um modelo de separação para um escoamento bifásico para sistemas com baixa concentração, propondo que transporte se daria pela imposição do fluxo de sedimentação ao fluxo turbulento. Já o último estudo, foi proposto um perfil de velocidades baseado na viscosidade turbulenta, que supôs ser constante, encontrando que a presença de sólidos reduzia os gradientes de velocidade, bem como deixava mais próximo de constante o perfil de gradiente de pressão radial

2.3 Abordagem por Meio de Números Adimensionais

Sabe-se que o escoamento em hidrociclones é bastante complexo, dessa forma uma alternativa para projeto e análise de desempenho deste equipamento é por meio da abordagem que utiliza grupos adimensionais.

De acordo com Svarovsky (1984), as variáveis importantes para o processo de hidrociclonação, quando são utilizados fluidos newtonianos são: d_{50} , D_c , ρ , $\Delta\rho = \rho_s - \rho$, μ , C_v , R_L , u_c e ΔP .

Utilizando-se o teorema π de Buckingham tendo como núcleo u_c , ρ e D_c , encontram-se os seguintes grupos adimensionais (SOUZA, 1999):

$$\pi_1 = \frac{d_{50}}{D_c} \quad \pi_2 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \pi_3 = \frac{\mu}{D_c u_c \rho} \quad \pi_4 = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho u_c^2}{2}}$$

Por sua vez, u_c pode ser definida como:

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

Ao combinar os grupos adimensionais π_1 , π_2 e π_3 , obtém-se o número de Stokes (Stk_{50}). O número de Euler é definido para os hidrociclones como o grupo adimensional π_4 e o número de Reynolds como o inverso de π_3 . As Equações 2.2, 2.3, 2.4 representam, respectivamente, os números adimensionais supracitados.

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

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

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

Esses grupos adimensionais são geralmentes relacionados, em conjunto com C_v e R_L , como postula a Equação 2.5.

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

Para encontrar uma correlação descrita pela Equação 2.5 são necessários estudos experimentais criteriosos. Na literatura há trabalhos que apresentam correlações utilizando a abordagem dos grupos adimensionais (SVAROVSKY, 1984; SILVA; MEDRONHO, 1986; SILVA; MEDRONHO, 1988).

Seguindo essa tendência, (MASSARANI, 1989) propôs uma metodologia bastante utilizada na avaliação do desempenho de hidrociclones. Tal metodologia pode ser descrita pelas Equações de 2.6 a 2.9.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} f(R_L) g(C_v) \quad (2.6)$$

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

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

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

E os valores para K , B e C são parâmetros empíricos que devem ser estimados para cada família de hidrociclones.

2.4 Hidrociclones Convencionais e Princípio das Mudanças

Os hidrociclones podem ser agrupados em famílias, estas sendo caracterizadas por um conjunto de equipamentos que mantêm entre si uma proporção constante e definida das suas principais dimensões geométricas e o diâmetro da parte cilíndrica. Tais separadores se diferem somente quanto a dimensões geométricas, e dessa maneira, todo o equipamento que somente apresenta modificações em relação às proporções geométricas do equipamento, não apresentando mudanças na estrutura do equipamento, foram chamados de hidrociclones convencionais. A Figura 2.1 apresenta as principais dimensões de projeto para um hidrociclone convencional.

Svarovsky (1984), em seu livro sobre hidrociclones, apresenta dois grupos de hidrociclones empregados principalmente em operações de clarificação e espessamento (1º grupo),

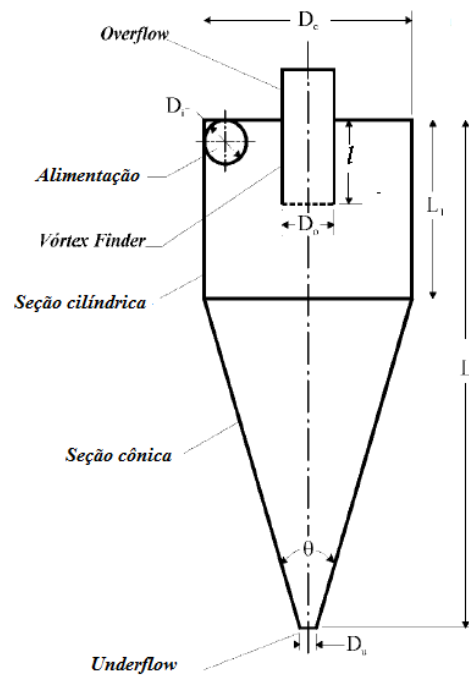


Figura 2.1: Principais dimensões de projeto de um hidrociclone - Adaptado (SVAROVSKY, 1984).

bem como em operações de classificação quanto ao tamanho/forma e densidade das partículas (2º grupo). A Tabela 2.1 apresenta as proporções geométricas de hidrociclones inseridas no primeiro grupo, que contém os hidrociclones de geometria convencional mais conhecidos. O segundo grupo tem suas relações geométricas apresentadas pela Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones conhecidas (SVAROVSKY, 1984).

Tipo de hidrociclone	D_c [m]	D_a/D_c [-]	D_o/D_c [-]	l/D_c [-]	L/D_c [-]	θ [°]
Rietema	0,075	0,28	0,34	0,4	5	20
Bradley	0,038	0,133	0,20	0,33	6,85	9
Mozley	0,022	0,154	0,214	0,57	7,43	6
Mozley	0,044	0,160	0,25	0,57	7,71	6
Mozley	0,044	0,197	0,32	0,57	7,71	6
Warman 3" modelo R	0,076	0,29	0,20	0,31	4	15
RW 2515 (AKW)	0,125	0,20	0,32	0,8	6,24	15
Hi-Klone modelo 2	0,097	0,175	0,25	0,92	5,6	10
Hi-Klone modelo 3	0,125	0,15	0,20	0,80	5,4	10
Demco	0,051	0,217	0,50	1,0	4,7	25
Demco	0,102	0,244	0,313	0,833	3,9	20

Tabela 2.2: Lista de famílias de hidrociclones com grande abertura de cone (SVAROVSKY, 1984).

Tipo de hidrociclone	D_a/D_c	D_o/D_c	D_u/D_c	l/D_c	L/D_c	θ
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]
Rietema - otimizado	0,14	0,14		0,4	2,5	28
Dreissen, 60 mm	0,167	0,333	0,247			45
Dreissen, 60 mm	0,167	0,333	0,247			60
Rietema, 600 mm	0,083	0,083	0,013	0,23	0,53	160
Rietema, 300 mm	0,133	0,167	0,027		1,17	160

Pode ser observado ainda nesta literatura (SVAROVSKY, 1984), que a busca por novas geometrias que facilitassem o processo de separação era crescente e foram apresentadas algumas delas para separação sólido-líquido, líquido-líquido, para operação gás-líquido, que traziam mudanças estruturais. Como exemplo, pode-se citar o hidrociclone empregado na separação líquido-líquido com duas entradas tangenciais e duas seções cônicas, como mostra a Figura 2.2.

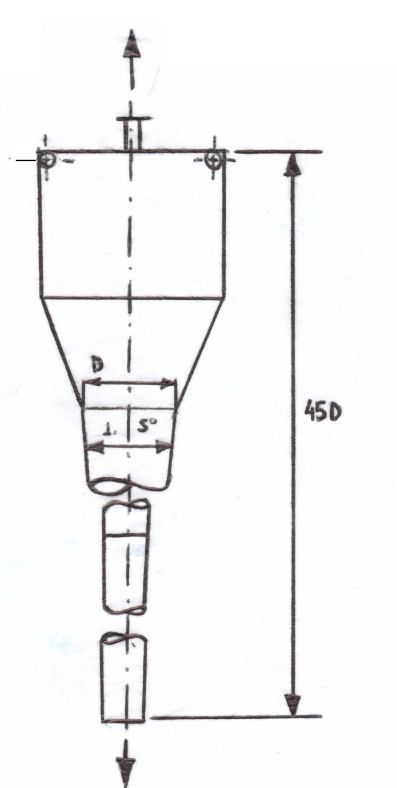


Figura 2.2: Hidrociclone para separação líquido-líquido em fase dispersa com duas entradas tangenciais e duas seções cônicas. (SVAROVSKY, 1984).

Ademais, foi apresentado (SVAROVSKY, 1984) um hidrociclone totalmente cilíndrico com uma parede porosa para injeção de ar, aplicado na separação sólido-líquido em indústrias do setor mineral, assim como em processos de flotação de dispersões óleo-água. Este hidrociclone combinava as operações unitárias de separação por hidrociclonagem e flotação, mostrando uma outra tendência na modificação desses separadores, isto é, conjugar mais de uma operação unitária para melhorar o desempenho do hidrociclone, e é apresentado pela Figura 2.3.

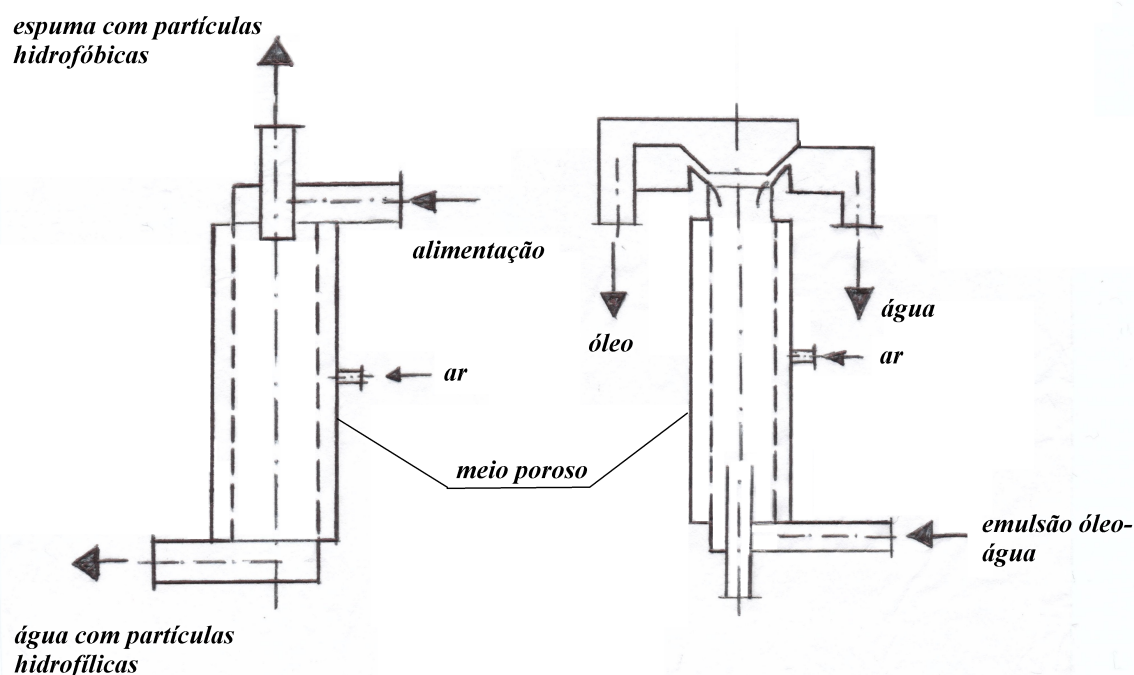


Figura 2.3: Hidrociclone modificado, com a presença de uma parede porosa para injeção de ar: (a) Flotação mineral, (b) Projeto modificado para flotação de dispersões óleo-água - (SVAROVSKY, 1984).

Um outro hidrociclone modificado (entrada retangular ajustável, tronco de cone encapsulado com uma purga de gás e dreno e saída para óleo) foi apresentado para separação gás-líquido, concebido pela empresa BP (British Petroleum), como ilustra a Figura 2.4.

Hidrociclones não convencionais podem ser definidos como aqueles que apresentam modificações em sua estrutura com a finalidade de melhorar o desempenho do mesmo na separação de uma fase discreta de uma fase contínua.

Visto que a tendência da aplicação desses equipamentos foi a modificação dos mesmos para atender demandas específicas de cada indústria e que esse movimento ainda perdura, a próxima seção traz algumas propostas de modificação de hidrociclones apresentadas pela

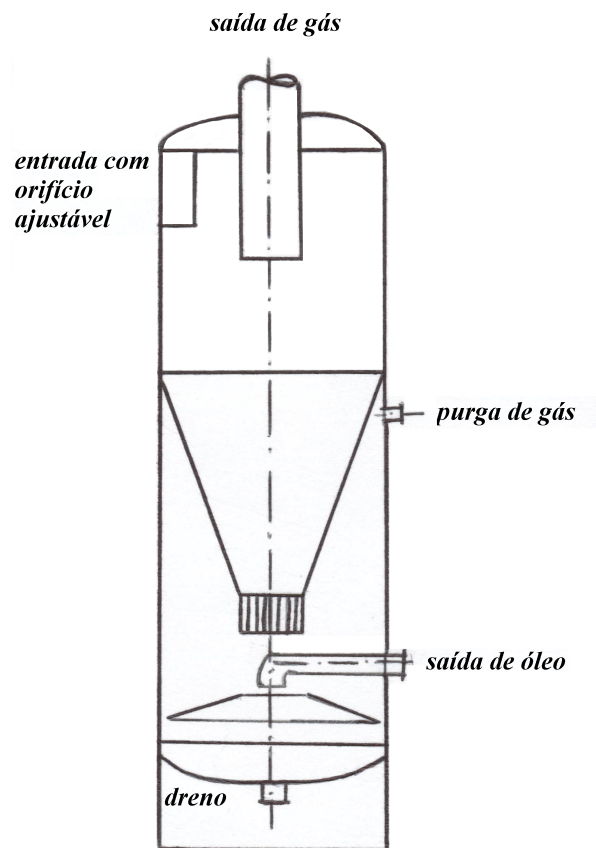


Figura 2.4: Hidrociclone para retirada de gás de petróleo cru - (SVAROVSKY, 1984).

literatura na última década.

2.5 Hidrociclones Não Convencionais

Nessa seção serão apresentados alguns grupos de hidrociclones com funcionamento não convencional reportados recentemente pela literatura.

Hidrociclone com injeção tangencial de água - Estes hidrociclones são caracterizados pela presença de um truncamento do tronco de cone logo acima do orifício de *underflow*, formando uma entrada para injeção tangencial de água, cuja finalidade é fazer a retirada dos finos que são arrastados para corrente de *underflow*, redirecionando-os para a corrente de *overflow*, enquanto as partículas que não foram coletadas continuam escoando em direção a segunda seção cônica do equipamento

que é descarregada pelo orifício de *underflow*. É aplicado principalmente em operação de classificação de sólidos, cujo interesse está na obtenção de finos na corrente de *overflow* e uma corrente concentrada de *underflow*. A **Krebs Engineering** patenteou um equipamento, disponível comercialmente sob o nome de **K H Cyclowash**, que é mostrado na Figura 2.5. Existem trabalhos na literatura sobre esse tipo de hidrociclone, podendo citar aqueles sob a autoria de Honaker et al. (2001), Bhaskar et al. (2005) e Dueck et al. (2010). Nos dois primeiros, estudaram-se variáveis de projeto e operacionais, ambos chegando à conclusão que a vazão de água injetada é a variável que se deve controlar com mais cuidado, a fim de ser obtido um arraste de finos para corrente de *overflow* mais efetivo. O último trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático que incluísse a taxa de injeção de água no modelo que prevê a performance deste tipo de hidrociclone.

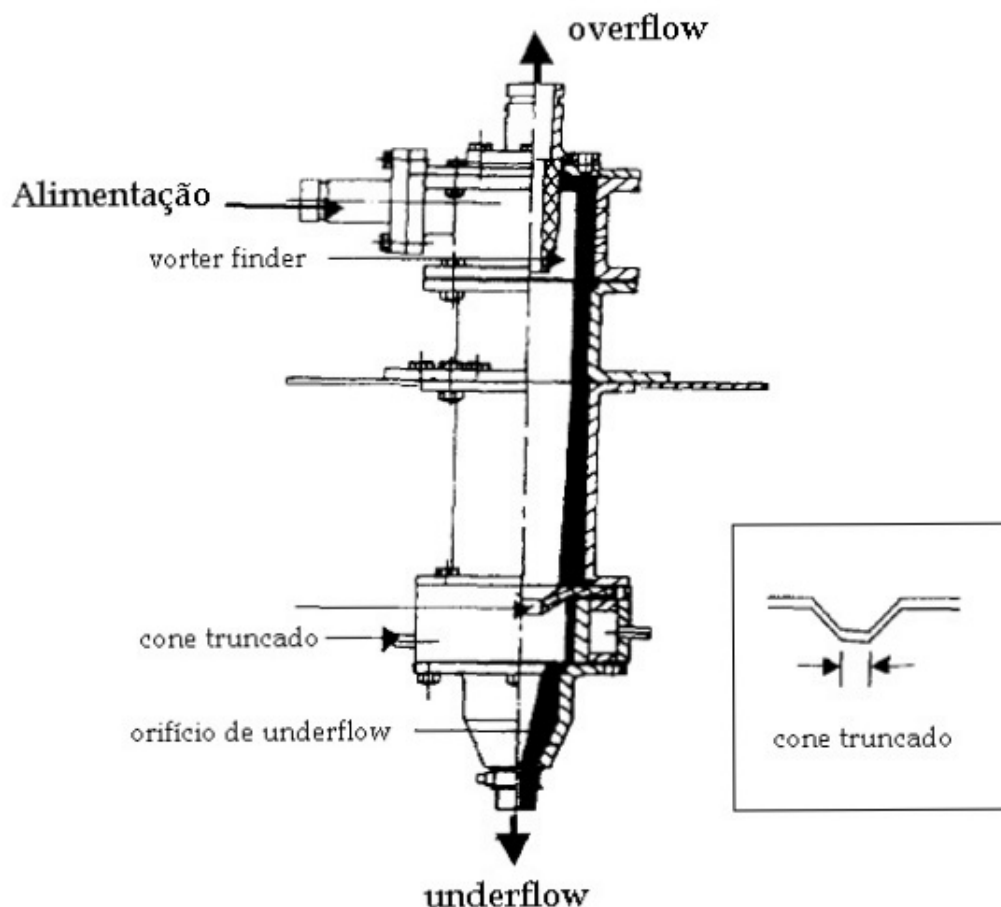


Figura 2.5: Hidrociclone comercial *Cyclowash* patenteado e comercializado por Krebs Engineers (HONAKER et al., 2001).

Hidrociclones com três produtos - Esses hidrociclones, diferentemente dos hidrociclones convencionais, possuem três correntes de produto, podendo ser duas de *overflow* e uma de *underflow* ou o inverso, com duas de *underflow* e uma de *overflow*. Analogamente aos hidrociclones com injeção de água, foram concebidos para minimizar a saída de finos reportadas na corrente de *underflow*, com intuito de diminuir a moagem em excesso do material e, por conseguinte, diminuir os custos adicionais dessa operação ocasionada por esse excesso. Foi apresentado anteriormente que a injeção de água no hidrociclone pode acarretar na mudança do diâmetro de corte do processo que é um efeito não desejado para o mesmo. Sendo assim, o hidrociclone de três produtos, sendo dois de *overflow* surge como alternativa a esse equipamento, realizando uma mudança no comprimento de um segundo *vortex finder* exterior àquele que já é comum ao hidrociclone convencional. A Figura 2.6 apresenta o esboço de um hidrociclone de três produtos (a), com destaque para três zonas (A, B e C) de segregação das partículas contidas na suspensão de interesse (b). Obeng e Morrell (2003) estudaram um sistema, cuja alimentação era formada por minério de magnetita e sílica de diferentes tamanhos. Encontraram que esse equipamento poderia ser aplicado em operações de flotação por *flash* obtendo melhor desempenho que o equipamento convencional, pois a nova corrente de *overflow* interno, não precisaria ser muito diluída ao contrário do que acontece com o convencional e ainda, a corrente externa de *overflow* continha as mesmas características necessárias para o processo subsequente de flotação. Dessa maneira, isso resultaria na diminuição de custos do processo de moagem. Outros trabalhos envolvendo hidrociclones com três produtos são o de Mainza et al. (2004) e Ahmed et al. (2009).

Hidrociclone “elétrico” (separação centrífuga + precipitador eletrostático) -

Este hidrociclone, aplica diferença de potencial (d.d.p.) com intuito de obter um diâmetro de corte menor para um hidrociclone. Foi apresentado no trabalho de Pratarn et al. (2005) e a Figura 2.5 apresenta o esboço do hidrociclone utilizado nesse trabalho. O hidrociclone continha uma barra central para que fosse possível a aplicação de diferença de potencial e o material particulado utilizado foi a sílica. Concluiu-se que houve um decréscimo no diâmetro de corte de até 50% em relação ao equipamento em que não se utilizava diferença de potencial, sendo que a melhor configuração foi aplicar um potencial positivo na parede externa do hidrociclone e um potencial negativo na barra de metal central. Ainda é reportado na literatura (PRATARN et al., 2008), outro trabalho deste grupo dando continuidade aos estudos, avaliando a influência do pH da suspensão de sílica alimentada ao equipamento, do diâmetro da barra central, bem como o fato da presença ou ausência da corrente de *underflow* (para esta configuração de hidrociclone, a coleta do produto que era descarregado por essa saída era feita em batelada) no diâmetro de corte das partículas

de um hidrociclone “elétrico”.

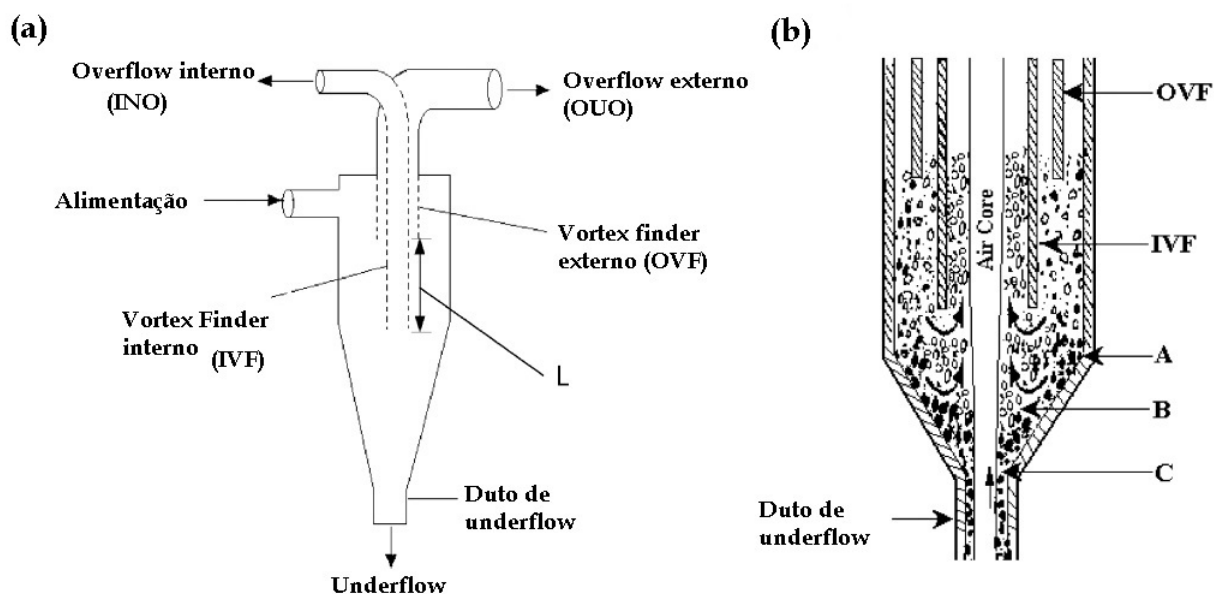


Figura 2.6: (a) Esquema de um hidrociclone com três correntes de produto. (b) Corte transversal do equipamento mostrando características internas e regiões (A, B, C) nas quais é mais provável encontrar um tipo de partícula (OBENG; MORRELL, 2003).

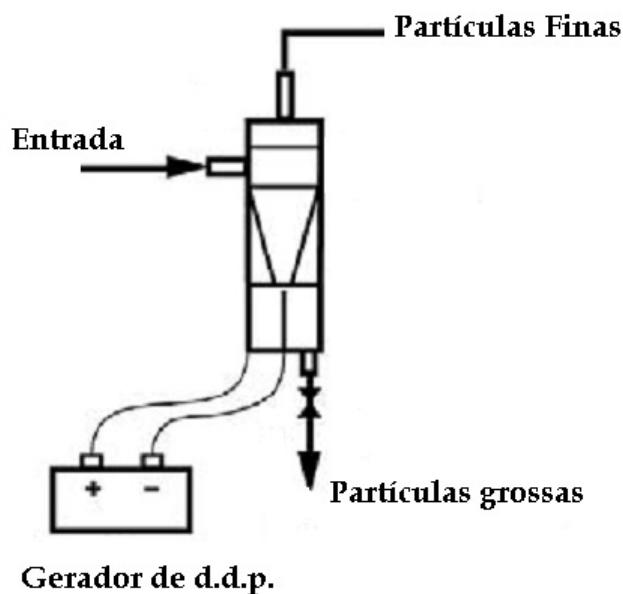


Figura 2.7: Hidrociclone “elétrico” desenvolvido por Pratarn et al. (2005).

A literatura igualmente reporta outros tipos de hidrociclones não convencionais, como exemplo o que tenta a eliminação do *air core* pela inserção de uma barra de metal no eixo central do equipamento (CHU et al., 2004; EVANS et al., 2008) sempre com intuito de alavancar o desempenho do equipamento frente ao equipamento convencional de mesma geometria. A próxima seção apresenta os trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia -LSP/FEQUI/UFU, com intuito de seguir essa linha empreendedora de equipamentos não convencionais.

2.5.1 Hidrociclones Filtrantes

Visto que a busca por mudanças no hidrociclone objetivando a melhora de seu desempenho era uma tendência, o grupo de pesquisa do LSP/FEQUI/UFU - propôs um a construção de um novo equipamento denominado de hidrociclone filtrante, que se diferencia do convencional pela substituição da parede cônica maciça por uma outra constituída de um meio poroso. Nesse equipamento há o surgimento de mais uma corrente, a de filtrado, que diferentemente das outras correntes, não contém partículas, somente fluido. Outra característica do equipamento é que não há formação de torta devido à presença de forças de cisalhamento intensas no interior do equipamento, geradas pelo escoamento helicoidal.

Esse equipamento foi inspirado pelos trabalhos de Damasceno e Massarani (1986) e Henrique et al. (1987), que incorporaram uma fundo filtrante ao sedimentador convencional. Puderam observar que houve um decréscimo da área requerida para sedimentação, gerando interesse por essa modificação aplicadas a outros separadores.

Os trabalhos com hidrociclones começaram com Lanna et al. (1992) que propuseram a inserção de uma parede cônica filtrante constituída de tecido nylon em um hidrociclone segundo a geometria Bradley. Esse possuía o diâmetro da parte cilíndrica igual a 3 cm e foram utilizados três tamanhos de diâmetro de *underflow* iguais a 3, 4 e 5 mm. O carbonato de cálcio e a barita foram os materiais particulados eleitos para realização desse estudo. Por fim, o equipamento foi operado em uma faixa de queda de pressão entre 0,55 e 2,25 kgf/cm² aproximadamente.

Pôde-se observar que este equipamento apresentou algumas vantagens em relação ao equipamento convencional, como acréscimo tanto da vazão de alimentação quanto da concentração de sólidos na corrente de *underflow* e decréscimo dos valores para o número de Euler, que se relaciona com o consumo energético do processo. Contudo, observou-se que houve diminuição da eficiência total e aumento do diâmetro de corte reduzido.

Por meio da sistemática de Massarani (1989) para hidrociclones convencionais, encontraram-se os seguintes resultados referentes ao hidrociclone estudado por Lanna et al. (1992), apresentados pelas Equações 2.10 e 2.11.

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

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

Vieira (1997) deu continuidade aos estudos com hidrociclones filtrantes de mesma geometria daqueles estudados por Lanna et al. (1992), realizando somente a mudança do meio filtrante utilizado na parede da seção cônica, isto é, a substituição de um meio filtrante constituído de tecido de nylon por um meio poroso manufaturado com polipropileno. O material utilizado nesta fase foi o sulfato de bário (barita).

O hidrociclone com meio poroso de polipropileno obteve resultados semelhantes àqueles apresentados pelo hidrociclone cuja parede cônica era formada pelo meio filtrante de nylon, havendo mudança somente quanto à ordem de grandeza. Analogamente ao trabalho anterior, utilizou-se a sistemática de Massarani (1989) para propôr as Equações 2.12, 2.13 e 2.14.

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

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

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

Tais equações utilizando a metodologia de Massarani (1989) não continham a resistência do meio filtrante, o que as tornava restrita para o caso dos hidrociclones filtrantes.

Dessa maneira, Souza (1999) propôs o desenvolvimento de uma metodologia para os hidrociclones filtrantes da geometria Bradley que incorporasse a resistência do meio filtrante, com intuito de contabilizar os efeitos da mesma. Nesse trabalho realizou testes com outros dois tipos de meio filtrantes constituídos de partículas de bronze sinterizado, utilizando como material particulado o pirocloro. Os testes foram realizados nas mesmas condições experimentais do equipamento convencional e tinha como objetivo incorporar ao equacionamento tradicional com a presença de grupos adimensionais, as características da filtração como resistência do meio poroso (R_m) e resistividade da torta (α). Esta não mostrou ter muita influência devido ao fato de existirem altas forças cisalhantes dentro do equipamento impedindo, dessa maneira, a formação da torta. Após obter uma quantidade significativa de dados experimentais, Souza (1999) pôde obter uma expressão que previsse de maneira satisfatória o desempenho de hidrociclones filtrantes segundo a geometria Bradley. As Equações de 2.18 a 2.15 são resultado desse estudo.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,0640 \pm 0,0042) \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} (1 - R_L)^2 \quad (2.15)$$

$$R_L = \frac{1}{1,69 - 8,6610^{-6}(R_m D_c)^{0,5}} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{\exp(-0,69 + 1,06 \cdot 10^{-21}(R_m D_c)^2)} \quad (2.16)$$

$$Eu = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{Eu_{conv}}} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{8\rho}{\mu\pi^2 D_c^4}} f(R_m) \right)} \quad (2.17)$$

$$Q = Q_{conv} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{(-\Delta P)}{\mu\pi^2 \cdot D_c^4}} f(R_m) \quad (2.18)$$

$$f(R_m) = \frac{2\pi \cdot \varepsilon (L - L_1)}{R_m \ln \left(1 + \frac{4\varepsilon}{D_c + D_u} \right)} \quad (2.19)$$

Souza (1999) verificou que para os hidrociclones filtrantes segundo a geometria Bradley apresentaram maiores vazões que os hidrociclones Bradley de geometria convencional. Por conseguinte, observou que houve um decréscimo do número de Euler e que esta grandeza

estava relacionada com a resistência do meio filtrante como mostra a Equação 2.17.

Pode ser observado que a razão de líquido aumentava à medida que era incrementada a resistência do meio filtrante. Creditou-se esse fato ao efeito de migração de corrente existente nos hidrociclones filtrantes. Acreditou-se que a saída da corrente de filtrado poderia interferir nos perfis dos vórtices internos gerados pela turbulência, modificando assim a relação entre os volumes que deixavam o hidrociclone pelas correntes de *overflow* e *underflow* que compunham esses vórtices. Dessa forma, para um meio filtrante de baixa resistência, esse efeito seria mais pronunciado, intensificando o processo de mistura acarretando um maior volume de suspensão direcionada para a corrente de *overflow*. Por conseguinte, haveria diminuição da razão de líquido já que os volumes direcionados para o orifício de *underflow* seria menor. Devido à migração de corrente do vórtex externo para o vórtex interno, e consequente diminuição da razão de líquido, haveria um arraste mais intenso das partículas no sentido da corrente de *overflow*. E isso foi a sugestão de Souza (1999) para o aumento dos diâmetros de corte obtidos na operação dos hidrociclones filtrantes da família Bradley.

Posteriormente, Vieira (2001) realizou estudos com a finalidade de analisar a influência do meio filtrante em hidrociclones da família Rietema. Nesta fase, foram utilizados três cones porosos com diferentes permeabilidades e confeccionados de bronze sinterizado, sendo que os hidrociclones foram submetidos às mesmas condições experimentais que os hidrociclones Bradley estudados por Lanna et al. (1992) e Souza (1999).

Foi observado por Vieira (2001) que a razão de líquido do hidrociclone filtrante sofria incrementos em relação ao equipamento convencional, culminando em correntes de *underflow* mais diluídas. E devido a esse fato, mantendo as mesmas vazões de alimentação do hidrociclone convencional, constatou-se que houve decréscimo do diâmetro de corte e, por consequência, aumento da eficiência de coleta do equipamento.

No entanto, diferentemente do que foi encontrado para os hidrociclones filtrantes segundo a geometria Bradley, os da geometria Rietema apresentaram acréscimos do número de Euler nas mesmas condições de queda de pressão que o equipamento convencional. Dessa maneira, percebeu-se que o tamanho do tronco de cone filtrante exercia considerável influência no processo de separação sólido-líquido em hidrociclones filtrantes. Utilizando a sistemática de Massarani (1989) e a metodologia de Souza (1999) que incorporou a resistência do meio filtrante às equações que descreviam o desempenho do hidrociclone, Vieira (2001) obteve as seguintes equações empíricas:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,036 \pm 0,001) \left[\frac{\mu D_c}{Q (\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + (0,51 \pm 0,12) R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.20)$$

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

$$R_L = \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{1,66 \pm 0,07} (R_m D_c)^{0,092 \pm 0,006} \quad (2.22)$$

Prosseguindo os estudos com hidrociclones filtrantes, Arruda et al. (2002) estudaram hidrociclones filtrantes da família Krebs, nos quais o ângulo do tronco de cone era $\theta = 12,7^\circ$, valor intermediário aos dos hidrociclones Bradley ($\theta = 9^\circ$) e Rietema ($\theta = 20^\circ$). Foi verificado que a incorporação de uma matriz filtrante pouco modificou o desempenho desse equipamento frente a sua versão convencional. Para o hidrociclone filtrante Krebs encontraram-se valores de número de Euler próximos àqueles obtidos para os equipamentos filtrantes de geometria Rietema. Contudo, dentre as três famílias estudadas, Bradley, Rietema e Krebs, o último foi o que apresentou menores valores para diâmetros de corte reduzido, devido aos altos valores de razão de líquido obtidos.

Arruda et al. (2002), então, propuseram as seguintes equações empíricas para os hidrociclones filtrantes da família Krebs, apresentadas pelas Equações 2.25, 2.24 e 2.23.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,0295 \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + 1,307 R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.23)$$

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

$$R_L = \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{0,9678} (R_m D_c)^{-0,0450} \quad (2.25)$$

Arruda (2003) ainda estudou hidrociclones filtrantes da família Demco, equipamentos que possuem a parte cônica de mesma dimensão que os da família Rietema. Percebeu-se que a inclusão de uma parede cônica filtrante não resultou em modificações expressivas no desempenho deste equipamento frente ao hidrociclone Demco convencional, analogamente ao observado nos hidrociclones filtrantes segundo a geometria Krebs e contrário ao que se

encontrou para as geometrias Bradley e Rietema.

Verificou-se, neste estudo, que os hidrociclones filtrantes Demco registraram os menores valores para a razão de líquido e os menores números de Euler dentre todos os hidrociclones já estudados. Sugeriu-se que esse equipamento seria melhor empregado em processos de concentração.

Por fim, Arruda (2003), à luz de todos os dados já obtidos para os hidrociclones filtrantes (Bradley, Rietema, Krebs e Demco), propôs equações empíricas de projeto de hidrociclones baseado na abordagem de Coelho e Medronho (2001), representadas pelo rol de equações a seguir.

$$d'_{50} = \frac{5,072D_c^{1,351}}{D_c^{0,263}(L-l)^{1,251}} \left[\frac{\mu\rho Q}{(\rho_s - \rho)} \right] \left[\ln \left(\frac{1}{R_L} \right) \right]^{0,373} e^{(8,438C_v)} \quad (2.26)$$

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

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

$$Stk_{50} Eu = 0,0055 \left(\frac{D_c}{D_o} \right)^{0,0075} \left(\frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,921} \left[\ln \left(\frac{1}{R_L} \right) \right]^{1,417} \exp(-2,264C_v) \quad (2.29)$$

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

Neste contexto, Vieira (2006) propôs, em sua tese de doutorado, encontrar uma geometria para um hidrociclone filtrante que combinasse as vantagens de diminuição de número de Euler e aumento da eficiência de coleta (ou diminuição do diâmetro de corte). Dessa maneira, desenvolveu um estudo que empregou as relações geométricas que abrangeram toda faixa das famílias utilizadas comercialmente.

Nesse trabalho foi avaliada a influência do diâmetro de alimentação (D_a), do diâmetro do orifício de *overflow* (D_o), do comprimento total do hidrociclone (L) e da abertura do tronco de cone (θ). Foi utilizado um diâmetro da parte cilíndrica de $3 \cdot 10^{-3}$ m com l e D_u fixos nos valores de $1,2 \cdot 10^{-2}$ e $5 \cdot 10^{-3}$ m, respectivamente. Por meio de um planejamento composto central, com 4 réplicas no centro, obteve-se uma matriz de experimentos que culminou na construção de 25 hidrociclones filtrantes, e para fins de comparação, outros 25 equipamentos convencionais de mesma geometria foram estudados. Como foram feitos inúmeros experimentos, a viabilização dos mesmos ocorrera pois as partes dos hidrociclones foram construídas de maneira modular, ou seja, separadamente e posteriormente acopladas. Os cones filtrantes foram construídos de bronze sinterizado. A Tabela 2.3 mostra o planejamento experimental do trabalho de Vieira (2006).

Tabela 2.3: Matriz de planejamento para confecção dos hidrociclones e realização dos experimentos (VIEIRA, 2006).

Configuração	D_a/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
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	0,21	0,27	5,8	14,5

Além dessa extensa parte experimental, Vieira (2006) lançou mão de técnicas de flui-

dodinâmica computacional (CFD), com intuito de obter melhor entendimento sobre o escoamento no interior do equipamento e formular as hipóteses que explicariam o desempenho de cada configuração. A metodologia de simulação numérica foi validada com dados da literatura (DABIR, 1983), que apresentavam perfis de velocidade radial e tangencial para diferentes números de Reynolds e posições axiais, por meio da técnica LDA (*Laser Doppler Anemometry*). A Figura 2.8 mostra os dados simulados por Vieira (2006) e aqueles apresentados por Dabir (1983).

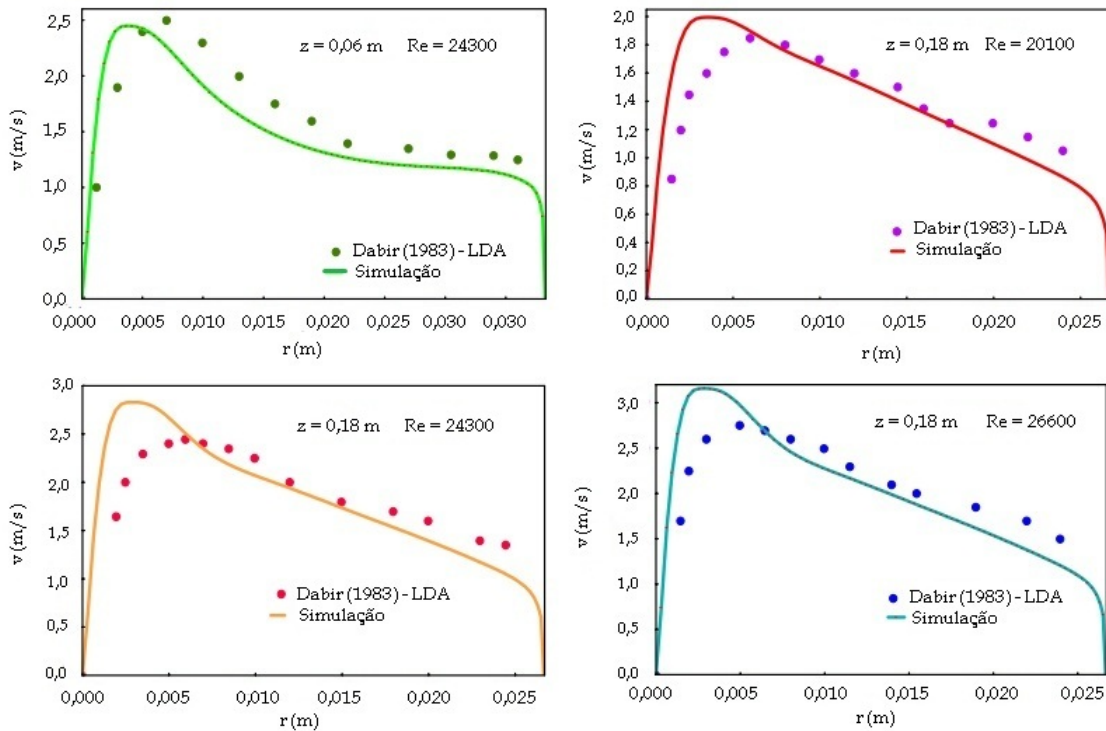


Figura 2.8: Perfis de velocidade tangencial simulados por Vieira (2006) via CFD em comparação com os dados experimentais de Dabir (1983) para diferentes posições axiais (z) e números de Reynolds (Re).

Pode-se observar na Figura 2.8, que os dados simulados por Vieira (2006) apresentaram boa concordância com aqueles encontrados por Dabir (1983) e dessa maneira, pôde-se validar a metodologia de simulação. Após tal validação, Vieira (2006) partiu para a análise da influência do diâmetro da alimentação (D_a), diâmetro de *overflow* (D_o), do comprimento do hidrociclone (L) e da abertura do ângulo do tronco de cone (θ) para os hidrociclones filtrantes segundo o planejamento experimental apresentado pela Tabela 2.3.

Vale ressaltar que ao analisar a influência de uma variável sobre o escoamento interno do hidrociclones, todas as demais foram mantidas constantes. Nesse contexto, foi observado que o incremento do diâmetro de alimentação (D_a) proporcionou o aumento da

capacidade de processamento, culminando, dessa maneira, em um menor custo energético de bombeamento para uma mesma queda de pressão ($1,5 \text{ kgf/cm}^2$). No entanto, para essas condições, a eficiência de coleta não apresentou mudanças significativas, pois, como mencionado, mesmo que o aumento do diâmetro proporcionasse um aumento da componente tangencial da velocidade do fluido, esse incremento também resultou em uma mudança da componente radial da velocidade que não contribuiu para o processo de coleta das partículas.

Para o diâmetro de *overflow* (D_o) o aumento do mesmo resultou em majoração da capacidade de processamento, também seguida pelo decréscimo dos custos de bombeamento do processo. Entretanto, pôde-se observar que o aumento não foi benéfico para a eficiência de coleta, devido ao fato de que houve uma queda significativa da eficiência de separação, tal fenômeno explicado pelas mudanças do perfil de velocidades radial e tangencial no equipamento. O hidrociclone filtrante com menor diâmetro de *overflow* apresentou maiores velocidades tangenciais e menores velocidades radiais para uma mesma posição o que facilitaria o deslocamento das partículas até a parede para posteriormente serem coletadas no orifício de *underflow*. Por outro lado, as maiores velocidades radiais, que sugeria haver um deslocamento mais intenso das partículas até o vórtice interno existente no equipamento, foram obtidas para o hidrociclone filtrante com maior diâmetro de *overflow*.

Por sua vez, o aumento do comprimento do hidrociclone teve influência somente sobre a capacidade de processamento do equipamento já que para maiores valores de comprimento do hidrociclone foram obtidas as maiores vazões de alimentações para uma queda de pressão e, por conseguinte, um menor consumo energético de bombeamento representado pelos menores números de Euler obtidos. Em relação aos perfis de velocidade, essa variável quase não apresentou influência, bem como para a performance de separação do equipamento.

Finalmente, verificou-se que o ângulo do tronco de cone não exerceu influência significativa sobre a capacidade de processamento do equipamento, pois para as mesmas condições de simulação, os pares estudados obtiveram números de Euler parecidos. Em relação à eficiência de separação, os menores ângulos de cone obtiveram maiores valores para a mesma, fato sugerido pela diferença entre as velocidades radiais dos equipamentos com menor e maior ângulo de abertura. Para o último, a componente radial, foi mais intensa, indicando um maior direcionamento das partículas para a vórtice interno do equipamento, não sendo coletadas, dessa maneira, no *underflow*.

Como o trabalho de Vieira (2006) também teve caráter experimental, e como mencionado anteriormente, foram utilizadas técnicas de análise de superfície de resposta para avaliar a influência das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones filtrantes. Sendo assim, as Equações de 2.31 a 2.34 são apresentadas a fim de ratificar as análises

realizadas. Vale ressaltar que as variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 representam, respectivamente, os fatores D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c e θ . Por sua vez, X_5 relaciona-se com a queda de pressão.

$$Eu = 1607 - 1176X_1 - 283X_2 - 183X_3 + 85X_5 + 604X_1^2 + 112X_2^2 \quad (2.31)$$

$$R_L = 21,14 - 7,21X_2 + 1,47X_3 - 4,26X_4 + 1,96X_3X_4 + 3,36X_2^2 \quad (2.32)$$

$$\eta = 65,18 - 4,94X_2 - 5,23X_4 + 2,05X_5 + 1,28X_2^2 \quad (2.33)$$

$$d_{50} = 5,17 + 1,61X_2 + 1,12X_4 - 0,41X_5 + 0,33X_2X_4 - 0,49X_2^2 \quad (2.34)$$

Ainda nesse trabalho, Vieira (2006) propôs a otimização do hidrociclone filtrante, com intuito de reunir, em um mesmo equipamento, alta eficiência de separação e baixo número de Euler. Após análise dos resultados (experimentais e simulados), comparando o equipamento filtrante com o convencional, encontrou que a configuração de número 11 (vide Tabela 2.3) foi a que apresentou essas características desejadas. A Figura 2.9 apresenta os resultados de número de Euler e Eficiência Total (η) para os 25 equipamentos filtrantes e o número 11 está em destaque. As relações geométricas deste hidrociclone são dadas pela Tabela 2.4

Tabela 2.4: Relações geométricas para o hidrociclone otimizado proposto por Vieira (2006).

D_a/D_c	0,26
D_o/D_c	0,22
L/D_c	6,9
θ	11,2°

Almeida (2007), dando continuidade ao trabalho de Vieira (2006) estudou a influência do comprimento do *vortex finder* (l) e do diâmetro de *underflow* para os hidrociclone filtrante com geometria otimizada encontrada no trabalho supracitado. Foram utilizados 3 comprimentos de *vortex finder* iguais a 12, 21 e 30 mm, bem como 3 valores para diâmetros

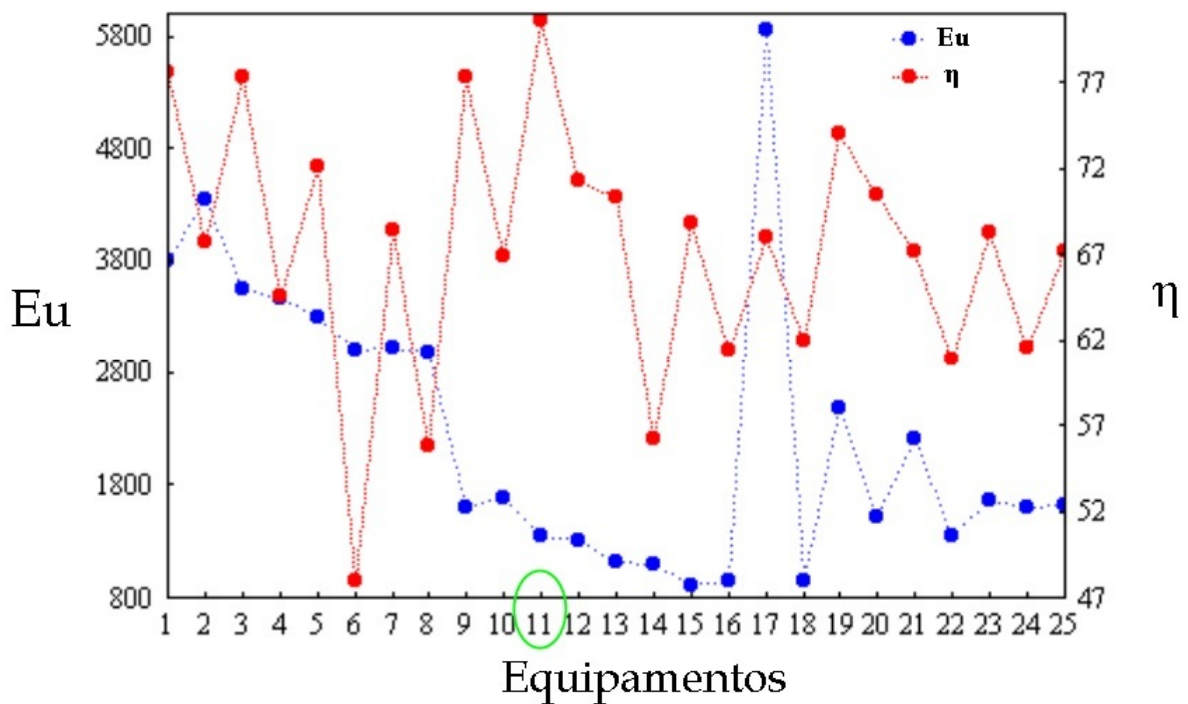


Figura 2.9: Comparação dos dados de Euler e Eficiência de Separação experimentais para os hidrociclones filtrantes à pressão de 147 kPa (VIEIRA, 2006)

de *underflow* iguais a 3, 4 e 5 mm. Tais artefatos foram confeccionados também em separado, para que a cada experimento, a peça de interesse fosse acoplada ao hidrociclone. O material particulado utilizado para realização desses experimentos foi a rocha fosfática obtida junto à Fosfertil de Patos de Minas. Os experimentos foram realizados segundo um planejamento em três níveis para avaliação cuidadosa da influência de cada variável e da combinação entre elas. No mesmo trabalho, foram realizados estudos de CFD para melhor entendimento dos fenômenos envolvendo o escoamento interno dos equipamentos estudados.

Foi observado por Almeida (2007) que, independentemente das combinações dos diâmetros de *underflow* e de comprimento do *vortex finder*, a filtração apresentou sempre ser benéfica para o desempenho de hidrociclones quando avaliada a capacidade de processamento destes equipamentos. Para todas as combinações, a filtração majorou a capacidade de alimentação, seguido da queda do número de Euler, ligado aos custos de bombeamento do processo. Tal comportamento foi igualmente percebido para o potencial de separação. Isto é, independentemente da configuração de D_u e l , o hidrociclone filtrante foi aquele cujo potencial de separação foi maior, levando-se em conta os diâmetros de corte obtidos.

Levando em conta somente o hidrociclone filtrante e analisando a influência das variáveis estudadas, l e D_u , Almeida (2007) verificou que o aumento do comprimento do

tubo de *vortex finder* resultou no incremento dos valores de número de Euler, e sugeriu que isso era devido a uma maior resistência ao escoamento devido a presença do *vortex finder*. E tal tendência foi observada para todos os diâmetros de *underflow* estudados. Outra variável analisada em seu estudo foi o diâmetro de corte e verificou-se que essa variável apresentou valores mínimos, e por consequência, maiores valores de eficiência de separação, para valores intermediários de comprimento do *vortex finder*. Sugeriu-se que um valor intermediário seria mais benéfico, pois ajudaria a interromper dois fenômenos existentes no escoamento interno, o de curto-circuito (quando partículas da alimentação migram diretamente para o orifício de *overflow*) para o caso de menores comprimentos e o fenômeno de migração das partículas do *vortex* externo para o interno, que supostamente aconteceria quando se tivesse maiores comprimentos de *vortex finder*. Ainda, verificou-se que o comprimento deste aparato não teve influência sobre a razão de líquido do equipamento.

Prosseguindo com as análises, Almeida (2007) verificou que para menores diâmetros de *underflow* obtiveram-se os maiores valores para número de Euler, indicando que para pequenos diâmetros havia maior resistência ao escoamento da suspensão no interior do equipamento. Dessa forma, sugeriu-se que para diminuição de gastos energéticos se utilizasse hidrociclones com maiores diâmetros de *underflow*. E esse comportamento foi verificado para todos os comprimentos de *vortex finder* estudados. Se, para o número de Euler, o diâmetro de *underflow* teve uma influência suave nos resultados, para a razão de líquido a influência foi significativa. Verificou-se que com a diminuição do mesmo, as restrições impostas ao escoamento realmente seriam maiores, o que direcionaria, preferencialmente, a suspensão para o orifício de *overflow* resultando na queda expressiva dos valores de razão de líquido obtidas. Como consequência do arraste dessas partículas em direção ao orifício de *underflow*, foi encontrado para maiores D_u , menores diâmetros de corte, o que implica em um maior poder de separação para o hidrociclone que tenha essas características.

Nesse contexto, visto que o hidrociclone de parede cônica filtrante com geometria otimizada apresentou melhor desempenho que o equipamento convencional nessa mesma geometria, a necessidade de investigar como a mudança da parede filtrante da seção cônica para a seção cilíndrica surgiu e o próximo capítulo tem como objetivo apresentar os materiais e metodologia utilizada para realizar tal estudo.