

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
LABORATÓRIO DE PESQUISA EM FLUIDODINÂMICA E IMAGEM**

**“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FLUIDODINÂMICA DE UM  
HIDROCICLONE APLICADO NA SEPARAÇÃO  
ÓLEO/ÁGUA”**

**ANDRÉA MARIA BRANDÃO MENDES SIMÕES**

**Campina Grande – Paraíba  
Setembro de 2005**

# **“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FLUIDODINÂMICA DE UM HIDROCICLONE APLICADO NA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA”**

**Andréa Maria Brandão Mendes Simões**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: **Operações e Processos**

Orientador: **Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**

**Campina Grande-Paraíba**

**Setembro de 2005**

**“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FLUIDODINÂMICA DE UM HIDROCICLONE  
APLICADO NA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA”**

**Andréa Maria Brandão Mendes Simões**

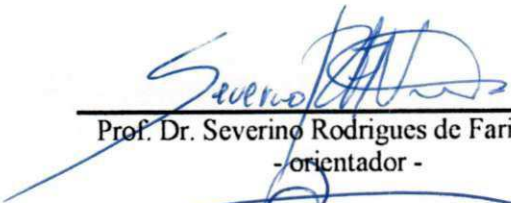
Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**

Especialidade Engenharia de Operações e Processos e aprovada em sua  
forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Química


No dia 15 de Setembro de 2005.

**BANCA EXAMINADORA**



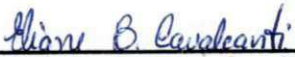
---

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
- orientador -



---

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
- examinador -



---

Prof.<sup>a</sup>.Dr.<sup>a</sup> Eliane Bezerra Cavalcanti  
- examinadora -

*Dedico este trabalho á minha família,  
em especial á minha mãe Maria José por todo  
amor e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e Nossa Senhora das Graças por estarem sempre ao meu lado iluminando os meus passos e por atenderem minhas preces, me enchendo de força e coragem para continuar meu caminho.

Aos meus pais Mário e Maria José, que sempre me apoiaram de forma incondicional e me impulsionaram adiante.

Aos meus irmãos Altair e Adriana, em especial a Adriana por todo carinho e apoio durante todo este tempo.

Ao meu amado esposo William por toda a compreensão, carinho e paciência.

Ao Professor Severino pela orientação, dedicação e grande ajuda na conclusão bem sucedida deste trabalho.

À todos os amigos, em especial à Gorethe pelo ombro amigo e pelo mês de Janeiro dentro do laboratório, à Josi por tamanha generosidade, à Fabiana por toda ajuda, a Enivaldo pelas aulas particulares, à Luis e à Elba pelas pelo apoio, à Cláudia pelas palavras de incentivo e pelos momentos de distração.

Ao CNPQ e a CAPES pelo suporte financeiro para a boa execução deste trabalho.

Ao Professor Antonio Gilson pela concessão de utilização do CFX Post versão 5.5 para obtenção dos resultados.

## RESUMO

Um dos grandes problemas das indústrias é o tratamento de seus efluentes antes de despejá-los no meio ambiente. Uma parte destes efluentes é constituída de emulsões de óleo e água. A indústria petrolífera se destaca entre elas, pelo fato dos produtos orgânicos provenientes do petróleo serem bastante prejudiciais e o seu descarte só pode ser feito dentro de determinadas especificações regulamentadas pelo CONAMA que limita o teor de óleos e graxas em efluentes em 20 mg/l. Portanto, torna-se necessário efetuar um tratamento destes efluentes. Diferentes processos de separação óleo/água são aplicados pela indústria do petróleo, dentre os quais se destaca o hidrociclone em virtude de sua alta capacidade de processamento, por não requerer praticamente nenhuma manutenção e pelo baixo tempo de residência do fluido. Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar a influência da intensidade turbilhonar sobre a eficiência de separação em um hidrociclone, bem como por em evidência o caráter assimétrico e tridimensional do escoamento turbilhonar induzido por uma entrada tangencial de seção quadrada neste dispositivo. Os resultados numéricos obtidos com auxílio do pacote comercial CFX 4.4 mostraram que a eficiência total de separação depende da intensidade turbilhonar induzida pela entrada tangencial e pressão na seção reta do duto de alimentação. Esta dependência mostrou ser mais acentuada para valores do número de Reynolds entre 150 e 1800. Já para valores superiores a 1800, esta dependência é pequena em função da intensidade turbilhonar e constante com a pressão de alimentação. Os resultados das análises hidrodinâmica do hidrociclone confirmaram o caráter assimétrico e tridimensional a qual o escoamento do fluido está submetido neste tipo de dispositivo.

## ABSTRACT

One of the great problems of the industries is the treatment of its effluent ones before pouring them in the environment. A part of these effluent ones is constituted of emulsions of oil and water. The petroliferous industry if detaches among them, by the fact of the organic products proceeding from the oil to be sufficiently harmful and its discarding alone it can be made inside of determined specifications regulated for the CONAMA that limits the text of oils and greases in effluent in 20 mg/l. Therefore, one becomes necessary to effect a treatment of these effluent ones. Different processes of separation óleo/água are applied by the industry of the oil, amongst which if high capacity of processing detaches hidrociclone in virtue of its, for practically not requiring no maintenance and the low time of residence of the fluid. In this direction, this objective work to evaluate the influence of the intensity to turbilhonar on the efficiency of separation in one hidrociclone, as well as for in evidence the anti-symmetrical and three-dimensional character of the draining turbilhonar induced for a tangential entrance of square shaped section in this device. The numerical results obtained with aid of the commercial package CFX 4.4 showed that the gross efficiency of detachment depends on the intensity turbilhonar prompted by the entrance tangencial and pressure in the seção straight of the duto of food. This dependence showed to be more accentuated for values of the number of Reynolds between 150 and 1800. Already for superior values the 1800, this dependence is small in function of the intensity to turbilhonar and constant with the feeding pressure. The results of the analyses hydrodynamics of hidrociclone had confirmed the anti-symmetrical and three-dimensional character which the draining of the fluid is submitted in this type of device.

## **Lista de Figuras**

Figura 1	Ciclone típico	12
Figura 2	Linhas de fluxo	13
Figura 3	Diagrama da velocidade tangencial	16
Figura 4	Perfil da velocidade tangencial do vórtice Rankine	16
Figura 5	Diagrama da velocidade axial	17
Figura 6	Hidrociclone de Colman e Thew	24
Figura 7	Malha estruturada	33
Figura 8	Malha não estruturada	33
Figura 9	Seqüência esquemática do CFX- Build para a construção da geometria	35
Figura 10	Malha multibloco	37
Figura 11	Dimensões características do hidrociclone	43
Figura 12	Definição do ponto 1	45
Figura 13	Criação da curva 1	45
Figura 14	Criação da circunferência para construção do “vortex finder”	46
Figura 15	Superfície usada na confecção do “vortex finder”	46
Figura 16	Criação da circunferência para criação da seção cilíndrica do hidrociclone	47
Figura 17	Criação das superfícies II, III, IV e V	47
Figura 18	Criação da superfície superior do duto de entrada	48
Figura 19	Sólido criado ate a altura da entrada	48
Figura 20	Sólido construído ate a altura do “vortex finder”	49
Figura 21	Criação dos corpos cilindro e cônico do hidrociclone	49
Figura 22	Geometria referente ao hidrociclone Bradley	50
Figura 23	Pontos de refinamento	51
Figura 24	Posições axiais ao longo do hidrociclone	55
Figura 25	Linhas de fluxo para Re	60
Figura 26	Linhas de fluxo para Re	61
Figura 27	Linhas de fluxo para Re	62
Figura 28	Iso- superfícies de pressão	64



Figura 29	Iso- superfícies de pressão	65
Figura 30	Posições angulares	66
Figura 31	Componente adimensional da velocidade axial	67
Figura 32	Componente adimensional da velocidade tangencial	68
Figura 33	Campo vetorial de velocidade sobre o plano YZ	71
Figura 34	Campo vetorial de velocidade sobre o plano XZ	72
Figura 35	Intensidade turbilhonar x Re	73
Figura 36	Intensidade turbilhonar x Re	74
Figura 37	Intensidade turbilhonar media x Reynolds	75
Figura 38	Eficiência x Intensidade turbilhonar media	77
Figura 39	Eficiência total x Pressão adimensional	78

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1	Arquivos utilizados e gerados pelo CFX	36
Tabela 2	Dimensões do hidrociclone	44
Tabela 3	Seleção das curvas para a criação das superfícies II, III, IV e V	47
Tabela 4	Valores utilizados para o refinamento	52
Tabela 5	Características do problema	53
Tabela 6	Valores do numero de Reynolds	55

# ÍNDICE

---

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Introdução	1
Motivação pelo tema	3
CAPÍTULO 1 - Revisão Bibliográfica.....	7
1.1    Poluição por petróleo .....	7
1.2    Água proveniente da produção de petróleo .....	9
1.3    Equipamentos de separação .....	10
1.4    Ciclones/Hidrociclones .....	12
1.4.1    Fatores que influenciam no desempenho do hidrociclone .....	16
1.4.2    Campos de velocidade.....	21
1.4.3    Forças Interfaciais .....	17
1.4.4    Intensidade turbilhonar.....	23
1.4.5    Eficiência de separação .....	26
CAPÍTULO 2 - Fluidodinâmica Computacional .....	29
2.1    Fluidodinâmica Computacional .....	29
2.2    Método dos volumes finitos.....	32
2.3    Malha .....	34
2.4    Aplicativo computacional .....	36
2.4.1    CFX.....	36
2.4.2    Modelos matemáticos.....	39
CAPÍTULO 3 - Metodologia .....	45
3.1    Descrição do hidrociclone .....	45
3.2    Criação da geometria .....	46
3.2.1    Definição das fronteiras .....	52
3.3    Geração da malha.....	53
3.4    Definição do problema.....	54
3.5    Cálculo do número de Reynolds.....	56
3.6    Cálculo da intensidade turbilhonar .....	57
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	60
4.1    Análise da hidrodinâmica do escoamento turbilhonar associado a uma entrada tangencial no hidrociclone .....	60
4.1.1    Análise qualitativa do escoamento.....	60
4.1.2    Análise quantitativa do escoamento .....	68

Conclusão .....	81
-----------------	----

## INTRODUÇÃO

---

A água proveniente do processo de produção de petróleo contém um teor residual de óleo bem acima dos padrões especificados pela legislação ambiental para o seu descarte no meio ambiente. Segundo a resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) do ano de 2005, o conteúdo de óleo para descarte em efluentes aquosos não deve exceder o valor de 20 mg/l, sendo necessário tratamento prévio destes efluentes, em planta de processo, antes de lançá-los diretamente ao mar.

A indústria petrolífera está se esforçando para a melhoria da qualidade da água descartada em alto mar, de modo a enquadrá-la nas normas ambientais. Para isto estão sendo utilizados diversos equipamentos para a separação óleo/água. Dentre estes destacam-se os separadores que utilizam a força centrífuga. A performance deste tipo de separação depende de alguns fatores: capacidade de processamento, tamanho das gotas, temperatura, diferença de densidade, tensão interfacial e viscosidade, sendo esta última um fator primordial para separação água-óleo (NORDIVK *et al.*, 1996). Neste contexto, pode-se citar como exemplo o hidrociclone, o qual visa acelerar a recuperação do resíduo de óleo através de separação gravitacional. A água oleosa é introduzida, sob pressão, tangencialmente no trecho de maior diâmetro do hidrociclone, sendo direcionada internamente em fluxo espiral em direção ao trecho de menor diâmetro. Este fluxo é acelerado pelo contínuo decréscimo de diâmetro, criando uma força centrífuga que força os componentes mais pesados contra as paredes. Devido o formato cônico e o diferencial de pressão existente entre as paredes e o centro, ocorre, na região central do equipamento, um fluxo axial reverso. A fase líquida central contendo óleo em maior concentração é denominada de rejeito.

Diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo, experimental e numérico, de hidrociclones visando de uma maneira geral, assegurar uma melhor eficiência de separação por meio de modificações nos aspectos geométricos tais como: diâmetro do corpo cilíndrico, forma do duto de entrada (cilíndrica; retangular), alimentação tangencial ou axial (este último com dispositivos geradores de escoamentos em espirais) e inclinação da seção cônica.

Neste sentido o objetivo deste trabalho é avaliar numericamente a influência da intensidade turbilhonar sobre a eficiência de separação em um hidrociclone, bem como por em evidência o caráter assimétrico e tridimensional do escoamento turbilhonar induzido por uma entrada tangencial de seção quadrada num hidrociclone.

## MOTIVAÇÃO PELO TEMA

---

Na produção de petróleo em campos marítimos utilizavam tradicionalmente sistemas baseados em tanques de sedimentação para separar óleo/água proveniente do poço. Estes tanques são volumosos, pesados e caros e somado ao elevado custo do metro quadrado de uma plataforma e o pouco espaço disponível, se faz mister desenvolver separadores mais compactos.

A separação é necessária devido à toxicidade do óleo, o que faz com que essa água seja poluente e se torne um perigo aos seres vivos presentes no mar, já que é lá que é descartada.

Os hidrociclones surgiram como alternativa eficiente e econômica para separação óleo/água por serem baratos, não possuem partes móveis, pela simplicidade em operá-lo, baixo custo de manutenção, por requererem um pequeno espaço para instalação quando comparado a outros dispositivos comumente utilizados para estes processos e, principalmente, por serem considerado de extrema importância em tarefas de combate a poluição.

A idéia da simulação via técnicas da fluidodinâmica computacional foi devido ao avanço dos computadores e das técnicas numéricas, especialmente do método dos volumes finitos que proporcionam análises de fenômenos que somente com técnicas empíricas e semi-empíricas seriam impossíveis de realizar.

# Capítulo 1: Revisão bibliográfica

**1.1** Poluição por petróleo

**1.2** Água proveniente da produção de petróleo

**1.3** Equipamentos de separação

**1.4** Ciclones/Hidrociclones

**1.4.1** Fatores que influenciam no desempenho do hidrociclone

**1.4.2** Forças interfaciais

**1.4.2.1** Força de arraste

**1.4.2.2** Força de massa virtual

**1.4.2.3** Força de sustentação

**1.4.2.4** Força de dispersão turbulenta

**1.4.2.5** Velocidade terminal

**1.4.3** Campos de velocidade

**1.4.4** Intensidade turbilhonar

**1.4.5** Eficiência de separação



# CAPÍTULO 1 - Revisão Bibliográfica

*“Se por um motivo muito grave você ficar em estado de ansiedade, faça um teste, deixe a ansiedade subir, subir, subir, até o limite máximo, até onde você não pode mais suportar. Neste momento, pense. O que poderia acontecer de pior? Pronto, você já começou a encontrar uma saída. Ao falar isto para você mesmo a sua força interior começa a agir no seu cérebro e o próximo passo é relaxar. A hora é difícil, mas o pior já passou, você já conseguiu se perguntar sobre o pior que lhe pode acontecer, agora basta encher o peito de ar e falar com segurança, assim você ganha metade do caminho e parte para a outra metade como vencedor”.*

*Paulo Balek*

## 1.1 Poluição por petróleo

O meio ambiente é hoje uma das principais preocupações do setor industrial e da sociedade em geral. No caso particular da indústria petrolífera esta preocupação é ainda maior. O petróleo, apesar da grande importância para economia mundial, é um dos produtos que mais causam desequilíbrio ambiental. A grande quantidade de óleo derramado nos oceanos é responsável pela morte de milhões de seres vivos como algas, plânctons, moluscos, peixes, entre outros. Isso têm sido uma ameaça permanente a integridade do ecossistema marinho.

Os problemas ambientais relacionados ao petróleo estão ligados ao transporte, armazenamento, refino e consumo de derivados. Com o aumento da produção de petróleo há uma possibilidade de acontecer vazamentos e derrames acidentais de petróleo em operações rotineiras; uma das causas pode ser o envelhecimento da frota mundial (cerca de 3000 navios tem mais de 20 anos) e a deficiente formação profissional das tripulações. Nas operações de lavagem dos tanques dos petroleiros em pleno oceano são derramados grandes quantidades de óleo, que normalmente originam autênticas marés negras. Embora, atualmente, tal operação em pleno mar seja proibida, os abusos continuam a serem cometidos devido à dificuldade de fiscalização apesar da existência de múltiplas instâncias jurídicas destinadas a proteção do meio marinho (CÂMARA *et al.*, 2002).

A presença de petróleo na água, por menor que seja a quantidade, tem conseqüências negativas. A conseqüência deste contato dependerá de um conjunto de fatores agravantes, como por exemplo, o volume e as propriedades do produto derramado, as condições meteorológicas durante o derrame (vento, agitação do mar, entre outras), a época do ano e a sensibilidade local. O problema não está no petróleo propriamente dito, mas em seus componentes, como por exemplo: a gasolina, benzina, nafta, querosene e diesel (gasóleo). Quando estes produtos entram em contato com a água pode ocorrer a dispersão, evaporação, dissolução, emulsificação, foto-oxidação e/ou biodegradação. Para o ambiente marinho, os piores contaminantes são os aromáticos, dentre os quais podem ser citados o gasóleo e benzeno, e os de alto peso molecular, tipo o alcatrão (que demoram muito tempo para se degradar naturalmente). Uma forma de avaliar o impacto causado pela presença do óleo na água é através da toxicidade dos constituintes e da quantidade de compostos orgânicos do petróleo. Normalmente é difícil quantificar a toxicidade, mas, de uma forma geral, a toxicidade dos componentes individuais resulta na toxicidade global, porém possíveis efeitos sinérgicos e/ou adicionais não podem ser desprezados (CARDIGOS, 2003; RIMA, 2003). Dada a alta complexidade da composição química do petróleo, o estudo de sua toxicidade é evidentemente difícil e influenciado por inúmeros fatores físico-químicos e biológicos, alguns dos quais alteram a concentração e/ou a estrutura química de seus componentes. Pesquisadores tais como GOODMAM (1983) e FERNANDES (2001) ressaltam os seguintes fatores:

- Evaporação – É um processo bastante importante, que ocorre assim que o óleo entra em contato com a água. A volatilidade de alguns hidrocarbonetos pode fazer com que de um a dois terços da massa do petróleo possam ser perdidas em um dia, dependendo da composição do petróleo, da temperatura, do grau de espalhamento, do regime de ventos, entre outras. A evaporação dos componentes mais voláteis faz com que sejam aumentadas a densidade e a viscosidade da mancha de óleo, fazendo com que os compostos mais pesados sofram processos de envelhecimento. À medida que o óleo envelhece, a evaporação vai diminuindo progressivamente.
- Dissolução – É o processo pelo qual os hidrocarbonetos solúveis se fragmentam em partículas pequeníssimas, misturando-se com a água e originando uma massa líquida homogênea entre ambos, conferindo um risco potencial de efeitos tóxicos para os sistemas biológicos.

- Foto-oxidação – É um processo químico que degrada o petróleo devido à ação dos raios ultravioletas, ocorrendo a transformação de alguns componentes químicos em componentes polares através da adição de oxigênio, aumentando a hidrossolubilidade dos hidrocarbonetos, sendo mais facilmente degradados.
- Sedimentação – Quanto menor a solubilidade em água, mais os hidrocarbonetos podem adsorver-se à partículas que estão suspensas na água e que se sedimentam. Os policíclicos aromáticos são os que mais se enquadram nestas características. Podem acumular-se no fundo do mar por longos períodos em regiões próximas a descargas de petróleo. Estes hidrocarbonetos, aderidos a sedimentos, têm importante papel na intoxicação crônica, produzindo efeitos irreversíveis, como mutagênese e/ou carcinogênese nos seres vivos que com eles mantêm contato.
- Biodegradação – Também conhecida como oxidação bioquímica, ocorre quando microorganismos são responsáveis pela transformação de hidrocarbonetos em compostos mais simples. Existem várias algas, bactérias e fungos responsáveis por este processo.

## 1.2 Água proveniente da produção de petróleo

Na saída de um poço de petróleo geralmente é obtida uma mistura trifásica: gás, água e petróleo. A água e o gás podem ser provenientes tanto do poço quanto de processos secundários de recuperação do petróleo por injeção. Essa mistura pode ser facilmente separada em separadores trifásicos, dando origem a uma corrente de petróleo cru, outra de gás e uma última de água. No entanto, a fração do petróleo cru permanece ainda com quantidades consideráveis de água, que forma emulsões estáveis de difícil separação. Similar problema ocorre com a água, que mantém determinada quantidade de óleo e é descartada no mar em grandes quantidades. O volume da água descartada varia de 860 a 27000 m<sup>3</sup>/dia (HARGREAVES e SILVESTER, 1990).

A separação completa da água contida no petróleo é fundamental para evitar problemas de corrosão em equipamentos e tubulações, bem como reduzir as dificuldades no seu bombeamento, transporte e refino. Já a separação do óleo contido na água é importante para evitar problemas de contaminação ambiental.

Se o petróleo cru, obtido após a separação da água e do gás for deixado envelhecer em tanques, em temperatura e pressão ambiente durante um longo período de tempo, as gotículas de água emulsionadas irão coalescer espontaneamente, e assim, o petróleo poderia ser obtido isento de água. No entanto, o tempo necessário para quebrar essa emulsão é muito longo, motivo pelo qual a separação é feita de forma forçada em equipamentos apropriados.

Outro problema da produção de petróleo em campos marítimos é que os separadores trifásicos devem ser posicionados nas plataformas e como esses dispositivos ocupam grandes espaços, acabam causando um acréscimo considerável de tamanho das plataformas, aumentando assim, o seu custo de fabricação, por isso os processos de tratamento a serem adotados, as suas formas construtivas e os materiais a serem empregados são considerados a partir de alguns fatores, tais como: a legislação ambiental regional, o clima, a cultura local, os custos de investimento e operação (GIORDANO, 1999).

O descarte destes efluentes no meio ambiente só pode ser feito dentro de determinadas especificações, regulamentadas por órgão de controle do meio ambiente que limita a quantidade de poluentes como o teor de óleos e graxas nos efluentes aquosos. Segundo a resolução N°20/86 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), o conteúdo de óleos e graxas em efluentes não deve exceder 20 mg/l. Em consequência disso, as indústrias devem implantar sistemas de tratamento que permitam o descarte de seus efluentes no meio ambiente (SANTOS, 2002).

### **1.3 Equipamentos de separação**

A indústria petrolífera emprega vários processos de separação a fim de melhorar a qualidade da água contaminada com produtos orgânicos, e está sempre preocupada com o desenvolvimento de tecnologias avançadas de separação óleo/água. Os processos comuns para separação de óleo/água incluem métodos como a sedimentação/decantação, coagulação/floculação, filtração, adsorção, centrifugação, ultracentrifugação, tratamentos térmicos entre outros (ARAÚJO, 2001; ASSUNÇÃO, 2003; SILVA, 2004; MAIA, 2004). A seguir citam-se algumas informações sobre cada um destes processos:

- Sedimentação ou decantação – É um processo muito utilizado na indústria do petróleo, nos postos de serviço, nas oficinas mecânicas e outras atividades que utilizam óleo, porém este processo não é capaz de remover óleo emulsionado, sendo utilizado na etapa preliminar dos sistemas de tratamento.
- Coagulação/floculação – É uma técnica de tratar a água com produtos químicos coagulantes, aplicados para agregar partículas dificilmente sedimentáveis em aglomerados que podem ser retirados mais facilmente. Os aglomerados do material sólido resultante, chamados flocos, são removidos por sedimentação, por filtração ou outras operações.
- Adsorção – No processo de adsorção, as moléculas de hidrocarbonetos aderem fisicamente nos poros ativados da superfície de um sólido, como por exemplo: o carbono ativado (comercialmente conhecido como carvão ativado). Apesar da alta eficiência na adsorção de um amplo número de compostos e uma ampla faixa de concentração, esse sistema necessita constantemente da regeneração do carvão ativado devido à sua capacidade de adsorção limitada e apresenta problemas de corrosão com alguns solventes orgânicos.
- Flotação – O processo de flotação de emulsões está baseado na ocorrência de contato entre as bolhas de gás e as gotas de óleo. Como as fases gás e óleo são menos densas do que a água, ambas tenderão a ascender naturalmente. A eficiência de remoção do óleo dependerá fundamentalmente da distribuição do diâmetro da gota e da condição de operação empregada. Uma das desvantagens deste processo reside no fato de que, caso existam partículas sólidas de graxa, estas não irão flotar, pois tenderão sempre a sedimentar.
- Eletroflotação – Nesse processo, um campo elétrico é gerado pela aplicação de uma corrente contínua entre duas placas, fazendo com que algumas gotículas de água adquiram cargas negativas (aquelas próximas à placa com carga negativa) e outras adquiram cargas positivas (aquelas próximas à placa com carga positiva). Assim, as gotas se atraem formando gotas maiores que acabam por se separar do óleo por efeito da gravidade.
- Hidrociclonagem – Este processo utiliza a força centrífuga para separar suspensões sólido-líquido e líquido-líquido. É aplicado nas mais diversas áreas, entre elas a Petroquímica como separador óleo/água. Dentre as inúmeras vantagens em relação a outros equipamentos de separação destaca-se o de ser economicamente viável em relação ao custo/benefício.

Segundo HARGREAVES e SILVESTRE (1990) e THOMAS (2001) a hidrociclonagem é o processo mais utilizado pela indústria de petróleo para separação óleo/ água. O hidrociclone é considerado de extrema importância em tarefas de combate à poluição e recuperação do petróleo derramado. Estes pesquisadores destacam ainda que este equipamento é ideal para plataformas, por oferecerem uma economia substancial no espaço e no peso em relação a outros equipamentos de separação em plataformas marítimas, além de possuir pouca sensibilidade ao movimento que se verifica nas plataformas.

#### **1.4 Ciclones/Hidrociclones**

Ciclones são equipamentos usados há mais de cem anos pela indústria de processos, mas só a partir da década de 60 houve um aumento na sua aplicabilidade em vários campos da tecnologia, sendo por isso considerado um equipamento de grande importância e amplamente usado.

O ciclone/hidrociclone, Figura 1, consiste basicamente de uma seção cônica ligada a um corpo cilíndrico, a qual possui um duto de alimentação ajustado para se ter uma entrada tangencial da mistura.



Figura 1 – Ciclone típico ([www.aalborg-industries.com.br/cps.htm](http://www.aalborg-industries.com.br/cps.htm))

Ele é fechado com uma tampa dotada de um tubo axial para a saída de uma corrente superior (overflow) e ao final da seção cônica tem uma abertura circular para a descarga da corrente inferior (underflow). A ação de separação baseia-se no efeito de forças centrífugas geradas pelo movimento tangencial da mistura no seu interior.

As concentrações das correntes do “underflow” e “overflow” dependem de vários fatores, tais como: o diâmetro do “underflow”, a queda de pressão do equipamento e, principalmente, o tipo de família do hidrociclone (SVAROVSKY, 1981; HSIEH e RAJAMANI, 1991; CARVALHO, 1996).

As principais vantagens deste dispositivo são: simplicidades de construção e manutenção, baixo custo operacional, ausência de partes móveis e possibilidade de uso à pressões e temperaturas elevadas, sendo as condições de operação determinadas pelo material utilizado em sua construção. Possui como desvantagens a baixa eficiência para partículas menores que 5  $\mu\text{m}$  e alta queda de pressão (BOYSAN *et al.*, 1982; DIRGO e LEITH, 1986; FRASER *et al.*, 1997; MEIER, 1998; SALCEDO e PINHO, 2003).

Em contrapartida à simplicidade dos ciclones está seu comportamento fluidodinâmico que apresenta fenômenos como alta preservação do vórtice, zonas de

reversão do escoamento, regiões de recirculação, intenso contato partícula-fluido, alta intensidade turbilhonar, entre outros.

A primeira e principal aplicação do ciclone foi na limpeza de gases, removendo o material particulado neles contido. Posteriormente, a sua aplicação abrangeu processos de: combustão, redução de átomos, classificação de pó, separação/coleta de partículas numa corrente gasosa e/ou líquida, separação sólido-líquido, controle da poluição do ar pela redução da emissão atmosférica, secagem, entre outros.

A literatura tem apresentado um grande número de trabalhos com várias configurações de ciclones, quase na totalidade das vezes com o objetivo de aumentar a eficiência ou diminuir a queda de pressão (MOLERUS e GLUCKER, 1996; FASSANI e GOLDSTEIN, 2000; PENG e PASCAL, 2001; YALCIN *et al.*, 2003; BRUNAZZI e PAGLIANTI, 2003; SANTANA *et al.*; AVCI e KARAGOZ, 2003;).

SALCEDO e PINHO (2003) trabalharam com um ciclone separador gás/óleo, e propuseram uma nova geometria obtida pela otimização numérica que apresentam eficiências entre 99,58 e 99,64%. Um novo modelo de ciclone separador também foi proposto por MOLERUS e GLUCKER (1996) para separar gás-sólido com partículas na faixa de  $1 \mu\text{m} < d < 15 \mu\text{m}$  obtendo com esse novo modelo uma eficiência total próxima de 99,9% e uma menor pulverização da partícula.

CORRÊA *et al.*, (2004) fez uma análise numérica e experimental da influência da geometria de um ciclone secador no tempo de residência das partículas. Os resultados mostraram que as dimensões da parte cônica do ciclone têm uma importante influência no escoamento e conseqüentemente no tempo de residência das partículas.

De maneira bastante simplista, pode-se dizer que o princípio básico de separação empregado nos ciclones é a sedimentação centrífuga, isto é, as partículas suspensas são sujeitas a uma aceleração centrífuga que provoca a separação do fluido. O fluxo no interior de um ciclone convencional apresenta um caráter tridimensional no qual o fluido entra tangencialmente na parte superior da região cilíndrica do equipamento, tendo como conseqüência um movimento giratório do fluxo provocando um forte movimento turbilhonar e um vórtice descendente, fazendo com que as partículas mais densas sejam projetadas contra a parede, sendo então arrastadas até a saída inferior do mesmo. Já as partículas de menor densidade são arrastadas para um tubo cilíndrico fixado no centro do equipamento criando um movimento helicoidal e a formação de um vórtice ascendente até atingir a saída por um orifício superior. (FRANÇA *et al.*, 1996; SALCEDO e PINHO, 2003). Este tipo de comportamento é evidenciado na Figura 2.



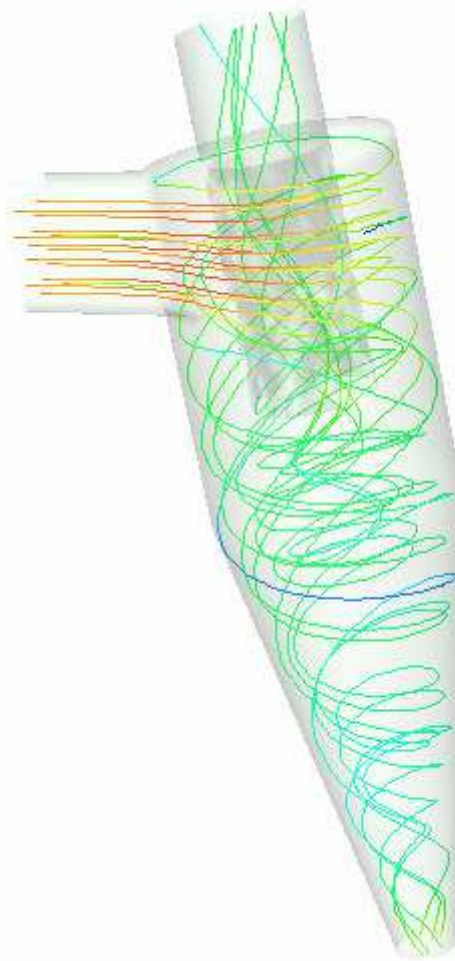


Figura 2: Linhas de Fluxo

Os ciclones especialmente projetados para líquidos são chamados de hidrociclones, ciclones hidráulicos ou hidroclones.

Embora a primeira patente de um hidrociclone tenha mais de 100 anos (BRETNEY, 1981), sua primeira aplicação industrial data dos anos 40 quando os produtores de minério de ferro reconheceram as vantagens do uso do hidrociclone no sentido de melhorar o controle do tamanho da partícula, diminuir o consumo de água, reduzir o custo de construção, operação e manutenção de uma unidade de processamento mineral. Devido a essas vantagens, seu uso expandiu-se em indústrias químicas, petroquímicas, têxteis, metalúrgicas e outras. Recentemente, investiga-se o uso deste dispositivo em sistemas de difícil separação, ou seja, aqueles constituídos de partículas ou gotas muito pequenas, ou mesmo misturas, onde as diferenças de densidades na misturas sólido-líquido ou mesmo líquido-líquido são pequenas (GOMES, 2002).

Os hidrociclones apresentam uma elevada capacidade de processamento, pouco espaço físico necessário para suas instalações, facilidade de operação, e por não requererem praticamente nenhuma manutenção, os hidrociclones são economicamente viáveis no que diz respeito a relação custo/benefício (LEAHY-DIOS e MEDRONHO, 2003; OLIVEIRA e MEDRONHO, 2004). Entretanto, apesar das vantagens, apresentam um comportamento fluidodinâmico muito complexo: zonas de reversão de fluxo, região de recirculação, alta preservação de vórtices, alta intensidade turbilhonar, entre outros. Esta complexidade é decorrente do alto nível de turbulência e da tridimensionalidade do escoamento (MÉIER, 1998; SOLERO e COGHE, 2002; CORRÊA, 2003)

As características transientes do movimento turbilhonar levaram a comunidade científica e industrial a realizar estudos teóricos e experimentais e, quase na totalidade das vezes propuseram modificações na geometria do ciclone/hidrociclone e modelos matemáticos ou empíricos que possibilitassem, entre outras coisas, uma melhoria na eficiência de separação (PERICLOUS, 1987; MÉIER, 1998; NEBRA *et al.*, 2000; SOLERO e COGHE, 2002; CÔRREA, 2003; AVCI e KARAGOZ, 2003; SALCEDO e PINHO, 2003).

Diferentes formas de hidrociclones foram propostas, dentre estas se destaca a forma cônica patenteada por Bradley, em 1981. Este tipo de hidrociclone é muito aplicado industrialmente, sendo considerado uma das unidades de processo mais importantes em tecnologia de partícula (YOUNG *et al.*, 1994; AVEROUS e FUENTES, 1997; DAVIDSON, 1998).

#### **1.4.1 Fatores que influenciam no desempenho do hidrociclone**

De acordo com SANTOS e SOUSA (2003) existe uma série de fatores que influenciam no desempenho do hidrociclone, dentre os quais podem ser citados:

- **Diferencial de densidade** – quanto maior a diferença de densidade entre as fases maior é o desempenho do hidrociclone;
- **Viscosidade da fase contínua (água)** – quanto menor a viscosidade da fase contínua (água) maior é a eficiência de separação;

- **Temperatura** – quanto maior a temperatura de tratamento, menor é a viscosidade da fase contínua água, conseqüentemente, maior é a facilidade de movimentação das gotas de óleo na fase água, levando a um maior desempenho do hidrociclone;
- **Tamanho da gota de óleo na entrada** – esta é a variável com o maior impacto na separação óleo/água. A eficiência de separação do óleo aumenta com o aumento no tamanho da gota de óleo presente na emulsão de alimentação. Isto pode ser intuitivamente esperado pela rapidez com que as gotas maiores de óleo coalescem.

### **1.4.2 Forças Interfaciais**

As forças interfaciais são comumente divididas em dois tipos: a força de arraste e outras forças (drag force e non-drag forces). De acordo com PALADINO (2001) essa distinção é feita a partir do fato de que quando um corpo é submerso numa corrente fluida, as forças de não-arraste (massa virtual e sustentação são as mais comumente consideradas) aparecem mesmo quando a fase contínua é considerada inviscida.

As forças de interface geralmente levadas em consideração na modelagem de escoamentos multifásicos dispersos, são as forças de arraste, de massa virtual, de sustentação e de dispersão turbulenta. As três primeiras aparecem quando um corpo sólido é submerso numa corrente fluida viscosa, independentemente se o regime de escoamento é laminar ou turbulento, enquanto a força de dispersão turbulenta, indica a dispersão da fase gasosa (bolhas) devido a turbulência da fase contínua.

#### **1.4.2.1 Força de arraste**

A força de arraste é função da velocidade de fluxo e da viscosidade do fluido. Sua influência na estrutura do escoamento depende do tipo de problema que se pretende estudar. A forma padrão de expressar a força de arraste sobre um corpo num determinado escoamento é através de um coeficiente de arraste, como segue:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $U$  é a velocidade média,  $D$  é a grandeza da força de arraste e  $A$  é a área projetada do corpo na direção do fluxo.

PALADINO (2001) afirma que a força de arraste sobre um corpo pode ser separada em duas parcelas, a força devida ao cisalhamento superficial e aquela exercida pela distribuição de pressão assimétrica no corpo, chamado de arraste de forma. Assim, para baixos números de Reynolds o arraste da partícula é principalmente devido ao atrito superficial. Quando o número de  $Re$  aumenta, o arraste de forma vai tendo maior influência, até que para altos valores de  $Re$  o arraste é dominado por este fenômeno. Dessa forma três regimes são amplamente conhecidos:

- 1- Regime de Stokes ( $0 \leq Re \leq 0,2$ ). Neste regime, o coeficiente e arraste é dado pela Lei de Stokes,

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (4)$$

- 2- Região Viscosa ( $0 \leq Re \leq 500-1000$ ). Nesta região tanto o atrito superficial quanto o arraste de forma são importantes. Diversas correlações empíricas são avaliadas, entre elas estão as desenvolvidas por Schiller and Nauman, Ishii and Zuber e Ihme *et al.*, citadas no manual do CFX (2000), que são escritas respectivamente como:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (5)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1 Re^{0,75}) \quad (6)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + 5,48 Re^{-0,573} + 0,36 \quad (7)$$

- 3- Região Inercial ou Turbulenta ( $500-1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ ). Nesta região o arraste de forma domina totalmente e o coeficiente  $C_D$  se torna praticamente independente do valor de Reynolds assumido para partícula, um valor aproximado de 0,44.

Inúmeros outros modelos existem para o cálculo do coeficiente de arraste, entre outros, aqueles que levam em consideração a forma distorcida da bolha ou partícula, bolhas alongadas ou elipsoidais.

#### **1.4.2.2 Força de massa virtual**

A força de massa virtual aparece devido à aceleração relativa de uma parcela de massa da fase contínua que é arrastada pela fase dispersa adquirindo a sua velocidade.

#### **1.4.2.3 Força de sustentação**

A sustentação é dada pela rotacionalidade induzida pela vorticidade do campo de velocidade médias cujos gradientes possuem uma escala de comprimento muito maior que os diâmetros das bolhas, e muito maior que as escalas de comprimento dos gradientes de velocidades locais na superfície das bolhas. Estes gradientes de velocidades locais são os responsáveis pela força de arraste enquanto as forças de sustentação e massa virtual estão associadas às variações das velocidades promediadas (PALADINO, 2001)

#### **1.4.2.4 Força de dispersão turbulenta**

Esta força é o resultado das componentes flutuantes das forças atuando sobre uma partícula, e representa a premeditação volumétrica das flutuações da força de arraste.

#### **1.4.2.5 Velocidade terminal**

Quando uma esfera movimenta-se sob a ação de um campo de aceleração em um fluido viscoso estacionário em meio infinito (quando o efeito de fronteiras rígidas e de população é desprezível), está sujeita a ação das seguintes forças:

- A força gravitacional P no sentido do movimento,
- A força de empuxo E cujo sentido é contrário ao movimento da partícula e
- A força de arraste.

A equação resultante do movimento para a esfera é:

$$P - E - F_D = R \quad (8)$$

ou ainda,

$$mpk - mp'k - F_D = mp \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

onde mp é a massa da partícula, mp' é massa do fluido deslocado pela partícula, v é a velocidade do centro de massa da partícula e k é o campo de aceleração ao qual a esfera encontra-se submetida.

FOUST (1980) afirma que as partículas, num ciclone, atingem com rapidez uma velocidade constante denominada de velocidade terminal. Daí em diante o somatório das forças agindo na partícula é nulo. Isto é, a força de gravidade é equilibrada pela força de empuxo e a força resistiva, de forma que pode-se escrever:

$$F_G = F_D + F_E \quad (10)$$

$$\frac{1}{6} \pi D_p^3 \rho_s g = \frac{1}{6} \pi D_p^3 \rho_f g + 3 \pi D_p \mu V_t \quad (11)$$

de onde obtém-se:

$$V_t = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_f) g}{18 \mu} \quad (12)$$

A determinação da velocidade terminal em função do coeficiente de arraste é muito usada na engenharia, então em geral tem o seguinte balanço de forças :

$$\rho_s v_G = \rho_f v_G + \frac{1}{2} C_D A \rho_f V_t^2 \quad (13)$$

dando como resultado: (14)

$$v_t = \sqrt{\frac{2v(\rho_s - \rho_f)g}{\rho_f AC_D}}$$

No caso de partículas esféricas

$$v_t = \sqrt{\frac{4 gD(\rho_s - \rho_f)}{3\rho_f C_D}} \quad (15)$$

### 1.4.3 Campos de velocidade

Muitos pesquisadores têm tentado uma correlação para o campo de velocidade no hidrociclone, especialmente a velocidade tangencial. Isto pode ser determinado usando a seguinte relação

$$wr^n = \text{constante} \quad (1)$$

Isto implica que a velocidade tangencial ( $w$ ) aumenta com o raio ( $r$ ) e diminui para valores positivos do expoente empírico ( $n$ ). O expoente  $n$  é usualmente entre 0,5 e 0,9 (SVAROVSKY, 1984) no vórtice externo, quando na região central estiver perto de -1, conforme mostra a Figura 3.

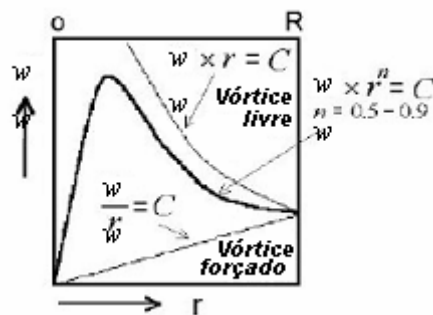


Figura 3 - Diagrama da velocidade tangencial

Se  $n = 1$ , um vórtice livre é obtido onde uma conservação completa do momento angular está implícito ou nenhum efeito viscoso é considerado. Entretanto, se  $n = -1$  um vórtice forçado ou um tipo de rotação no corpo sólido é esperado. A velocidade tangencial depende muito pouco da posição axial.

**Velocidade tangencial:** é confirmado experimentalmente que a velocidade tangencial é uma combinação do vórtice forçado próximo ao eixo do hidrociclone, e o vórtice livre na região externa da parede, desprezando os efeitos da camada limite da parede. Este tipo de comportamento é conhecido como vórtice do tipo Rankine, ilustrado na Figura 4.

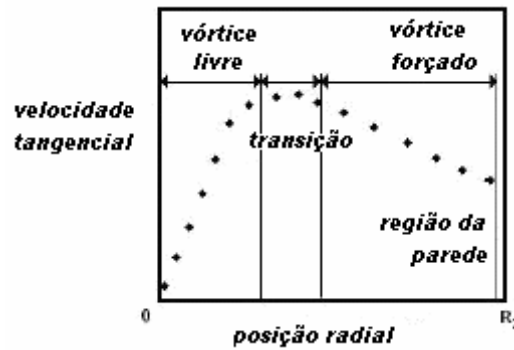


Figura 4 - Perfil da velocidade tangencial do vórtice Rankine

ALGIFRI *et al.* (1988) propôs a seguinte equação para o perfil de velocidade tangencial.

$$\frac{w}{\bar{U}} = \frac{Tm}{\left(\frac{r}{Rc}\right)} \left\{ 1 - \text{EXP} \left[ -B \left( \frac{r}{Rc} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

Onde  $w$  é a velocidade tangencial local, que é normalizada com a velocidade axial média,  $\bar{U}$ , no diâmetro característico,  $r$  é o raio local e  $Rc$  e o raio local característico.  $Tm$  representa o momento máximo da velocidade tangencial na seção e  $B$  determina o raio local em que a velocidade tangencial ocorre.

**Velocidade axial:** Em escoamento turbilhonar o movimento tangencial ocasionado pela força centrífuga na qual gira interiormente tende a mover o fluido em direção a região externa. Tal como a radial resulta na redução da velocidade axial próxima ao eixo, e quando a intensidade turbilhonar é suficientemente alta, um fluxo reverso pode ocorrer próximo ao eixo. Este fenômeno causa um fluxo reverso característico em torno do eixo do hidrociclone, que permite a separação de fluidos de diferentes densidades. Um perfil de velocidade axial para um hidrociclone e ilustrado na Figura 5. Os valores positivos representam o fluxo descendente próximo a parede, que é a direção do fluxo principal, e os valores negativos representam o fluxo reverso ascendente próximo ao eixo do



hidrociclone. O raio do fluxo reverso,  $r_{rev}$ , é a posição radial que a velocidade axial é igual a zero.

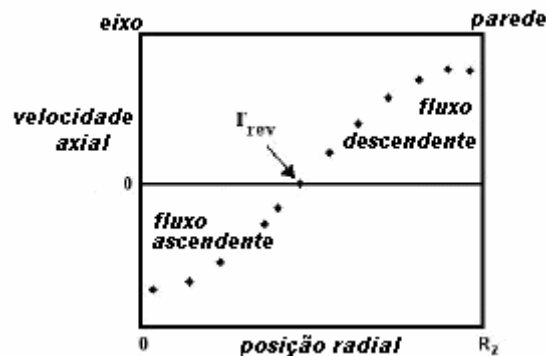


Figura 5 - Diagrama da velocidade axial

**Velocidade radial:** A velocidade radial da fase contínua é muito pequena, e têm sido desprezada em muitos estudos, devido a sua contribuição ser muito pequena quando comparada as outras duas componentes de velocidade.

Nos últimos anos têm sido publicados vários trabalhos sobre a hidrodinâmica de fluidos no interior de hidrociclones, que utilizam para a solução do sistema de equações códigos computacionais comerciais. Neste sentido podem ser citados os trabalhos de PERICLOUS (1987) onde foi apresentado um modelo bidimensional alternativo baseado nas equações de Navier-Stokes para a mistura líquido-sólido e o trabalho de DAVIDSON (1988) que apresentou um modelo para a simulação de hidrociclones propondo a utilização de uma condição correspondente a uma tensão nula próximo ao eixo de simetria, utilizando dois códigos CFD para realizar seus experimentos numéricos: o TEACH e o PHOENICS. O autor concluiu que a adoção de uma condição de tensão nula próximo ao eixo de simetria produz resultados mais realistas do que o uso de somente uma condição de velocidade tangencial nula no eixo de simetria e a escolha adequada do comprimento de mistura é determinante para a correta predição dos perfis de velocidade tangencial e axial.

#### 1.4.4 Intensidade turbilhonar

A presença de um escoamento turbilhonar em equipamentos tais como: trocadores de calor e de matéria, turbinas, combustores e separadores utilizando os efeitos da força centrífuga tais como: ciclones e hidrociclones, reatores de mistura gás-líquido, líquido-líquido e sólido-líquido são de grande interesse na vida acadêmica e industrial (NISSAN e BRESSAN, 1961; CLAYTON e MORSI, 1984; BOTARO *et al.*, 1991; FARIAS NETO *et al.*, 1998; SIMÕES *et al.*, 2004).

O primeiro estudo significativo sobre escoamento turbilhonar foi realizado por TALBOT (1954), onde foi observado que a rotação de uma seção de um tubo gerava um decréscimo do escoamento tangencial ao longo do cilindro. Este tipo de escoamento é fisicamente complexo e apresenta um comportamento tridimensional caracterizado por linhas de corrente encurvadas. Vários estudos experimentais mostram que é possível gerar este tipo de escoamento na prática a partir da rotação de um ou os dois cilindros de um espaço anular, pela introdução de uma ou várias entradas tangenciais na base de um conduto, ou ainda pela implantação de hélices ou aletas na entrada de um conduto (SHOUKRY e SHELMILT, 1985; LEGENTILHOMME e LEGRAND, 1989; LEGENTILHOMME e LEGRAND, 1990).

Ao estudar a transferência de massa entre uma superfície sólida e um fluido, na presença de um escoamento turbilhonar induzido por uma entrada tangencial na base de um espaço anular entre dois cilindros, LEGENTILHOMME e LEGRAND (1991); AOUABED *et al.* (1995); LEFEBVRE, (1996) e FARIAS NETO (1997) observaram que a transferência de matéria dependia fortemente da relação entre o diâmetro da entrada tangencial,  $d_e$ , e a espessura do espaço anular,  $e$ . Estes autores mostraram que a transferência de massa está intimamente relacionada com o comportamento hidrodinâmico no interior da célula de estudo. De acordo com o valor desta razão, três tipos de comportamentos hidrodinâmicos foram observados:

- (i) escoamento turbilhonar puro ( $d_e = e$ );
- (ii) escoamento turbilhonar com expansão ( $d_e < e$ ) e
- (iii) escoamento turbilhonar com contração ( $d_e > e$ ).

Uma importante característica deste tipo de escoamento, quando induzidas por uma seção de entrada é o decréscimo do movimento turbilhonar ao longo do dispositivo. A intensidade turbilhonar,  $S_n$ , é usualmente quantificada pelo número de turbilhões, o qual representa um número adimensional definido como sendo a razão

entre a quantidade de movimento do fluxo angular e o produto do raio do duto pela quantidade de movimento do fluxo axial, conforme mostra a Equação (16) (NISSAN e BRESSAN, 1961; CLAYTON e MORSI, 1984; BOTTARO *et al.*, 1991; FARIAS NETO *et al.*, 1998).

$$S_n = \frac{\int_0^R w u r^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr} \quad (16)$$

onde  $w$  e  $u$  correspondem as componentes de velocidades nas direções angular e axial, respectivamente,  $R$  é o raio da tubulação e  $r$  é a coordenada radial.

Diversas definições de intensidade turbilhonar têm sido usadas por pesquisadores em diferentes áreas. A importância deste parâmetro, caracterizando o escoamento turbulento em hidrociclones, é reconhecido por WEISPFENNING e PETTY, e por THEW e SMITH citados em CALDENTAY (2000) e GOMÉZ (2001). Em ambos os casos o conceito do número de turbilhões foi usado. Para separadores de óleo (deoilers) o número de turbilhões é comumente dentro da faixa de 8-10 que é alto o suficiente para atingir uma boa separação, mas baixo o suficiente para impedir a quebra da gota e a instabilidade do vórtice central (THEW e SMYTH, citados em CALDENTAY, 2000).

CALDENTAY (2000) desenvolveu um modelo para intensidade turbilhonar que leva em consideração o semi-ângulo de uma seção cônica, resultando em:

$$S_n = 1,48 \left( \frac{M_t}{M_T} I^2 \right)^{0,93} (1 + 1,2 \tan(\beta)^{0,15}) \exp \left[ - \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{M_t}{M_T} I^4 \right)^{0,35} \left( \frac{1}{Re_z} \right)^{0,16} \left( \frac{Z}{Dc} \right)^{0,7} (1 + 2 \tan(\beta) \right. \quad (17)$$

onde  $M_t$  é o momento de fluxo na entrada,  $M_T$  é o momento axial de fluxo na posição do diâmetro característico,  $I$  é o fator de entrada,  $Dc$  é o diâmetro característico do hidrociclone  $Re$  é o número de Reynolds,  $\beta$  é o semi-ângulo e  $Z$  a posição axial.

Esta correlação foi desenvolvida usando dados experimentais para semi-ângulos,  $\beta$ , pequenos na faixa de 0 a 0,75 graus (Figura 6). Devido à esta limitação e a falta de dados experimentais para ângulos maiores, esta equação é principalmente válida para o

modelo de hidrociclone de COLMAN e THEW, citados em CALDENTAY (2000) e GOMÉZ (2001).

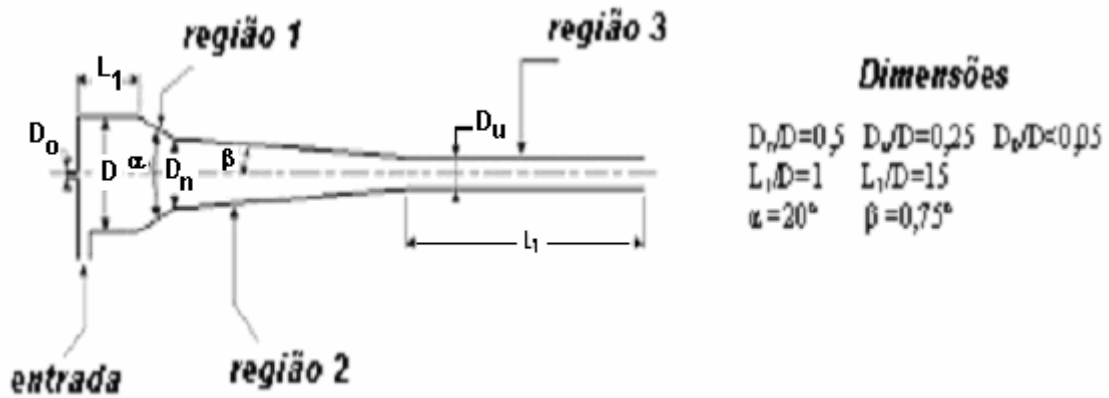


Figura 6 - Hidrociclone de Colman e Thew

A razão  $\frac{M_t}{M_T}$  é calculada como segue:

$$\frac{M_t}{M_T} = \frac{A_c}{A_A} \quad (18)$$

onde  $A_c$  corresponde a seção cilíndrica de diâmetro  $D_c$  e  $A_A$  é a seção reta de alimentação.

O número de Reynolds foi calculado segundo a equação:

$$Re_z = \frac{\rho_c U_{avz} D_z}{\mu_c} \quad (19)$$

onde  $\rho_c$  e  $\mu_c$  são a densidade e a viscosidade da fase contínua, respectivamente.  $U_{avz}$  e  $D_z$  são a velocidade média e o diâmetro na posição axial  $z_0$ .

O fator de entrada,  $I$ , foi definido como:

$$I = 1 - \exp(-n) \quad (20)$$

Com  $n = 1,5$  para duas entradas e  $n = 1$  para uma única entrada.

#### 1.4.5 Eficiência de separação

A eficiência de separação relaciona a vazão mássica de sólidos coletados no overflow e a vazão mássica alimentada no hidrociclone, de acordo com a Equação 21.

$$\varepsilon = \frac{W_{oleo\_overflow}}{W_{oleo\_entrada}} \times 100\% \quad (21)$$

onde:  $W_{oleo\_overflow}$  é a vazão mássica de óleo no “overflow” e  $W_{oleo\_entrada}$  é a vazão mássica de óleo no duto de entrada.

# Capítulo 2: Fluidodinâmica Computacional

**2.1** Fluidodinâmica Computacional

**2.2** Método dos volumes finitos

**2.3** Malha

**2.4** Aplicativo Computacional

**2.4.1** CFX

**2.4.2** Modelos matemáticos

**2.4.2.1** Modelo turbulento k- $\epsilon$

**2.4.2.2** Modelo turbulento RNG k- $\epsilon$

# CAPÍTULO 2 - Fluidodinâmica Computacional

*“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”.*

*Cora Coralina*

## 2.1 Fluidodinâmica computacional

Fluidos em movimento estão presentes em toda natureza: no corpo humano, na forma da circulação sanguínea; no ar, com o vento; e na água, com as correntes e marés. As características do movimento dos fluidos têm sido objeto de estudo desde os tempos mais remotos. Os fenômenos relacionados com o movimento de fluidos podem ser bastante complexos. Análises teóricas somente, ainda não conseguem descrever esses fenômenos de forma adequada, principalmente nos escoamentos encontrados nos problemas de engenharia. Por essa razão, recorre-se a métodos experimentais, como ensaios em túneis de ventos, para se compreender melhor esses fenômenos (FORTUNA, 2000).

O barateamento dos computadores nos últimos 40 anos e o avanço das técnicas computacionais forneceu uma terceira alternativa para a análise do movimento dos fluidos via simulação numérica. Esse novo ramo de conhecimento de característica interdisciplinar que complementa as análises teóricas e as técnicas experimentais da mecânica dos fluidos, recebeu o nome de dinâmica de fluidos computacional (DFC) ou fluidodinâmica computacional (FDC) ou “Computation Fluid Dynamics” (CFD).

A simulação numérica tornou-se ferramenta indispensável no desenvolvimento e otimização de processos químicos, pois de um modo geral, os métodos analíticos são aplicáveis apenas aos problemas mais simples da engenharia e os métodos experimentais são mais dispendiosos e trabalhosos que a simulação numérica, embora estes sejam necessários para verificar a validade e precisão dos resultados. Devido a grande dificuldade de implementar condições não ideais dos processos, a partir de equipamentos de laboratório ou em escala piloto, pesquisadores, projetistas de equipamento e engenheiros de processo estão utilizando com mais frequência o FDC para a análise do comportamento do fluido, no desempenho de equipamentos de

processo e na aplicação da modelagem matemática e simulação numérica para desenvolver e otimizar processos químicos (BAKKER *et al.*, 2001; ALCÂNTARA, 2003).

A fluidodinâmica computacional é hoje uma poderosa ferramenta para a solução de importantes problemas aplicados à engenharia. É capaz de prever comportamentos de escoamento de fluidos, de transferência de calor e de massa, das reações químicas e dos fenômenos relacionados, resolvendo as equações matemáticas que governam estes processos a partir de um algoritmo numérico (MALISKA, 1995).

O procedimento computacional na fluidodinâmica tem o intuito de tornar as investigações experimentais mais eficientes, possibilitando um entendimento mais profundo dos processos de escoamento. Deve ficar bem claro que a fluidodinâmica computacional tem como objetivo complementar e não substituir os estudos teóricos e experimentais sobre o movimento de fluidos, porém, em conjunto, proporcionam um entendimento mais claro do processo como um todo (CAVALCANTI, 2003; CAVALCANTI *et al.*, 2004).

Uma ferramenta numérica é adequada e confiável quando está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais de um modelo matemático que, represente com fidelidade o fenômeno físico. A facilidade na aplicação destes métodos e a qualidade dos resultados obtidos aliada à economia de tempo de projeto e obviamente, do custo total do equipamento têm sido um atrativo sempre crescente para aumentar sua utilização. Este tipo de método praticamente não apresenta restrições e oferecem atrativas vantagens como:

- **Baixo custo:** a maior vantagem sobre os outros métodos.
- **Velocidade:** centenas de diferentes configurações podem ser testadas em poucas horas.
- **Informações completas:** fornece o valor das variáveis relevantes em qualquer ponto de interesse.
- **Facilidade de simular condições realísticas:** pode tratar qualquer condição de contorno, velocidades altas e baixas, temperaturas altas ou baixas, grandes ou pequenos domínios. Qualquer geometria arbitrária pode ser tratada.



Dentre os métodos numéricos existentes os mais utilizados são: diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. A seguir destacam-se as principais vantagens e desvantagens destes métodos:

- i. **diferenças finitas** - Este método baseia-se na expansão da série de Taylor e na aplicação direta das definições de derivada (GOSMAN *et al.*, 1969; HIRSCH, 1988; SAATDJIAN, 1993). As grandezas pesquisadas são calculadas sobre os pontos da malha e não existe uma função para definir os componentes entre estes pontos (GOSMAN *et al.*, 1969, BUFFAT, 1991). Uma das vantagens deste método é que a discretização e a programação são relativamente simples; em geral, o tempo de cálculo é baixo. Tem por desvantagem as limitações para o domínio simples; o refinamento local de uma malha, para aumentar a precisão de um cálculo é difícil de ser empregada.
- ii. **elementos finitos** – Neste método supõe-se que a variação da grandeza estudada sobre os pontos da malha e os pontos interpolados está de acordo com a função de interpolação escolhida (HUSSEY *et al.*, 1970; BUFFAT, 1991). Possui como vantagem a grande flexibilidade ao gerar malhas complexas, caso seja necessário à condição de malhas não-estruturadas. Existe uma base matemática sólida e geral, o que permite a construção de esquemas numéricos de maneira satisfatória (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 1994). Tem por desvantagem o tempo computacional alto; Formulação sensível ao esquema de diferenças centrais, o que pode conduzir a resultados pouco realistas (HUGHES, 1978; PATANKAR, 1980; DHATT e TOUZOT, 1984).
- iii. **volumes finitos** - O domínio de cálculo é dividido em subdomínios ou volumes de controle. Em seguida, sobre cada um dos volumes de controle, são escritos os balanços de conservação associados às equações que serão solucionadas (PATANKAR e SPALDING, 1972; HIRSCH, 1988). A solução resultante sugere que a integral de conservação da quantidade de massa, movimento e energia são precisamente satisfeitas, não importa qual o grupo de volume de controle e, seguramente, sobre o domínio inteiro (HIRSCH, 1988). Tem como vantagens, aplicações possíveis para vários domínios complexos, com

considerável rendimento quando comparado as diferenças finitas, pois as malhas utilizadas não necessitam ser regular. Após a discretização das equações diferenciais, as propriedades conservativas são mantidas. Sua desvantagem é que não existe até o presente, uma teoria matemática geral sobre a convergência para estimação dos erros; A utilização das malhas estruturada durante a maior parte dos casos, não permite tratar dos domínios relativamente complexos (PATANKAR, 1980)

O presente trabalho optou, dentre estes métodos, pelo método dos volumes finitos em virtude do mesmo garantir a conservação da propriedade envolvida (massa, quantidade de movimento, entalpia e matéria) no volume elementar, por sua formulação ter base física e pelo fato de que é a metodologia utilizada pelo aplicativo computacional CFX.

## **2.2 Método dos volumes finitos**

Segundo HIRSCH (1988), o método dos volumes finitos foi introduzido no campo da fluidodinâmica numérica por McDonald, Mac-Cormack e Paullay, para solucionar problemas bidimensionais e as equações de Euler (dependente do tempo), e estendidas mais tarde para fluxos tridimensionais.

Este método foi desenvolvido para a obtenção de soluções de problemas de escoamento de fluidos, com ou sem transferência de calor e/ou massa, reação química e/ou bioquímica, onde todas as variáveis possuem o mesmo volume de controle. Ele associa o caráter físico de cada termo da equação diferencial com a matemática, obtendo as equações aproximadas através dos balanços de conservação da propriedade envolvida (massa, quantidade de movimento, entalpia, entre outras) no volume elementar. Algumas de suas vantagens, em relação a outros métodos, é que ao criar suas equações aproximadas, este método realiza um balanço de propriedade em nível de volumes elementares que devem ser satisfeitos para qualquer tamanho de malha, ou seja, todos os princípios de conservação podem ser checados em um malha grosseira, tornando as execuções no computador mais rápidas (MALISKA, 1995). Além destas vantagens, pode-se destacar igualmente, a possibilidade de trabalhar com malhas arbitrárias, uma vez que, um grande número de opções é disposto para a definição do volume de

controle ao redor da lei de conservação expressa. Desta forma, modificando a forma e localização do volume de controle associado a um dado ponto da malha, ambos variando as regras e precisão para a avaliação do fluxo através da superfície de controle, tem-se considerável flexibilidade para trabalhar-se com o método dos volumes finitos, além de assegurar que as quantidades de massa, de movimento e energia, também permaneçam conservadas para o nível discretizado (HIRSH, 1988).

Segundo PATANKAR (1980), cada parte do perfil que expressa a variação do fluxo entre os pontos da malha é usado para avaliar as integrais necessárias. O resultado é a equação de discretização que contém os valores do fluxo para um grupo de pontos da malha. Assim, a equação de discretização, obtida desta maneira, expressa o princípio de conservação do fluxo para o volume de controle finito, da mesma forma que a equação diferencial expressa para um volume de controle infinitesimal.

O primeiro passo na transformação de um problema composto por equações diferenciais em um problema formado por equações algébricas lineares é discretizar o domínio da variável independente. A discretização pode ser definida como sendo o processo na qual as equações diferenciais que regem o processo são substituídas por suas contrapartes descritas, ou seja, as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas que tentam aproximar corretamente o transporte de propriedades físicas (FRANCO, 2000; SPOGIS, 2002). Portanto, as informações contínuas contidas na solução exata da equação diferencial são substituídas por valores discretos distribuídos num conjunto de pontos nodais, sobre o domínio de estudo, o qual denomina-se malha. Os subdomínios podem ter o mesmo tamanho, gerando uma malha uniforme, ou não, formando uma malha não-uniforme, obtendo uma malha estruturada ou não-estruturada. Embora as discretizações baseadas no primeiro tipo de malha sejam mais simples, ela não é freqüentemente adaptada a geometrias complexas que possuam ângulos agudos e superfícies curvas, porém, na maioria das vezes, facilita significativamente o esforço computacional empregado (SCHNEIDEER e MALISKA, 2000). O segundo tipo permite adaptações a geometrias bem mais complexas e um refinamento local da malha em zonas caracterizadas por fortes gradientes de velocidade, pressão, temperatura ou concentração. Entretanto, o grau de dificuldade das discretizações das equações envolvidas no modelo é mais complexo do que a obtida com a malha estruturada.

## 2.3 Malha

Uma malha é a representação discreta de um domínio geométrico em um conjunto de subdomínios formado por triângulos ou quadriláteros em duas dimensões, e tetraedros e hexaedros em três dimensões. Em virtude destas características, as malhas são largamente empregadas em diversas áreas, como por exemplo na modelagem de superfícies (topografia, geografia) e de volumes (geologia, geofísica), visando proporcionar representações mais compactas. Em simulações de processos físicos as malhas são essenciais para a solução de equações diferenciais parciais ao se empregar os diferentes tipos de métodos numéricos disponíveis<sup>1</sup> em diversas aplicações das Engenharias e da Geologia (<http://www.inf.puc-rio.br/~heloreis/#Introdução>).

De acordo com a sua topologia as malhas são divididas em estruturadas e não-estruturadas.

- **Malha estruturada** – é aquela na qual cada vértice, exceto nas bordas da malha, tem uma vizinhança local isomórfica, ou seja, todos os pontos da malha encontram-se sobre a interseção de duas ou três famílias de linhas, consideradas como linhas das coordenadas curvilíneas, conforme mostra a Figura 7.
- **Malha não-estruturada** – Corresponde aquela em que seus vértices podem apresentar vizinhos locais arbitrariamente variados, ou seja, a malha é formada pela combinação de células triangulares e quadriláteras (ou tetraédricas e pirâmides em três dimensões), onde os pontos da malha não podem ser identificados com linhas de coordenadas como ilustra a Figura 8.

---

<sup>1</sup> diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos, elementos de contorno e elementos finitos baseados no volume de controle.



Figura 7: Malha estruturada (Fonte: Farias Neto, 1997)

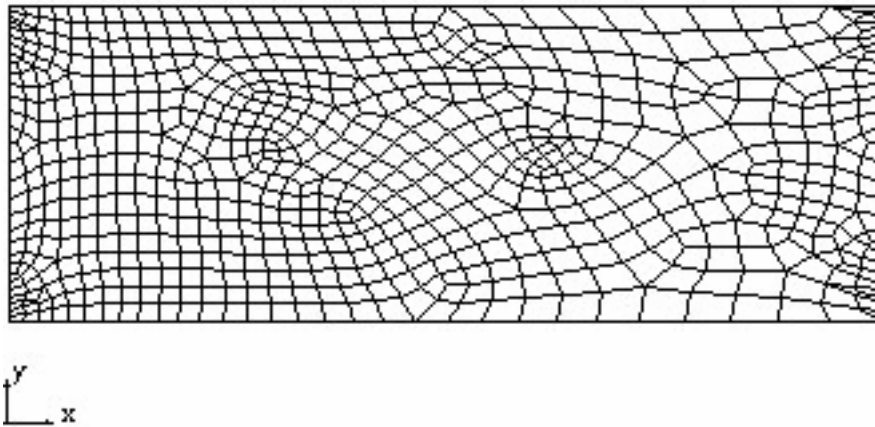


Figura 8: Malha não-estruturada (Fonte: Farias Neto, 1997)

A principal vantagem da malha estruturada repousa numa maior simplicidade e maior facilidade de acesso quando comparada à malha não-estruturada. Isto se deve ao fato das malhas estruturadas apresentarem uma lei de formação para a numeração dos volumes elementares, onde o número de vizinhos é o mesmo para cada volume, o que proporciona uma grande facilidade ao percorrer a malha. Todavia, ao contrário das malhas não-estruturadas, as malhas estruturadas não são flexíveis ao se ajustar a domínios de formas complexas (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 1994; MALISKA, 1995; <http://www.inf.puc-rio.br/~heloreis/#Introdução>). A utilização de malhas estruturadas versus malhas não-estruturadas na solução de problemas em geometrias complexas é uma questão em aberto entre pesquisadores. Uma alternativa intermediária para problemas envolvendo geometrias complexas é a subdivisão do domínio em blocos, onde em cada bloco é gerada uma malha estruturada. Este artifício, aliado ao sistema de coordenadas generalizadas, possibilita uma maior versatilidade do mapeamento do

domínio físico completo, o qual denomina-se de multibloco. A solução dos multiblocos se dá interativamente, bloco a bloco, onde a transferência das informações é realizada pela superposição dos domínios (MALISKA, 1995; <http://www.sinmec.ufsc.br/pt/pesquisa/areas/malhasnaoestruturadas.html>).

## 2.4 Aplicativo computacional

A simulação numérica via técnicas da fluidodinâmica computacional requer a codificação de um programa em uma linguagem estruturada do tipo FORTRAN, por exemplo. Este programa ou um conjunto de sub-programas resulta em um código computacional responsável pela obtenção dos resultados numéricos, o qual pode ser classificado em comercial ou não. Na linha dos códigos comerciais tem-se a disposição inúmeros pacotes como por exemplo o CFX, FLUENT, FIDAP, PHOENICS, FEMLAB, FLEXPDE, entre outros. Dentre estes, o pacote utilizado neste trabalho foi o CFX.

### 2.4.1 CFX

O pacote CFX é um dos mais populares códigos disponíveis para predição de escoamentos complexos encontrados nas indústrias de processo e química. Ele oferece uma mistura de ferramentas poderosas incluindo: acesso direto aos arquivos de CAD; ferramentas automatizadas para a criação de geometrias; modelos avançados de turbulência, combustão, radiação, escoamentos multifásicos, etc.. Estas tecnologias permitem simular escoamentos reais da indústria de processos, desde tanques decantadores até escoamentos conduzidos por bolhas em tanques de mistura, além de muitos outros tipos de escoamentos como combustão, chama, etc.

O CFX é dividido em três módulos principais: Pré-Processador, Processador e Pós-Processador.

- O Pré-Processador – é responsável pela definição do domínio de cálculo e pela geração da malha propriamente dita, a qual é obtida seguindo basicamente a seqüência ilustrada na Figura 9.

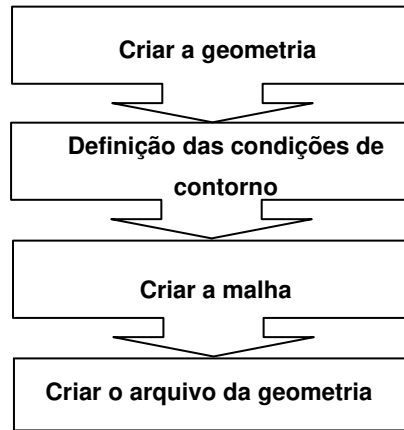


Figura: 9 – Sequência esquemática do CFX-Build para a construção da geometria

- O Processador – nesta etapa são implementadas as propriedades físicas do domínio, as características do problema (fluxo laminar ou turbulento, escoamento mono ou multifásico, meio poroso ou não, entre outros), os métodos numéricos de resolução das equações discretizadas, etc.. Estas informações são armazenadas em um arquivo denominado arquivo de comandos (“command file”).
- O Pós-Processador – é o módulo responsável pelas análises dos resultados por meio de gráficos ou imagens, esta última representando as linhas de fluxo, os campos de velocidade, pressão, concentração, entre outros. Todas estas informações são armazenadas em um arquivo denominado “dump”.

O CFX emprega o método dos volumes finitos em conjunto com malhas estruturadas (podendo-se ter malhas não-estruturadas), porém com flexibilidade de adaptação de geometrias complexas por meio de coordenadas generalizadas e a possibilidade de resolução com a metodologia de multibloco. Além de resolver as equações de Navier-Stokes em três dimensões, o software possui uma enorme quantidade de modelos para diferentes aplicações que vão desde modelos para o escoamento turbulento até modelos para escoamentos em meios porosos, combustão e escoamentos multifásicos, entre outros (CAVALCANTI, 2003; CAVALCANTI *et al.*, 2005).

Uma outra característica interessante do software é que este permite a inclusão de novos modelos ou modificações nos já implementados, sejam estes, para as considerações de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, por meio de rotinas em linguagem Fortran. Isto torna o software adequado para pesquisa científica, já que possibilita testar diferentes modelos matemáticos, analisar influência de determinados parâmetros, etc., sem ser necessário o árduo trabalho de implementação numérica das equações de Navier-Stokes ou modelos matemáticos amplamente conhecidos na literatura (PALADINO, 2001).

O programa de resolução do CFX (“Solver”) recebe três tipos de arquivos: um contendo as informações geométricas do modelo, um arquivo com os comandos que definem o modelo a ser utilizado, condições de contorno, fenômenos a serem considerados, entre outras. e, se forem utilizadas rotinas de usuário, um arquivo contendo rotinas em linguagem Fortran.

A Tabela 1 lista e descreve os arquivos utilizados e gerados pelo CFX. Os \*\* representam um número que inicia em 01 e termina em 99 e indica a simulação corrente. Quando a simulação é iniciada, o CFX lê os arquivos necessários fornecidos pelo usuário e faz uma cópia com esse número incrementado. Quando chegar a 99, a próxima cópia produzida será 01.

Tabela 1: arquivos utilizados e gerados pelo CFX

Nome do arquivo	Descrição
m**.fc	arquivo de comandos (Command File), escritos pelo usuário.
m**.dmp	arquivo onde a resposta encontrada é armazenada (Dump File)
m**.fo	arquivo de texto simples que contém uma lista de todos os possíveis erros que impediram a execução do CFX-Solver
m**.geo	arquivo que contém a geometria construída pelo pré-processador
m**.f	arquivo que contém subrotinas escritas pelo usuário em Fortran 77.

O CFX-4 utiliza o conceito de coordenada local para permitir o usuário estruturar malhas multiblocos. Um bloco é topologicamente uma malha retangular na qual é atribuído um sistema de coordenada local ( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ) tal que, na vizinhança, os nós da malha são separados por vetor unitário na direção  $\xi$ ,  $\eta$  ou  $\zeta$ . Uma malha multibloco



consiste de vários blocos unidos uns aos outros, de tal maneira que as células vizinhas se encontram nas faces inteiras, isto é, não são permitidos nós suspensos (CAVALCANTI, 2003).

As malhas multiblocos são construídas pela junção de diferentes blocos, como ilustra a Figura 10, para formar uma malha sobre o domínio de estudo. Os blocos individuais devem ser topologicamente retangulares para uma máxima eficiência computacional. Na malha multibloco, o dado é transferido de um bloco para outro usando uma generalização da condição de contorno periódica.

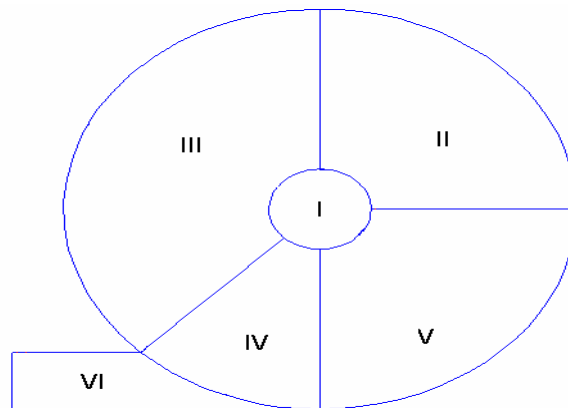


Figura 10: Malha multibloco. Cada algarismo representa uma superfície.

#### 2.4.2 Modelos matemáticos

Um modelo é um componente capaz de explicar um fenômeno físico qualquer para a engenharia, o qual corresponde a um conjunto de dados e idéias abstratas que permitem ao engenheiro ou pesquisador propor uma explicação para o fenômeno que se está estudando (PINTO e LAGE, 2001). A partir do momento em que é possível pôr as variáveis do problema na forma de uma ou mais relações quantitativas precisas, chega-se ao que se denomina de modelo matemático.

As principais equações empregadas no CFX-4 permitem resolver problemas específicos sem adoção de hipóteses simplificadoras e tem como base às equações de conservação da massa e momento (Equações de Navier-Stokes).

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (22)$$

Equação do momento:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U - \mu \nabla U) = B - \nabla p' + \nabla \cdot [\mu (\nabla U)^T] \quad (23)$$

onde o expoente  $T$  representa a transposta do termo e  $p'$  é a pressão modificada dada por:

$$p' = p + \left( \frac{2}{3} \mu - \zeta \right) \nabla \cdot U \quad (24)$$

O termo  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  corresponde ao trabalho da pressão, o qual é desprezado quando o fluxo é incompressível ou fracamente compressível,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $U$  é a velocidade,  $\mu$  é a viscosidade molecular,  $B$  é a força corpo,  $p$  é a pressão,  $\zeta$  é a viscosidade volumétrica.

No caso específico de escoamentos multifásicos, estas equações são substituídas por:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} \left( \dot{m}_{\alpha\beta} - \dot{m}_{\beta\alpha} \right) \quad (25)$$

Equação do momento:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot \left( r_\alpha \left( \rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha - \mu_\alpha \left( \nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T \right) \right) \right) = \\ & r_\alpha (B - \nabla p_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} c_{\alpha\beta}^{(d)} (U_\beta - U_\alpha) + F_\alpha + \sum_{\beta=1}^{N_p} \left( \dot{m}_{\alpha\beta} U_\beta \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Os índices gregos  $\alpha$  e  $\beta$  representam as fases,  $N_p$  é o número de fases,  $r$  é a fração volumétrica,  $c^{(d)}$  representa os termos de arraste entre as fases,  $F$  são as forças de não arraste entre as fases,  $\dot{m}$  é a taxa de fluxo mássico por unidade de volume.

Um escoamento é tido como multifásico quando mais de um fluido com propriedades diferentes presentes no escoamento, cada um dominando seu próprio campo de fluxo. Este tipo de escoamento é facilmente encontrado em diversas áreas tecnológicas: indústrias químicas, alimentícia, sistemas de conversão de energia, processamento de materiais e indústria de petróleo e gás.

A definição de fase não é relativa ao estado da matéria (sólido, líquido, gasoso, plasma), mas sim ao número de interfases presentes no escoamento multifásico. Por exemplo, escoamento bifásico significa a presença de uma interface, e pode ser do tipo líquido-líquido imiscíveis ou líquido-gás. Quando essas fases escoam juntas, distribuem-se segundo configurações interfaciais próprias, isto é, há uma distribuição espacial das fases na mistura, que depende de condições operacionais (vazão, pressão, temperatura, etc.), geométricas (dimensão, inclinação, forma, etc.) e de propriedades das fases (densidade, viscosidade). Estas características combinadas, determinam certas classes de configurações interfaciais, normalmente denominadas regime ou padrão de escoamento multifásico. Desta forma, o aplicativo computacional CFX-4 disponibiliza a utilização do modelo multifásico a partir de dois modelos distintos:

- **modelo multi-fluido:** este modelo considera cada fase como sendo um meio contínuo ocupando todo o domínio de cálculo, onde a quantidade presente de cada fase em cada ponto do domínio é dada pela fração volumétrica de cada fase. Considera ainda um sistema de equações de conservação para cada fase podendo calcular um campo de solução para cada uma destas fases separadamente (PALADINO, 2001).
- **modelo homogêneo:** é baseado na hipótese de que determinadas variáveis de escoamento podem ser consideradas iguais para todas as fases. Assim, a idéia é utilizar uma única equação de conservação para todas as fases, como se fosse uma mistura. A hipótese de homogeneidade pode ser feita para qualquer variável de escoamento (velocidade, temperatura, concentração, etc.) (PALADINO, 2001)

A presença da turbulência no escoamento em ciclone e a escolha de um modelo turbulento adequado em soluções numéricas são fatores extremamente importantes em uma simulação.

### 2.4.2.1 Modelo turbulento k-ε

O modelo k-ε usa a hipótese da viscosidade turbulenta (as tensões de Reynolds podem ser relacionadas linearmente com os gradientes médios de velocidade).

Este modelo envolve duas equações de transporte para as características de turbulência. Uma destas equações governa a distribuição da energia turbulenta,  $k$ , que mede a energia cinética local de movimento de flutuação. A outra governa a energia turbulenta de taxa de dissipação  $\varepsilon$ . As equações de transporte para a energia cinética turbulenta  $k$  e a taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon$  são respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho U k) - \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \varepsilon \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho U \varepsilon) - \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} [(P + C_3 \max(G, 0))] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (28)$$

onde  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são as constantes do modelo,  $P$  é o termo de produção pelo efeito de cisalhamento definida por:

$$P = \mu_{eff} \nabla U \left[ (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] - \frac{2}{3} \nabla U (\mu_{eff} \nabla U + \rho k) \quad (29)$$

e  $G$  é um parâmetro decorrente da força corpo dada por:

$$G = G_{buoy} + G_{rot} + G_{res} \quad (30)$$

$G_{buoy}$ ,  $G_{rot}$  e  $G_{res}$  são os termos que representam o empuxo, a rotação e a resistência respectivamente.

### 2.4.2.2 Modelo turbulento RNG k-ε

Vários autores defendem a idéia de que o modelo turbulento k-ε é inadequado para prever situações em que há fluxo rotacional, pois este modelo superestima a dissipação da energia cinética do fluxo resultando numa região central de recirculação, menor que a observada experimentalmente.

O modelo RNG (Renormalization Group Theory) é uma alternativa do modelo k-ε padrão para fluxos com alto número de Reynolds. O modelo difere do modelo padrão na equação da taxa de dissipação ε.

As constantes deste modelo são obtidas teoricamente e não empiricamente, como no modelo k-ε tradicional. Resultados preliminares indicam que este modelo fornece previsões mais precisas em situações de escoamento incluindo separação, linhas de correntes curvas e regiões de estagnação.

As equações que descrevem este modelo são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \varepsilon \quad (31)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla (\rho U \varepsilon) - \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = (C_1 - C_{1RNG}) \frac{\varepsilon}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (32)$$

onde  $C_{1RNG}$  é dado pela Equação (33)

$$C_{1RNG} = \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad (33)$$

$$\eta = \left( \frac{P_S}{\mu_T} \right)^{0.5} \frac{k}{\varepsilon} \quad (34)$$

$\eta_0$  e  $\beta$  são as constantes adicionais do modelo e  $P_S$  é o termo de produção pelo efeito de cisalhamento.

## Capítulo 3: Metodologia

**3.1** Descrição do hidrociclone

**3.2** Criação da geometria

**3.2.1** Definição das fronteiras

**3.3** Geração da malha

**3.4** Definição do problema

**3.5** Cálculo do número de Reynolds

**3.6** Cálculo da intensidade turbilhonar

## CAPÍTULO 3 - Metodologia

*“O homem que a dor não educou será sempre uma criança”.*

*Tommaso*

### 3.1 Descrição do hidrociclone

O hidrociclone é um dispositivo constituído basicamente de duas seções acopladas: uma cônica e uma cilíndrica. Nesta última tem anexada um duto de alimentação, em geral, perpendicular e tangencial. Na Figura 11 e na Tabela 2 encontra-se as dimensões características do ciclone a ser analisado.

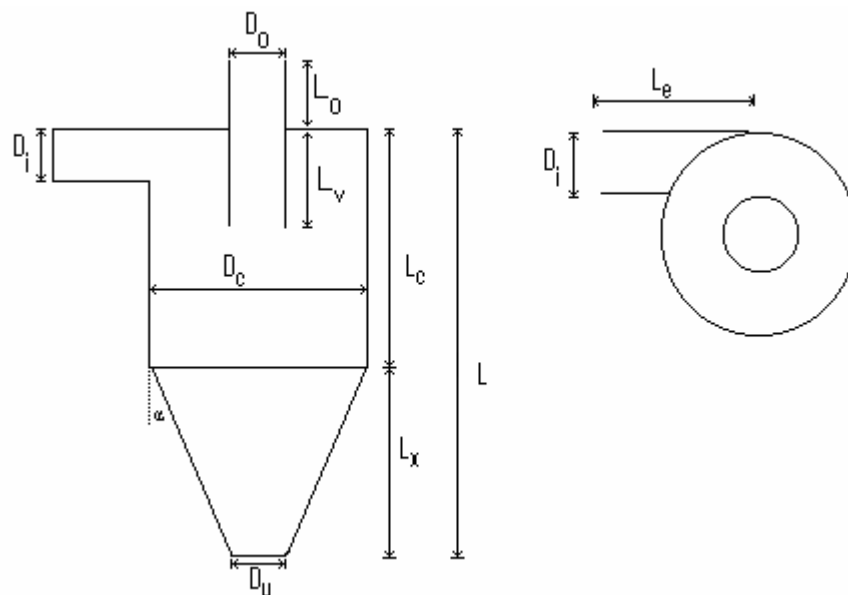


Figura 11: Dimensões características do hidrociclone

Tabela 2: Dimensões do hidrociclone

Dimensão	m
Diâmetro do ciclone, $D_c$	0,1020
Diâmetro da saída no topo, $D_o$	0,0204
Diâmetro da saída inferior, $D_u$	0,0153
Altura da região cilíndrica, $L_c$	0,0510
Comprimento da região da entrada retangular, $D_i$	0,01457
Altura do tubo de saída superior, $L_o$	0,0500
Altura da região cônica, $L_x$	0,5508
Comprimento do duto de entrada, $L_e$	0,0765
Altura do vortex finder, $L_v$	0,0340
Comprimento do hidrociclone, $L$	0,6018
Inclinação da região cônica, $\alpha$	0,1500

### 3.2 Criação da geometria

Para representar o domínio de estudo em um espaço tridimensional é necessário definir pontos, curvas, superfícies e sólidos de acordo com o software CFX para em seguida subdividi-lo em vários pequenos subdomínios denominado malha.

A confecção da malha foi realizada utilizando o módulo de pré-processamento do CFX-Build, o qual é basicamente dividido em duas etapas principais: a primeira é a criação da geometria e a segunda a geração da malha propriamente dita.

Ao lançar o módulo CFX-Build para dar início a criação da geometria do hidrociclone, o mesmo solicitou a definição da Tolerância do Modelo Global (Global Model Tolerance), que é responsável pela identificação da coincidência ou não dos pontos, curvas, superfícies ou sólidos. Dois pontos são considerados coincidentes se os mesmos estiverem separados por uma distância menor ou igual àquela definida pela tolerância do modelo global. Caso dois pontos sejam considerados coincidentes o segundo ponto não é criado, o mesmo acontece com as curvas, superfícies e sólidos. Neste trabalho foi escolhida a tolerância de  $1.10^{-5}$  em metros.



Definiu-se inicialmente o ponto  $P_1$   $(-D_c/10; 0; Z)$ , onde  $D_c$  corresponde ao diâmetro do cilindro e  $Z$  a posição axial (altura do hidrociclone), usando as funções “create-point-xyz” do submenu geometry.

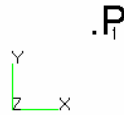


Figura 12: Definição do Ponto 1

Partindo do ponto  $P_1$  foi criada a curva  $C_1$  empregando o método “Revolve”, o qual cria curvas a partir de um ponto, um ângulo e um eixo de orientação. Este método é acionado quando é ativado as funções: create-curve-revolve. Neste caso, o ângulo e o eixo de orientação foram, respectivamente,  $90^\circ$  e  $(0;0;0)$ . Vale salientar que esta metodologia cria automaticamente o ponto  $P_2$ , conforme está ilustrado na Figura 13.

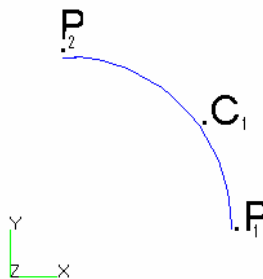


Figura 13: Criação da curva  $C_1$ .

Para criar a curva  $C_2$ , (Figura 14) foi necessário determinar o ângulo de rotação até o ponto de intersecção com a entrada tangencial. Esta tarefa foi realizada utilizando a equação abaixo, que relaciona este ângulo de rotação com o diâmetro do ciclone,  $D_c$ , e o comprimento da entrada retangular,  $D_i$ . Esta equação foi obtida a partir de cálculos simples de trigonometria, resultando em:

$$\phi = 90^\circ + \arcsen\left(1 - \frac{2D_i}{D_c}\right) \quad (35)$$

A curva  $C_3$  (Figura 14) foi então criada de forma análoga a anterior, sendo, que o ângulo de rotação desta vez foi obtido simplesmente por meio da diferença de  $180^\circ - \phi$ .

Bem como a curva  $C_4$  com um ângulo de  $90^\circ$ . Desta forma, foi criada a circunferência que iria constituir o tubo de saída superior ou “vortex finder”, conforme mostra a Figura 14.

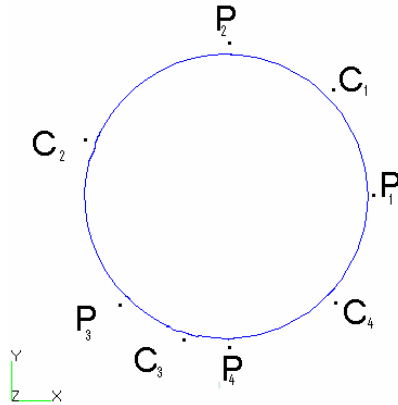


Figura 14: Criação da circunferência para construção do “vortex finder”.

A próxima etapa foi a definição da superfície, sobre esta circunferência usando as funções: “create-surface-EDGE”, que permite criar uma superfície a partir de três ou quatro lados (curvas). Portanto, esta superfície ilustrada na Figura 15 foi criada ao selecionar os lados  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  :

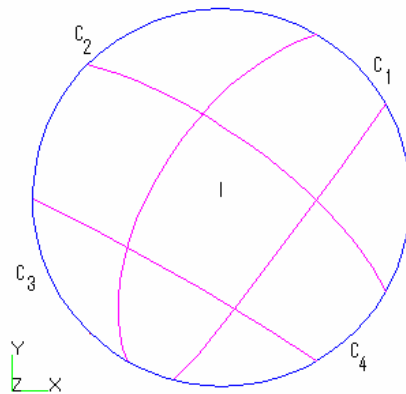


Figura 15: Superfície usada na confecção do “vortex finder”

Com a metodologia análoga a descrita anteriormente, foram criadas as curvas  $C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$  e  $C_8$ , como pode ser observado na Figura 16, tendo como ponto de partida  $P_5$  ( $D_c/2; 0; z$ ).

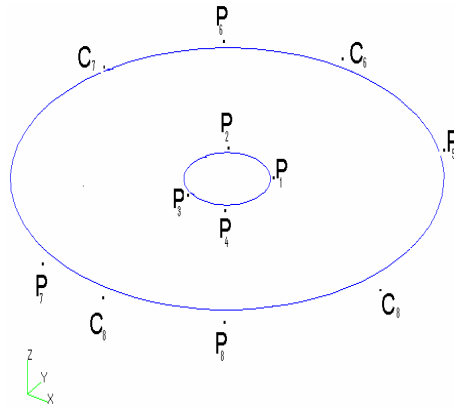


Figura 16: Criação da circunferência para criação da seção cilíndrica do hidrociclone

Usando as funções “create-curve-point”, o qual permite criar uma curva a partir de dois ou mais pontos, foram criados as curvas: C<sub>9</sub> entre os pontos P<sub>1</sub> e P<sub>5</sub>; C<sub>10</sub> entre P<sub>2</sub> e P<sub>6</sub>; C<sub>11</sub> entre P<sub>3</sub> e P<sub>7</sub> e, finalmente C<sub>12</sub> entre P<sub>4</sub> e P<sub>8</sub>. Em seguida, foram criadas as superfícies II, III, IV e V, através da mesma metodologia para criação da superfície I, conforme ilustra a Figura 17. As curvas selecionadas para cada superfície estão ilustradas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Seleção das curvas para a criação das superfícies II, III, IV e V.

Superfície	Curvas
II	C <sub>1</sub> , C <sub>9</sub> , C <sub>5</sub> e C <sub>10</sub>
III	C <sub>2</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>8</sub> e C <sub>11</sub>
IV	C <sub>3</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>7</sub> e C <sub>12</sub>
V	C <sub>4</sub> , C <sub>12</sub> , C <sub>8</sub> e C <sub>9</sub>

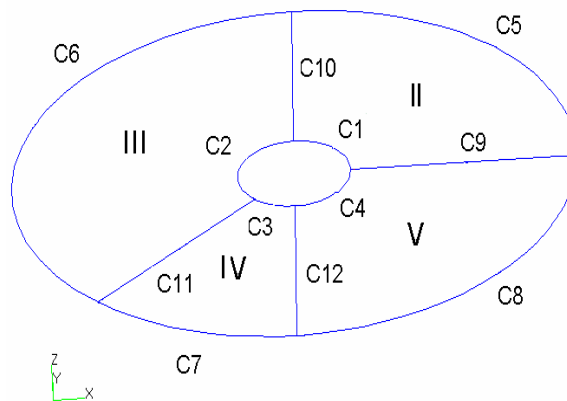


Figura 17: Criação das superfícies II, III, IV e V

Empregando a mesma metodologia já descrita, foi criada a superfície VI partindo dos pontos  $P_9 (-L_e, D_i - D_o/2; z)$  e  $P_{10} (-L_e, D_o/2; z)$ , como pode ser observado na Figura 18.

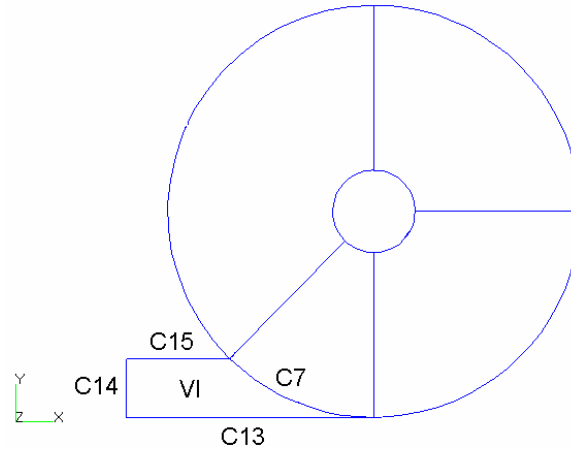


Figura 18: Criação da superfície superior do duto de entrada

A próxima etapa da construção do hidrociclone foi a criação dos corpos cilindros e cônicos, para isto foi utilizada as funções “create-solid-extrude”, as quais permitem criar um sólido a partir de uma superfície pré-existente numa dada direção definida pelo usuário. Assim, foram selecionadas as superfícies de I a V, criadas anteriormente, juntamente com o vetor de orientação  $(0; 0; -D_i)$ , o que resultou na geometria ilustrada na Figura 19.

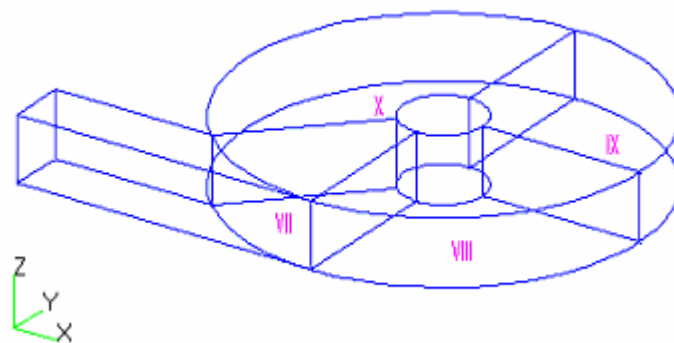


Figura 19: Sólido criado até a altura da entrada

De forma análoga, foram selecionadas as superfícies projetadas, VII a X (Figura 19), referentes as superfícies II a V (Figura 17), que foram projetadas quando usado as funções “create-solid-extrude”. Com as superfícies selecionadas foi criado mais quatro

sólidos que representaram o corpo cilíndrico até a altura do “vortex finder” com auxílio do vetor de orientação  $(0; 0; -L_v)$ . Na Figura 20 está representada a geometria resultante destas operações.

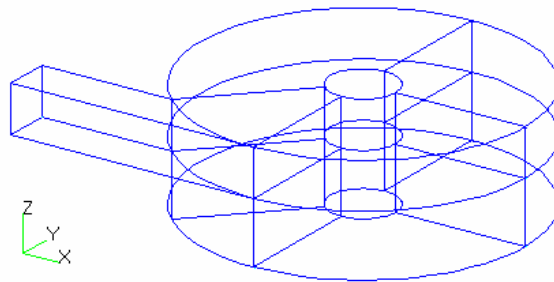


Figura 20: Sólido construído até a altura do “vortex finder”

De forma análoga, foi criada todo corpo cilíndrico e cônico com os respectivos vetores de orientação  $(0;0;-L_e)$  e  $(0;0;-L)$ , como pode ser observado na Figura 21. Deve-se ressaltar que para criação da seção cônica foi necessário definir mais um parâmetro, o qual corresponde a uma relação entre os diâmetros das seções extremas da seção cônica, denominada de fator de redução, cujo valor de  $D_u/D_c$  foi igual a 0,15.

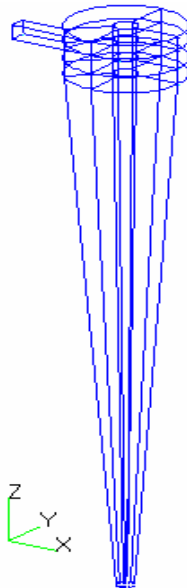


Figura 21: Criação dos corpos cilindro e cônico do hidrociclone

Finalmente, foi criada a complementação do “vortex finder” usando as funções “create-solid-extrude” a partir da seleção da superfície I e o vetor de orientação  $(0; 0; L_o)$ , resultando na geometria final do hidrociclone de Bradley, ilustrada na Figura 22.

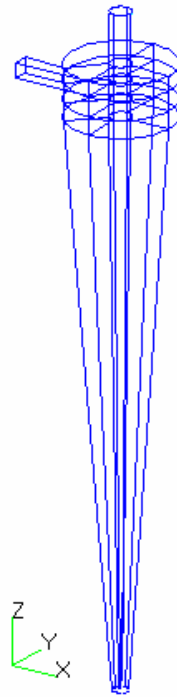


Figura 22: Geometria referente ao hidrociclone de Bradley

### 3.2.1 Definição das fronteiras

Para complementar a geometria do hidrociclone foi necessário definir as superfícies correspondentes as fronteiras do dispositivo, usando o sub-menu PATCH, as quais são utilizadas principalmente, para especificar uma superfície ou um conjunto de superfícies onde devem ser impostas as condições limite. Dentre as opções disponibilizadas no CFX 4.4 foram utilizadas as seguintes opções:

- INLET – implementa uma condição de fluxo a partir de um valor atribuído ao vetor de velocidade.
- PRESS – permite definir uma condição de pressão na fronteira.
- WALL – permite definir uma condição de contorno de não-deslizamento, ou seja, velocidade nula, sobre a(s) fronteira(s), que não foram automaticamente definidas como parede (wall).

O CFX 4.4 considera automaticamente que todas as fronteiras externas ao domínio de estudo, são do tipo parede. Assim, definiu-se como condição de entrada (INLET) a seção quadrada do duto de alimentação e como condição de saída nas duas saídas do

hidrociclone: na seção de saída do “vortex finder” de “PRESS\_TOPO” e na seção de saída da base do hidrociclone ou “spigot” de “PRESS\_BASE”. As superfícies do “vortex finder” dentro do hidrociclone foram definidas como parede ou “WALL\_INTERNO”.

### 3.3 Geração da malha

Partindo da geometria do hidrociclone a geração da malha é realizada automaticamente bastando definir alguns parâmetros, como por exemplo: densidade de pontos ou comprimento do lado do volume de controle. Outra opção, é a definição dos números de pontos, por exemplo, sobre cada curva previamente escolhida concentrando-os ou não em uma ou nas duas extremidades da curva. Esta tarefa é realizada utilizando a função “mesh seed”.

O “mesh seed” permite um melhor controle no refinamento da malha, a fim de que as características em uma dada região do domínio de estudo sejam determinadas em detalhes visando a obtenção de resultados mais fidedignos.

No presente trabalho aplicou-se esta função (“mesh seed”) para definir o número de pontos sobre as curvas selecionadas, conforme ilustrada na Figura 23, e denominadas de a à l. O valor do número de ponto sobre cada uma destas curvas, bem como a forma de concentração dos mesmos: Uniforme, concentrados em uma das extremidades (OWB) e concentrado nas duas extremidades (TWB).

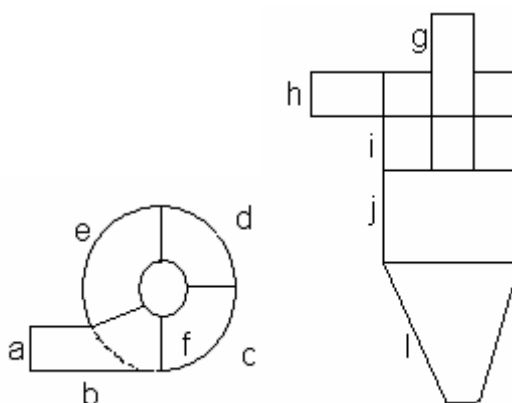


Figura 23: Pontos de refinamento

Tabela 4: Valores utilizados para o refinamento

Parâmetro	Uniforme	OWB*		TWB**	
	Np	np	L <sub>2</sub> /L <sub>1</sub>	Np	L <sub>2</sub> /L <sub>1</sub>
\$a	-----	----	----	8	1,5
\$b	-----	15	0,25	----	---
\$c	9	---	---	---	---
\$d	12	---	---	---	---
\$e	9	---	---	---	---
\$f	----	---	---	8	1,5
\$g	7	---	---	---	--
\$h	15	---	---	---	--
\$i	11	---	---	---	---
\$j	8	---	---	---	---
\$l	60	---	---	---	---

\* One way bias: pontos concentrados em uma extremidade

\*\* Two way bias: pontos concentrados nas duas extremidades

### 3.4 Definição do problema

As primeiras características do problema numérico estudado estão mencionados na Tabela 5. Nesta tabela figuram os métodos empregados para resolver as equações diferenciais, discretizadas pelo método dos volumes finitos, definindo o escoamento turbilhonar induzido pela entrada tangencial no hidrociclone, os principais dados relativos a malha e a capacidade de memória necessária para resolver as equações algébricas.



Tabela 5: Características do problema

<b>Definição do problema</b>	<b>Descrição</b>	
Dimensão espacial	tridimensional	
Coordenadas	cartesianas	
Tipo do escoamento	turbulento	
Dependência em função da temperatura	isotérmico	
Empuxo	vetor gravidade (0;0;-9,8) densidade de referência $9,4 \cdot 10^2$	
Tipo de fluido	Incompressível	
Parâmetro multifásico: Descrição das fases	Fase contínua	Fase dispersa
	água	óleo com diâmetro médio $2,08 \cdot 10^{-6}$
Dependência em relação ao tempo	Estado estacionário	
Propriedades físicas constantes	Densidade	água: 995,9 óleo: 884,1
	Viscosidade	água: $8,6 \cdot 10^{-3}$ óleo $4,862 \cdot 10^{-1}$
Modelo acoplamento pressão-velocidade	Simplec	
Modelo turbulento	RNG k- $\epsilon$	
Regime da partícula	Viscoso com a correlação Ishii-zuber, modelo de partícula induzida (sato)	
Número de iterações	10000	
Tolerância	$1 \cdot 10^{-7}$	
Fração volumétrica	água: 0,99 óleo :0,01	
Modelo multifásico	Equação	Modelo
	Momento Turbulento	IPSA-C Since IPSA Since
Transferência entre as fases água-óleo	Equação	modelo
	Momento	partícula Modelo de arraste viscoso Concentração da partícula diluída

Para maiores detalhes do modelo adotado pode ser consultado os arquivos de Comand File e o arquivo de texto com extensão fo, que se encontra no anexo I.

### 3.5 Cálculo do número de Reynolds

No estudo de hidrociclones o número de Reynolds é um grupo adimensional de bastante interesse, pois como todo número adimensional concentra, em sua concepção, as variáveis relevantes do fenômeno, consignando para si os efeitos conjugados dessas. O cálculo de Reynolds foi baseado na seguinte equação:

$$Re = \frac{D_h U_e \rho}{\mu} \quad (36)$$

onde  $Re$  = número de Reynolds

$D_c$  = diâmetro hidráulico do duto de entrada ( $D_h = D_i$ )

$U_e$  = velocidade de entrada do fluido no hidrociclone

$\rho$  = densidade da fase contínua (água)

$\mu$  = viscosidade da fase contínua (água)

A Tabela 6 descreve os valores dos números de Reynolds calculado para o problema em estudo.

Tabela 6: Valores dos números de Reynolds

Velocidade (m/s)	Reynolds
0,25	421,8100
0,5	843,6199
1	1687,2399
2	3374,4798
4	6748,9595
6	10123,4393
8	13497,9191
10	16872,3988
15	25308,59826
20	33744,7997

### 3.6 Cálculo da intensidade turbilhonar

Para se avaliar o escoamento turbilhonar induzido por uma entrada tangencial no hidrociclone, foi calculado a partir dos resultados da simulação, a intensidade turbilhonar em diferentes posições axiais. Para isto, foi suficiente conhecer as componentes de velocidades em coordenadas cartesianas ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ) expressas em coordenadas cilíndricas sobre diferentes seções transversais ao longo do hidrociclone (Figura 24). As componentes de velocidade em coordenadas cilíndricas foram calculadas usando a Equações 39, 40 e 41:

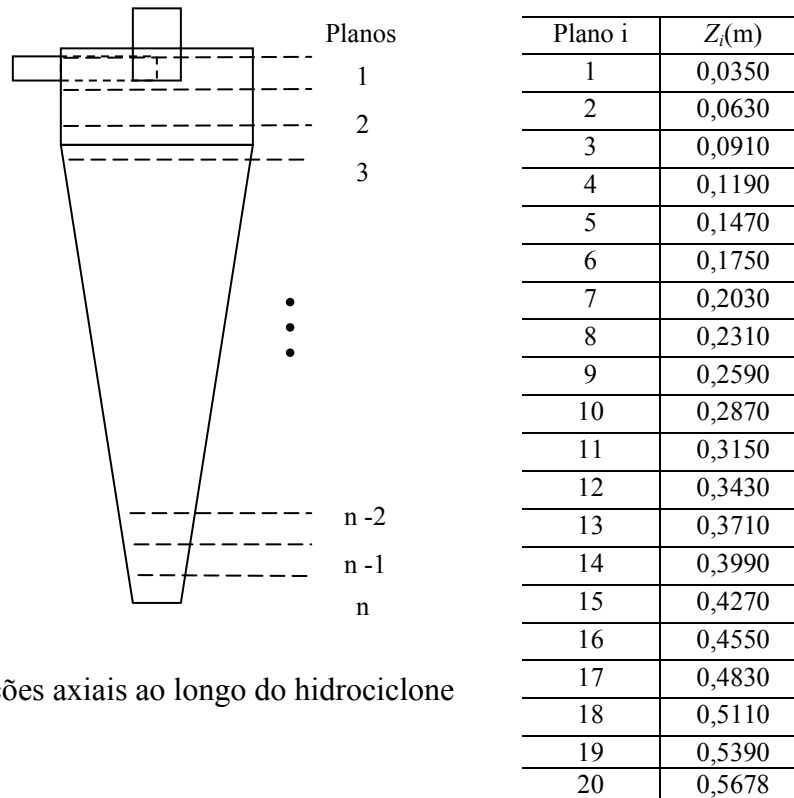


Figura 24: Posições axiais ao longo do hidrociclone

$$v = u_x \cos(\theta) + u_y \text{sen}(\theta) \quad (37)$$

$$w = -u_x \text{sen}(\theta) + u_y \cos(\theta) \quad (38)$$

$$u = u_z \quad (39)$$

A partir da definição da intensidade turbilhonar, equação 16, foi possível obter um valor médio da intensidade turbilhonar sobre cada plano dada pela seguinte equação:

$$\overline{S_n} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R w u r^2 dr d\theta}{R \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R u^2 r dr d\theta} \quad (40)$$

## **Capítulo 4: Resultados e Discussão**

**4.1** Análise da hidrodinâmica do escoamento turbilhonar associado a uma entrada tangencial no hidrociclone

**4.1.1** Análise qualitativa do escoamento

**4.1.2** Análise quantitativa do escoamento

## **CAPÍTULO 4 - Resultados e discussão**

*“Dois importantes fatos, nesta vida, saltam aos olhos; primeiro, que cada um de nós sofre inevitavelmente derrotas temporárias, de formas diferentes, nas ocasiões mais diversas. Segundo, que cada adversidade traz consigo a semente de um benefício equivalente. Ainda não encontrei homem algum bem-sucedido na vida que não houvesse antes sofrido derrotas temporárias. Toda vez que um homem supera os reveses, torna-se mental e espiritualmente mais forte... É assim que aprendemos o que devemos à grande lição da adversidade”.*

*Andrew Carnegie*

### **4.1 Análise da hidrodinâmica do escoamento turbilhonar associado a uma entrada tangencial no hidrociclone**

A fim de caracterizar o comportamento do escoamento turbilhonar associado a uma entrada tangencial no hidrociclone (configuração de Bradley), cujas características estão representadas na Figura 11 do capítulo 2. Em um primeiro momento foi realizada uma análise qualitativa do escoamento visando evidenciar o comportamento global da hidrodinâmica, para em seguida, realizar uma análise quantitativa a partir dos perfis de velocidade axial e tangencial, bem como das curvas de intensidade turbilhonar.

#### **4.1.1 Análise qualitativa do escoamento**

O principal objetivo desta análise repousa sobre a evolução do escoamento na forma de espiral descendente, evidenciando o seu enfraquecimento à medida que o fluido se distancia da entrada tangencial, bem como a espiral ascendente. Para isto, foi caracterizado o comportamento hidrodinâmico com auxílio das representações dos resultados numéricos oriundos do código CFX na forma de linhas de fluxo e iso-superfícies de pressão.

Com a finalidade de por em evidência o comportamento em espiral ascendente e descendente no interior do hidrociclone, foram representadas as linhas de fluxo da mistura óleo/água para diferentes valores de Reynolds, distribuídas nas Figuras 25, 26 e

27. Na Figura 23 estão apresentadas três valores de Reynolds assim como na Figura 24 e, por fim, na Figura 25.

De uma maneira geral, as Figuras 23, 24 e 25 mostram claramente duas correntes de fluxo, uma ascendente na região central do hidrociclone e outra descendente nas proximidades das paredes cilindro-cônica do mesmo. Comportamento este observado por diversos autores em trabalhos numérico e experimental com ciclones e hidrociclones (FRANÇA *et al*, 1996; SALCEDO e PINHO, 2003; LEAHY-DIOS e MEDRONHO, 2003). É importante ressaltar que este comportamento está intimamente relacionado com o valor do número de Reynolds, como pode ser observado nas Figuras 23 a 25. Este fato pode ser explicado pelo fato da força centrífuga aumentar com a vazão de fluido na entrada tangencial. É possível constatar, igualmente, que para baixos valores de Reynolds, as espirais perde sua intensidade rapidamente, e no caso específico de  $Re$  igual a 153 não chega a formar a espiral ascendente na região central do hidrociclone. Esta ação pode estar relacionada com a alta perda de carga que este tipo de dispositivo pode ocasionar (CALDENTAY, 2000; GOMEZ, 2001; SANTOS e SOUSA, 2003). Outra remarca importante sobre estas figuras é que a intensidade turbilhonar, ocasionada pela vazão de entrada, aumenta e promove ao fluido um maior número de voltas no interior do ciclone. Esta intensidade turbilhonar perde sua intensidade à medida que o fluido se distancia da entrada tangencial. Este tipo de comportamento é observado não apenas em hidrociclones, mas também em outros dispositivos munidas de uma entrada tangencial, como por exemplo, nos trabalhos de BOTTARO *et al* (1991) ao estudar numericamente, usando o método dos volumes finitos, o escoamento turbilhonar laminar gerado por uma entrada tangencial de seção quadrada na base de um cilindro vertical. FARIAS NETO *et al.* (1998) estudando numericamente via método de elementos finitos, o escoamento anular não-estabelecido do tipo turbilhonar decrescente induzido por uma entrada tangencial na base de um espaço anular entre dois cilindros verticais. O decréscimo da intensidade turbilhonar ao longo do corpo cilindro-cônico do hidrociclone está relacionado, provavelmente, aos efeitos efetivos da componente de velocidade axial e das forças de atrito induzidas pelas paredes do dispositivo.









Com relação aos campos de pressão, sobre um plano longitudinal mostrados nas Figuras 28 e 29 percebe-se a relação deste campo com a vazão de alimentação no hidrociclone.

Os campos de pressão ilustrados na Figura 26 revelam que a distribuição da pressão depende da vazão de alimentação para valores de Reynolds inferiores a 6748.9595. Este fato pode ser decorrente da predominância da componente de velocidade axial perante a tangencial, fazendo com que a intensidade turbilhonar decaia bruscamente, e o comportamento do fluido se assemelhe a de um escoamento no interior de um tubo. Todavia, para valores do número de Reynolds superiores a 6748.9595, observou-se um comportamento da distribuição das pressões bastante semelhante, como pode ser observado na Figura 29. Nesta Figura percebem-se regiões de baixa pressão próxima ao eixo de simetria, especialmente, no tubo de saída do óleo ou “vortex finder”, bem como, regiões onde as pressões são elevadas, em especial, onde o fluido que vem da entrada tangencial choca diretamente com as paredes da região cilíndrica do hidrociclone (canto superior das imagens da Figura 29). Deve-se destacar igualmente que na parede frontal a esta, tem-se uma região onde as pressões são superiores às do eixo central, sendo mais distribuídas, isto pode ser explicado pela degeneração da força centrífuga face a ação da força peso, do atrito das paredes e das forças viscosas.





#### 4.1.2 Análise quantitativa do escoamento

Este parágrafo tem por objetivo, analisar a evolução dos perfis das componentes axial e tangencial da velocidade para diferentes posições angulares,  $\theta$ , (Figura 30) e da componente da velocidade axial na direção  $z$ , no hidrociclone, para em seguida, avaliar em detalhes a intensidade turbilhonar, definida no parágrafo 1.4.4 do capítulo 1.

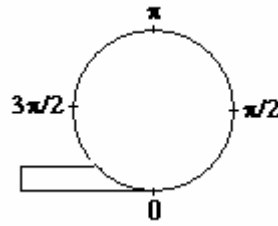


Figura 30: Posições angulares

Nas Figuras 31 e 32 estão representadas, respectivamente, as componentes adimensionais das velocidades axiais ( $u^* = u/u_e$ ) e tangenciais ( $w^* = w/u_e$ ) em função da posição radial adimensional ( $r^* = r/R_c$ ), para diferentes posições axiais adimensionais ( $z^* = z/L$ ) e  $Re$  igual a 6137, com  $u$  e  $w$  sendo as velocidades axiais e tangenciais dimensionais (m/s), respectivamente,  $U_e$  a velocidade axial de entrada (condição de contorno adotada na seção reta do duto de alimentação),  $r$  a posição radial dimensional e  $R_c$  o raio da seção cilíndrica do hidrociclone.







De uma maneira geral, estes gráficos mostram que a medida que o fluido se distancia da entrada tangencial ( $z^* \approx 1$ ) os efeitos das forças centrífuga, das forças de atrito induzidas pelas paredes do hidrociclone e redução na intensidade turbilhonar levam a mudanças da forma dos perfis de velocidade tangencial e axial, principalmente na tangencial.

Tomando-se especificamente as curvas para  $z^* = 0,988$  nas diferentes posições angulares ( $0, \pi/2, \pi$  e  $3\pi/2$ ) das componentes de velocidade axial, (Figura 31), entre as posições radiais adimensionais,  $r^*$ , entre 0 e 0,2 correspondendo a tubulação de saída superior ou “vortex finder”, tem-se que o comportamento do fluido tende a um escoamento do tipo parabólico não-estabelecido, assemelhando-se a de um escoamento em um tubo. O não estabelecimento deste perfil é, provavelmente, decorrente, ainda, da presença de uma velocidade tangencial o que ocasionaria uma intensidade turbilhonar, como pode ser observado na Figura 32, na mesma região ( $0 \leq r^* \leq 0,2$ ). Analisando agora os perfis de velocidade axial nas posições radiais,  $r^*$ , entre 0,2 e 1,0 correspondendo ao espaço anular entre o corpo do hidrociclone e o tubo de saída superior (“vortex finder”) ao longo da posição angular, percebe-se, de uma maneira geral, que seus valores são praticamente constantes e próximos a zero, isto é decorrente da ação da força centrífuga induzida ao fluido pela entrada tangencial. Isto pode ser comprovado ao se observar, nesta mesma região e posição  $z^* = 0,988$ , a Figura 32 nas diferentes posições angulares.

Tomando-se, especificamente, a posição angular  $\pi/2$  em  $0,2 \leq r^* \leq 1$  e  $z^* = 0,988$ , é possível observar que a curva apresenta o ponto de inversão em  $r^* \approx 0,6$  característico de uma zona de recirculação. Para valores de  $r^* > 0,6$  tem-se velocidades negativas caracterizando um fluxo descendente nas proximidades da parede do cilindro e entre  $0,2 < r^* < 0,6$  ascendente, como pode ser observado no campo vetorial de velocidade ilustrada na Figura 33 (b). Comportamento semelhante, foi observado por AOUABED *et al.* (1995) e FARIAS NETO *et al.* (1998) ao estudar um escoamento turbilhonar decrescente de um fluido induzido por uma entrada tangencial na base de um espaço anular entre dois cilindros concêntricos.

Como esperado, a velocidade tangencial  $w$  é a componente predominante em quase todo o hidrociclone, sendo superada pela axial nas proximidades da saída inferior (ou “underflow”), como pode ser observado na Figura 32, na qual estão representadas as componentes de velocidade tangencial adimensional,  $w^*$ , em função da posição radial

adimensional,  $r^*$ , para diferentes posições angulares,  $\theta$ . Estas componentes promovem um movimento rotatório no fluido ao longo de  $\theta$ , fazendo com que atinja valores máximos nas proximidades das paredes cilindro-cônica do hidrociclone. Deve-se ressaltar portanto, dentre os ângulos ilustrados, que a velocidade tangencial atinge um valor máximo da ordem de 0,6 (ou  $w = 12$  m/s) na posição  $\pi/2$ . Todavia, estas componentes de velocidade perde intensidade ao se deslocar nas posições angulares de 0 a  $3\pi/2$ , decorrentes, provavelmente, dos efeitos das componentes de velocidade axial e das forças de atrito induzidas pelas paredes do hidrociclone e da força gravitacional.

A resultante das componentes de velocidade axial e tangencial são, provavelmente, as responsáveis pelo aparecimento das zonas de recirculação que são observadas nas Figuras 33 b-d e 34 b-d, caracterizando um turbilhão que nasce na região de alimentação (duto de entrada) e que percorre o hidrociclone em espiral descendente.





A análise e a discussão da hidrodinâmica do hidrociclone realizada até então, ilustra um comportamento decrescente do escoamento turbilhonar à medida que o fluido se distancia da entrada tangencial. Este decréscimo é igualmente caracterizado por um parâmetro adimensional fazendo a relação entre as quantidades de movimento axial e tangencial, definido pela equação (16) capítulo 1, denominada de intensidade turbilhonar,  $S_n$ .

Os resultados da intensidade turbilhonar média,  $\overline{S_n}$  sobre cada um dos planos (seção transversal) situados a diferentes posições axiais estão ilustradas nas Figuras 35 e 36 para diferentes valores de Reynolds. Estas figuras mostram de uma maneira geral dois comportamentos distintos: um onde  $S_n$  apresenta flutuações e outra com um comportamento decrescente, com exceção para baixos valores de Reynolds .

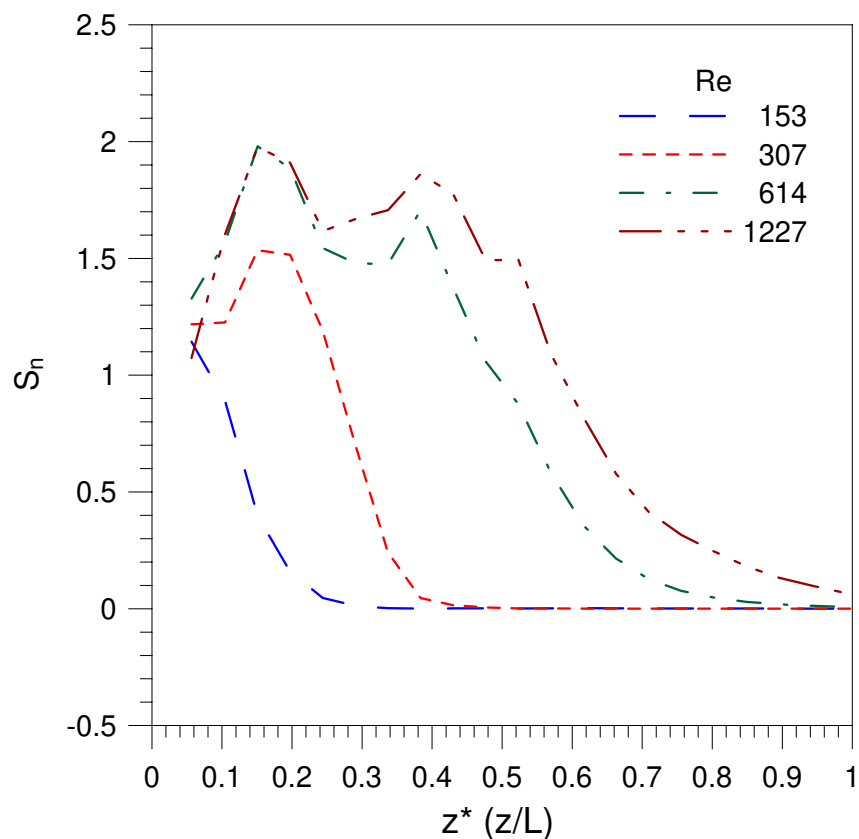


Figura 35: Intensidade turbilhonar em função da posição axial adimensional para diferentes números de Reynolds

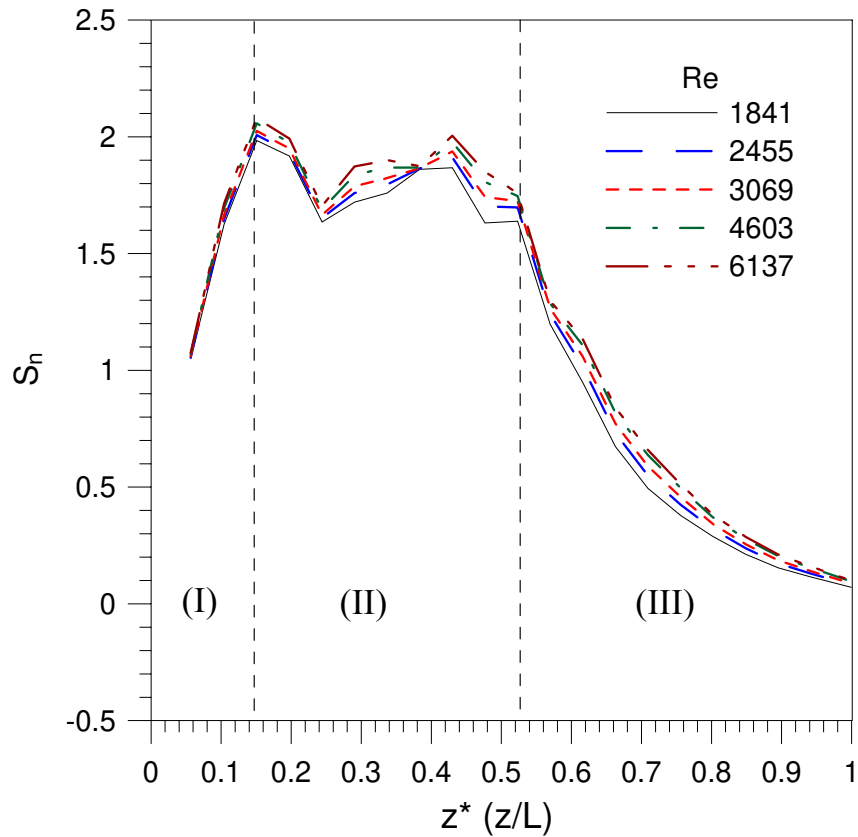


Figura 36: Intensidade turbilhonar em função da posição axial adimensional para diferentes valores de Reynolds

Ao se analisar mais detalhadamente o comportamento da intensidade turbilhonar,  $S_n$ , em relação a posição axial,  $z^*$ , para  $Re$  maiores que 1800 (Figura 36) pode-se distinguir três zonas:

- I) Uma primeira correspondendo a região na qual foi constatada que a velocidade tangencial predominava em relação a componente axial ( $z^* \leq 0,16$ )
- II) Uma zona de transição, na qual existe uma constante alternância da componente de velocidade dominante de acordo com a posição axial. ( $0,16 \leq z^* \leq 0,52$ )
- III) Uma última região, onde as componentes axiais começam a predominar sobre as tangenciais ( $z^* > 0,52$ ), onde os efeitos da força centrífuga reduzem drasticamente.

Este tipo de comportamento está provavelmente relacionado com as zonas de recirculação que foram observadas quando da análise das componentes de velocidade axial e tangencial e da redução gradual da seção reta da região cônica do hidrociclone.

Ao se observar as Figuras 35 e 36 é possível constatar a influência da vazão de alimentação sobre o comportamento do fluido no interior do hidrociclone, conforme fora discutido durante a análise qualitativa da hidrodinâmica. Percebe-se que a medida que o valor de Re aumenta, há um aumento substancial da intensidade turbilhonar e que a partir de um determinado valor de Reynolds, a intensidade turbilhonar fica praticamente independente da vazão de alimentação. Visando por em evidência esta característica foi criado o gráfico de  $S_{n,med}$  em função do número de Reynolds, onde  $S_{n,med}$  corresponde a média das intensidades turbilhonares médias,  $\overline{S_n}$ , ao longo das posições axiais adimensionais,  $z^*$ , Figura 37, dada por:

$$S_{n,med} = \frac{\int_0^1 S_n dz}{\int_0^1 dz} \quad (43)$$

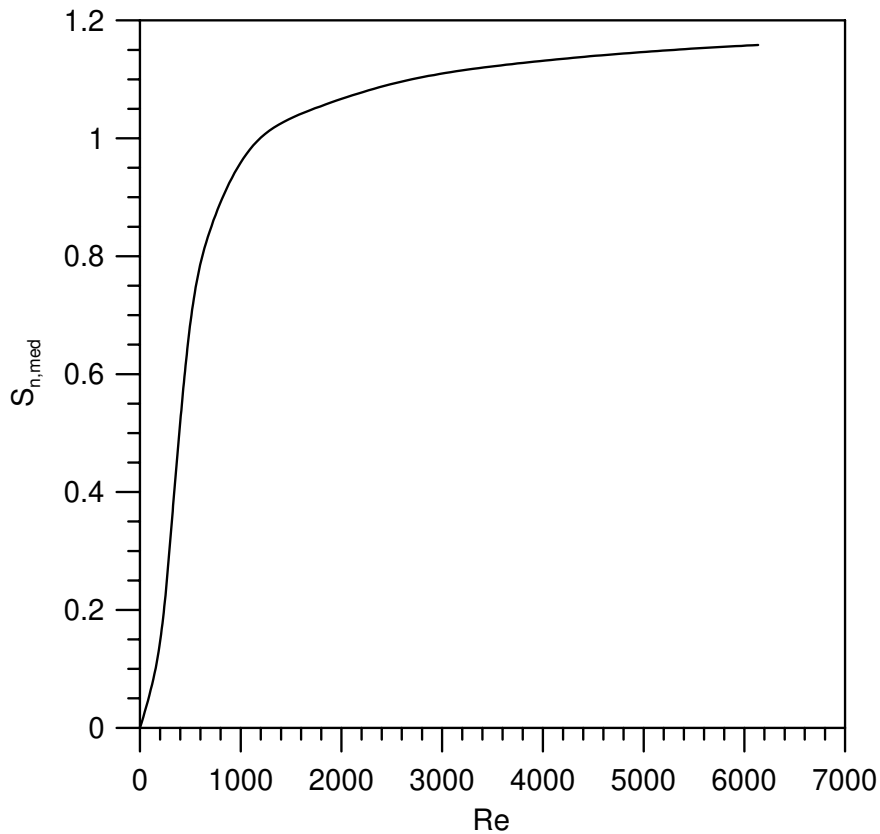


Figura 37: Intensidade turbilhonar média em função do número de Reynolds

A Figura 37 mostra que  $S_{n,med}$  aumenta rapidamente para valores de Reynolds inferiores a 1800 e que se mantém praticamente constante a medida que  $Re$  aumenta.

Com a finalidade de por em evidência a influência da intensidade turbilhonar no interior do hidrociclone sobre a eficiência de separação óleo/água, foi calculada a eficiência total,  $\epsilon$ , definida pela Equação 21 e, então, plotada em função da intensidade turbilhonar média,  $S_{n,med}$ , como pode ser observada na Figura 38. Esta figura mostra claramente a dependência da eficiência total em relação a intensidade turbilhonar média,  $S_{n,med}$ . Observa-se que para atingir uma boa eficiência de separação é necessário altos valores da intensidade turbilhonar. Verifica-se geralmente, que para valores superiores a 1 da intensidade turbilhonar a eficiência total manteve-se praticamente constante e em torno de 56%. Este fato pode estar relacionado com a forma pelo qual foi induzida esta intensidade turbilhonar no seio do hidrociclone, ou seja, por meio da variação da vazão de entrada. LEAHY-DIOS e MEDRONHO (2003) obtiveram uma eficiência total de separação de 58,9%, usando a configuração de Bradley dez vezes menor que a do presente trabalho. Recentemente, foi publicado um trabalho em que seus autores variaram a inclinação do duto de alimentação aumentando substancialmente a eficiência



total de separação de 54,4% com uma entrada tangencial sem inclinação para 77,2% com uma inclinação de 45° (BERNARDO *et al.*, 2005).

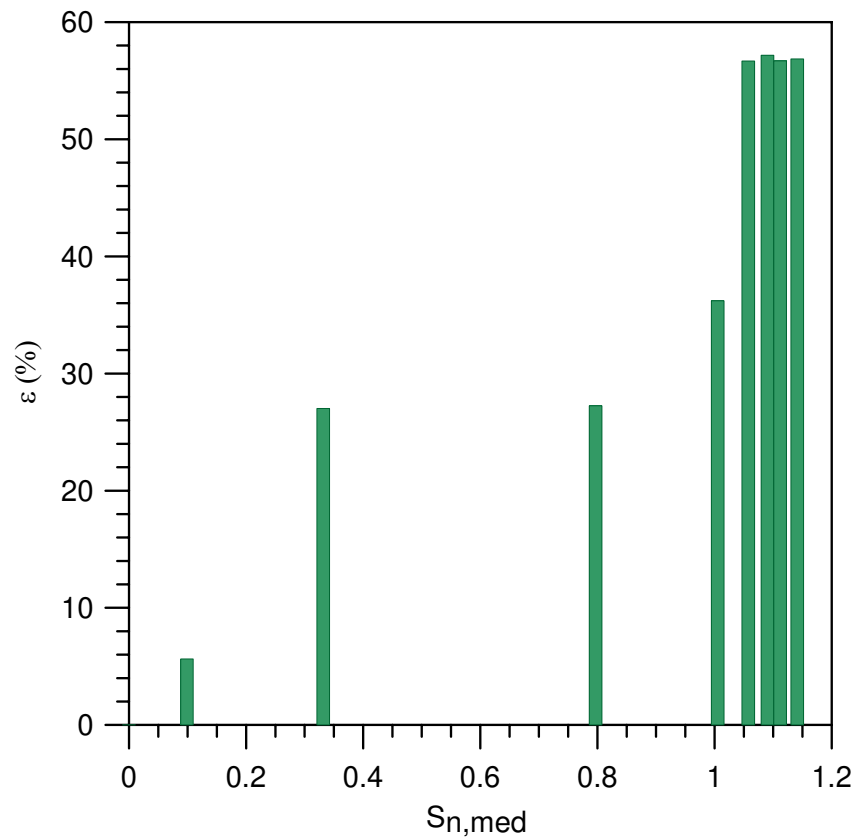


Figura 38: Eficiência versus Intensidade turbilhonar média

A fim de verificar a dependência da eficiência de separação, ou seja, eficiência total,  $\varepsilon$ , em relação a pressão de entrada,  $p$ , foi criado o gráfico de  $\varepsilon$  versus a pressão adimensional,  $p^*$  [ $p/(\rho_m U_e)$ ], onde  $\rho_m$  é a massa específica da mistura e  $U_e$  é a velocidade de entrada, conforme ilustra a Figura 39. Esta curva mostra que para pressões adimensionais de entrada superiores a 0,3 a eficiência se mantém constante, mostrando-se independente da pressão de alimentação, pelo menos nas condições estudadas. GOMES (2002) por sua vez mostrou experimentalmente que a eficiência começa a cair com o aumento da pressão, devendo ressaltar que esta observação foi feita para pressões de entrada muito superiores as adotadas neste trabalho.

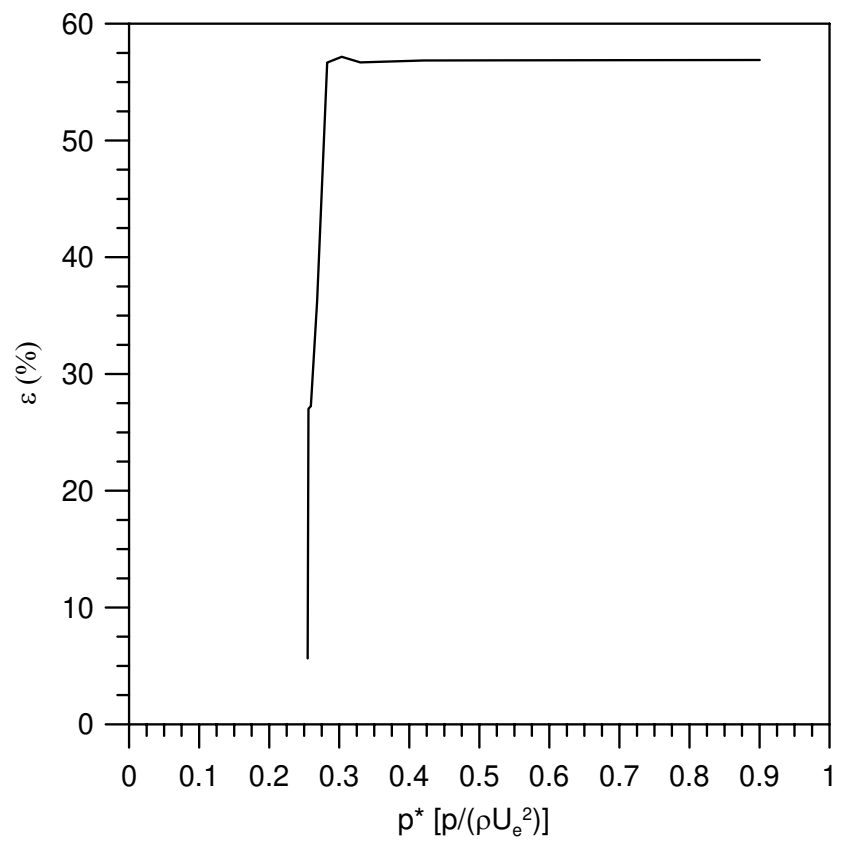


Figura 39: Eficiência total versus Pressão de entrada adimensional

## Conclusão

As análises qualitativas e quantitativas das linhas de fluxo, das iso-superfícies de pressão, das intensidades turbilhonares para diferentes números de Reynolds permitiu por em evidência o caráter fortemente assimétrico e tridimensional do escoamento turbilhonar induzido por uma entrada tangencial no hidrociclone.

Os resultados numéricos mostraram o aparecimento de zonas de recirculação ligadas a combinação de diversos fatores, tais como: efeitos da força centrífuga, efeito do atrito induzido pelas paredes e efeitos da queda de pressão no eixo.

Com os resultados da intensidade turbilhonar em função da posição axial no hidrociclone foi possível diferenciar três regiões com comportamentos diferentes: uma onde as velocidades tangenciais predominam; outra de zona de transição e finalmente onde as velocidades axiais começam a predominar.

A eficiência total mostrou-se dependente do valor da intensidade turbilhonar média com valores inferiores a 1, já para valores superiores a este, a eficiência se manteve praticamente constante.

A eficiência de separação ou total mostrou-se independer da pressão na seção de entrada, para valores superiores a 1,2 atm, dentro da gama de valores avaliados no presente trabalho (1 a 3,5 atm).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, P.H.L., “Modelagem e simulação fluidodinâmica de um secador de leito fluidizado industrial”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil (2003).
- AOUABED,H.; LEGENTILHOMME,P. E LEGRAND,J., “Wall visualization of swirling decaying flow using a dot-point method”, *Exp. Fluids*, vol. 19, pp. 43-50 (1995).
- ARAÚJO,A.J.S., “Paradoxos da modernização: Terceirização e segurança dos trabalhadores em uma refinaria de petróleo”, Tese de Doutorado, Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2001).
- ASSUNÇÃO,R.S., “Avaliação das emissões de compostos orgânicos voláteis (VOCs) em operações de carga e descarga de derivados líquidos de petróleo”, Monografia. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil (2003).
- AVCIA,A. E KARAGOZ, I., “Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators”, *J. Aerosol Sci*, vol. 34, pp. 937-955 (2003).
- AVEROUS,J. E FUENTES,R., “Advances in the numerical simulation of hydrocyclones classification”, *Can. Metall. Quartely*, vol. 36, n<sup>o</sup> 5, pp. 309-314 (1997).
- BAKKER,A.; HAIDARI,A.H. E OSHINOWO,L.M., “Realize greater beneficts from CFD”, *Fluids/Solids Handling*, [www.aiche.org/cep/](http://www.aiche.org/cep/) (2001).
- BERNARDO, S.; PERES, A.P.; MORI, MILTON, “Avaliação das influências da inclinação da seção de entrada em ciclones de escala industrial”, *Petro & Química*, n<sup>o</sup> 272, pp 143-151. Rio de Janeiro, 2005.
- BOTTARO.A., RYHMING,I.L., WEHRLI,M.B., RYS,F.S. E RYS,P., “Laminar swirling flow and vortex breakdown in a pipe”, *Computers Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 89, pp. 41-57 (1991).
- BOYSAN,F. ;AYERS,W.H.;SWITHEBANK,J.A., “Fundamental mathematical modeling approach to cyclone design. *Trans. I. Chem. E.* v.60, pp. 222-230, 1982.
- BRETNEI, E. US Patent n. 453, 105, 1891 apud GOMES, R.H.P, “Separação de emulsoes oleo-agua em hidrociclones”. Dissertação de mestrado. Universidade de Uberlândia. Engenharia Química. Uberlândia – Mg, 2002.

BRUNAZZI,E.;PAGALNTI,A., “ Simplified design of axial-flow cyclone mist eliminators. AICHE Journal, vol.49, n.1, 2003.

BUFFAT,M., “Étude de la simulation numérique par une méthode d’éléments finis des écoulements internes subsoniques instationnaires bi et tridimensionnels”, Tese de Doutorado, Université Claude Bernad - Lyon I, Lyon, França (1991).

CALDENTAY,J.C., “ A mechanistic model for liquid hydrocyclones (LHC). Dissertação de mestrado. University of Tulsa, 2000.

CÂMARA, J.B.D.; MESQUITA,J.X.; MIRANDA,M.I.; BRUSSOLO JÚNIOR,J.B.; ANTUNES,M.I., “Perspectivas do meio ambiente do Brasil”, Relatório do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o meio ambiente) – IBAMA (2002).

CARDIGOS, F.,LOPES H., GONÇALVES J., “Prestige: Conseqüências de um derrame de hidrocarbonetos”, (2003). Disponível no endereço:

<http://www.horta.uac.pt/projetcs/msubmerso/200302/prestige.html>

CARVALHO,N.G., “Estudo e avaliação de um separador de agregados minerais por hidrociclonagem”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil (1996).

CAVALCANTI,R.S., “Estudo fluidodinâmico do desprendimento de H<sub>2</sub> em uma célula eletrolítica utilizando o aplicativo computacional CFX”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil (2003).

CAVALCANTI,R.S.; Farias Neto,S.R.; Vilar,E.O., “Estudo da fluidodinâmica de bolhas de hidrogênio em um reator eletroquímico”, Artigo submetido ao XV COBEQ – Congresso Brasileiro de Engenharia Química (2004).

CAVALCANTI,R.S.;FARIAS NETO,S.R.;VILAR,R.E., “A computational fluid dynamics study of hydrogen bubbles in na electrochemical reactor. Braz.arch.biol.technol., June 2005, vol. 48,n.spe,p.219-229, ISSN 1516-8913.

CLAYTON,B.R. E MORSI,Y.S.M., “Determination of principal characteristics of turbulent swirling flow along annuli, Part 1, Measurement of time mean parameters”, Int. J. Heat & Fluid Flow, vol. 5, n<sup>o</sup> 4, pp. 195-203 (1984).

CÔRREA,J.L.G., “Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, SP, Brasil (2003).

CORREA,J.L.G.çGRAMINHO,D.R.;SILVA,M.A.;NEBRA,S.A., “ The cyclone dryer a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle

- residence time. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Vol.21, n.1, pp. 103-112, 2004.
- DAVIDSON,M.R., “Similarity solutions for flow in hydrocyclones”, Chem. Eng. Science, vol. 43, n<sup>o</sup> 7, pp. 1499-1505 (1998).
- DHATT,G. E TOUZOT,G., “Une présentation de la méthode des éléments finis”, Maloine S.A., Paris (1984).
- FARIAS NETO, S. R., “Simulation numérique des écoulements annulaires non-établis de types axial e tourbillonnaire – cãs du transfert de matière”, Tese de Doutorado, Universidade de Nantes, França (1997).
- FARIAS NETO, S.R.;LEHENTILHOMME,P.; LEGRAND,J. “Finite-element simulation of laminar swirling decaying flow induced by means of a tangential inlet in na annulus”, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol. 165, pp. 189-213 (1998).
- FASSANI,F.L.;GOLDSTEIN,J.L., “A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency. Powder Techonology 107, 60-65, 2000.
- FERNANDES R., “Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos”, Monografia. Instituto Superior Técnico em Engenharia do Ambiente (2001).
- FORTUNA, A.O., “Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos”, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo (2000).
- FOUST,A.S.;WENZEL,L.A.;CLUMP,C.W.;MAUS,L.;ANDERSEN,L.B., “ Operações unitárias. Editora Guanabara 2. 2<sup>a</sup>.edição , Traduzido por Macedo,H. UFRJ, 1982.
- FRANÇA,A.M.;ORFAO,J.J.;SALCEDO.R.L., “ Dry scrubbing of gaseous HCL with solid lime in a cyclone reactor at low temperatures – Ind. Eng. Chem. Res. 2001, 40, 304-313.
- FRANCO, A.T., “Diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos”, Apostila do Centro Federal de Educação Tecnológico do Paraná (2000).
- FRASER,S.M.,RAZEK,A.M.A.;ABDULLAH,M.Z., “ Computational and experimental investigations in a cyclone dust separator. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Eng. Parte E – Journal of Process Mechanical Engineering, v.211,p. 247-257, 1997.
- GIORDANO, G., “Avaliação ambiental de um Balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ (1999).
- GOMES, R.H.P, “Separação de emulsoes oleo-agua em hidrociclones”. Dissertação de

mestrado. Universidade de Uberlândia. Engenharia Química. Uberlândia – Mg, 2002.

GÓMEZ, C. H., Oil-water separation in liquid-liquid hydrocyclones (LLHC) – Experiment and modeling, Dissertação de mestrado apresentado na Universidade de Tulsa, U.S.A. (2001).

GOODMAN, K. S.; Troake R.P., “Institute of Petroleum”, London (1983).

GOSMAN, A.D.; PUN, W.M.; RUNCHAL, A.K.; SPALDING, D.B. E WOLFSHTEIN, M., “Heat mass transfer in recirculating flows”, Academic Press, London (1969).

HARGREAVES, J.H. E SILVESTER, R.S., “Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoiling hydrocyclone performance. Institution of Chemical Engineers, vol. 68, Part A (1990).

HIRSH, C., “Numerical computation of internal and external flows”, vol.1, Fundamentals of numerical discretization, A Wiley-Interscience Publication (1988).

HUGHES, T.J.R., “A simple scheme for developing upwind finite elements”, Inst. J. Num. Eng., vol. 12, pp. 1359-1365 (1978).

HSIEH, K.T. E RAJAMANI, R.K., “Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow”, AIChE Journal, vol. 37, n<sup>o</sup> 5, pp. 735-746 (1991).

HUSSEY M.J.L.; Thatcher, R.W. e Bernal, M.J.M., “On the construction and use of finite elements, J. Inst. Maths Applics., vol. 6, pp. 263-282 (1970).

LEAHY-DIOS, A. E MEDRONHO, R.A. “Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones”, Cong. Bras. de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro (2003).

LEFÊBRE, G., “Caractérisation de la turbulence en écoulement annulaire tourbillonnaire non entreteu”, Tese de Doutorado, Universidade de Nantes – ISITEM, França (1996).

LEGENTILHOMME, P. E LEGRAND, J., “Overall mass transfer in swirling decaying flow in annular electrochemical cell”, J. Appl. Electrochem., vol. 20, pp. 216-222 (1990).

LEGENTILHOMME, P. E LEGRAND, J., “The effects of inlet conditions on mass transfer in annular swirling decaying flow”, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34, n<sup>o</sup> 4/5, pp. 1281-1285 (1991).

LEGENTILHOMME, P. E LEGRAND, J., “Visualisation de l’écoulement tourbillonnaire non-entreteu dans um réacteur électrochimique à cylindres coaxiaux”, Récents Progrés em Génie dès Procédés, Ed. Tech. Doc., Lavoisier, vol. 3, n<sup>o</sup> 7, pp. 567-572 (1989).

MAIA, D.F., “Membranas cerâmicas de zircônia obtidas pelo método pechini para separação de óleo/água”, Monografia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB

(2004).

MALISKA,C.R., “Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional - Fundamentos e coordenadas generalizadas”, LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro (1995).

MÉIER,H.F., “Modelagem fenomenológica e simulação bidimensional de ciclones por técnicas da fluidodinâmica computacional”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, São Paulo, Brasil (1998).

MOLEROUS,°;GLUCKER,M., “ Developmente of a cyclone separator with new design. Powder Technology 86, 37-40, 1996.

NEBRA,S.A.;SILVA,M.A.;MUJUNDAR,A.S., “Drying in cyclones – a review. Dryng Technology, v. 18, n.3, pp. 791-832, 2000.

NISSAN,A.H. E BRESSAN,V.P., “Swirling flow in cylinders”, A. I. Ch. E. Journal, vol. 7, n<sup>o</sup> 4, pp. 543-547 (1961).

NORDIVK,A.B.;SIMMONS,J.L.;BITTING,K.R.; LIWIS,A. E STROM-KRISTIENSEN,T., Oil and water separation in marine oil spill clean-up operations, Spill Science &Tech. Bulletin, 3,n<sup>o</sup>3,107-122,1996.

OLIVEIRA,A.G. E MEDRONHO,R.A., “Simulação numérica de um hidrociclone para o tratamento de águas de lastro de navios petroleiros”, II Cong. Bras. de Termodinâmica Aplicada (2004).

PALADINO,E.E., “ Estudo do escoamento multifasico em medidores de vazão do tipo de pressão diferencial”. Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolos, SC, 2001.

PATANKAR,S.V.;SPALDING,D.B., “ A calculation procedure for heat, mass and 86 momentum transfer in tree-dimensional parabolic-flows”. Int. Journal of heat and mas vol. 15, pp. 1797-1806, 1972.

PATANKAR,S.V.” Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA, 1980.

PENG,W;PASCAL.J.A.J., “ Flow in the inlet region in tangencial inlet cyclones. Ind. Eng. Chem. Res. 2001, 40, 5649-5655.

PERICLOUS,K.A., “Mathematical simulation of hydrocyclones”, Appl. Math. Modelling, vol. 11, pp. 242-255 (1987).



RIMA (relatório de impacto ambiental) do sistema de rebombeio autônomo e escoamento dos Campos de Marlim Leste, Marlim Sul e Roncador Complexo PDET- Trecho Marítimo (2003).

SAATDJIAN,E.,”Phenomenes de transport et leurs resolutions numeriques”Polytechnica, Paris, 1993.

SALCEDO,R.L. E PINHO,M.J., “Pilot and industrial-scale experimental investigation of numerically optimized cyclones, *Ind. Eng. Che. Res.*, vol.42, n<sup>o</sup> 1, pp. 145-154 (2003).

SANTOS,E.S., “Estudo da adsorção de contaminantes orgânicos provenientes da água de extração do petróleo em coluna de leito fixo utilizando biomassas como adsorvente”, Monografia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil (2002).

SANTOS,A.J. E SOUSA,A.M.S., “Teste com hidrociclones em série em PNA-1”, Relatório técnico da unidade Bacia de Campos, Petrobrás (2003).

SHOUKRY,E. E SHEMILT,L.W., “Mass transfer enhancement in swirling annular pipe flow”, *Ing. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, vol. 24, n<sup>o</sup> 1, pp. 53-56 (1985).

SILVA,A.A., - Estudo de argilas organofílicas destinadas à separação óleo/água. Monografia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2004.

SIMÕES,A.M.B.M.; FARIAS NETO,S.R.;CAVALCANTI,R.S. - Avaliação da intensidade turbilhonar em um corpo cilindro-cônico via CFX. II Congresso Brasileiro de Termodinâmica Aplicada – CBTERMO, 2004.

SOLERO,G. E COGHE,A., “Experimental fluid dynamics characterization of a cyclone chamber”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 27, pp. 87-96 (2002).

SPOGIS,N. “metodologia para determinação de curvas potencia e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2002.

SVAROVSKY,L., “Solid-Liquid Separation”, *Chemical Engineering Series*, 2nd ed., Butterworths, London (1981).

TALBOT,L., “Laminar swirling pipe flow”, *J. Appl. Mech.*, vol. 2, pp. 1-7 (1954).

THOMAS,J.E.; TRIGGIA,A.A.; CORREIA,C.A.; VEROTTO FILHO,C.; XAVIER,J.AD.; MACHADO,J.C.V., “Fundamentos de Engenharia do Petróleo”, ed. Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil (2001).

YALCIN,T.;KAUKOLIN,E.;BYERS,A., “ Axial inlet cyclone for mineral processing applications.” *Minerals Engineering* 16, 1375-1381, 2003.

YOUNG,G.A.B.;WAKLEY,W.D.;TAGGART,D.L.;ANDREWS,S.L.;WORREL,J.R., “ Oil water separation using hydrocyclone: An experimental search for optimum dimensions, Petroleum Science & Engineering, 11, 37-50, 1994.

ZIENKIEWICZ,O.C.;TAYLOR,R.L., “The finite element method”, 4a. Edição , Volmes 1 e2, 1994.

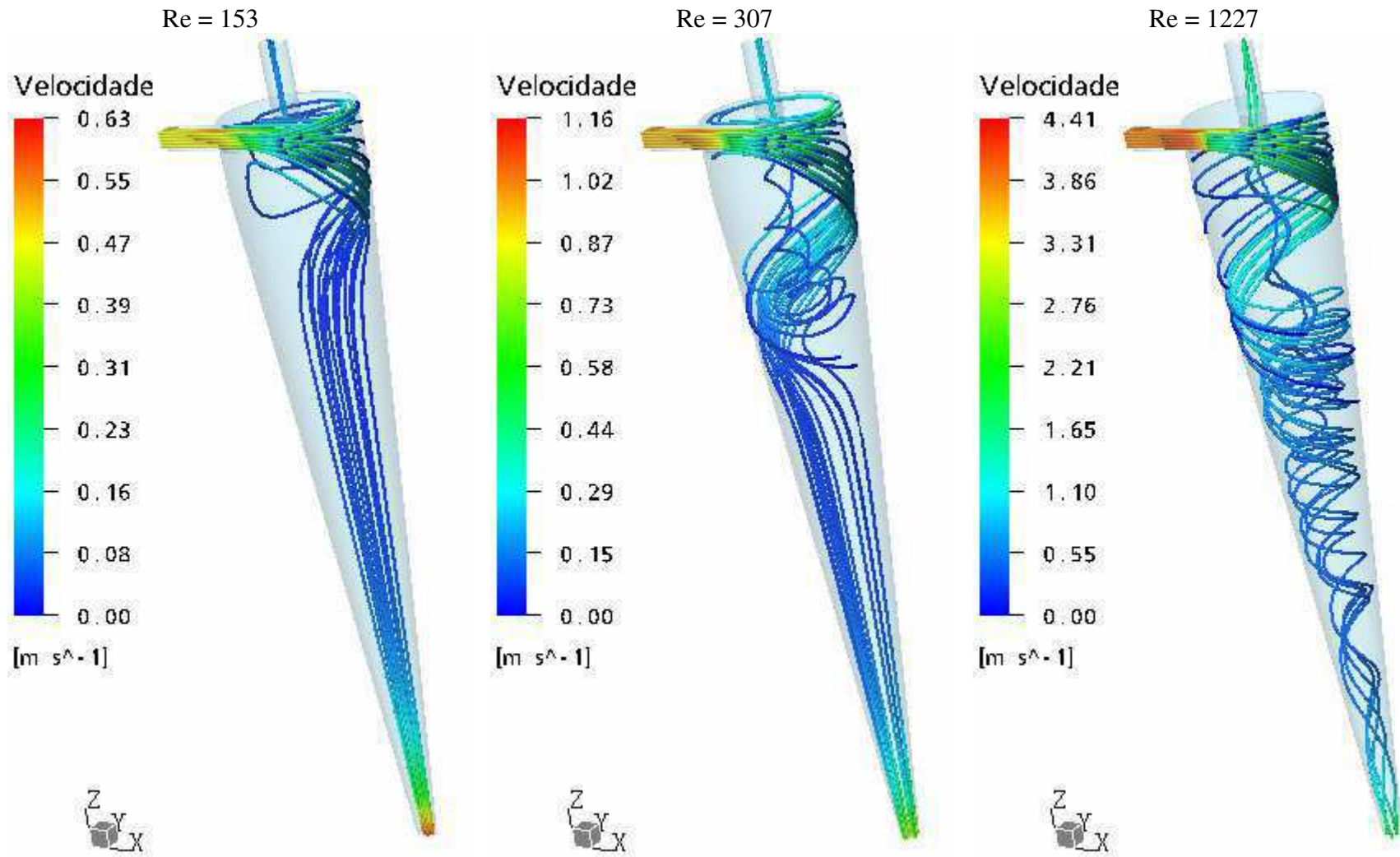


Figura 25: Linhas de Fluxo para Re (153, 307 e 1227)

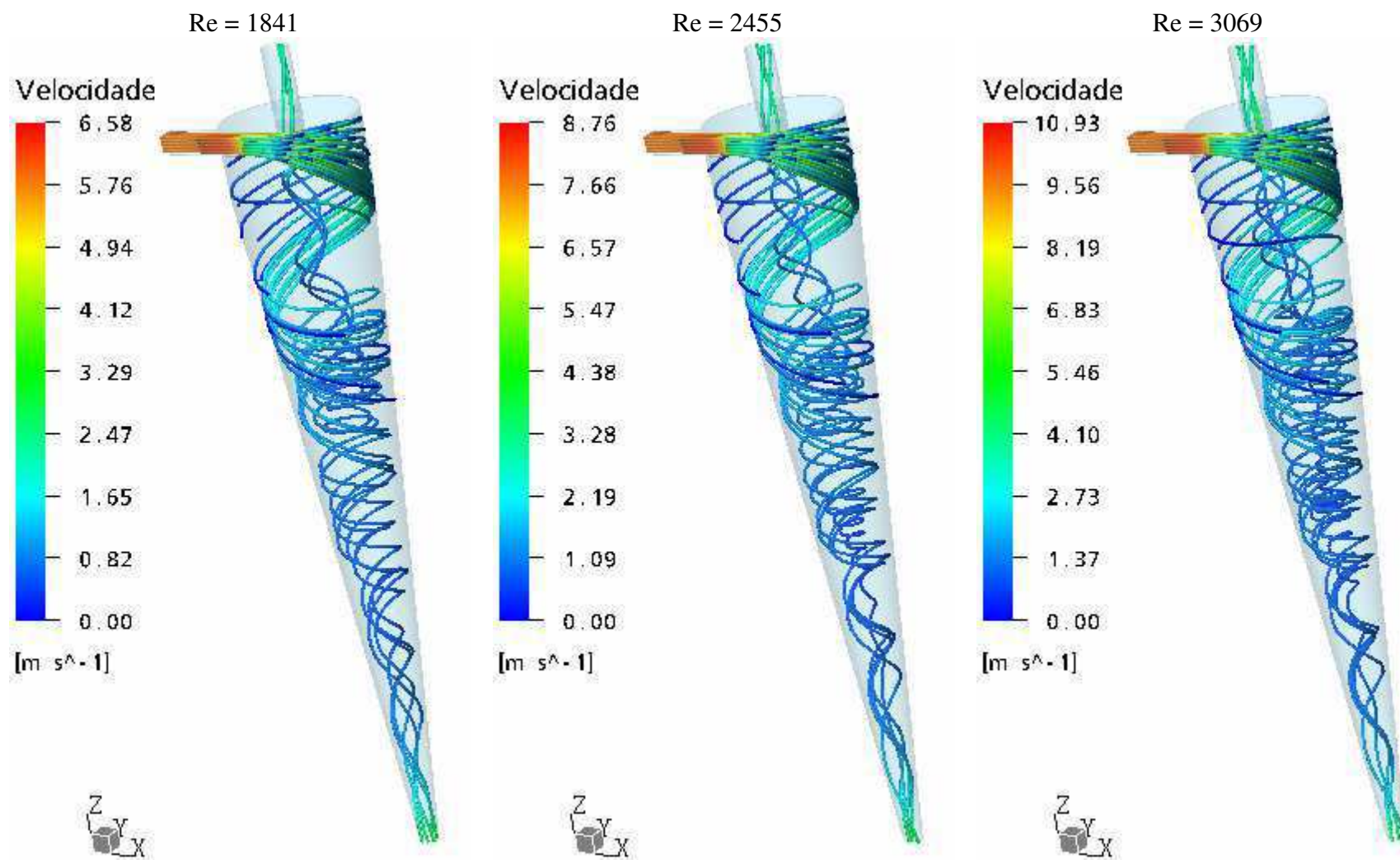


Figura 26: Linhas de Fluxo para Re (1841, 2455 e 3069)

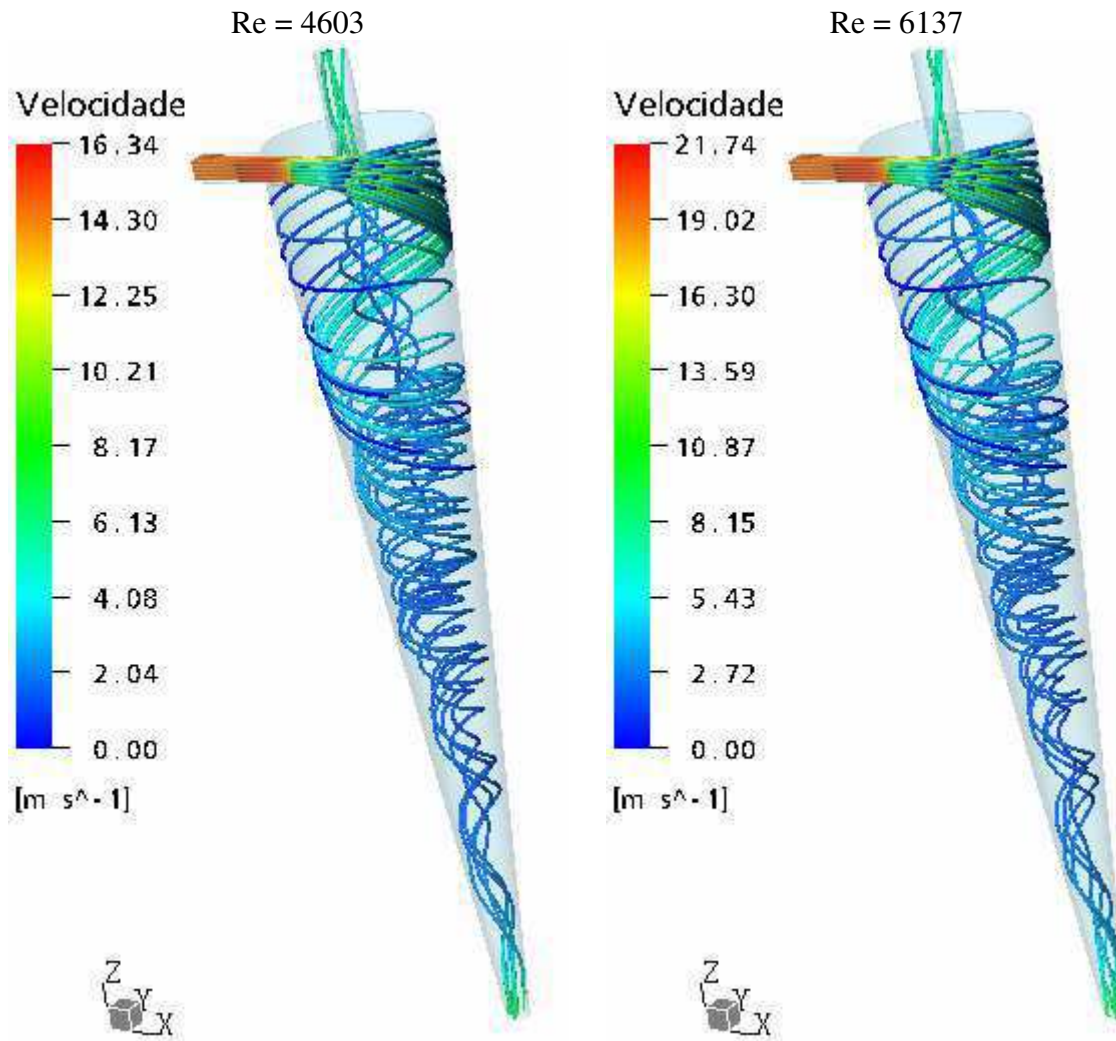
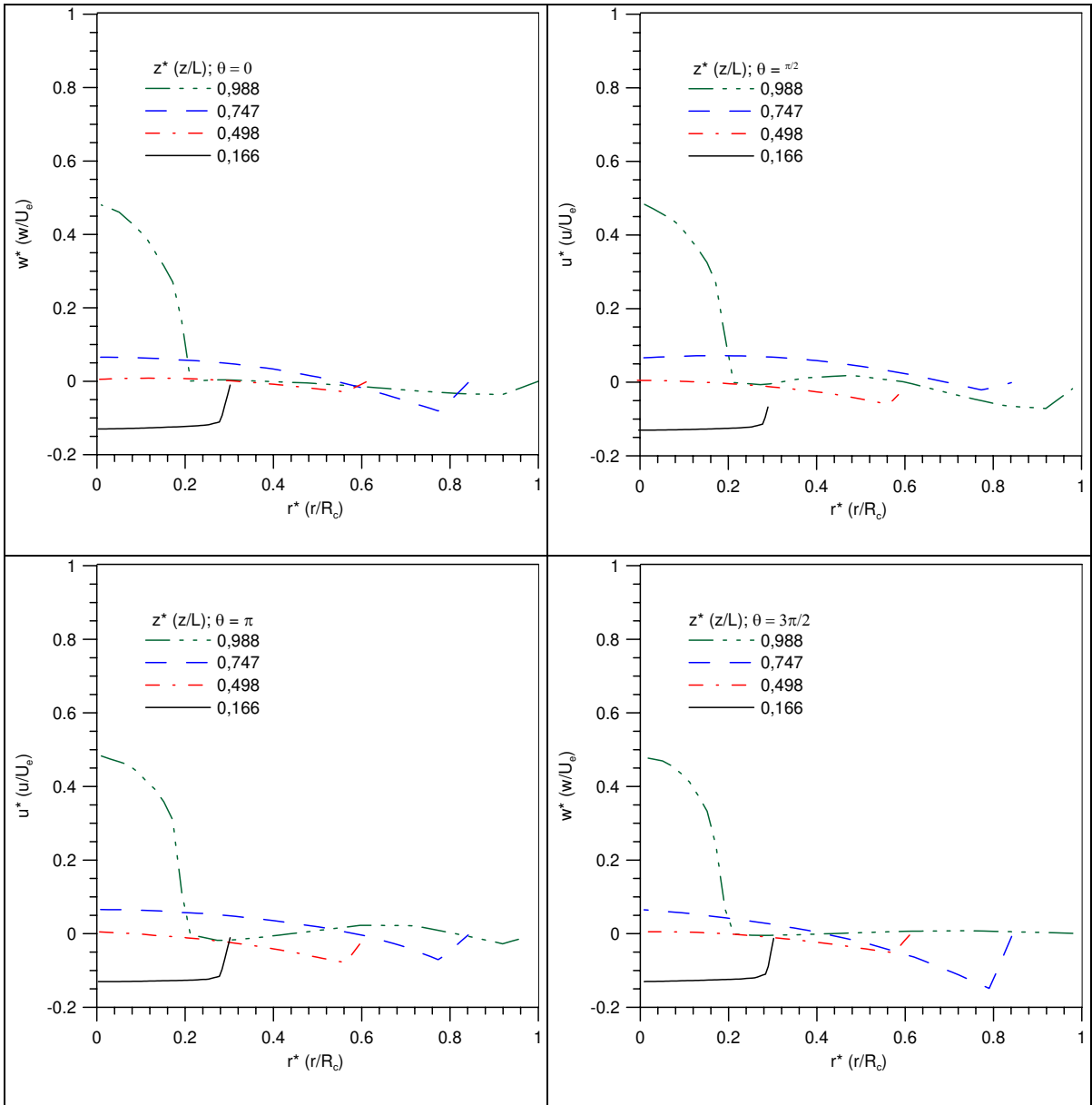
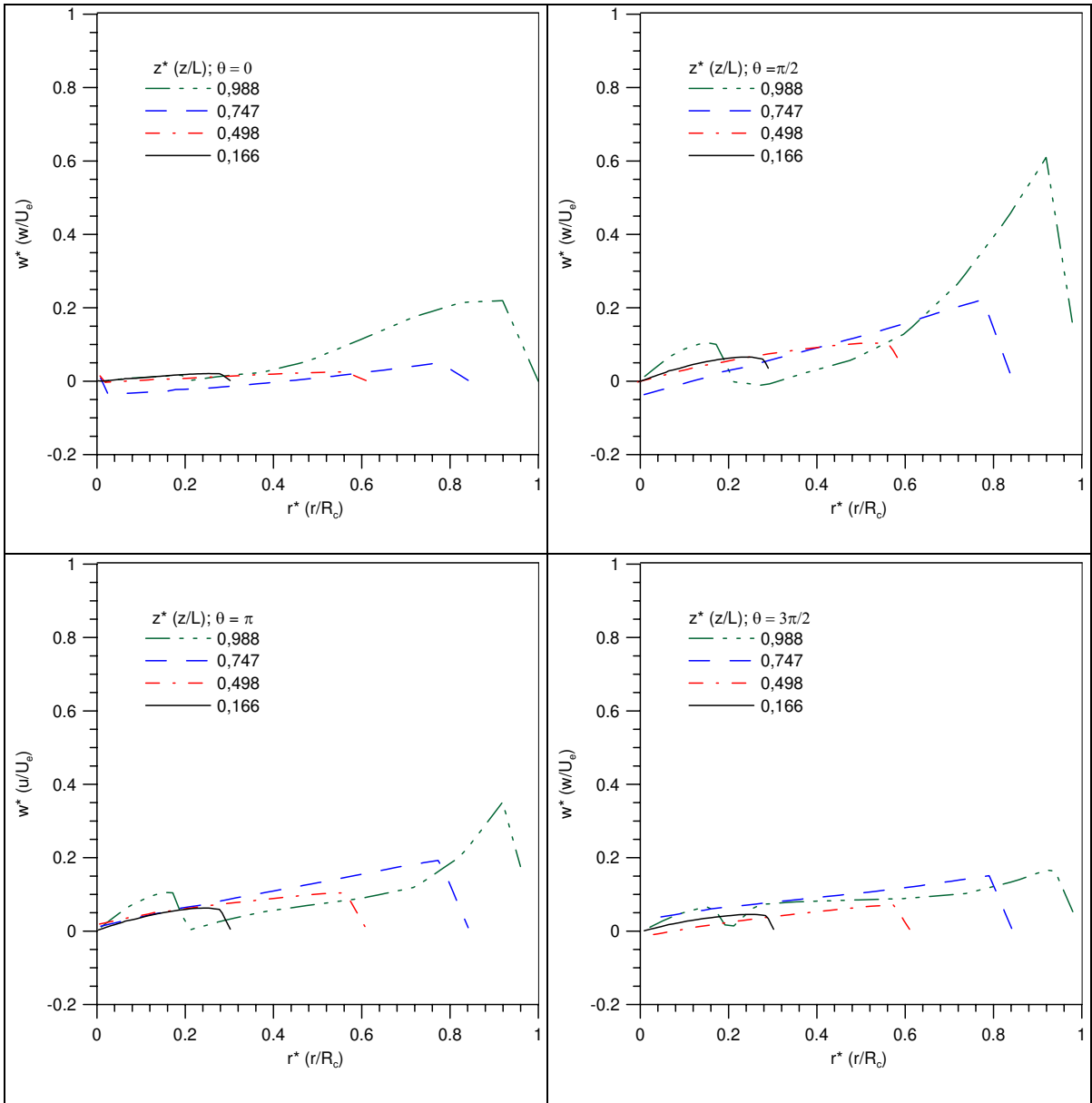


Figura 27: Linhas de Fluxo para Re (4603 e 6137)





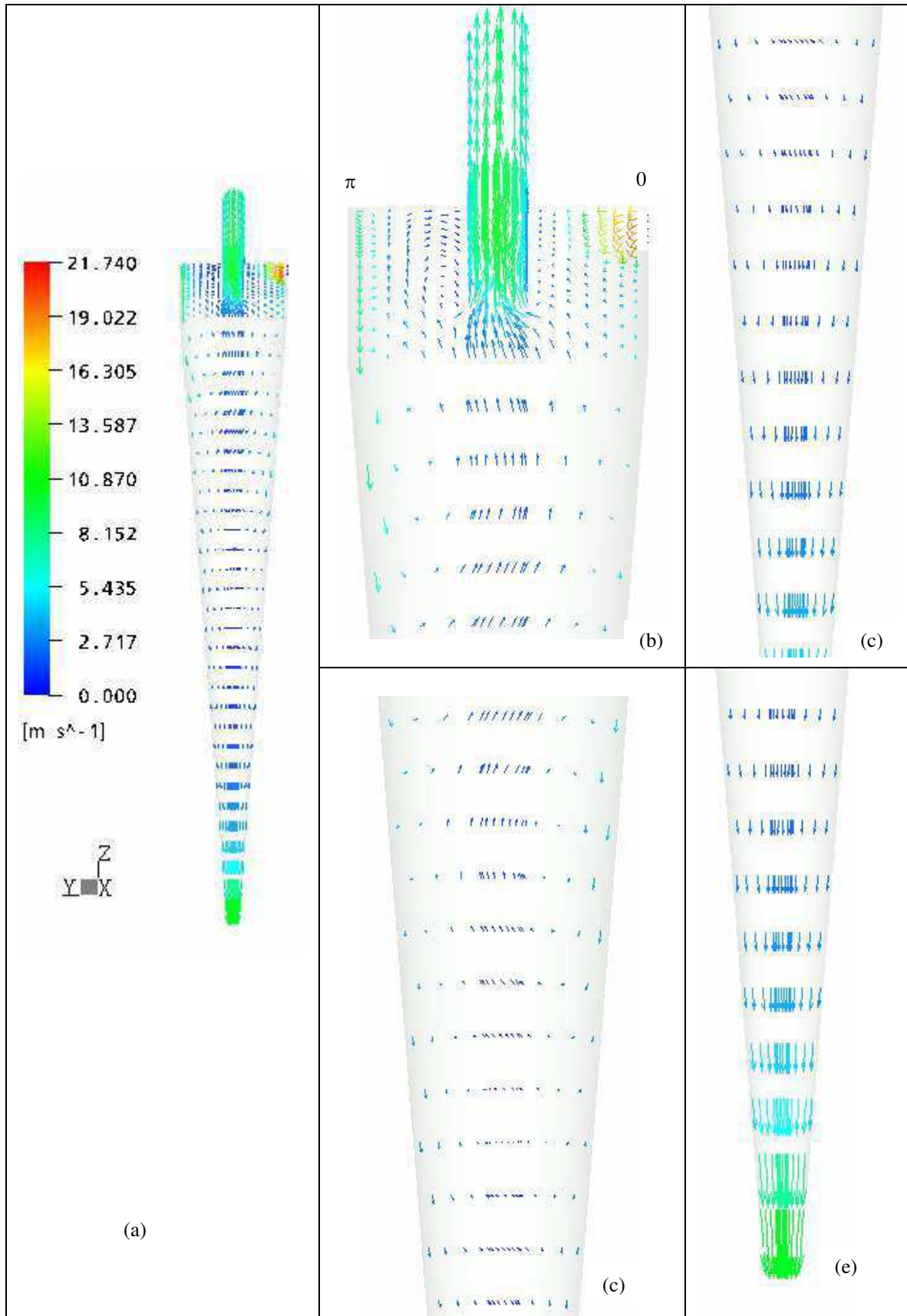


Figura 33 - Campo vetorial de velocidade sobre o plano YZ



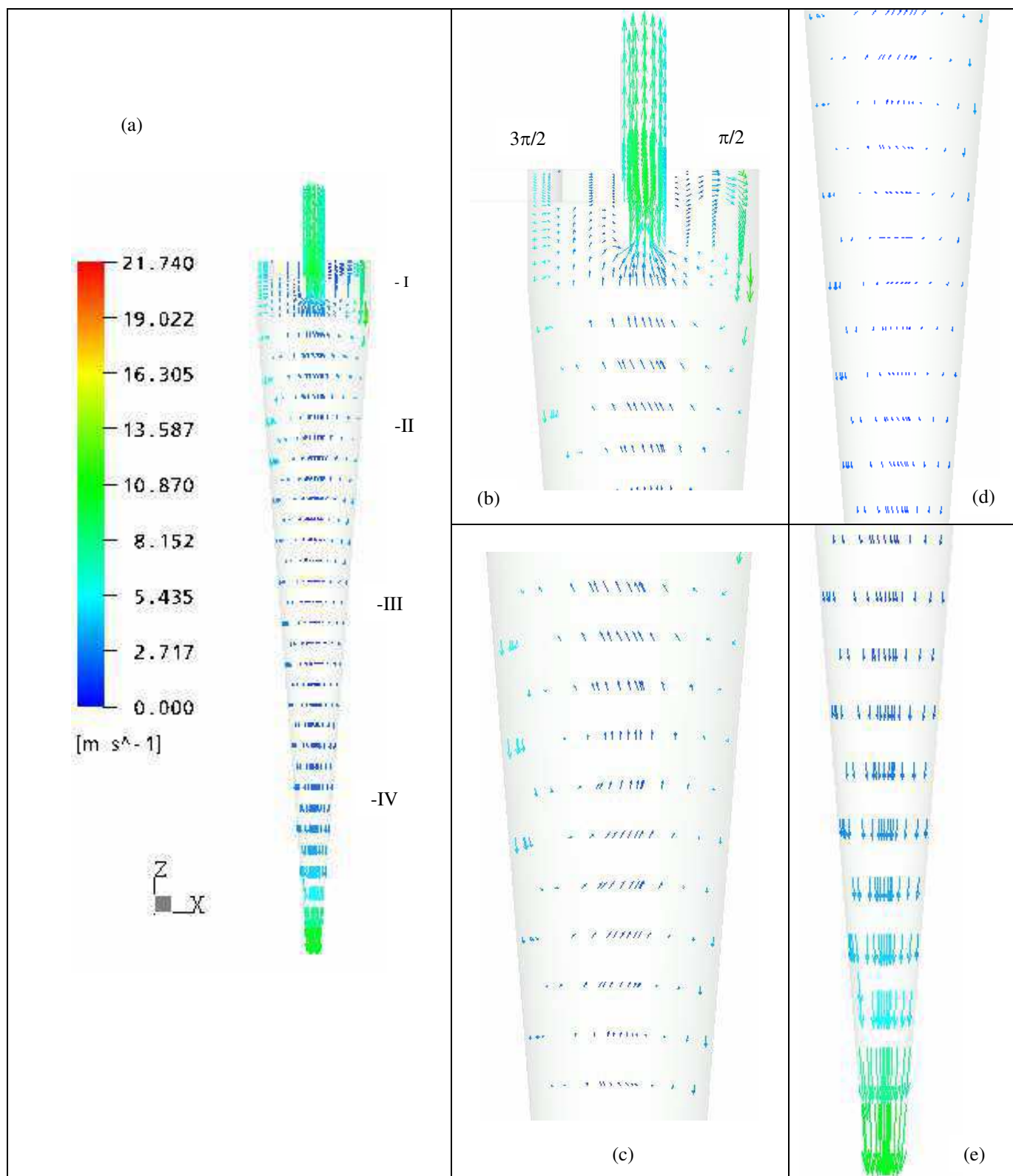


Figura 34: Campo vetorial de velocidade sobre o plano XZ

onde:

$$I = 0,988$$

$$II = 0,747$$

$$III = 0,498$$

$$IV = 0,166$$

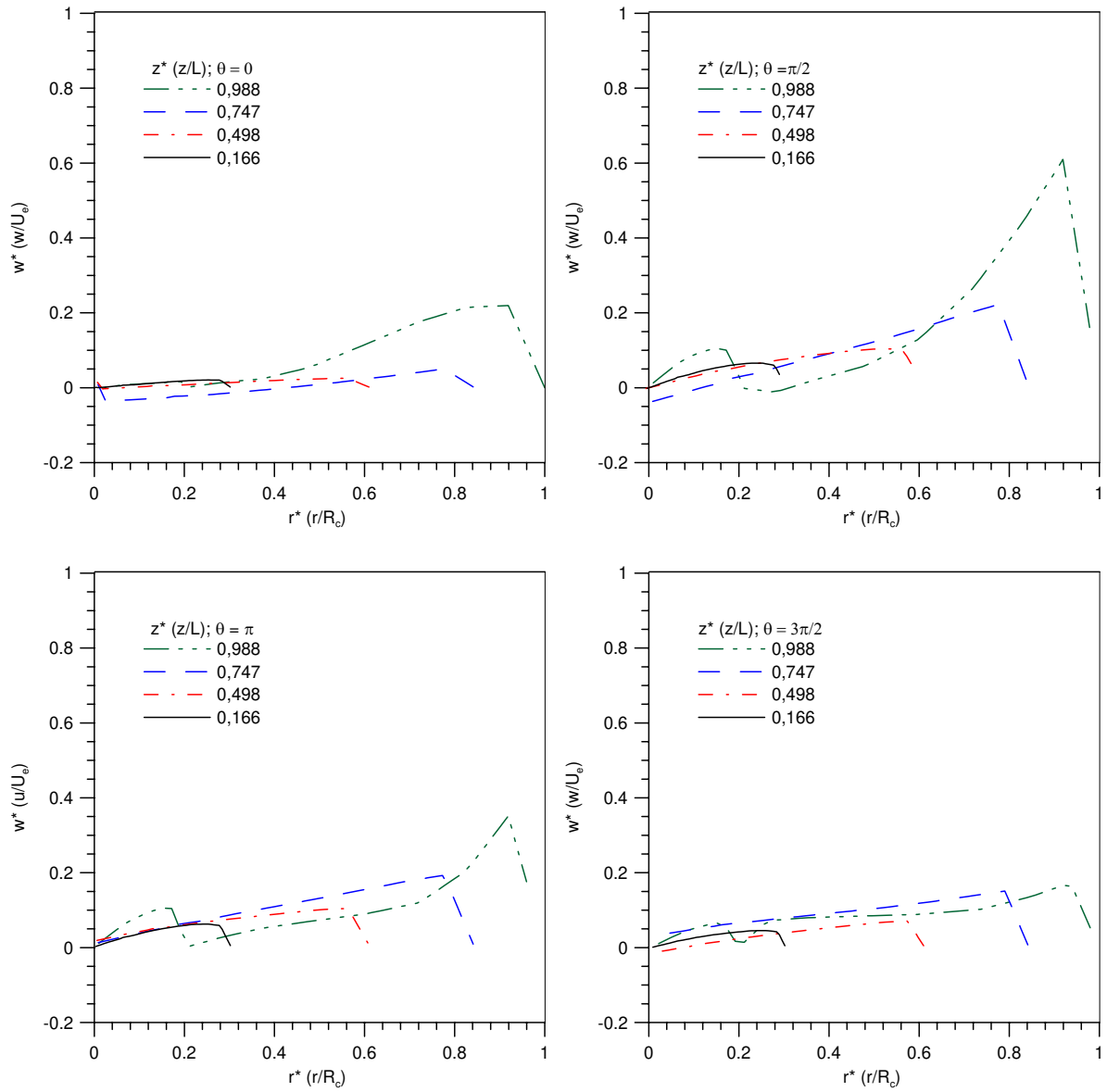


Figura 32: Componente adimensional da velocidade tangencial em função da posição radial adimensional

