

1

Introdução

O princípio de separação ciclônica vem sendo utilizado na indústria há mais de um século. A separação ciclônica se baseia na geração de um campo centrífugo, atuando de forma semelhante a separadores gravitacionais, mas com intensidade dezenas ou centenas de vezes maior, promovendo a separação de fluidos ou fluido/sólidos imiscíveis e de diferentes densidades. Os equipamentos que geram um campo centrífugo pelo uso de um corpo rotativo (com a necessidade de um acionamento externo ou motor) são chamados de centrífugas. Os separadores ciclônicos, em contrapartida, não possuem quaisquer partes móveis e o campo centrífugo é formado pelas condições impostas ao escoamento do fluido que passa pelo equipamento.

Os separadores ciclônicos são classificados em função dos fluidos e ou sólidos que manipulam. Se a fase contínua é um gás ou vapor, o dispositivo é denominado ciclone, se a fase contínua for um líquido o mesmo é denominado hidrociclone, entretanto, o princípio de funcionamento e as principais características de ambos são muito semelhantes.

Os hidrociclones foram patenteados pela primeira vez em 1891 por Bretney (Chiné e Concha, 2000) para a separação sólido/líquido na indústria de mineração, e desde então se tornaram um importante processo unitário. Sua inserção na indústria do petróleo ocorreu quando, em princípios da década de 70, o governo britânico, preocupado com os danos ecológicos e econômicos que derramamentos de óleo podiam produzir ao atingir as costas das ilhas britânicas, encomendou às universidades locais o desenvolvimento de um equipamento que permitisse a remoção de óleo da água contaminada e devolução desta ao mar com um resíduo mínimo. Em 1978 uma equipe liderada pelo professor Martin Thew, da Universidade de Southampton, patenteou a primeira configuração de um hidrociclone para tratamento de águas oleosas, o hidrociclone “de-oiling” (Young et al., 1994). Na Fig. 1.1 é apresentado um esquema deste hidrociclone com as respectivas dimensões.

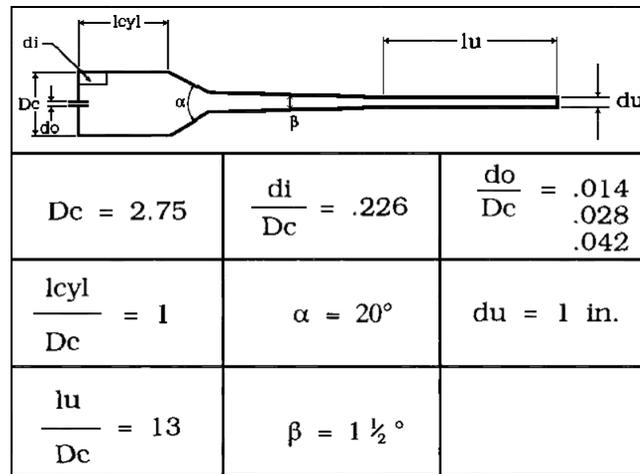


Figura 1.1 - Hidrociclone “de-oiling” de Colman-Thew (Young et al., 1994)

A aplicação de ciclones e hidrociclones na indústria do petróleo se intensifica a cada ano e diversos são os motivos. Ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo ocorre, geralmente, a produção simultânea de gás, óleo e água, juntamente com impurezas. Como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos, é necessário dotar as unidades de produção de equipamentos para o processamento primário dos fluidos, entenda-se por isto, a melhor separação possível entre as fases, óleo, gás, água e sólidos (principalmente areia). Originalmente, utilizavam-se separadores gravitacionais, onde são necessários vários minutos de tempo de residência para as fases para promover sua separação. No caso dos ciclones e hidrociclones a separação ocorre em segundos, trazendo ganhos claros quanto à questão da área ocupada e de peso acrescido à unidade de produção. Vantagem esta ainda mais importante no caso de unidades marítimas e flutuantes onde o custo do espaço é majorado em relação a unidades terrestres. Atualmente, essa compactação de equipamentos se tornou ainda mais necessária, devido ao novo cenário de plantas de tratamento submersas, a chamada separação submarina. A separação submarina vem ganhando espaço nos centros de pesquisa e desenvolvimento das empresas de petróleo, pois permite, a drenagem de áreas marginais dos reservatórios e de poços distantes das unidades de superfície, minimizando o volume de fluidos a serem transportados para a superfície. Nos equipamentos submersos, menores dimensões, significam menores espessuras de parede para resistir à pressão externa, resultando em menor investimento.

Os ciclones para separação gás/líquido vêm sendo amplamente utilizados

para o “desengargalamento” de unidades existentes de processos industriais, permitindo uma maior vazão de processamento de gás sem a substituição dos vasos depuradores e, no caso de unidades novas, permitindo a construção de equipamentos mais compactos.

Os hidrociclones “de-oiling” para tratamento da água produzida também têm sua posição já estabelecida no mercado como o primeiro estágio de depuração, superando os antigos decantadores e separadores API. E por vezes condicionando a carga (reduzindo o teor de óleo disperso) para unidades de polimento como a flotação e ou filtração, a depender da exigência ambiental para a disposição final do efluente.

O uso de hidrociclones para remover partículas de água dispersa numa corrente de óleo tem sido objeto de intensa pesquisa, devido à demanda da indústria do petróleo por métodos mais eficientes e de baixo custo para a purificação do óleo produzido. Entretanto, infelizmente, protótipos industriais confiáveis para essa aplicação ainda não estão disponíveis. Um dos problemas fundamentais é a ocorrência de ruptura das gotículas de água dispersas, que é prejudicial à separação. Essa ruptura das gotículas de água é decorrente das elevadas tensões cisalhantes presentes na corrente da fase contínua (óleo), à qual está relacionada à viscosidade que é maior no óleo do que na água nele dispersa.

Uma aplicação recente da separação ciclônica é a separação água/óleo com hidrociclones de alto teor de óleo, onde o teor de óleo pode variar de poucos pontos percentuais e chegar até 50% em volume, mantendo, porém a água como fase contínua.

Os diferentes tipos de hidrociclones se diferenciam por suas relações geométricas, como se pode ver na Fig. 1.2, onde são mostradas evoluções do hidrociclone de Colman-Thew (Young et al., 1994). Observa-se que, para melhorar o desempenho do equipamento, a seção cônica foi sub-dividida em duas, com diferentes ângulos. A primeira é o cone de angulação mais forte, cujo objetivo é causar aceleração por conservação de momento angular e a segunda é um cone de menor ângulo cujo objetivo é compensar a dissipação viscosa e captar as partículas/ gotículas. Adicionou-se ainda uma seção reta de forma a evitar que o cone reverso atinja a saída de fundo. A Fig. 1.3 ilustra um hidrociclone para separação sólido/líquido (Chiné e Concha, 2000). Observam-se variações dos trechos retos e cônicos dependendo da aplicação.

O escoamento no interior dos ciclones e hidrociclones é bastante complexo, apesar das características mecânicas bastante simples. São equipamentos tubulares, constituídos de partes cilíndricas e cônicas justapostas, nos quais a dispersão (fluido a sofrer separação) é alimentada por um tubo de entrada tangencial cujo eixo é normal ao eixo do equipamento. O separador tem duas aberturas para saída da dispersão classificada (separada em função do diâmetro das partículas), posicionadas axialmente opostas no equipamento, uma delas situada próxima da seção de alimentação, e outra situada numa seção afastada da seção de alimentação, próxima ao vértice do corpo cônico do hidrociclone.

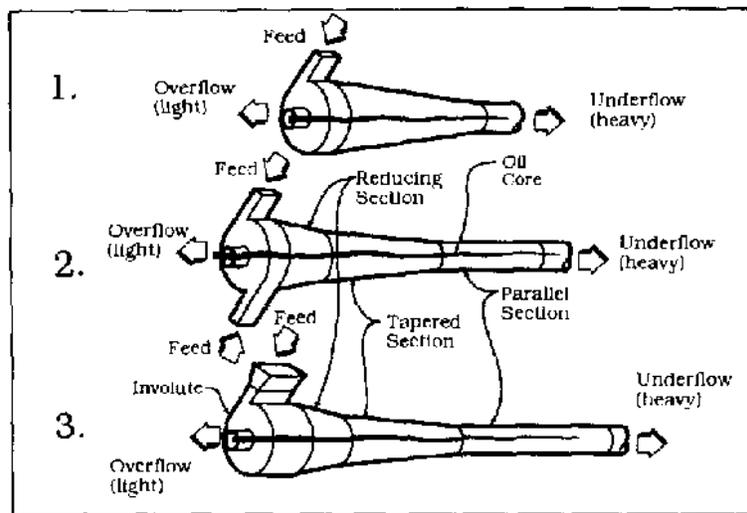


Figura 1.2 – Evolução do hidrociclone de Colman-Thew. (Young et al., 1994)

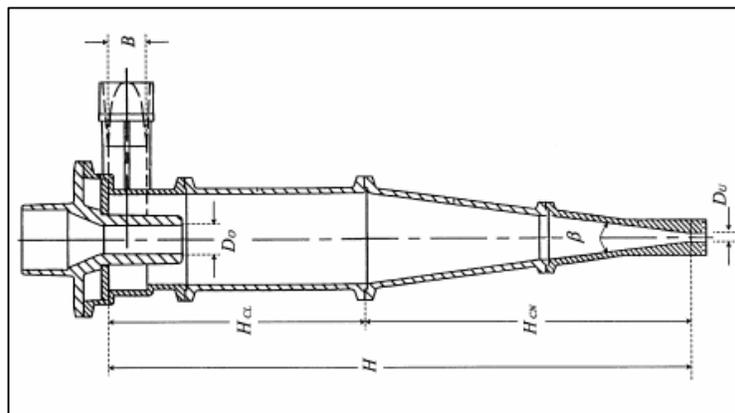


Figura 1.3 – Hidrociclone para separação de sólidos da Perspex. (Chiné e Concha, 2000).

O escoamento em um hidrociclone é fortemente tri-dimensional, pois é confinado em uma geometria cônica ou cilíndrica, sendo induzida uma rotação. Com relação ao componente tangencial da velocidade, o perfil radial assume a forma semelhante ao vórtice de Rankine, que é uma combinação de dois vórtices: um vórtice forçado ou rotação de corpo rígido próximo ao centro (onde a velocidade tangencial, v_θ , é proporcional ao raio, r , $v_\theta = k r$); e um vórtice livre ou potencial junto a parede (onde a velocidade tangencial é inversamente proporcional ao raio, $v_\theta = k / r$). A intensidade deste vórtice controla a intensidade do campo centrífugo, que promove a segregação das fases contínua e dispersas, dada a diferença de densidade existente entre elas.

Outro fenômeno importante, que tem lugar no interior do equipamento, é o chamado fluxo reverso, caracterizado por um movimento axial em direção a descarga de fundo e outro fluxo axial reverso central, onde a velocidade radial é relativamente muito baixa. Esse fenômeno tem origem no gradiente de pressão radial que se estabelece em consequência do campo centrífugo. Isso faz com que, na vizinhança do eixo do equipamento, o gradiente de pressão axial tenha sentido inverso ao do escoamento original, como é ilustrado na Fig. 1.4, onde a isosuperfície (de velocidade axial constante e ascendente) ilustrada separa a região de fluido descendente e ascendente.

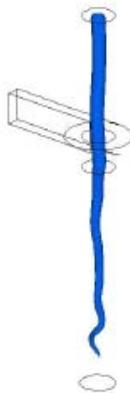


Figura 1.4 – Fluxo axial reverso formado no interior de hidrociclones

O desempenho dos hidrociclones está relacionado a pelo menos quatorze parâmetros, agrupados em variáveis dimensionais, operacionais, e de carga. Dentre as variáveis dimensionais podemos citar o diâmetro do hidrociclone, o

diâmetro da entrada, o comprimento do cilindro, o ângulo do cone, os diâmetros de saída de fluido de fundo e topo, etc. Como variáveis operacionais tem-se a pressão disponível na entrada (alimentação), e as diferenças entre esta e as duas saídas de fluidos. Ou seja, dois gradientes: a diferença entre a entrada e o rejeito (E-R); e a diferença entre a entrada e a saída de fundo (E-S). As principais variáveis da carga são a viscosidade da água (fase contínua), a diferença de densidade entre o óleo e a água, e a distribuição de tamanho de gotas de óleo disperso.

No hidrociclone para separação de sólidos não há qualquer preocupação com a eventual ruptura das partículas, pois mesmo as altas tensões cisalhantes reinantes no escoamento altamente turbulento não são capazes, nos casos práticos, de provocar este fenômeno. Já na separação de uma fase dispersa líquida, deve-se ter o cuidado de evitar a quebra das gotas, o que dificultaria a separação, pois gotículas menores apresentam menores velocidades de migração no campo centrífugo. Por essa razão evita-se criar, nos hidrociclones para águas oleosas, regiões de grande turbulência. Para isso, procura-se criar um vórtice relativamente fraco na câmara de entrada, minimizando também a perda de pressão na entrada. A medida que esse vórtice se desloca através da seção cônica vai se tornando mais forte, devido a conservação de momento angular. Como a diferença de densidade entre o óleo e a água é muito menor do que entre a maioria dos sólidos e líquidos, as velocidades de migração das gotículas de óleo são muito menores do que as velocidades de migração das partículas sólidas. Sendo assim, o tempo requerido para a separação do óleo é maior do que o requerido para um sólido de mesma distribuição granulométrica. A maneira de prover maior tempo para a migração consiste em aumentar o tempo de residência da dispersão na região de atuação do campo centrífugo, o que é obtido através de um maior comprimento do equipamento.

As variáveis dimensionais podem ser otimizadas para o melhor desempenho nas diferentes aplicações/situações. O desenvolvimento dos hidrociclones e sua diferenciação vinham, historicamente, ocorrendo de modo empírico ou semi-empírico para as condições de uma determinada aplicação. Nos últimos anos, esse processo tem se alterado, principalmente com o uso de soluções numéricas para as equações que governam o escoamento, como pode ser visto, pelo crescimento vertiginoso de publicações nesta área (Changirwa et al, 1999; Daí et al, 1999;

Melo et al, 2003, Matvienko, 2004, Gaiduzhevich et al, 2006, Narasimha et al, 2006 a), Yablonskii, 2006).

Apesar de intensas pesquisas com hidrociclones, são escassos os dados disponíveis desse equipamento para separação água/óleo. Isso se deve ao fato dos principais financiadores dessa pesquisa - em geral ligados às empresas do setor de petróleo - não permitirem a ampla divulgação dos resultados.

Como dito anteriormente, a diferença de desempenho entre os diferentes hidrociclones está associada às suas diferenças geométricas. Estas, podem ser ajustadas para as diferentes aplicações. O uso da simulação numérica visa diminuir gastos com experimentos, evitando a construção de um número excessivo de modelos reais para avaliar a influência das várias combinações de parâmetros possíveis.

Por isso, existe hoje na Petrobras uma linha de pesquisa para o desenvolvimento e aprimoramento de hidrociclones de alto teor de óleo (ATO) envolvendo, inicialmente, uma fase de simulação numérica e escolha das configurações geométricas mais promissoras, a construção de modelos para medições experimentais de escoamento, e, finalmente, a construção de protótipos para teste de campo. A presente dissertação visa contribuir com este desenvolvimento.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste na modelagem e simulação numérica do escoamento em uma geometria de hidrociclone de alto teor de óleos, que está sendo analisada pela Petrobras, utilizando o software comercial Fluent.

A mistura água-óleo será considerada homogênea. Pretende-se investigar o desempenho de diferentes modelos de turbulência, comparando-se as previsões obtidas com os dados obtidos experimentalmente por Marins(2007). A Figura 1.5 apresenta o modelo de hidrociclone ATO construído pela Petrobras em acrílico utilizado para a obtenção dos dados experimentais.

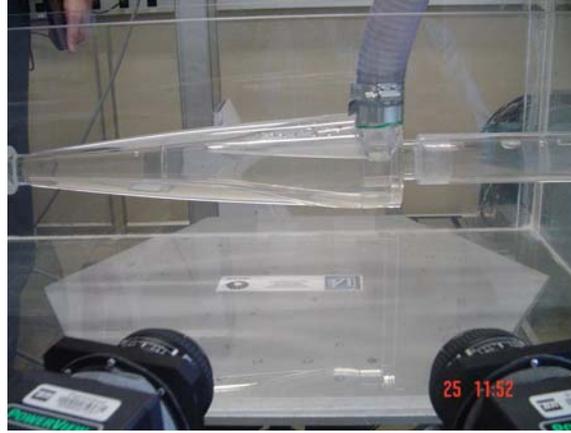


Figura 1.5 –Hidrociclone ATO em acrílico (Petrobras)

Uma vez selecionado um modelo de turbulência, será estudada a influência de alguns parâmetros operacionais e geométricos no desempenho do hidrociclone. Este estudo auxiliará a definir parâmetros numéricos e físicos para, numa etapa futura, realizar uma modelagem multifásica considerando as fases separadas.

Este trabalho vem complementar uma série de esforços de desenvolvimento de hidrociclones empreendidos pela Petrobras através de seu centro de Pesquisa, CENPES, convênios com universidades e “*joint ventures*” com outras operadoras.

1.2 Organização do manuscrito

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura iniciada no presente trabalho, enquanto o Capítulo 3 apresenta uma revisão dos modelos matemáticos utilizados para a modelagem da turbulência. O Capítulo 4 apresenta brevemente a abordagem numérica adotada.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e finalmente, no Capítulo 6 são resumidas as conclusões obtidas ao longo do trabalho.