

1

Introdução

O escoamento entre cilindros concêntricos foi altamente estudado ao longo dos anos, tornando-se um problema clássico em mecânica dos fluidos. Sua aplicação é ampla, desde equipamentos em medicina, como o separador de plasma, até a indústria petrolífera, como a perfuração de poços de petróleo e gás. De fato, a motivação do presente trabalho é entender melhor o escoamento do fluido de perfuração no processo de perfuração de poços horizontais de petróleo e gás. Além disso, este trabalho visa dar continuidade aos projetos na área de perfuração do Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Os estudos realizados anteriormente no Laboratório de Engenharia de Fluidos foram os trabalhos de Loureiro (2004) e Maldonado (2005).

O presente trabalho investigou o efeito da rotação do cilindro interno no escoamento em um espaço anular concêntrico com gradiente de pressão axial, voltado para atender estudos relacionados aos escoamento de fluidos de perfuração em poços de petróleo horizontais. Para isso, uma seção de testes foi construída, e é descrita no Capítulo 2. A seção de testes foi projetada para obter o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento no espaço anular para todos os regimes de escoamento (laminar, transição laminar-turbulento e turbulento). Portanto, foi necessário construí-la com 6 metros de comprimento. Outro aspecto importante do projeto da seção de testes é sua transparência. Isto possibilitou o uso da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), descrita no Capítulo 3. Esta técnica fornece uma riqueza de informações que nenhuma outra técnica de medição de escoamento possa oferecer. Tomadas de pressão estática foram adaptadas no cilindro externo para a medição da queda de pressão na região desenvolvida hidrodinamicamente. Uma cuidadosa verificação e qualificação da seção de teste foi feita para garantir que dados confiáveis pudessem ser obtidos.

A queda de pressão, na forma de fator de atrito, foi estudada para quatro rotações diferentes do cilindro interno e para os três regimes de

escoamento: laminar, transição laminar-turbulento, e turbulento.

Campos de velocidades instantâneos e médios foram obtidos através da técnica de PIV. Estes campos de velocidade foram obtidos para as mesmas faixas de vazões e rotações do cilindro interno conduzidos para a obtenção da queda de pressão. Com isso, foi possível correlacionar os resultados da queda de pressão e campos de velocidade, ajudando a ter um melhor entendimento da influência da rotação do cilindro interno no escoamento em um espaço anular concêntrico.

1.1 Revisão Bibliográfica

Taylor (1932) , em seu trabalho pioneiro, investigou a instabilidade de escoamentos entre cilindros concêntricos com rotações independentes. Em seu estudo, Taylor quantitativamente previu e confirmou experimentalmente a existência de instabilidades no escoamento quando o cilindro interno atingia uma rotação crítica. Para pequenas rotações, o fluido simplesmente se movia azimutalmente em torno dos cilindros (escoamento de Couette). Taylor observou que, quando o escoamento se tornava instável, era substituído por padrões celulares no qual o fluido se move em caminhos toroidais em torno dos cilindros em camadas de vórtices, conhecido como vórtices de Taylor. A figura 1.1 ilustra o desenho feito por Taylor destes padrões celulares.

Tagg (1992) criou uma bibliografia dos artigos sobre este assunto e achou mais de 1500 referências. Observando o enorme número de variantes deste problema, Tagg (1992) nomeou o escoamento de Taylor-Couette de o "átomo de hidrogênio" da mecânica dos fluidos.

Ooms & Kampman-Reinhartz (1996) investigaram a influência da rotação da coluna e excentricidade na queda de pressão durante uma perfuração. O trabalho procurou explicar este fenômeno através de estudos experimental, analítico e numérico de um escoamento em regime laminar de um fluido Newtoniano entre dois cilindros excêntricos com rotação do cilindro interno. Seus experimentos confirmaram que a rotação do cilindro interno em um anular concêntrico não tinha nenhum efeito na queda de pressão quando o fluido era Newtoniano e o regime de escoamento era laminar. A queda de pressão aumentava quando a rotação do cilindro interno era alta suficiente para formar vórtices de Taylor ou até turbulência. Sem a rotação, a queda de pressão diminuía com o aumento da excentricidade. Quando o cilindro interno foi rotacionado em um espaço anular excêntrico,

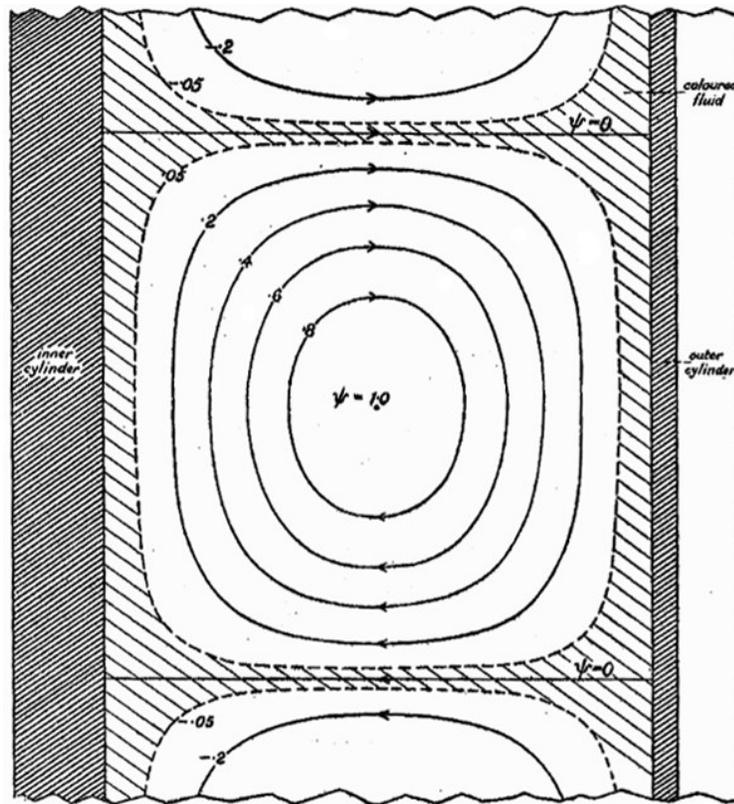


Figura 1.1: Desenho feito por G. I. Taylor (1923) mostrando as linhas de corrente depois que ocorre a instabilidade (vórtices de Taylor).

um aumento da queda de pressão foi observado com o aumento da rotação do cilindro. Este aumento pode ser observado em regimes de vórtices de Taylor e turbulência, mas também em regimes de escoamento laminar.

No trabalho de Escudier & Gouldson (1995) foram medidas as distribuições radiais das componentes de velocidade axial e tangencial e flutuações de velocidade axial rms junto com o fator de atrito *versus* número de Reynolds para dois fluidos: um Newtoniano e uma solução polimérica "shear-thinning". Foram investigados os regimes de escoamento laminar, transição e turbulento, em uma geometria anular concêntrica com rotação do cilindro interno, com razão de raios igual 0,506. Em todos os regimes, o fator de atrito aumentava com a rotação do cilindro interno, sendo mais aparente em regime laminar e com o fluido Newtoniano. As medições das componentes de velocidade foram feitas por anemometria por Laser Doppler mostrando que a influência da rotação na velocidade média axial era mais aparente para baixo números de Reynolds e foi atribuído à advecção das estruturas vorticiais pela velocidade média do escoamento. Escudier & Gouldson (1995) citam que Sharma *et al.* (1976) realizou uma

análise teórica para escoamento turbulento e fluido Newtoniano mostrando que o comprimento de desenvolvimento aumentava significativamente com o aumento $\frac{U}{\omega R_i}$, onde U é a velocidade média do escoamento e ωR_i é a velocidade tangencial do cilindro interno.

Lueptow *et al.* (1992) estudaram experimentalmente, através de técnicas de visualização e óptica, os vários regimes de um escoamento entre cilindros concêntricos com rotação do cilindro interno e a imposição de um gradiente de pressão axial, para uma faixa vasta de números de Taylor e uma faixa pequena de número de Reynolds. O número de Taylor definido pelos autores é:

$$Ta = \frac{r_i \Omega d}{\nu} \quad (1-1)$$

onde, r_i é o raio do cilindro interno, Ω é velocidade angular de rotação do cilindro interno e ν é a viscosidade cinemática do fluido. A razão de raios do aparato experimental foi $\eta = 0,848$ e a razão de aspecto foi $\Gamma = 41$. O fluido utilizado era Newtoniano e a este foi adicionado uma concentração de 0,25% em peso de um fluido reoscópcico permitindo assim a visualização dos regimes. Sete regimes de vórtices toroidais foram identificados, incluindo vórtices de Taylor, vórtices ondulados, vórtices aleatoriamente ondulados, vórtices modulado ondulados, vórtices turbulentos modulado ondulados, vórtices turbulentos ondulados e vórtices turbulentos. O regime de vórtices toroidais se assemelhavam aos vórtices correspondentes àqueles quando sem a imposição do escoamento axial, exceto com a diferença que, neste regime, os vórtices transladam axialmente com o escoamento a uma velocidade um pouco acima do escoamento médio. Três regimes de vórtices helicoidais foram observados para baixos números de Taylor, incluindo vórtices helicoidais laminares, vórtices helicoidais estacionários e vórtices helicoidais ondulante. Um mapa foi construído ilustrando as transições entre os vários regimes para os números de Reynolds e Taylor investigados pelos autores (figura 1.2).

Nouri & Whitelaw (1997) realizaram experimentos em espaços anulares concêntricos e excêntricos para fluidos Newtoniano e não-Newtoniano. Foram feitas medições das três componentes de velocidade pela técnica de Velocimetria por Laser Doppler e da distribuição da pressão estática. Os números de Reynolds analisados para o fluido Newtoniano foram 8900 e 26600, mostrando que o fator de atrito foi cerca de 8% acima do valor do fator de atrito para um tubo redondo liso.

Wereley & Lueptow (1998) mediram experimentalmente as velocidades axial e radial em um plano meridional para vórtices laminares e ondu-

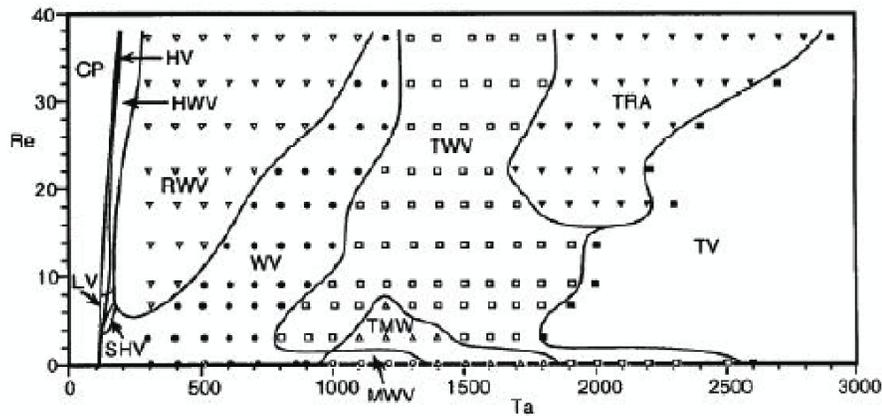


Figura 1.2: Mapa da transição entre os vários regimes investigados por Lueptow et al. (1992)

lados de um escoamento Taylor-Couette de um espaço anular concêntrico com rotação do cilindro interno através da técnica PIV. Os resultados mostraram que, com o aumento do número de Reynolds rotacional, os vórtices ficaram mais fortes e a região de saída de fluido, no sentido radial, entre os pares de vórtices ficaram mais parecidas com jato de parede. Foi constatada uma transferência de fluido entre pares de vórtices ondulados. Essa transferência ocorreu de maneira cíclica ao longo de uma onda azimutal, de forma que quando um vórtice aumentava de tamanho, os outros dois vórtices adjacentes se tornavam menores, e vice-versa. Posteriormente, We-reley & Lueptow (1999) utilizaram a técnica de PIV para medir os campos de velocidade em um espaço anular com rotação do cilindro interno e com imposição de um gradiente de pressão axial. Os regimes investigados foram para vórtices toroidais e helicoidais e vórtices ondulados toroidais e helicoidais. Este foi o primeiro trabalho que obteve resultados experimentais do campo de velocidade instantâneo 2D dos vórtices de Taylor com escoamento axial.

Loureiro (2004) investigou o escoamento em um espaço anular parcialmente obstruído para uma geometria entre cilindros concêntricos. O campo de velocidade para esses escoamentos foi obtido via solução numérica e experimental. Os resultados experimentais foram obtidos a partir de campos instantâneos e médios de velocidade em planos meridionais do espaço anular usando a técnica de PIV. As medições focalizaram a obtenção do número de Reynolds rotacional crítico e do perfil de velocidade axial passando pelo centro do vórtice. Os resultados mostraram que o número de Reynolds crítico é diretamente afetado pelo grau de obstrução do espaço anular, assim como a largura dos vórtices de Taylor. Os perfis de velocidade axial calculados

apresentaram boa concordância com os dados experimentais. A presença da placa de obstrução parcial promoveu uma recirculação circunferencial no escoamento que interagiu com o escoamento de vórtices de Taylor formando um escoamento complexo a partir de níveis de obstrução moderados.

Em seu trabalho, Maldonado (2005) analisou experimentalmente a influência da rotação cilindro interno com a imposição do gradiente de pressão axial no fator de atrito para algumas rotações do cilindro interno e números de Reynolds que compreendiam os regimes de escoamento laminar, transição e turbulento. A faixa de números de Reynolds investigada foi de 150 a 15000, enquanto o Reynolds rotacional variou de 50 a 100. Os resultados de queda de pressão em termos do fator de atrito indicaram um aumento de cerca de 15% para o maior valor de rotação investigada.

A revisão bibliográfica apresentada mostrou que, na literatura, existem poucos trabalhos que investigaram os campos de velocidade em regiões anulares com rotação do cilindro interno. Estes trabalhos analisaram uma faixa muito restrita de números de Reynolds, de 0 a 37. Para a queda de pressão em um espaço anular, o trabalho de Escudier & Gouldson (1995) pode ser considerado uma referência. Porém, não existe nenhum trabalho, até o momento, no qual foram investigados estes dois problemas juntamente: os campos de velocidade e a queda de pressão.

Então, o objectivo principal deste trabalho é obter uma melhor compreensão do efeito da rotação do cilindro interno no escoamento em um espaço anular. Além disso, pretende-se estudar em conjunto a queda de pressão e os campos de velocidades para um mesma faixa de vazão e rotação do cilindro interno.