

## 5 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

### 5.1. Conclusões

O presente trabalho combinou o estudo experimental com o numérico para uma geometria anular horizontal e obstruída parcialmente. Esse trabalho apresentou resultados pioneiros, não sendo ainda encontrado algo a respeito na literatura sobre escoamento em anular parcialmente obstruído. Conforme comentado nas primeiras seções, o estudo proposto apresentou simplificações quanto ao fenômeno físico complexo de abertura de um poço para produção de óleo e gás, visto que o poço também apresenta escoamento axial e o leito de cascalho é móvel. As simplificações consistiram da presença da placa plana simulando um leito rígido na parte inferior do anular destruindo a simetria existente do problema e afetando a transição do regime de Couette para o de vórtices de Taylor, assim como a ausência de escoamento axial devido ao gradiente de pressão.

O campo de velocidade tridimensional no espaço anular foi determinado pela solução numérica das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear para o regime permanente, escoamento isotérmico e para fluidos newtoniano e não newtonianos incompressíveis. Campos médios de velocidade foram determinados experimentalmente pela técnica de velocimetria por imagens de partículas. As comparações entre os resultados numéricos e experimentais mostraram boa concordância e revelaram que a condição de contorno imposta na extremidade da geometria pode alterar as características geométricas dos vórtices de Taylor.

Campos instantâneos de velocidade obtidos pela técnica de PIV foram utilizados na determinação do valor crítico para o número de Reynolds rotacional que caracterizou a transição do escoamento de Couette para o regime de vórtices de Taylor. Essa técnica, ainda não utilizada na literatura sobre vórtices de Taylor, obteve bons resultados apresentando incerteza relativa não superior a 2%. A parcela de incerteza que teve maior contribuição foi relativa às

propriedades físicas do fluido para o cálculo do número de Reynolds, por causa da dependência de tais propriedades com a temperatura. Embora a temperatura tenha sido monitorada ao longo dos testes, alguns testes realizados com menor rigor experimental apresentaram uma variação na temperatura da ordem de 2°C e pôde-se verificar a influência de tal variável sobre o número de Reynolds. Os experimentos com essa ordem de variação de temperatura foram descartados.

Os resultados obtidos para a transição de regimes obtidos experimental e numericamente apresentaram boa concordância para todos os níveis de obstrução investigados. Os resultados têm mostrado que a obstrução do escoamento atrasa a transição para o regime de vórtices de Taylor e que o atraso é mais acentuado para fluidos newtonianos que para os fluidos não newtonianos. Esse atraso da transição de regimes é governado pela região de menor folga do anular devido à obstrução parcial da geometria. Constatou-se que mesmo para uma obstrução de 75% do espaço anular os vórtices de Taylor foram formados, embora com características singulares devidas à nova geometria.

Para os casos de escoamentos de fluidos não newtonianos pode-se perceber que o atraso, conforme mencionado no parágrafo anterior, foi menor que o identificado nos escoamentos de fluidos newtonianos. A explicação mais provável para tal efeito pode ser abordada da seguinte forma: como as maiores taxas de cisalhamento ocorrem na proximidade do cilindro interno e os fluidos não newtonianos testados apresentam característica “shear-thinning”, as menores viscosidades se encontram na região próxima ao cilindro interno, enquanto que as maiores viscosidades nas proximidades do cilindro externo. A presença da placa pouco interferiu no escoamento da região próxima ao cilindro externo, visto que tal região apresentava maiores valores de viscosidade. Quanto maior é o efeito “shear-thinning” do fluido não newtoniano,  $n \rightarrow 0$ , o atraso da transição é maior visto que a região nas proximidades do cilindro externo apresenta elevado valor de viscosidade e a assimetria causada pela obstrução parcial é pouco percebida.

A análise de sensibilidade da transição de regime devido à aceleração imposta ao cilindro interno foi investigada e confirmou a tendência dos resultados disponíveis na literatura por Park et al. (1981), embora a comparação tenha sido realizada por causa das diferentes razões de raios. Não foi possível verificar a influência da aceleração do cilindro interno sobre as características geométricas dos vórtices, pois um fluido reoscópio não foi adicionado ao fluido do experimento para poder fazer tal identificação. As rampas de rotação

estabelecidas no experimento foram as possíveis de serem realizadas utilizando um motor elétrico de corrente alternada. Uma alternativa para obtenção de uma rampa menos acentuada seria a utilização de um motor de passo, mas a implantação desse sistema não foi viável em função do tempo disponível para conclusão do trabalho.

Uma excelente concordância foi obtida também entre os resultados numéricos e experimentais para os perfis de velocidade. Os experimentos mostraram, entretanto, duas possíveis configurações estáveis para o perfil de velocidade. A existência dessas soluções foi atribuída aos diferentes números de vórtices acomodados dentro do espaço anular. Embora a concordância entre os resultados do número de Reynolds crítico e dos perfis de velocidade tenha sido muito boa, as larguras dos vórtices apresentaram discrepâncias entre os resultados para alguns níveis de geometria. Essas discrepâncias também foram atribuídas aos diferentes números de vórtices acomodados no espaço anular. Diferentes condições de contorno aplicadas às paredes das extremidades apresentaram diferentes números de pares de vórtices.

Os resultados numéricos do campo de velocidade mostraram uma estrutura de escoamento bastante complexa dentro do vórtice de Taylor com zonas de recirculação quando a obstrução foi mais acentuada. Essa estrutura mostra um novo padrão de escoamento para os vórtices de Taylor até então não apresentada. Embora não tenha sido analisada nesse trabalho, a recirculação do escoamento devida à obstrução parcial pode apresentar alguma similaridade com o escoamento estabelecido pela rotação, em sentidos contrários, de ambos os cilindros da geometria anular.

A avaliação do campo de tensão cisalhante possibilitou a verificação da ordem de grandeza das tensões distribuídas sobre a placa de obstrução parcial e as regiões de maiores intensidades de tensão cisalhante. Uma outra conclusão importante está no fato do coeficiente de atrito médio,  $c_f$ , apresentar-se praticamente constante no regime de vórtices de Taylor, em relação ao regime de Couette. Isso significa que a tensão cisalhante média sobre a placa de obstrução parcial cresce mais para um incremento de rotação do cilindro interno no regime de vórtices de Taylor que para o regime de Couette.

A metodologia usada fornece uma primeira aproximação para o problema real de remoção de cascalhos e poderá servir como base para experimentos futuros de arraste de cascalho, visto que o maior crescimento da tensão cisalhante média fornece um indicativo de que os vórtices de Taylor são benéficos ao arraste de cascalhos.

## 5.2. Recomendações para trabalhos futuros

A primeira aproximação proposta por esse trabalho pode motivar novas pesquisas nas áreas de instabilidade de escoamentos e limpeza de poços. Existe um universo a ser explorado em tais aplicações e esta seção ilustra o que pode ser pesquisado em trabalhos futuros utilizando o experimento já construído e instrumentado.

- *Características geométricas dos vórtices*

A adição de um fluido reoscópico, como o produzido pela Kalliroscope, pode ser a alternativa experimental para observar as características geométricas dos vórtices de Taylor ao longo da coordenada axial da geometria parcialmente obstruída, além de poder identificar o comportamento do escoamento nas proximidades das extremidades.

- *Efeito da razão de raios e razão de aspecto*

O fluido reoscópico pode ainda ser utilizado como uma alternativa na identificação dos vórtices de Taylor, ondeantes e modulados. Para o caso dos vórtices ondeantes e modulados, podem-se obter ainda os comprimentos de onda relativos a cada escoamento. Esse mesmo fluido reoscópico pode ser utilizado para uma geometria concêntrica, sem obstrução parcial, com o intuito de estudar a transição do regime de vórtices de Taylor para os vórtices ondeantes para diversas razões de raios. Essa transição tem sido estudada para razões de raios superiores a 0,8, mas uma análise de diversas razões de raios ainda não foi realizada.

Uma outra análise a ser realizada para a geometria com obstrução parcial, independentemente da técnica, é o efeito da razão de raios em anulares com obstrução parcial. Tal estudo não foi possível de ser realizado nesse trabalho, mas a realização do mesmo acrescentaria informações importantes, visto que a adimensionalização da obstrução parcial seria realizada da mesma forma e um único gráfico comparativo poderia ser montado. O efeito da razão de raios tem sido bastante explorado para anulares concêntricos.

Quanto à razão de aspecto, poderia ser explorada a influência da mesma sobre os vórtices de Taylor para uma geometria anular parcialmente obstruída

ou excêntrica, pois para cilindros concêntricos tais influências já são bem conhecidas na literatura.

- *Efeito da aceleração do cilindro interno*

O efeito da aceleração do cilindro interno sobre as características geométricas e cinemáticas dos vórtices de Taylor deve ser mais bem compreendido. Para isso, deve-se aperfeiçoar o sistema de transmissão utilizando-se um motor de passo no lugar do motor elétrico convencional. A utilização desse novo motor reduziria as oscilações de rotação, além de permitir uma maior exatidão da rampa de rotação. Uma outra característica importante da utilização do motor de passo é a obtenção de menores acelerações do cilindro interno, que foi um limitante desse trabalho.

- *Escoamento axial*

O escoamento axial devido a um gradiente axial de pressão possibilitaria uma abordagem mais realista de um problema de poço e poderia ilustrar os diversos regimes de escoamento existentes. O efeito da obstrução parcial sobre as transições de regimes é um problema interessante de ser estudado. Um outro aspecto importante seria a distribuição da tensão cisalhante sobre a placa de obstrução, pois ilustraria as regiões preferenciais de remoção de cascalho além da ordem de grandeza das mesmas. O experimento com escoamento axial deve apresentar uma razão de aspecto maior que a escolhida para esse trabalho uma vez que é necessário obter um escoamento completamente desenvolvido para ser medido.

- *Carreamento de cascalhos*

Uma alternativa à construção de simuladores de carreamento de cascalhos seria a construção de um canal em que poderia ser estimada a tensão cisalhante de arraste de cascalho. Os simuladores já construídos, por exemplo, pela Universidade de Tulsa, apresentam difícil controle de variáveis, visto a complexidade do experimento. A tensão cisalhante necessária para arraste de cascalho obtida através desse novo experimento poderia ser estudada como função da reologia do fluido utilizado, da distribuição de probabilidade dos diâmetros das partículas e da razão entre as massas específicas do fluido e das

partículas. Esses valores obtidos em função das variáveis citadas poderiam produzir um mapa que fornecesse quais os valores de tensão cisalhante para remoção de cascalho. As simulações numéricas das geometrias com obstrução parcial do espaço anular possibilitariam a identificação das regiões com tensões cisalhantes superiores aos limites estabelecidos pelo experimento produzido no canal, tornando possível a identificação do percentual de área que seria carregado pelo escoamento.

Os resultados de tensões cisalhantes mostrados nesse trabalho são obtidos a partir de uma primeira aproximação do problema de arraste de cascalhos, isto é, uma obstrução parcial, plana e lisa. A troca da placa de obstrução parcial por um leito de cascalhos não é tão simples de ser modelada, visto que existem outras variáveis envolvidas, tais como a compactação do leito e as características geométricas dos cascalhos. A experimentação desse tipo de condição de contorno estabelece outros desafios ao problema.

- *Interface entre fluido e leito de cascalho*

Uma proposta interessante de trabalho seria a obtenção da interface entre o fluido e o leito de cascalho. Essa interface poderia identificar a influência da rotação do cilindro interno sobre o leito de cascalho móvel e a provável remoção de cascalhos. Uma outra abordagem poderia ser feita ao modelar o leito de cascalho como um fluido não newtoniano com tensão limite de escoamento. Um agravante para tal linha de pesquisa é a complexidade dos dois fenômenos físicos, mas possibilitaria previsões interessantes do perfil da interface dadas as condições de contorno e iniciais.

- *Excentricidade e geometrias elípticas*

A excentricidade do cilindro interno perante o cilindro externo é uma variável física importante, visto que na maior parte dos processos de perfuração a coluna de perfuração não está concêntrica com a parede do poço. Esse efeito poderia ser trabalhado e certamente produziria resultados adicionais ao que foi realizado nesse estudo.

Quanto às geometrias elípticas, esse estudo poderia ilustrar as mudanças ocorridas no escoamento e nas transições de regime. Um estudo desse tipo de geometria é justificado pela existência de poços elípticos produzidos pelo atrito da coluna de perfuração durante o processo de abertura.