

6

Considerações Finais

O presente trabalho avaliou o campo de velocidade de fluidos não Newtonianos em geometria anular excêntrica tridimensional a partir de um modelo que leva em consideração a curvatura da folga radial e foi obtido utilizando a teoria da lubrificação e o método da viscosidade Newtoniana equivalente. A grande vantagem da metodologia empregada é o pequeno custo computacional necessário para solução do problema em relação aos diversos trabalhos publicados na literatura, independentemente da geometria adotada e do comportamento reológico do fluido.

O modelo proposto foi primeiramente comparado com uma solução obtida por Bird [22] para o escoamento de um fluido *Power-law* no espaço anular concêntrico, permitindo avaliar o erro numérico do método da viscosidade newtoniana equivalente já que a teoria da lubrificação não é uma fonte de erros para esse caso. A aproximação obtida recupera a solução analítica para um fluido Newtoniano e mostra que à medida que o fluido se afasta do comportamento Newtoniano o erro numérico cresce devido à hipótese realizada para a tensão cisalhante na parede interna do anular. Com isso foi possível estudar a ordem de grandeza do erro numérico em função do índice de comportamento do fluido, mostrando que a variação deste parâmetro reológico deve ser limitada (definir uma faixa de utilização do modelo) para restringir o erro numérico a um nível admissível (semelhante ao encontrado em outros trabalhos).

Posteriormente, foi realizada uma comparação entre o modelo a ser validado e a solução numérica proposta por Escudier [15] para o escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido *Power-law* no espaço anular com excentricidade constante ao longo do domínio. Foi possível validar os resultados encontrados e realizar uma análise criteriosa da influência de cada um dos

parâmetros do problema na magnitude do erro numérico, definindo assim as limitações da formulação adotada.

O erro numérico observado na comparação com Escudier tende para o obtido anteriormente na comparação com a solução apresentada por Bird, mostrando que este é provocado principalmente pelo método da viscosidade Newtoniana equivalente e conseqüentemente governado pelo índice de comportamento do fluido, além disso, a teoria da lubrificação só gerou imprecisão na solução do problema para uma razão de raios pequena. Os estudos mostraram que o modelo deve ser utilizado para $n \geq 0,7$ e $k \geq 0,5$, pois para esses parâmetros o erro numérico é tolerável e a utilização de uma solução de baixo custo computacional e extremamente flexível (permite qualquer descrição geométrica) é justificada.

Os resultados estão de acordo com a solução proposta por Escudier e mostram que o produto $f \times Re$ para o espaço anular com excentricidade constante diminui com aumento da excentricidade, ou seja, para um dado gradiente de pressão a vazão volumétrica do escoamento aumenta com afastamento do cilindro interno em relação ao centro do cilindro externo. A influência da razão de raios e do índice de comportamento no escoamento também foi apresentada, sendo que a razão de raios praticamente não provoca alteração no produto $f \times Re$ para pequenas excentricidades.

Também foi analisado o comportamento do campo de velocidade ao longo do domínio com excentricidade constante, sendo evidenciada a inexistência de escoamento azimutal e grande variação da componente axial da velocidade na direção azimutal devido à influência da excentricidade. O fluido tende a escoar pela região mais larga do anular provocando aumento de velocidade axial nessa área, já na zona de menor folga radial a movimentação de fluido é extremamente prejudicada e com o aumento da magnitude da excentricidade tende a ocorrer canalização.

Por último, ainda foram obtidos resultados não contemplados na literatura para o espaço anular tridimensional, onde a presença de escoamento azimutal foi observada mesmo sem rotação da coluna interna. O escoamento azimutal é provocado pelo gradiente de pressão azimutal, sendo este gerado pela variação da excentricidade ao longo do domínio (derivada da função que descreve a excentricidade ao longo da direção axial).

O produto $f \times Re$ para a geometria tridimensional foi comparado qualitativamente com o resultado que considera a excentricidade constante, apresentando valores maiores para mesma excentricidade adimensional e decréscimo menos acentuado com o aumento da magnitude da excentricidade. Esse comportamento mostra que para um dado gradiente de pressão axial a vazão volumétrica axial é menor para configuração tridimensional devido, provavelmente, ao escoamento azimutal existente.

A influência da variação da razão de raios no produto $f \times Re$ é praticamente inexistente, já os efeitos causados pela variação do número de Reynolds se mostraram presentes apenas para um fluido não Newtoniano. O aumento do número de Reynolds diminui o produto $f \times Re$, existindo a tendência de convergência para um dado valor no limite da transição para o regime turbulento.

O índice de comportamento do fluido também provoca alteração relevante no produto $f \times Re$, sendo que o valor do produto diminui com o afastamento do comportamento Newtoniano do fluido (diminuição do índice de comportamento), ou seja, para um dado gradiente de pressão e uma geometria a vazão volumétrica axial será maior para o fluido com menor índice de comportamento.

Após uma análise global do escoamento, um estudo da magnitude e da variação ao longo das duas direções das componentes axial e azimutal da velocidade para um dado ponto do domínio foi apresentado. Zonas de aceleração e desaceleração de fluido ao longo da coordenada axial foram identificadas (escoamento não desenvolvido nessa direção), além disso, existem áreas do domínio onde ocorre migração de fluido para região mais larga do anular ou para região de menor folga radial. O escoamento azimutal pode se tornar consideravelmente relevante para grandes magnitudes da excentricidade adimensional e pequenos valores de número de Reynolds (casos com velocidade axial média da seção transversal baixa).

Através do método da viscosidade Newtoniana equivalente foi possível observar a distribuição da viscosidade efetiva do fluido (comportamento do fluido) ao longo do espaço anular, sendo observada uma área ao centro do domínio (região de menor folga radial) onde o fluido apresenta viscosidade efetiva elevada e outra zona na periferia (região mais larga do anular) de baixa viscosidade efetiva.

As influências de cada parâmetro foram avaliadas separadamente e com isso foi possível observar que a excentricidade é realmente a única responsável pela existência do escoamento azimutal no espaço anular (geometria tridimensional gera a componente azimutal da velocidade), sendo que os outros parâmetros apenas alteram a magnitude de cada componente da velocidade.

Para grandes amplitudes da função senoidal que descreve a excentricidade ($\varepsilon > 0,7$) ao longo do domínio foi possível observar uma imprecisão no resultado obtido com o modelo proposto, uma vez que as hipóteses realizadas pela teoria da lubrificação deixaram de ser validas e a equação de conservação de massa não foi satisfeita.

Após analisar todo o trabalho é possível realizar algumas considerações a respeito de estudos futuros que merecem ser abordados a partir do modelo numérico desenvolvido para o escoamento de fluido não Newtoniano no espaço anular com excentricidade variável.

Primeiramente, é importante rever e tentar modificar a hipótese de que a tensão cisalhante na parede interna do espaço anular tem mesmo módulo da tensão cisalhante na parede externa realizada durante o desenvolvimento teórico do modelo da viscosidade Newtoniana equivalente. Grande parte da imprecisão encontrada ocorre devido a essa hipótese e com isso o erro numérico se torna dependente do índice de comportamento do fluido. A utilização de um modelo onde uma relação entre as tensões na parede pudesse ser definida e tratada geraria um ganho significativo de precisão para os resultados.

A partir da modificação proposta acima, o escoamento de um fluido descrito por outra função viscosidade poderia ser realizado sem qualquer dificuldade ou custo computacional adicional. Seria interessante utilizar um modelo reológico de um fluido viscoplástico, uma vez que grande parte dos fluidos envolvidos na indústria de petróleo e gás apresenta tal comportamento.

Posteriormente, o modelo apresentado nesse trabalho poderia ser utilizado na solução de problemas onde ocorre o deslocamento de fluidos no espaço anular (processo comum durante a cimentação de poços), já que a maioria dos modelos existentes para esse tipo de problema não considera a curvatura da folga radial e a variação da excentricidade ao longo do comprimento do poço. O campo de velocidade obtido e estudado no presente trabalho seria utilizado para acompanhar a evolução da interface formada entre os fluidos ao longo do tempo.