

# 1 Introdução

## 1.1. Motivação

Neste trabalho é apresentado um estudo das características do escoamento formado no espaço anular entre dois cilindros concêntricos na presença de rotação do cilindro interno e de obstrução parcial do espaço anular.

O escoamento na região anular com rotação do cilindro interno é um problema clássico na mecânica dos fluidos que tem sido alvo de inúmeros estudos, como poderá ser observado na revisão da literatura realizada como parte desse trabalho.

Além de sua importância como um problema fundamental, escoamentos em regiões anulares encontram diversas aplicações práticas. O presente trabalho foi motivado por uma aplicação desse tipo de escoamento na perfuração de poços para produção de óleo e gás.

Ao longo da história, dois métodos distintos de perfuração foram usados para produção de óleo. O primeiro método, desenvolvido ainda na Antiguidade para extração de água, foi o de percussão. Com o passar dos anos esse processo foi aperfeiçoado até que no final do século XIX um sistema rotativo foi introduzido. Após 1901, o método rotativo ganhou melhor aceitação, passando, ao longo desses anos até a atualidade, por inovações tecnológicas.

Com a introdução do método rotativo, passou-se a utilizar fluidos de perfuração que tinham como um dos objetivos principais a remoção de material escavado durante a abertura do poço (Moore, 1974). A utilização de aditivos tornou o fluido de perfuração uma mistura complexa de líquidos, produtos químicos e sólidos com o intuito de agregar funções tais como: a garantia da integridade estrutural do poço, o resfriamento da broca, a lubrificação da coluna, entre outras funções.

Embora o fluido de perfuração tenha hoje várias funções, uma das principais é ainda o carreamento dos cascalhos retirados pelo processo de perfuração (Caenn & Chillingar, 1996). O processo de retirada desse material sólido de dentro do poço tem grande importância para a indústria de perfuração,

pois um procedimento de retirada de cascalhos ineficiente interfere na velocidade de perfuração do poço, aumentando o tempo e o custo para sua abertura. Assim, a indústria de perfuração busca a otimização da retirada de cascalhos do poço através de uma melhor capacidade de carreamento do fluido de perfuração utilizado.

Para melhor entender a capacidade de carreamento do fluido de perfuração, deve-se compreender o escoamento sólido-líquido existente na região anular entre a parede do poço e a coluna giratória. Tal escoamento depende de algumas variáveis tais como: o fluido de perfuração utilizado, o tipo de material sólido carregado e sua geometria, a geometria do poço, a rotação da coluna, a vazão axial imposta e também a concentração de cascalhos. Desta forma, pode-se observar que a remoção de cascalhos de dentro do poço é um problema bifásico complexo.

Ao longo dos anos, a indústria de perfuração desenvolveu técnicas de abertura de poços inclinados e horizontais, também chamados de poços desviados. Esses poços têm o objetivo de facilitar a produção de petróleo e gás, uma vez que aumentam a área de contato do poço com o reservatório, como ilustrado na Figura 1. Com a utilização desses poços, surgiram novos desafios que anteriormente não existiam para o caso dos poços verticais ou pouco desviados. Um desses desafios é a remoção eficiente do material sólido de dentro do poço que se acumula na parte inferior do mesmo devido ao efeito gravitacional.

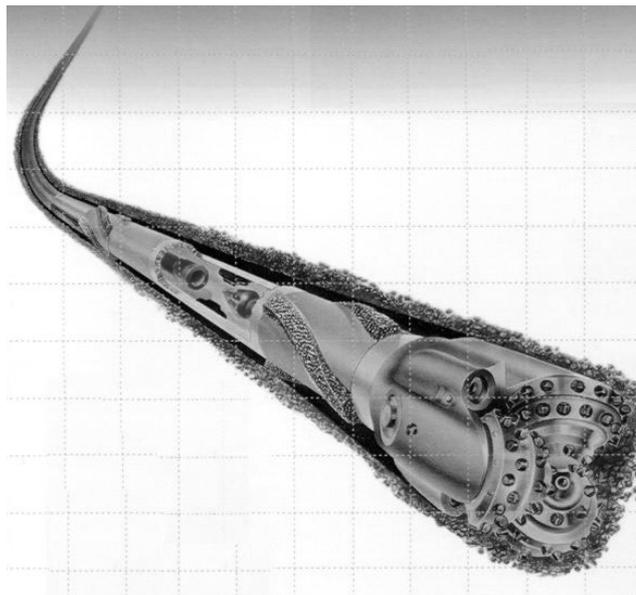


Figura 1 – Representação ilustrativa de um processo de perfuração

A rotação da coluna tem sido alvo de diversos estudos envolvendo a sua influência na suspensão de cascalhos do leito, carreamento de cascalhos e queda de pressão. Estudos mais recentes, tal como Lockett et al. (1993), consideram a presença de vórtices de Taylor gerados pela rotação da coluna na eficiência de limpeza do poço. Martins et al. (2000) observaram a influência da rotação da coluna sobre o leito de cascalhos depositado na parte inferior do poço e verificaram a existência de quatro padrões de leito. Para baixas rotações, o leito permanecia inalterado. À medida em que a rotação era aumentada, o leito apresentava deformações, resultando na suspensão de cascalho. Com um aumento adicional na rotação, observaram também a formação de escoamento tridimensional na forma de vórtices de Taylor no espaço anular. O estudo da influência da rotação da coluna na limpeza de poços tem resultados contraditórios na literatura, mas estima-se, que de uma forma geral, tal efeito seja favorável ao carreamento (Yoho, 1980; Phillip, 2000).

A indústria de perfuração tem como um dos seus objetivos a constante otimização de operação de perfuração e, em particular, da remoção de cascalhos visto que a limpeza inadequada do poço diminui a velocidade de perfuração podendo causar danos à sua integridade.

Os simuladores computacionais de escoamento são ferramentas fundamentais para o processo de otimização da remoção de cascalho. Esses simuladores utilizam uma combinação de modelos teóricos com informações empíricas para prever o carreamento de cascalho pelo fluido de perfuração.

Como já foi mencionado, trata-se de um problema extremamente complexo se todas as suas características forem levadas em consideração. Em particular, no caso de poços desviados ou horizontais, a formação do leito de cascalho na parte inferior do espaço anular produz uma obstrução parcial do espaço anular entre a coluna de perfuração e a formação, destruindo a simetria circunferencial do problema. Aliada a essa dificuldade, devem ser acrescentadas outras que são originadas no comportamento não newtoniano do fluido, na geração de diversos padrões de escoamentos secundários associados à rotação da coluna e na interação desses escoamentos secundários com o escoamento axial principal. A mobilidade do leito de cascalho também contribui para dificultar a modelagem do problema.

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo com o objetivo de contribuir para um melhor entendimento dos fenômenos básicos que controlam o escoamento em operações de perfuração de poços horizontais. Para isso, foi concebido um programa de pesquisa combinando estudos numéricos e

experimentais de uma configuração simplificada do problema real de remoção de cascalhos na perfuração de poços horizontais. A configuração estudada é apresentada de maneira esquemática na Figura 2. Nessa figura, pode-se observar que o cilindro externo representa a formação, enquanto o cilindro interno representa a coluna giratória. Uma parede sólida horizontal simula o leito de cascalhos. O escoamento axial não é considerado. Fluidos newtonianos e não newtonianos foram estudados. Para a geometria proposta foi estudada a transição entre regimes de escoamento, o perfil de velocidade axial dentro do vórtice, o coeficiente de atrito médio sobre a placa de obstrução, entre outras variáveis importantes. Os resultados do estudo dessa configuração mostram que informações relevantes foram obtidas, o que corrobora a estratégia adotada de estudar-se de maneira aprofundada uma configuração simplificada em contraposição de um estudo mais superficial de uma configuração mais próxima da real, em que o controle das condições de contorno é problemático.

Espera-se que os resultados obtidos no presente trabalho motivem a continuação de estudos, a partir da incorporação gradual de características físicas que aproximem cada vez mais o modelo estudado do problema real.

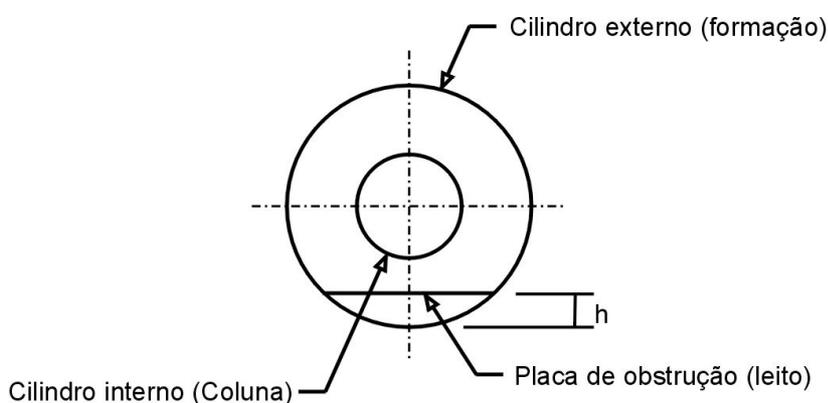


Figura 2 – Figura esquemática da configuração simplificada do problema real.

## 1.2. Revisão da literatura

Em um espaço anular entre cilindros concêntricos com o cilindro externo em repouso e o cilindro interno em rotação, pode-se esperar a existência de cinco regimes de escoamento antes de o regime turbulento ser iniciado. Andereck et al. (1986) identificaram quatro regimes estáveis (1-2; 4-5) e Lim et al. (1998) um regime adicional (3). Tais regimes são:

- 1) Escoamento de Couette;
- 2) Escoamento com vórtices de Taylor;
- 3) Segundo escoamento com vórtices de Taylor (dependente da aceleração do cilindro interno);
- 4) Escoamento com vórtices ondeantes (“wavy-vortex”); e
- 5) Escoamento com vórtices modulados.

De acordo com Chandrasekhar (1961), se um padrão estacionário de movimento formado no início da transição prevalecer, o princípio da troca de estabilidades é válido e a instabilidade torna-se estacionária na forma de um escoamento secundário. Dessa forma, os regimes possíveis são estáveis, mas em um regime diferente do escoamento de Couette.

Andereck et al. (1986) apresentaram em um gráfico os principais regimes observados experimentalmente entre cilindros concêntricos com rotações independentes e razão de raios igual a 0,883. A aceleração imposta ao cilindro interno foi lenta o suficiente para não obter o segundo escoamento com vórtice de Taylor, conforme pode ser visto na Figura 3. A abscissa da Figura 3 representa o número de Reynolds rotacional relativo ao cilindro externo, enquanto a ordenada representa o número de Reynolds rotacional relativo ao cilindro interno. Os valores negativos do número de Reynolds referentes ao cilindro externo representam o sentido de giro do cilindro externo contrário ao do cilindro interno.

Pode-se perceber na Figura 3 que para o cilindro externo em repouso, isto é,  $Re_o=0$ , verifica-se os quatro regimes antes do regime turbulento. A variedade de regimes é significativa quando se possibilita a rotação de ambos os cilindros. No mapa proposto por Andereck et al. (1986), verifica-se a presença de quinze regimes de escoamento diferentes para os números de Reynolds explorados, embora não tenha sido explorada pelos autores uma ampla região. No caso de rotação dos dois cilindros com o mesmo sentido, pode-se perceber que a linha que divide o regime de Couette do regime de Taylor–Couette apresenta número de Reynolds igual para o cilindro interno e externo, visto que a rotação do cilindro interno deve ser superior à rotação do cilindro externo para que o critério de Rayleigh seja satisfeito e o novo regime seja estabelecido.

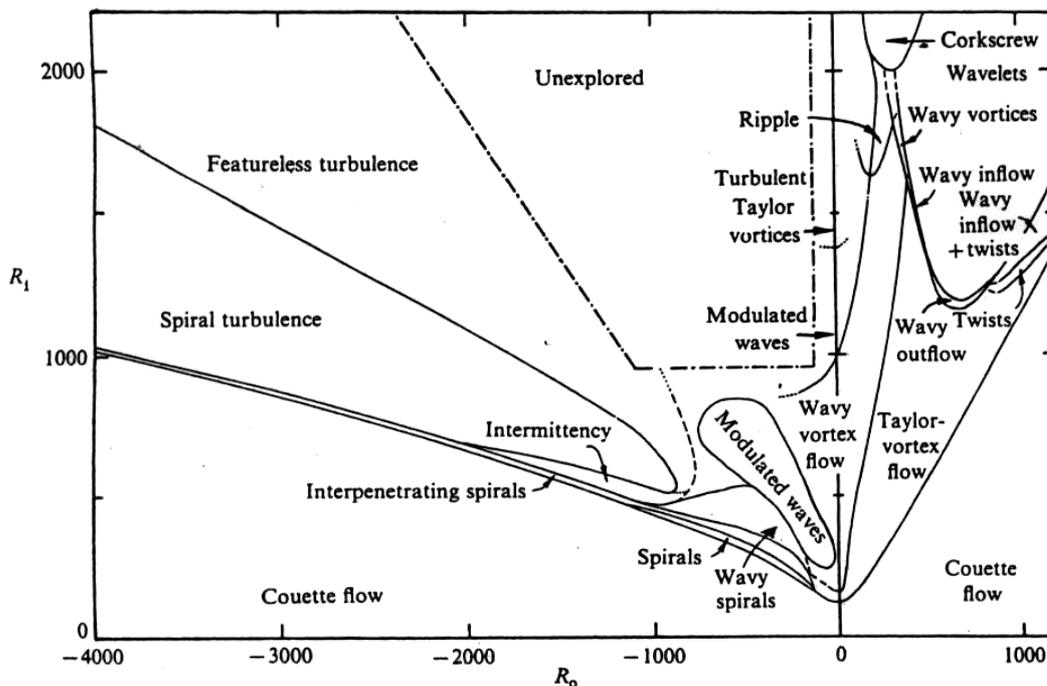


Figura 3 – Regimes observados em um escoamento entre cilindros concêntricos com rotações independentes e razão de raios igual a 0,883. Andereck et al. (1986).

O escoamento de Couette é caracterizado por um escoamento estável para um distúrbio infinitesimal aplicado ao campo de velocidade. Esse escoamento apresenta os componentes de velocidade tangencial  $v_z$  e radial  $v_r$  nulas. Possui ainda equação teórica que prevê o perfil de velocidade tangencial  $v_\theta = v_\theta(r)$ . O valor crítico de Reynolds rotacional para esse tipo de escoamento é dado em um número de Reynolds crítico,  $Re_c$ , conforme DiPrima & Stuart (1983). A estabilidade hidrodinâmica em um escoamento de Couette foi primeiramente estudada com recursos matemáticos por Taylor (1923). Desde os estudos de Geoffrey Ingram Taylor até os dias de hoje, a instabilidade de Taylor-Couette vem sendo amplamente estudada e informações importantes têm sido conseguidas através das simulações numéricas realizadas em computadores com processadores cada vez mais velozes. Experimentos realizados com técnicas de velocimetria a laser utilizando o princípio Doppler ou imagem de partículas também têm ajudado no entendimento físico dos problemas de instabilidade, assim como as técnicas de visualização de escoamento.

Cerca de duzentos e trinta e seis anos antes do trabalho de G. I. Taylor, o movimento circular começou a ser estudado por Isaac Newton, sendo relatado pelo mesmo em 1687 no Livro II, seção IX do *Principia*. Na proposição 51, Newton comenta:

“Se um cilindro sólido infinitamente longo, em um fluido uniforme e infinito, gira com um movimento uniforme em torno de seu eixo de posição conhecida, e o fluido forçado a mover-se apenas pelo impulso do cilindro, e todas as partes do fluido se mantêm uniforme em seu movimento, eu afirmo que os tempos periódicos das partes do fluido são proporcionais às suas distâncias em relação ao eixo do cilindro”. (I. Newton, 1687 apud Donnelly, R.J., 1991)

No corolário 2, Newton continua:

“Se um fluido contido em um recipiente cilíndrico de comprimento infinito, contendo um outro cilindro internamente e ambos os cilindros giram em torno de um eixo comum, e os tempos de suas revoluções são proporcionais a seus semidiâmetros, e todas as partes do fluido se mantêm em movimento, os tempos periódicos de todas as partes serão proporcionais às distâncias em relação ao eixo dos cilindros”. (I. Newton, 1687 apud Donnelly, R.J., 1991)

Após cento e sessenta e um anos depois de Newton, George Gabriel Stokes fez a seguinte afirmação em um artigo publicado na Transactions of the Cambridge Philosophical Society de 1848 (Donnelly, R.J., 1991):

“Vamos considerar o movimento de uma massa de fluido inelástica compreendida entre dois cilindros tendo em comum o mesmo eixo, os cilindros girando uniformemente em torno de seus eixos e o fluido modificado seu estado de movimento permanente.

...Se o cilindro interno for girar em uma rotação muito alta, o fluido próximo a esse teria a tendência de migrar para fora em consequência da força centrífuga e recirculações seriam produzidas...” (Stokes, 1848 apud Donnelly, R.J., 1991)

Pode-se notar que a intuição de G. G. Stokes revelou algo que até então não se tinha comprovação experimental. Stokes fez essa afirmação tomando apenas como base os seus conceitos físicos em escoamento de fluidos. Com o desenvolvimento das equações de quantidade de movimento para um fluido viscoso elaboradas por Navier em 1823 e Stokes em 1845, segundo Donnelly (1991), uma grande discussão se arrastou sobre a determinação da viscosidade através de medição experimental. A partir dessa necessidade, o escoamento entre cilindros concêntricos foi bastante explorado, pois se acreditava que era a melhor maneira de se obter o valor da viscosidade para os fluidos.

Em 1881, Max Mergules propôs a construção de um viscosímetro utilizando cilindros concêntricos, mas apenas em 1888, Henry Reginald Arnulph Mallock e M. Maurice Couette apresentaram concretamente seus viscosímetros com cilindros concêntricos, mas de forma bastante curiosa apenas o

viscosímetro de Couette ficou conhecido no meio científico. De acordo com Donnelly (1991), M. Maurice Couette foi o primeiro a considerar o problema de cilindros excêntricos para estimar os erros na obtenção do valor da viscosidade.

Após trinta e cinco anos, Taylor (1923) publica um artigo sobre o assunto utilizando a teoria de estabilidade linear para casos gerais de escoamento com os cilindros interno e externo girando nos mesmos sentidos e em sentidos opostos. Nesse trabalho, Taylor confirmou a existência do escoamento secundário com estrutura na forma de toróides. Taylor identificou esses toróides ao utilizar um traçador para identificá-los em seu experimento, ficando os mesmos conhecidos como vórtices de Taylor. Essas estruturas toroidais são representadas esquematicamente na Figura 4. O trabalho de G. I. Taylor vem confirmar a intuição de Stokes em 1848 e estabeleceu uma fronteira entre os primeiros trabalhos para obtenção de viscosidade e o estudo de instabilidade em escoamentos em espaços anulares.

Após o trabalho de Taylor (1923), diversas foram as contribuições no estudo da instabilidade de escoamento em espaços anulares. Segue-se a diante as principais contribuições dos últimos quarenta anos.

A instabilidade em um escoamento de Couette inicia-se a partir do número de Reynolds crítico,  $Re_c$ , conforme mencionado anteriormente. A transição para o regime de vórtices de Taylor inicia-se em um dado número de Reynolds crítico que depende da razão de raios dos cilindros que compõem o anular. O efeito da razão de raios sobre a transição entre regimes será explorado a seguir.

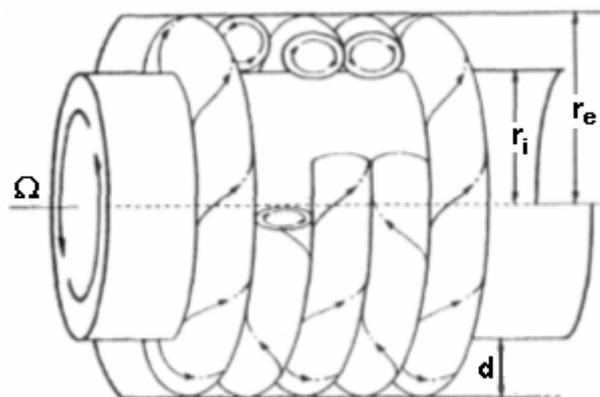


Figura 4 – Representação esquemática das estruturas toroidais dos vórtices de Taylor.

A formação desses vórtices de Taylor é regida pelo critério de Rayleigh para um fluido viscoso, definindo de acordo com as condições de contorno se o escoamento é estável ou instável. Para um fluido invíscido, conforme

Chandrasekar (1961), o critério de Rayleigh estabelece que a condição necessária e suficiente para a distribuição de velocidade angular  $\Omega(r)$  ser estável é estabelecida na eq. (1).

$$\frac{d}{dr} (r^2 \Omega)^2 > 0 \quad (1)$$

Essa equação estabelece que a quantidade de movimento linear decrescente com o raio propicia a instabilidade do escoamento. Ainda de acordo com o critério de Rayleigh, a instabilidade significa a troca de porções de fluidos pertencentes a posições radiais diferentes. Essa troca de porções só é possível devido à liberação de energia para que propicie sempre um decréscimo da quantidade de movimento angular.

Para um fluido viscoso, o critério de Rayleigh estabelece que o discriminante da estabilidade,  $\phi_{Est}(r)$ , seja sempre positivo para que haja estabilidade, conforme pode ser verificado na eq. (2).

$$\phi_{Est}(r) = \frac{1}{r^3} \frac{d}{dr} (r^2 \Omega)^2 > 0 \quad (2)$$

O desenvolvimento desse discriminante acarreta  $\psi = \Omega_2 / \Omega_1 > \xi^2$  como sendo o critério para definir se o escoamento será estável, em que  $\xi$  é a razão entre raios dos cilindros interno e externo. Dessa forma, percebe-se que o cilindro externo, para o caso geral, tenha de girar com rotação superior a  $\Omega_1 \xi^2$  para que o escoamento seja estável. Essa situação de giro do cilindro externo não cabe no problema estudado nesse trabalho, mas ilustra a formulação proposta por Rayleigh para a instabilidade.

O efeito da razão de raios na estabilidade de Couette foi estudada matematicamente por DiPrima et al. (1984) para cilindros concêntricos infinitamente longos e para o cilindro externo em repouso. De acordo com DiPrima, o início da formação dos vórtices de Taylor identificado pelo número de Reynolds crítico apresenta um decréscimo à medida em que a razão de raios é aumentada até  $\xi = 0,450$ . A partir dessa razão de raios, a transição entre regimes cresce com a razão de raios, conforme pode ser observado na Figura 5.

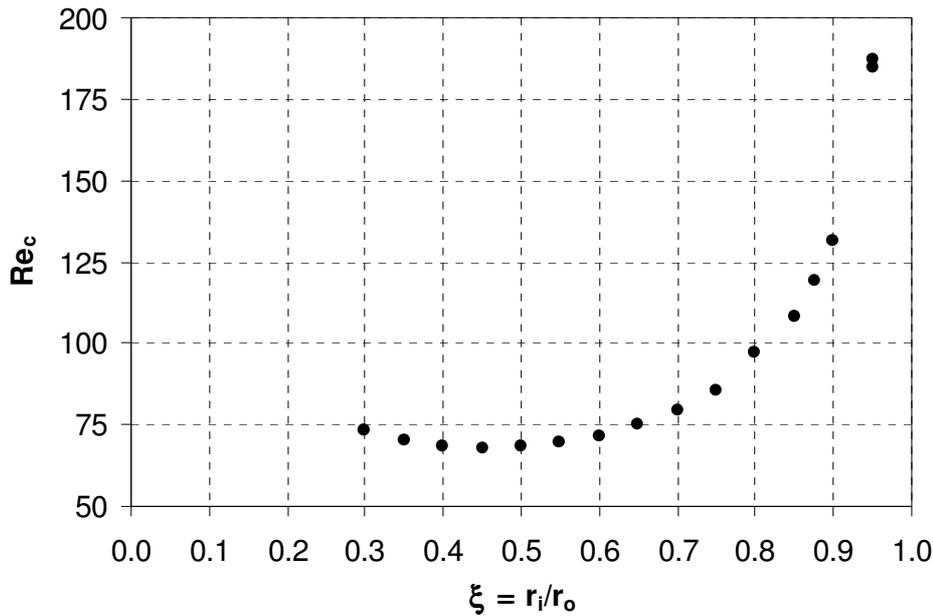


Figura 5 - Valores críticos de Reynolds rotacional em função da razão de raios. DiPrima et al. (1984).

Os resultados obtidos por Sparrow et al. (1964) mostraram que a transição do regime de Couette para o de vórtices de Taylor é possível mesmo para razões de raios em torno de 0,1. Os resultados apresentados por Sparrow foram tanto para rotação dos cilindros no mesmo sentido quanto em sentidos opostos.

A instabilidade que ocorre nesse tipo de escoamento é proveniente de fenômeno não linear. Tais fenômenos dependem do caminho percorrido e em particular para o escoamento de Taylor-Couette, a instabilidade é dependente da aceleração imposta ao cilindro interno até chegar ao regime permanente. De acordo com Park et al. (1981a), a transição do regime laminar para o regime com vórtices de Taylor ocorre de maneira dependente da aceleração imposta ao cilindro interno. Segundo Park et al., a histerese que ocorre na identificação da transição ao acelerar o cilindro interno com uma rampa crescente e outra decrescente de mesmo módulo é minimizada para aceleração adimensionalizada menor que 10. A aceleração adimensionalizada,  $a^*$ , proposta por Park et al. é definida pela eq (3).

$$a^* = (d Re / dt^*) / \Gamma, \quad t^* = t / (L^2 / \nu) \quad (3)$$

em que  $Re$  é o número de Reynolds rotacional,  $L$  é o comprimento axial dos tubos,  $\Gamma$  é a razão de aspecto do anular dada pela razão entre o comprimento

dos tubos e o espaço entre os cilindros; e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido presente no espaço anular.

Pode-se notar que a razão de aspecto,  $\Gamma$ , está presente na equação da aceleração adimensionalizada com a intenção de inserir o efeito da mesma de forma acoplada à aceleração na identificação da transição, visto que os efeitos das extremidades podem ser significativos.

Assim como os vórtices de Taylor, os vórtices ondeantes são dependentes da aceleração imposta pelo cilindro interno. De acordo com Andereck et al. (1986), o valor do número de Reynolds crítico para esse tipo de vórtice será tanto mais preciso quanto mais próximo de um processo quase estático for a rampa de aceleração do cilindro interno, isto é, quanto menor a aceleração angular imposta, conforme já tinha sido descrito por Park et al. (1981).

De acordo com Jones (1985), os experimentos indicam que a transição dos vórtices de Taylor para os vórtices ondeantes pode existir para razões de raios da ordem de 0,5, mas que a transição ocorre em números de Reynolds bem mais altos que normalmente ocorre para as geometrias com razões de raios superiores a 0,8. Para razões de raios de 0,8, a transição para vórtices ondeantes ocorre para um número de Reynolds por volta de 20% acima do número de Reynolds crítico, que identifica a transição do escoamento de Couette para os regime de vórtices de Taylor. Para razões de raios de 0,5, pode-se chegar até 80% do Reynolds crítico que identifica a transição para vórtices de Taylor e não obter o regime de vórtices ondeantes, conforme será ilustrado na seção de resultados desse trabalho.

Cole (1976) utilizou uma montagem experimental para analisar a influência da razão de aspecto na formação dos vórtices de Taylor e dos vórtices ondeantes utilizando técnica de visualização e de medição do torque do cilindro interno. De acordo com seu estudo, o início da formação dos vórtices de Taylor não é afetado significativamente pela razão de aspecto a partir de  $\Gamma > 10$ , sendo a razão de aspecto dada pela razão do comprimento do tubo para a folga do anular. Para os vórtices ondeantes a razão de aspecto pouco influencia a transição entre regimes a partir de  $\Gamma > 50$ . De acordo com as medições efetuadas por Kusnetsov et al. (1977) e Pfister & Rehberg (1981) citados por Escudier et al. (1995), os efeitos das extremidades são detectáveis até cinco espessuras do anular, a partir da extremidade do experimento. Pode-se verificar que as características dos vórtices são melhor representadas para uma razão de aspecto maior que 10, Park & Donnelly (1981b).

Os trabalhos de Mullin & Benjamin (1980) e Lorenzen et al. (1982), citados por Jones (1985), mostraram que o número de Reynolds crítico para um experimento com menores razões de raios é bastante sensível à razão de aspecto. O número de células no experimento foi mantido constante quando a razão de aspecto foi variada, de forma que o tamanho das células variou com a razão de aspecto. Pode-se explorar a hipótese de que são tais variações no tamanho da célula as responsáveis pela forte sensibilidade da razão de aspecto nos trabalhos de Mullin & Benjamin (1980) e Lorenzen et al. (1982).

Park et al. (1983) mostraram que o comprimento de onda axial para os vórtices ondeantes apresenta um valor variável ao longo do comprimento axial do anular. Os valores máximos se encontram na região da simetria do experimento, enquanto que os menores valores encontram-se a 25% do comprimento total a partir das extremidades. Park et al verificaram, no mesmo trabalho, que a utilização de uma rampa de rotação mais rápida, isto é,  $a^* = 15$ , acarretou uma distribuição de comprimentos de onda constante na região de simetria e uma menor variação entre os valores da região da simetria e das extremidades. Essas menores variações podem ser interpretadas por uma situação de não equilíbrio da solução. Uma análise similar foi realizada para uma rampa de rotação menos acentuada,  $a^* = 0,1$ , e constatou-se uma maior variação do comprimento de onda axial. De acordo com as observações de Park et al. (1983), as rampas de rotação mais acentuadas produzirão resultados não reprodutíveis em diferentes experimentos por apresentarem efeitos transientes acentuados e com forte influência das extremidades. Os resultados obtidos nesse trabalho com as rampas mais acentuadas apresentaram forte influência das extremidades, mas não são ilustrados aqui.

Os vórtices de Taylor modulados foram primeiramente observados por Gollub & Swinney (1975) ao analisarem o espectro de velocidade radial com o aumento da rotação do cilindro interno para uma geometria de  $\xi = 0,88$ . Gorman & Swinney (1979), verificaram através de técnica de visualização utilizando fluido reoscópico, que a frequência de modulação,  $f_2$ , poderia apresentar vários valores, mesmo para diferentes valores  $f_1$ , isto é, frequência de alternância dos vórtices ondeantes ao longo da coordenada tangencial.

Wereley & Lueptow (1998) apresentaram várias características espaciais e temporais para os vórtices de Taylor e para os vórtices ondeantes utilizando a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV). Entre as características estudadas por eles está a diferença entre a velocidade radial de saída e a velocidade radial de entrada entre um par de vórtices, em que a velocidade

radial de saída é aquela que incide sobre sentido de raio crescente. Quanto maior o número de Reynolds maior será a velocidade de saída em relação à velocidade de entrada entre dois vórtices. Essa característica promove também a deformação do vórtice, que é mais perceptível em valores de Reynolds elevados. Uma outra característica observada foi a diferença do módulo da velocidade axial entre a região mais próxima ao cilindro interno e a mais próxima ao cilindro externo. A velocidade axial na região mais próxima ao cilindro interno é maior que a velocidade axial na região mais próxima ao cilindro externo, sendo tal fato justificado pela conservação de massa.

Uma técnica experimental muito utilizada em instabilidade de escoamentos é a de visualização de escoamento com fluido reoscópico<sup>1</sup>. Com essa técnica é possível identificar a transição do escoamento de Couette para o escoamento com vórtices de Taylor, além de obter as características geométricas das células por método direto através do uso de um catetômetro, ou por um método indireto através de um sistema de aquisição de imagens. De acordo com Dominguez-Lerma et al. (1985), certo cuidado deve ser tomado ao utilizar esse tipo de técnica em um experimento de Taylor-Couette na vertical, visto que o comprimento de onda dos vórtices situados na parte inferior é menor que o comprimento de onda dos vórtices situados na parte superior da seção de teste. Segundo Dominguez-Lerma et al. (1985), esse efeito foi mais acentuado para maiores concentrações de flocos poliméricos. A possível explicação dada pelos autores é que ocorre uma má distribuição dos flocos nos vórtices e que pode ocorrer um efeito acoplado com o campo gravitacional, pois tal efeito não ocorre se o anular for montado na posição horizontal. Uma outra característica do fluido reoscópico para esse tipo de experimento é o elevado tempo de sedimentação levando-se em consideração o tempo necessário para conduzir um experimento de Taylor-Couette, conforme Matisse, P. & Gorman, M. (1984).

Embora não seja o escopo do trabalho, vale ressaltar que a presença de um escoamento movido pelo gradiente axial de pressão também retarda a instabilidade do escoamento, mas não a inibe. Pode-se observar na Figura 6 o quadro proposto por Lueptow et al. (1992) com os padrões de escoamento considerando o número de Reynolds em função da rotação do cilindro interno versus o número de Reynolds em função da velocidade axial. Em paralelo a essas pesquisas de instabilidade para escoamento axial-rotacional, surgiu o interesse em se conhecer o perfil de velocidade numa seção anular

considerando os efeitos de rotação da coluna e de excentricidade para diversos fluidos.

Trabalhos clássicos de obtenção de perfis de velocidade na seção anular para fluidos não newtonianos foram realizados experimental e computacionalmente, tais como os trabalhos de Escudier & Gouldson (1995) e Escudier et al. (1995) que obtiveram resultados experimentais do fator de atrito em função do número de Reynolds e perfis de velocidade nos regimes laminar e turbulento para um escoamento em um anular concêntrico com e sem rotação. Resultados experimentais de perfis de velocidade para anular concêntrico e excêntrico, com efeito de rotação, de fluidos newtoniano e não newtoniano foram apresentados por Nouri & Whitelaw (1994, 1997). Recentemente, Escudier et al. (2002) consideraram o modelo de fluido de potência uma representação adequada de modelos não newtonianos mais complicados e incluíram os efeitos de rotação e excentricidade da coluna. Eles obtiveram resultados numéricos de  $fRe$  em função da excentricidade. Além disso, obtiveram a queda de pressão variando-se o número de Reynolds axial e rotacional sem alcançar o número crítico. Loureiro et al. (2002), utilizando o modelo de Carreau para o fluido não newtoniano obtiveram o perfil de velocidade axial e tangencial, em um anular concêntrico, para uma variedade de números de Reynolds e de Taylor sem alcançar o número crítico. Uma estimativa do número crítico de Taylor é investigado através da instabilidade do escoamento helicoidal, conforme elaborada por Wronski & Jastrzebski (1990) que investigaram o número crítico de Taylor em função do número de Reynolds a partir da taxa de transferência de massa na superfície do cilindro interno utilizando o método eletroquímico.

De acordo com os resultados de Escudier et al. (1995), que analisaram as linhas de corrente, a estrutura global dos vórtices de Taylor para as soluções de Laponite e CMC em água é similar à estrutura obtida para a goma xantana. Estes resultados sugerem que a característica de queda da viscosidade com o aumento da taxa de deformação, efeito “shear-thinning”, da solução de Laponite e CMC em água prevalece em relação à característica de elasticidade e tixotropia. As comparações realizadas por Escudier et al. foram apenas qualitativas tornando uma análise mais detalhada necessária, visto que os campos de velocidade não foram comparados. A natureza tixotrópica da Laponite utilizada no trabalho de Escudier não permitiu a precisa identificação do

---

<sup>1</sup> Este fluido consiste de uma suspensão de 1 a 2% de flocos poliméricos em uma mistura de propileno glicol e água conforme Matisse & Gorman (1984).

ponto de transição do escoamento de Couette para o escoamento de vórtices de Taylor.

O efeito de excentricidade entre os cilindros interno e externo foi estudado teoricamente por DiPrima & Stuart (1972) e Eagles et al. (1978). Ambos os trabalhos constataram que quanto maior a excentricidade, maior era o número de Taylor crítico. Os resultados apresentados por esses autores são para valores de excentricidade entre 0 e 0,8, em que 0 representa que os cilindros são concêntricos e 1 que os cilindros estão os mais descentralizados possíveis.

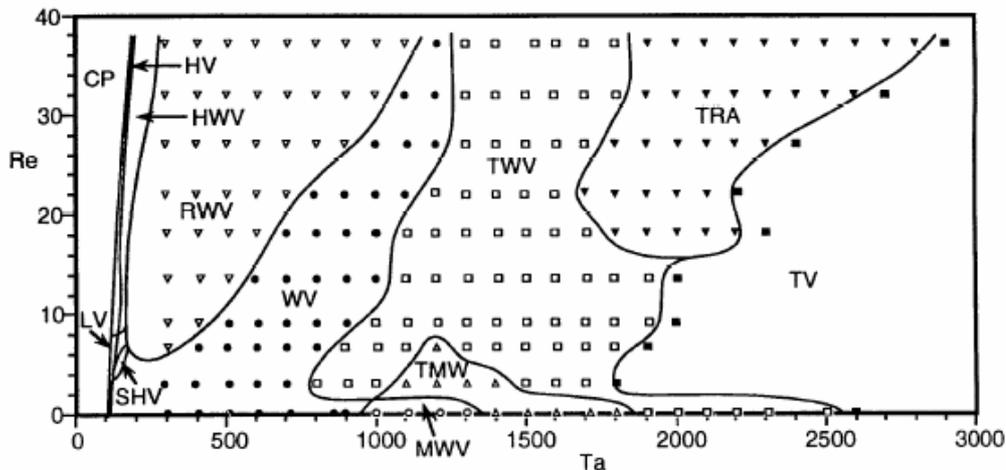


Figura 6 - Regimes de escoamento para uma geometria anular com rotação do cilindro interno e escoamento axial. Lueptow et al. (1992).

A influência dos parâmetros reológicos de fluidos não newtonianos em anulares concêntricos foi estudado para várias razões de raios por Coronado-Matutti (2002). Coronado-Matutti observou através de seus resultados numéricos que para baixas razões de raios os parâmetros reológicos do modelo de Carreau pouco afetam o início da formação dos vórtices de Taylor visto que tais fluidos apresentam um comportamento quase newtoniano. Também foi observado que para maiores razões de raios, o decréscimo do índice de potência fez diminuir o início da formação dos vórtices de Taylor. A tendência encontrada no trabalho de Coronado-Matutti (2002) para o número de Reynolds crítico igual a 65, em fluidos newtonianos, quando a razão de raios tende a zero entra em contradição com os resultados apresentados por DiPrima et al. (1984), visto que o último encontrou um aumento no número de Reynolds crítico à medida em que  $\xi$  decrescia para razões de raios menores que 0,450. Os resultados de DiPrima et al. (1984) foram apresentados na Figura 5.

De acordo com Ashrafi & Khayat (2000), o número de Reynolds crítico torna-se menor quando o efeito “shear-thinning” é aumentado. Para um fluido

não newtoniano modelado pela lei de potência, o parâmetro índice de potência,  $n$ , faz antecipar a formação dos vórtices de Taylor independentemente da razão de raios. O motivo pelo qual o início da formação dos vórtices de Taylor é antecipado justifica-se pelo decréscimo do efeito viscoso do fluido "shear-thinning".

Lockett et al. (1992) estudaram a transição do escoamento de Couette para o regime de vórtices de Taylor além do comprimento de onda axial dos mesmos para fluidos não newtonianos com diferentes índices de comportamento,  $\beta^2$ . Lockett et al. analisaram duas razões de raios, uma com  $\xi = 0,950$  e outra com  $\xi = 0,500$  para os diferentes modelos de fluidos não newtonianos e constaram que o valor da transição do escoamento de Couette para o regime de vórtices de Taylor em função do parâmetro  $\beta$  é o mesmo para todos os fluidos newtonianos generalizados quando  $\xi \rightarrow 1$  e  $\beta > -0,8$ . Para razões de raios da ordem de 0,500, o valor da transição não é mais o mesmo para cada parâmetro  $\beta$ , considerando os diferentes modelos utilizados. Considerando o estudo da geometria com razões de raios de 0,5, verifica-se que o número de Taylor crítico passa por um mínimo em  $\beta$  aproximadamente igual a -0,4. Para diferentes razões de raios, o mínimo ocorre em um valor de  $\beta$  diferente. Lockett observou que o valor do número de Taylor crítico mínimo ocorre em  $\beta = -0,8$  quando  $\xi \rightarrow 1$ . Para os mesmos valores de  $\beta$  em que foi detectado um valor mínimo para o número de Taylor, existe um valor de máximo para o comprimento de onda axial. O valor máximo do comprimento de onda está entre 2,0 e 2,05 dependendo do modelo de fluido não newtoniano utilizado.

Donnelly & Simon (1960) analisaram o torque transmitido pelo fluido ao cilindro externo como função da velocidade angular do cilindro interno. A relação empírica proposta por Stuart (1958) foi testada para o torque transmitido a partir do início de formação dos vórtices de Taylor com validade até dez vezes a velocidade crítica angular com boa representatividade. De acordo com os dados desses autores, o torque do cilindro interno cresce mais intensamente com o aumento da rotação do mesmo a partir do momento em que é constatada a presença dos vórtices de Taylor.

O estudo de escoamento secundário em um anular com leito de cascalhos é bastante interessante, podendo dar uma definição quanto à importância da rotação na eficiência de limpeza do poço assim como da deformação do leito de

---

<sup>2</sup> O parâmetro  $\beta$  é definido para um fluido modelado pela lei de potência como:  $\beta = n - 1$ , onde  $n$  é o índice de comportamento "shear-thinning".

cascalhos. Phillip et al. (1997) estudaram o papel dos vórtices de Taylor no transporte de cascalhos e observaram que é difícil quantificar a influência dos vórtices e da velocidade azimutal, de forma separada, na suspensão das partículas presentes no leito.

Como pode ser verificado na pesquisa bibliográfica apresentada, o escoamento em um espaço anular é bastante estudado tanto experimental quanto numericamente. Existem outras linhas de pesquisas com escoamento em anulares que não foram abordadas nessa revisão visto que estão fora do escopo do trabalho. Entre elas, pode-se citar: o efeito de Coriolis a partir de experimentos montados sobre mesas giratórias; e o anular parcialmente preenchido com líquido, isto é, com superfície livre. Não foi encontrado nenhum trabalho até o momento sobre o padrão de escoamento quando há uma obstrução parcial do espaço anular. A originalidade da geometria aliada à importância industrial dessa configuração motiva a realização do presente trabalho.

### **1.3. Considerações finais**

Ao longo desse capítulo pode-se verificar a importância do efeito de rotação na limpeza de um poço, além da extensa literatura sobre instabilidade de escoamento em um anular. Este trabalho segue com mais quatro capítulos que abordarão os seguintes temas: No capítulo dois, será abordado o modelo teórico com as equações que governam o escoamento, a equação constitutiva e os parâmetros adimensionais relevantes ao problema. No capítulo três, será abordada a metodologia experimental com uma breve descrição da técnica de velocimetria a laser utilizada, além da modelagem computacional. No capítulo quatro, serão apresentados os resultados obtidos experimental e computacionalmente e as comparações apropriadas. No capítulo cinco, serão emitidas as devidas conclusões relativas aos resultados obtidos e as sugestões de trabalhos futuros.