



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

ERICK GONÇALVES MORO
HUGO VIANEZ PEREGRINO

**ANÁLISE DE INSTABILIDADE TAYLOR-COUETTE EM
ESPAÇO ANULAR COM LEITO DE OBSTRUÇÃO MÓVEL**

VITÓRIA
2016

ERICK GONÇALVES MORO
HUGO VIANEZ PEREGRINO

**ANÁLISE DE INSTABILIDADE TAYLOR-COUETTE EM
ESPAÇO ANULAR COM LEITO DE OBSTRUÇÃO MÓVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Bruno Venturini Loureiro D.Sc.

VITÓRIA
2016

ERICK GONÇALVES MORO
HUGO VIANEZ PEREGRINO

ANÁLISE DE INSTABILIDADE TAYLOR-COUETTE EM ESPAÇO ANULAR COM LEITO DE OBSTRUÇÃO MÓVEL

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____/____/2016

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Bruno Venturini Loureiro
Universidade Federal do Estado do
Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. M.Sc. Lucas Antônio Silveira Silva
Faculdade do Centro Leste - UCL

Prof. Michell Luiz Costalonga
Faculdade do Centro Leste - UCL

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades. A UFES, seu corpo docente, direção e administração que nos propiciaram essa grande realização.

Ao nosso orientador Bruno Venturini Loureiro, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos. E aos professores Lucas Antônio Silveira Silva e Michell Luiz Costalonga por terem se disponibilizado à fazerem parte de nossa banca avaliadora.

À UCL por ter cedidos suas dependências e toda equipe que lá estava sempre solicita a nos ajudar. E finalmente mas não menos importantes nossos pais, familiares e todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa caminhada até aqui, o nosso muito obrigado.

RESUMO

Este projeto de graduação surge da necessidade de se estudar o efeito da altura de leito de cascalho que se forma na parte inferior de poços horizontais devido à gravidade e sua influência na transição entre os regimes de escoamentos anulares Taylor-Couette. No presente trabalho foi desenvolvido um estudo de forma a contribuir para um melhor entendimento dos fenômenos básicos que controlam o escoamento em operações de perfuração de poços horizontais. Este tipo de perfuração tem como principal vantagem o aumento na área de superfície de zona de produção de petróleo. Nesse estudo é analisado o efeito da altura de leito de partículas em diferentes velocidades de rotações da coluna que simula o eixo da broca de perfuração, utilizando-se um fluido newtoniano, através de testes experimentais em um anular parcialmente obstruído. Variando-se a viscosidade do fluido, a altura de obstrução e o diâmetro das partículas que formam o leito, encontrou-se o número de Reynolds crítico e o torque necessário para o aparecimento dos vórtices de Taylor em cada uma das combinações de situações. Uma análise posterior é feita sobre a influência da transição e instabilidade dos regimes de escoamento no carregamento das partículas.

Palavras Chaves: Perfuração de poços horizontais, Altura de leito de partículas, Transição Taylor-Couette

ABSTRACT

This work came up from the necessity to study the effect of the debris bed height that forms at the bottom of horizontal wells due to gravity and its influence on the transition between the annular flows regimes Taylor-Couette. In this work, a study was developed in order to contribute to a better understanding of the basic phenomena that control the flow in horizontal wells drilling. This kind of drilling has as the main advantage the increase of the surface area in oil production. In this study is analyzed the effect of bed height of particles at different rotation speeds of the column that simulates the axis of the drillstring, using a Newtonian fluid, through experimental testing in an annular partially obstructed. Varying fluid viscosity, the height of obstruction and the diameter of the particles that form the bed, it was found the critical Reynolds number and the torque required for the onset of the Taylor vortices in each of the combinations of situations. A further analysis is made on the influence of transition and instability of flow regimes in the entrainment of the particles.

Key words: drilling of horizontal wells, particle bed height, Transition Taylor-Couette

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	10
1.1 MOTIVAÇÃO.....	10
1.2 OBJETIVO	13
1.3 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.MODELAGEM MATEMÁTICA.....	20
3.METODOLOGIA.....	22
3.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL	22
3.2 VALIDAÇÃO DO TESTE.....	24
3.3 PARTÍCULAS UTILIZADAS.....	26
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
4.RESULTADOS EXPERIMENTAIS	28
5.CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
5.1 CONCLUSÃO	35
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
6.REFERÊNCIAS.....	37
APÊNDICE A – TORQUE DIMENSIONAL	39
APÊNDICE B – TORQUE ADIMENSIONAL	44

TABELA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE UMA PERFURAÇÃO HORIZONTAL (FONTE: PÁGINA MANUTENÇÃO & SUPRIMENTOS).....	11
FIGURA 2. PERFURAÇÃO HORIZONTAL (LOUREIRO 2004).....	12
FIGURA 3. FIGURA ESQUEMÁTICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO SIMULADOR (LOUREIRO, 2004).....	13
FIGURA 4. ESTRUTURAS TOROIDAIS DOS VÓRTICES DE TAYLOR (ADAPTADO LOUREIRO 2004)	15
FIGURA 5. REGIMES OBSERVADOS EM UM ESCOAMENTO ENTRE CILINDROS CONCÊNTRICOS COM ROTAÇÕES INDEPENDENTES E RAZÃO DE RAIOS. ANDERHECK ET AL. (1986).....	18
FIGURA 6. BANCADA EXPERIMENTAL.....	23
FIGURA 7. MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	24
FIGURA 8. VISCOSÍMETRO CAPILAR TIPO CANON-FENSKE.	25
FIGURA 9. VALIDAÇÃO DOS TESTES, VERIFICAÇÃO DA VISCOSIDADE	25
FIGURA 10. AMOSTRAS DE PARTÍCULAS UTILIZADAS	26
FIGURA 11. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS AO UTILIZAR GLICERINA SEM LEITO DE PARTÍCULAS. EXPERIMENTO: ANULAR PREENCHIDO SOMENTE COM FLUIDO 2 (256 CP).....	29
FIGURA 12. TORQUE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA AS DIFERENTES SOLUÇÕES UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS SEM LEITO DE PARTÍCULAS.	30
FIGURA 13. TORQUE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS. EXPERIMENTO: FLUIDO 2 (SOLUÇÃO 256 CP), ALTURA 1 (38MM), PARTÍCULA DA FAIXA 1 (1-1,4MM).....	31
FIGURA 14. REYNOLDS CRÍTICO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE ALTURA ADIMENSIONAL PARA O FLUIDO 1 (173 CP).	32
FIGURA 15. REYNOLDS CRÍTICO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO DE ALTURA ADIMENSIONAL PARA O FLUIDO 2 (256 CP).	32
FIGURA 16. VALORES CRÍTICOS DE REYNOLDS ROTACIONAL EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE RAIOS. DIPRIMA ET AL., (1984)	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS UTILIZADAS	26
TABELA 2. RELAÇÃO DE ALTURA ADIMENSIONAL	28
TABELA 3. VISCOSIDADE DO FLUIDO UTILIZADO	28
TABELA 4. AUMENTO PERCENTUAL DO REYNOLDS DE TRANSIÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPECTIVOS AUMENTOS DE ALTURA DO LEITO PARA O FLUIDO 1.....	33
TABELA 5. AUMENTO PERCENTUAL DO REYNOLDS DE TRANSIÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESPECTIVOS AUMENTOS DE ALTURA DO LEITO PARA O FLUIDO 2.....	33
TABELA 6. PARÂMETROS DIMENSIONAIS E SUAS RESPECTIVAS DIMENSÕES PRIMÁRIAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo vem investindo em pesquisas para estimar a eficiência de limpeza de poços, que se baseiam na combinação de modelos teóricos e empíricos para prever como os parâmetros relacionados à retirada de cascalho em forma de sedimento pelo fluido de perfuração podem ser otimizados no processo de perfuração, para que haja assim uma diminuição nos custos da operação.

O projeto aqui apresentado trata da continuação dos estudos feitos na bancada experimental desenvolvida para os trabalhos de Loureiro (2004), constituída de um anular formado por cilindros concêntricos, onde o cilindro interno simula a coluna da broca de perfuração que rotaciona, enquanto o cilindro externo representa a parede do poço e permanece estático. Para se conhecer o comportamento do torque da coluna do simulador, diversas condições de trabalho são testadas, como a variação do diâmetro de partícula, nível de partículas sedimentadas, velocidade de rotação de coluna e viscosidade do fluido de trabalho. Assim, é feita uma análise sobre a instabilidade e transição dos regimes de escoamento observadas nos processos experimentais.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os poços de petróleo, em princípio, eram perfurados percussivamente, martelando uma ferramenta a cabo na terra. Após desenvolvimentos na indústria petrolífera, um método mais rápido e eficaz foi implementado nesse ramo, a perfuração rotativa. Alcançando profundidades maiores em menos tempo. Durante estas perfurações obstáculos geográficos surgiam no caminho da broca o que exigia que o caminho da broca fosse desviado. Então tecnologias foram inventadas para realizar esses pequenos desvios, essas tecnologias se tornaram tão eficazes que poços inteiramente horizontal foram possibilitados. Esta tecnologia permitiu que empresas petrolíferas perfurem com o intuito de chegar a um alvo específico, que pode estar localizado a uma grande distância de uma plataforma offshore, em uma outra cidade ou outra área onde a perfuração vertical não alcançaria. Pode-se

também perfurar lateralmente, através de um leito de pedras cobertas de óleo ou gás para gerar maior extração do gás ou petróleo, devido a exposição de uma maior área de superfície produtora de óleo, conforme mostra a Figura 1 (Saad F, Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5429-perfuracao-direcional-de-pocos-de-petroleo/>>. Acesso em: 22 jun. 2016).

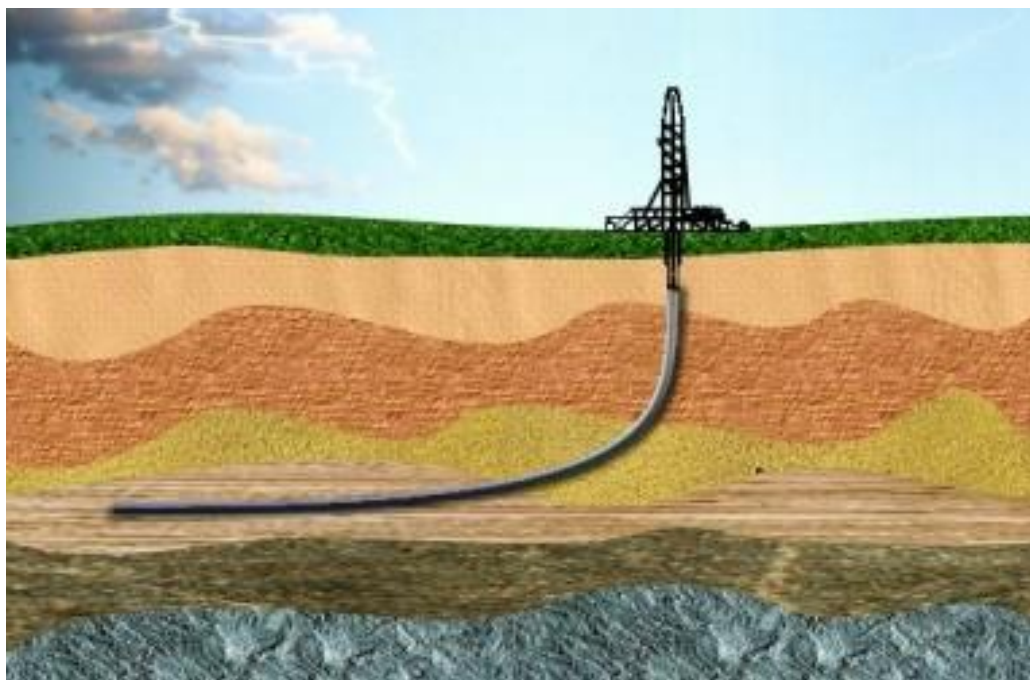


Figura 1. Esquema de uma perfuração horizontal (Fonte: Página Manutenção & Suprimentos Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5429-perfuracao-direcional-de-pocos-de-petroleo/>>. Acesso em: 22 jun. 2016).

Um grande desafio propiciado pela perfuração horizontal é o leito de cascalho que se forma na metade inferior do poço, devido a ação gravitacional as partículas retiradas podem se acumular causando aumento de torque e de atrito acima do dimensionado como pode ser visto na Figura 2. Em situações mais graves ou negligenciadas pode ocorrer até mesmo o aprisionamento da coluna de perfuração (Loureiro, 2004).

Muitos estudos tiveram como objetivo a construção de experimentos que fornecessem um modelo da situação real dessa sedimentação de cascalho e visavam um melhor entendimento da remoção desse cascalho acumulado. Uma

melhor compreensão da capacidade de carreamento do fluido de perfuração, exige que se compreenda o escoamento bifásico sólido-líquido existente na região anular entre a parede do poço e a coluna de perfuração (Loureiro, 2004). Um fenômeno importante que se observa nesse tipo de perfuração é a obstrução parcial do espaço anular entre a parede do poço e a coluna giratória, o que ocasiona uma descaracterização da simetria circunferencial do problema. O estudo da influência da rotação da coluna na limpeza de poços têm resultados contraditórios na literatura, mas estima-se, que de uma forma geral, tal efeito seja favorável ao carreamento (Loureiro, 2004 apud Iyoho, 1980; Phillip, 2000).

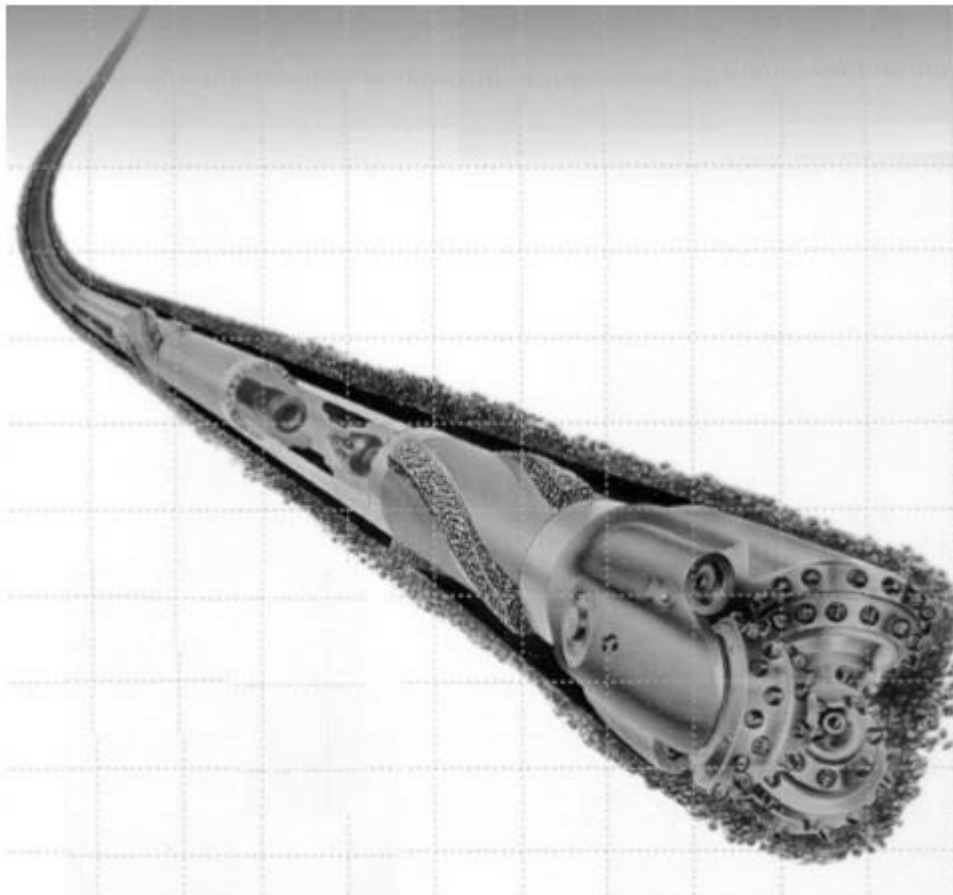


Figura 2. Perfuração horizontal (Loureiro 2004)

Devido à complexidade do problema estudado e a grande quantidade de parâmetros influentes no experimento, Loureiro (2004) propôs uma análise simplificada do problema real e sugeriu que a partir de seus estudos novas características físicas

fossem incorporadas gradualmente, aproximando cada vez mais o modelo estudado do problema real. Seguindo então uma de suas proposições um novo procedimento experimental, agora com leito móvel composto por partículas de vidro, vem sendo executado no Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte da UCL (Faculdade do Centro-Leste), com intuito de se observar a formação dos vórtices de Taylor mediante a variação da velocidade de rotação da coluna de perfuração. Este é o objeto de estudo desse trabalho. No qual diferentes variáveis serão estudadas e então suas influencias no aparecimento dos vórtices serão monitoradas.

A Figura 3 indica, de maneira esquemática, a configuração da seção transversal do simulador. Nessa figura, pode-se observar que o cilindro externo representa a parede do poço, enquanto o cilindro interno representa a coluna de perfuração. O comprimento dos cilindros é considerado suficientemente longo, de modo que os efeitos das extremidades não sejam relevantes no escoamento (Loureiro, 2004 apud Cole, 1976).

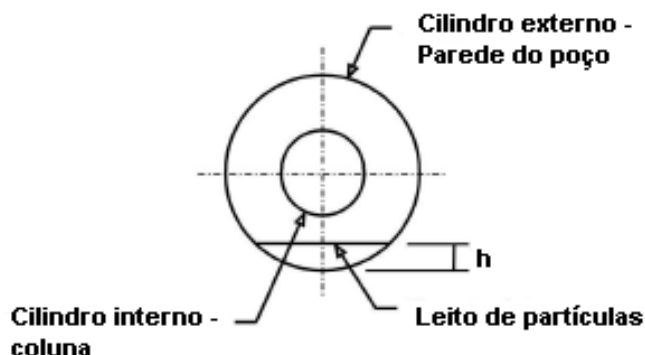


Figura 3. Figura esquemática da seção transversal do simulador (Loureiro, 2004)

1.2 OBJETIVO

Este projeto de graduação tem como objetivo o estudo do efeito da altura de leito de partículas na transição entre os regimes de escoamentos anulares Taylor-Couette entre dois cilindros concêntricos, onde o cilindro externo é fixo e o cilindro interno acelera angularmente. Variando-se a viscosidade do fluido por meio de diferentes

proporções de água e glicerina na solução, a altura de obstrução e o diâmetro das partículas que formam o leito, encontrou-se o número de Reynolds crítico para qual a transição acontece através do torque submetido a coluna giratória num dado intervalo de tempo. Uma análise posterior é feita sobre a influência desses parâmetros no carreamento das partículas.

O escoamento dentro de um cilindro horizontal anular devido a rotação de um cilindro concêntrico interno em poços de petróleo e gás dependem de algumas variáveis tais como: o fluido de perfuração utilizado, a geometria do poço, a rotação da coluna, a vazão axial imposta, a concentração e dimensão dos cascalhos (Loureiro, 2004).

Neste estudo será tomado apenas em consideração a formação dos vórtices de Taylor cuja a forma é mostrada na Figura 4 e que nos indicam quando um novo escoamento acontece. Sendo analisada a influência das diferentes granulometrias de partículas, diferentes alturas de leito e diferentes viscosidades. Este estudo também complementa os estudos apresentados por Loureiro (2004), que analisou numericamente o efeito da variação da altura de um leito fixo sobre o escoamento anular e conseqüentemente o torque da coluna de perfuração. 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 (Iyoho, 1980 e Phillip et al., 1997).

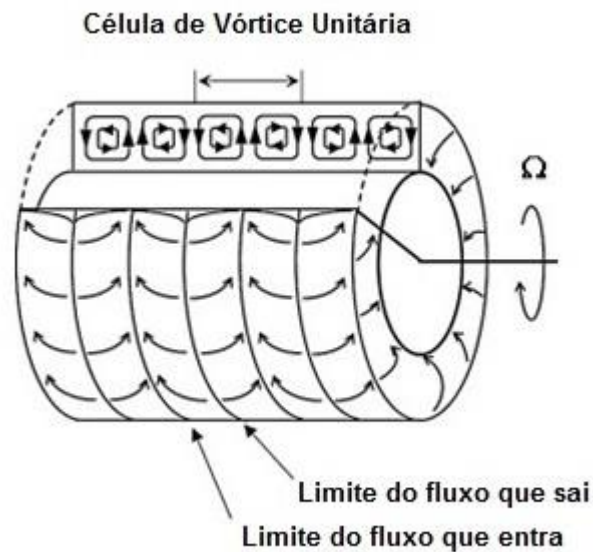


Figura 4. Estruturas toroidais dos vórtices de Taylor (adaptado Loureiro 2004)

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Apesar dos muitos estudos realizados com o intuito de caracterizar o comportamento do escoamento de fluidos entre cilindros concêntricos, é difícil correlacionar todas as variáveis que envolvem esse problema. Isso é devido a geometria e análises complexas que este problema propõe. Uma abordagem profunda de uma simplificação do problema tem se mostrado uma alternativa para seu estudo.

Os primeiros relatos que dizem respeito ao escoamento axial foi feito por Isaac Newton 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)

Newton concluiu também que:

“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 semi-diâmetros, 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)

Estudos referentes a escoamento anular formado entre cilindros concêntricos foram realizados inicialmente para medir a viscosidade da água. Couette (1890) realizou experiências onde o cilindro interno foi mantido fixo, enquanto o externo foi rodado. Foi constatado que com a rotação do cilindro externo e o arrasto sobre o cilindro interno foi crescendo de acordo com a velocidade de rotação, até uma velocidade limite. Após atingida essa velocidade, o arrasto não obedece mais tal proporcionalidade, devido a mudança do tipo de escoamento no espaço anular entre os cilindros. Mallock (1888) realizou experimentos com a mesma configuração, mas desta vez deixou o cilindro externo parado enquanto o interno girava e constatou erroneamente instabilidade para todas as velocidades de rotação. O problema de instabilidade em fluidos rotativos teve atenção atraída devido a sua importância metodológica e o simples critério da instabilidade inercial descoberto por Rayleigh (1916), que diz que um escoamento circulante invíscido é instável sempre que a vorticidade, ou o sentido de rotação local, é oposta ao sentido de rotação geral, ou a velocidade angular.

Taylor (1923) foi o pioneiro a correlacionar teoria com a parte experimental. Ele realizou experimento variando as configurações dos cilindros que giravam, ou seja, mantendo o cilindro externo ou interno em rotação enquanto o outro permanecia parado. Para o caso onde o cilindro externo rotaciona e o interno fica parado, ele constatou que até elevadas velocidades do cilindro externo o escoamento é estável. Para o caso onde o cilindro interno rotaciona e o interno fica parado, notou-se uma instabilidade do movimento quando a velocidade atingiu um valor crítico. Após essa

velocidade nota-se uma estrutura na forma de vórtice toroidais em que anéis fechados de vórtices alternantes são enrolados em torno do eixo de rotação, denominados vórtices de Taylor, fazendo com que o escoamento deixe de ser apenas estável. Estes resultados foram diferentes dos obtidos anteriormente por Mallock (1888) e Couette (1890), e segundo ele essa diferença se deu devido a alguns detalhes de fabricação nas bancadas experimentais de teste.

O segundo tipo de transição, chamado de transição catastrófica, é caracterizado pelo movimento quando o cilindro interno tem uma grande velocidade angular comparado com o cilindro externo. Para um determinado número de Reynolds fixo, o fluido é dividido em duas regiões de escoamento laminar e turbulento. Sobre algumas condições o escoamento turbulento pode aparecer ou desaparecer de maneira aleatória, sobre outras condições eles podem gerar padrões regulares (Coles, 1964).

Escoamento entre cilindros concêntricos com o cilindro interno girando e com o cilindro externo em repouso em um anular revela uma rica variedade de regimes de escoamentos. A ocorrência desses regimes de escoamento foi estudado experimentalmente por Andereck et al. (1986) e Lim et al. (1998) identificou um regime que aparece somente a baixas acelerações angulares, o aparecimento de cinco regimes de escoamento foi observado antes de o regime turbulento ser iniciado. 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");
- 5) Escoamento com vórtices modulados.

Andereck et al.(1986) ainda propôs em um gráfico os principais regimes observados experimentalmente entre cilindros concêntricos com todas as possibilidade de configuração de rotações possíveis. A aceleração do cilindro interno foi suficientemente lenta, conforme mostra a Figura 5, para não obter o escoamento proposto por Lim et al. (1998). A abscissa da Figura 5 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.

Nota-se ainda na Figura 5 que para o cilindro externo em repouso, onde $Re_0=0$, os quatro regimes antes do regime turbulento são constatados como citado anteriormente. 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 ainda não tenha sido explorada pelos autores uma ampla região. No caso de rotação dos dois cilindros com o mesmo sentido, percebe-se 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.

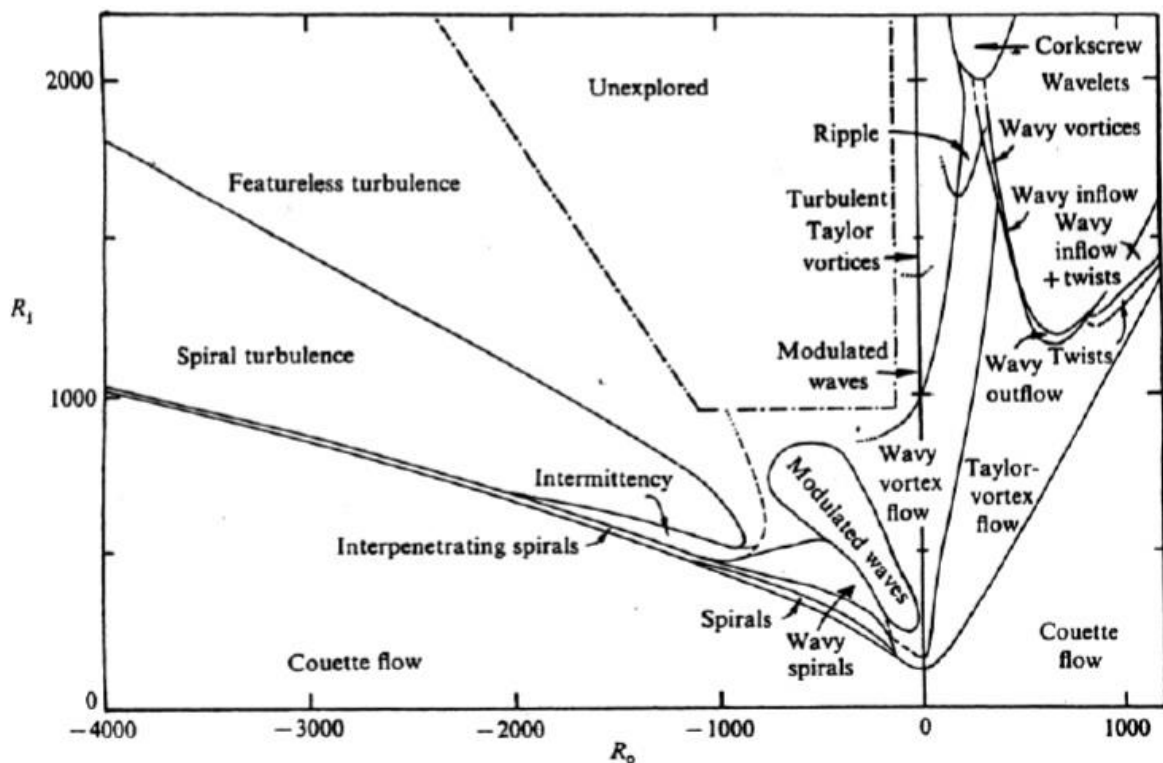


Figura 5. Regimes observados em um escoamento entre cilindros concêntricos com rotações independentes e razão de raios $\xi = 0,883$. Andereck et al. (1986).

A formação dos vórtices de Taylor está fortemente relacionada à razão de raios

($\xi = r_i/r_o$), onde r_i corresponde ao cilindro interno e r_o o cilindro externo, que neste estudo pode ser relacionado com a altura do leito de partículas e sua obstrução a simetria do escoamento que ele causa, foi estudada por DiPrima et al. (1984). Seus resultados mostram que a formação dos vórtices de Taylor, evidenciados pelos valores de Reynolds crítico encontrados, é antecipada com o aumento da razão de raios até $\xi = 0,450$. A partir dessa razão de raios, a transição entre os regimes é retardada a medida que a razão de raios cresce. Ainda sobre o leito de partículas formado, segundo (Martins, 1990) as variáveis mais frequentemente utilizadas para caracterizar o problema da formação de leito de cascalhos são a existência ou não de leito, a altura do mesmo e a concentração volumétrica destes detritos. Dois fenômenos atuam em poços horizontais: a sedimentação e a capacidade de remoção das partículas do leito formado. O modelo de duas camadas descreve o transporte de sólidos em poços desviados. A camada inferior formada a partir da gravidade é assumida fixa. A camada superior, é líquida e acompanha o movimento do cilindro interno. Não é considerado nenhum deslizamento nem transferência de massa entre as camadas e a altura entre elas é constante. Em poços ainda mais inclinados, horizontais ou quase horizontais concluiu-se que a rotação da coluna de perfuração propiciou a ressuspensão de sólidos depositados no leito de cascalhos. Loureiro, Siqueira e Fontenelle (2006) construíram um simulador de erosão afim de estudar este mesmo efeito, mas também a taxa de compactação do leito de partículas e a influência da altura do leito no desempenho desse processo de erosão.

Como foi mencionado anteriormente, uma das aplicações importantes do estudo do escoamento em espaços anulares é o escoamento de lamas de perfuração nos processos de perfuração de poços produtores de petróleo. De acordo com Lockett et al. (1993) as lamas são em sua maioria suspensões coloidais e possuem um comportamento não Newtoniano. Isto é, sua viscosidade deve variar com a taxa de deformação de forma que a mesma seja alta a baixas taxas de deformação para garantir um bom carregamento de cascalhos e baixa a altas taxas de deformação para diminuir a perda de carga do sistema e consequentemente a potência de bombeamento (Matutti, 2002).

Experimentalmente houve um grande desenvolvimento com o uso da imagem de partículas e do LDV (Velocimetria por imagens de partículas e anemometria por efeito Doppler), que possibilitou medir o campo de velocidades do fluido com grande precisão. Já o desenvolvimento no campo teórico, foi devido a implementação de métodos numéricos e elementos finitos bem como a própria melhoria dos computadores que possibilitaram cálculos mais complexos e preciso em tempos reduzidos. Esta evolução permitiu que Matutti (2002) fizesse um estudo numérico da instabilidade Taylor-Couette para mesmas configurações que adotamos em nosso trabalho. Porém, comparando fluido newtonianos e fluido não-newtoniano. Esta comparação diz, que para grandes espaços anulares $\xi < 0.8$, a influência dos parâmetros reológicos sobre o número de Reynolds crítico é quase imperceptível, isto porque as taxas de cisalhamento nestes caso são muito baixas. Para pequenos espaços anulares $\xi \rightarrow 1$, pode-se usar, para cálculos estimados, o número de Reynolds crítico para fluidos Newtonianos.

A complexidade do escoamento anular tridimensional, como ocorre em situações reais de perfuração, foi explorada por Lueptown, Docter e Min (1992). Que superpuseram o escoamento circular de Couette e o gradiente de pressão axial imposto em um anular, que resulta na situação onde dois mecanismos de instabilidades estão presentes. As linhas de corrente do escoamento circular de Couette podem resultar em uma instabilidade centrífuga, e o escoamento axial pode resultar em um instabilidade de cisalhamento.

Devido a aplicação prática destes estudos no campo de perfuração de poços horizontais e o aumento da demanda por esse tipo de exploração é provável que tenhamos um aumento significativo de pessoas interessadas e novos estudos nesta área.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Embasamento científico acurado é necessário para tornar razoável os resultados dos nossos experimentos. Para tal usaremos neste trabalho um modelamento matemático proveniente da mecânica dos fluidos.

Considerando o fluido presente entre dois cilindros concêntricos, de comprimento infinito, como incompressível e isotérmico em um escoamento laminar, o torque T como uma função da taxa de rotação ω do cilindro interno é dada pela equação (1).

$$T = 4\pi\mu\omega L \frac{R_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \quad (1)$$

Nesta fórmula, μ é a viscosidade dinâmica do fluido; R_i e R_o são os raios dos cilindros interno e externo, respectivamente; e L representa o comprimento do cilindro externo.

No Apêndice A encontra-se o detalhamento de como foi encontrado esse torque dimensional.

Seguindo a metodologia de Loureiro (2004), para a manipulação dos dados de forma que os resultados experimentais sirvam para representar uma situação real, deve-se fazer um processo de adimensionalização dos parâmetros. Analisando as equações que governam o nosso experimento podemos chegar à conclusão de que os parâmetros relevantes a serem adimensionalizados são:

T - Torque;

L - Comprimento do cilindro;

v_t - Velocidade tangencial do cilindro interno;

μ - Viscosidade do fluido;

ρ - Massa específica do fluido;

h - Altura de leito de partículas;

d_p - Diâmetro médio das partículas; e

G - Folga entre os cilindros interno e externo.

Com a finalidade de se obter um torque adimensional para interpretação dos dados coletados, os parâmetros acima podem ser correlacionados e podem ser representados pela equação funcional simbólica (2).

$$T = F(\mu, \rho, v_t, h, L, d_p, G)$$

(2)

Usando o teorema dos Pi's de Buckingham, encontrado no livro do Fox (1995), seguiremos o passo à passo para a adimensionalização do torque do nosso experimento, que pode ser consultado no Apêndice B. A caracterização física do problema pode ser expressa pela relação funcional (3).

$$\frac{T}{G^3 \rho v_t^2} = \left(\frac{\mu}{\rho v_t G}, \frac{L}{G}, \frac{h}{G}, \frac{d_p}{G} \right)$$

(3)

O lado esquerdo da equação (3) caracteriza o torque adimensional, enquanto o lado direito nos mostra as relações entre as forças de inércia e viscosas, bem como a geometria, e o efeito da altura do leito e do diâmetro das partículas que o compõe.

Vale ressaltar que o primeiro parâmetro do lado direito da equação acima representa o inverso do número de Reynolds (Re). Esse parâmetro será amplamente utilizado na interpretação dos resultado dos nossos experimentos, onde analisaremos o número de Reynolds crítico (Re_C) que representa a transição do escoamento laminar para o turbulento, caracterizando o aparecimento dos vórtices de Taylor.

3. METODOLOGIA

3.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL

A bancada experimental utilizada é apresentada por meio da foto da Figura 6. Nessa figura, observa-se que o cilindro externo representa a parede do poço, enquanto o cilindro interno representa a coluna giratória de escavação e as partículas do leito de cascalhos. Solução glicerina-água foi o fluido newtoniano utilizado.



Figura 6. Bancada experimental

A montagem experimental está apresentada na Figura 6. O fluido de trabalho é armazenado entre um anular formado por um cilindro externo de acrílico (a), com 216 mm de diâmetro e comprimento de 2000 mm, e um cilindro interno inteiriço de alumínio (b), com 140 mm de diâmetro e pontas de eixo soldadas nas extremidades, de modo a não permitir a infiltração de fluido no interior do mesmo. A temperatura do fluido presente no espaço anular é obtida a partir de uma média entre dois termopares tipo T (c).

O cilindro externo tem três aberturas (d) de 100x500 mm na parte superior para acesso ao espaço anular e três conjuntos de válvulas (e) que estão localizados na parte inferior do cilindro para a lavagem e remoção adequada de particulados e fluidos utilizados em experimentos.

As pontas de eixo do cilindro interno são apoiadas por mancais do tipo rolamento esférico (f) protegidos contra vazamento por meio de selos mecânicos resistentes a abrasão (g). Acoplado ao eixo do cilindro interno está um torquímetro S.Himmelstein,

modelo MCRT DC 7904V (h) e, em seguida, um conjunto de polias sincronizadoras (i) com redução de 4,5 :1 da rotação do motor (j). A rotação do motor é governada por um inversor de frequência trifásico WEG CFW-11 (k) via um sistema supervisório desenvolvido em LabView instalado em um computador dedicado (l).

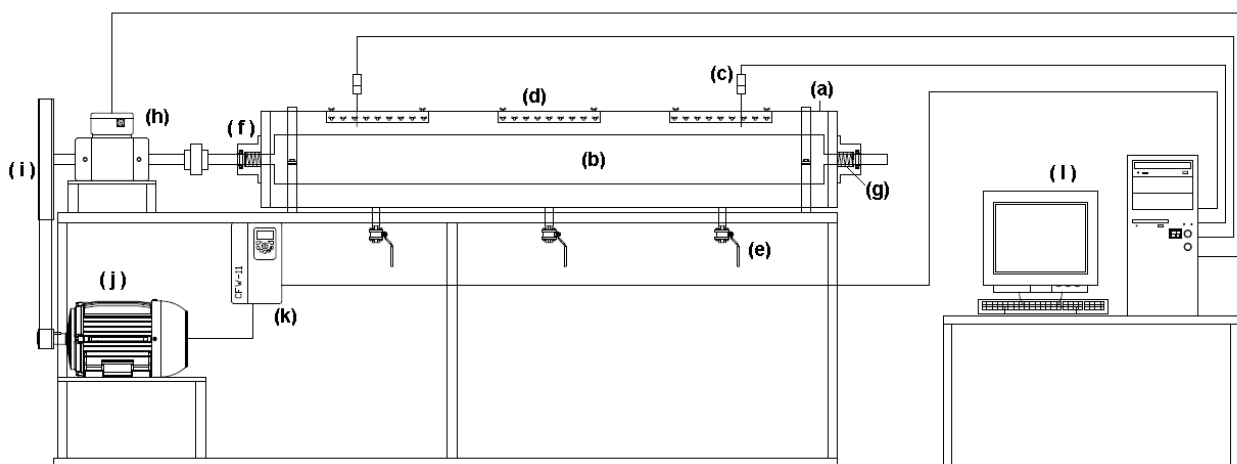


Figura 7. Montagem Experimental

3.2 VALIDAÇÃO DO TESTE

Para começar os experimentos, deve-se primeiro, determinar o valor da viscosidade do fluido de trabalho. Para isso testes de viscosidade em um viscosímetro cinemático do tipo Canon-Fenske em um banho TV4000 da PM TAMSON INSTRUMENTS com rastreabilidade ao sistema internacional (vide figura 8 e figura 9).



Figura 8. Viscosímetro capilar tipo Canon-Fenske (Fonte Catálogo Direct Industry Disponível em: < http://www.directindustry.com/cat/metrology-test-equipment/viscometers-rheometers-AK-535-_3.html >. Acesso em: 30 jun. 2016).



Figura 9. Validação dos teste, verificação da viscosidade

Uma vez que o equilíbrio térmico é atingido, a solução é administrada dentro do viscosímetro pelo capilar de maior diâmetro (da esquerda). Succiona-se o fluido dentro do capilar para cima pelo capilar de duas câmaras com o auxílio de uma bomba a vácuo até uma marca acima da câmara superior. Então retira-se a bomba e o fluido começa a descer pela câmara superior em direção à câmara inferior através do capilar, e o tempo de escoamento, ou seja, o tempo que demora a percorrer o comprimento do capilar de uma marca a outra é medido. Um fator de conversão

fornecido pelo fabricante é usado, possibilitando o cálculo da viscosidade cinemática de acordo com o tempo medido. Este procedimento deve ser repetido três vezes para garantir a validação dos resultados. Após a determinação da viscosidade do fluido, o mesmo é levado até a bancada experimental.

3.3 PARTÍCULAS UTILIZADAS

Foram utilizadas partículas esféricas de vidro mostradas na Figura 10 com as faixas de diâmetros mostradas na tabela 1. Optou-se por utilizar partículas esféricas de vidro, uma vez que a massa específica desse material se aproxima da massa específica dos cascalhos obtidos no processo de perfuração.

Tabela 1. Diâmetro das partículas utilizadas

Partícula	Diâmetro (mm)
1	1,0 – 1,4
2	2,4 – 3,5
3	4,0 – 4,8



Figura 10. Amostras de partículas utilizadas

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de se dar início aos testes, preenche-se o espaço anular com o fluido de teste e impõe-se uma rotação no cilindro interno para lubrificação dos selos mecânicos.

Logo após, esvazia-se o anular e, para evitar um desbalanceamento, é realizada uma limpeza do cilindro interno. O cilindro interno é submetido às rotações de teste durante 30 segundos para cada velocidade de rotação. O torque médio é registrado durante cada velocidade de rotação para o anular somente preenchido com o fluido.

Após o registro do torque "em vazio", as partículas são dispostas no espaço anular para formação de leito, onde o mesmo é cuidadosamente nivelado.

O motor é acionado impondo diferentes rotações para o escoamento a partir de uma função degrau, sendo que para cada rotação os dados de torque e rotação obtidos pelo torquímetro são adquiridos pelo supervisor e armazenados no banco de dados.

A rotação inicial utilizada para todos os testes foi de 20 rpm, com passo de 10 rpm, sendo mantida uma velocidade constante em cada patamar de rotação durante 30 segundos. A velocidade de rotação final do experimento foi ajustada em todos os testes para 190 rpm.

Uma média do torque armazenado durante o período de tempo de cada velocidade de rotação é calculada e subtraída do torque médio obtido, em sua respectiva velocidade de rotação, para o espaço anular em vazio.

Ao início e final de cada teste, uma amostra do fluido é retirada e sua temperatura é medida com auxílio de termômetro, são feitos novos testes de viscosidade no viscosímetro para validação do experimento. Como não há mudanças significativas de temperatura (da ordem de $0,5^{\circ}\text{C}$) por se tratar de um experimento de apenas nove minutos de duração a temperatura é considerada constante. Esta temperatura é obtida controlando-se o ambiente externo por meio de condicionadores de ar e então aguardando o equilíbrio térmico com a bancada experimental. Visando obter um tempo de equilíbrio térmico mais rápido possível, a temperatura de 27°C foi adotada por se tratar de uma temperatura próxima às temperaturas ambiente do local do experimento.

O simulador é preenchido com partículas até determinada altura, além das partículas, o simulador é preenchido com fluido. Por se tratar de um fluido newtoniano, o que garante uma análise mais simplificada, é utilizado nos experimentos uma solução de glicerina e água. O fato de ser uma solução, permite que sua proporção de glicerina e água seja trabalhada a fim de se obter a viscosidade desejada, sendo necessário em um segundo momento a determinação da massa específica. A tabela 2 abaixo, mostra a relação da razão de obstrução (h/R) onde h é a altura de obstrução do espaço anular e R é o raio externo do espaço anular e mede 108 mm e a tabela 3 nos indica as viscosidades dos fluidos utilizados. Utilizou-se como menor viscosidade 90cP, pois acreditava-se que esta seria a menor viscosidade onde o vórtices de Taylor apareceriam.

Tabela 2. Relação de Altura adimensional

Altura do leito	Razão de obstrução
1	35,18%
2	56,78%
3	78,40%
4	89,20%

Tabela 3. Viscosidade do fluido utilizado

Fluido	Viscosidade (cP)
0	90
1	173
2	256

As informações obtidas durante o processamento foram transmitidas para uma planilha eletrônica e avaliadas por meio de gráficos, conforme será abordado na seção seguinte.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma série de testes experimentais foram realizados para no máximo quatro diferentes alturas de leito de partículas, dependendo do aparecimento ou não dos vórtices de Taylor. As alturas especificadas foram: 38mm (leito sedimentado encosta no limite inferior do cilindro interno); 61,33mm; 84,67mm e 96,33mm. Além de ser testado 3 vezes somente o fluido sem partículas para cada fluido, as séries de testes foram realizadas nas 3 classes de diâmetro de partículas para cada fluido, e para cada altura o teste foi replicado 3 vezes.

A Figura 11 apresenta os resultados experimentais para o torque dimensional em função da rotação do cilindro interno considerando o espaço anular livre de partículas, comprovando a capacidade de replicação do experimento.

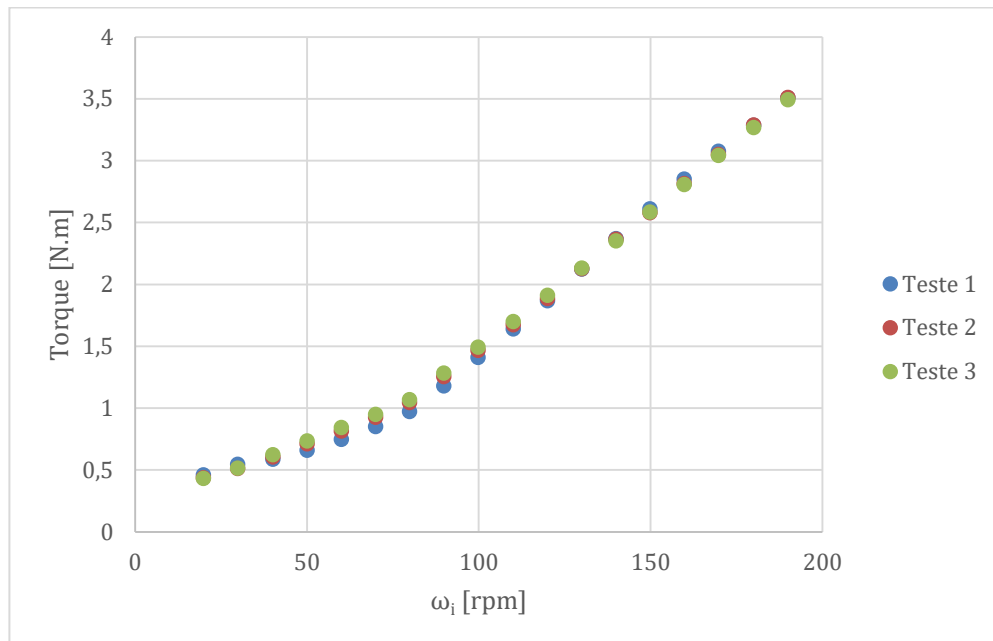


Figura 11. Resultados experimentais obtidos ao utilizar glicerina sem leito de partículas. Experimento: Anular preenchido somente com fluido 2 (256 cP).

A Figura 12 apresenta os resultados adimensionais de torque em função do Reynolds para os resultados experimentais sem a presença de leito de partículas nas três diferentes viscosidades de fluido utilizadas nos experimentos. Identifica-se nesta figura o início da instabilidade de Taylor-Couette (vórtices de Taylor) em Reynolds, aproximadamente igual a 70 nos fluidos de média (173 cP) e maior (256 cP) viscosidade, no entanto, para o fluido de menor viscosidade (90 cP) não há diferença de derivadas abrupta em sua curva, o que indica o não aparecimento dos

vórtices de Taylor. Como esta configuração de altura zero (sem leito de partículas) é a situação mais propícia ao aparecimento dos vórtices de Taylor, é possível concluir que para as demais alturas também não haverá vórtices. Portanto tal viscosidade já poderia ser descartada. No entanto, os subsequentes testes foram realizados para efeito de comprovação do comportamento esperado. Pode-se assim considerar que os resultados numéricos obtidos apresentam concordância com os resultados experimentais, garantindo a validação do experimento.

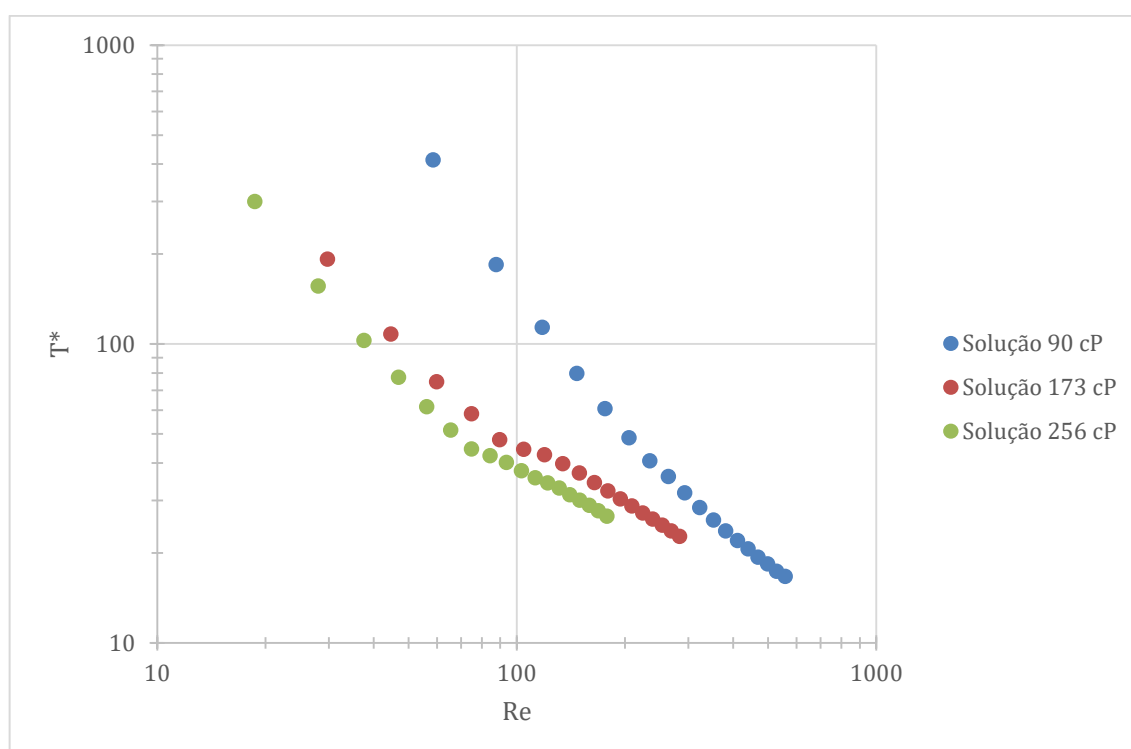


Figura 12. Torque adimensional em função do número de Reynolds para as diferentes soluções utilizadas nos experimentos sem leito de partículas.

A figura 13 ilustra o aparecimento dos vórtices de Taylor com presença do leito de partículas. Pode-se verificar que a curva apresenta uma diferença de derivadas acentuada mostrando assim o aparecimento dos vórtices de Taylor quando o número de Reynolds ultrapassa 100, mostrando a influência do leito de partículas sobre o Reynolds crítico necessário para o aparecimento dos vórtices.

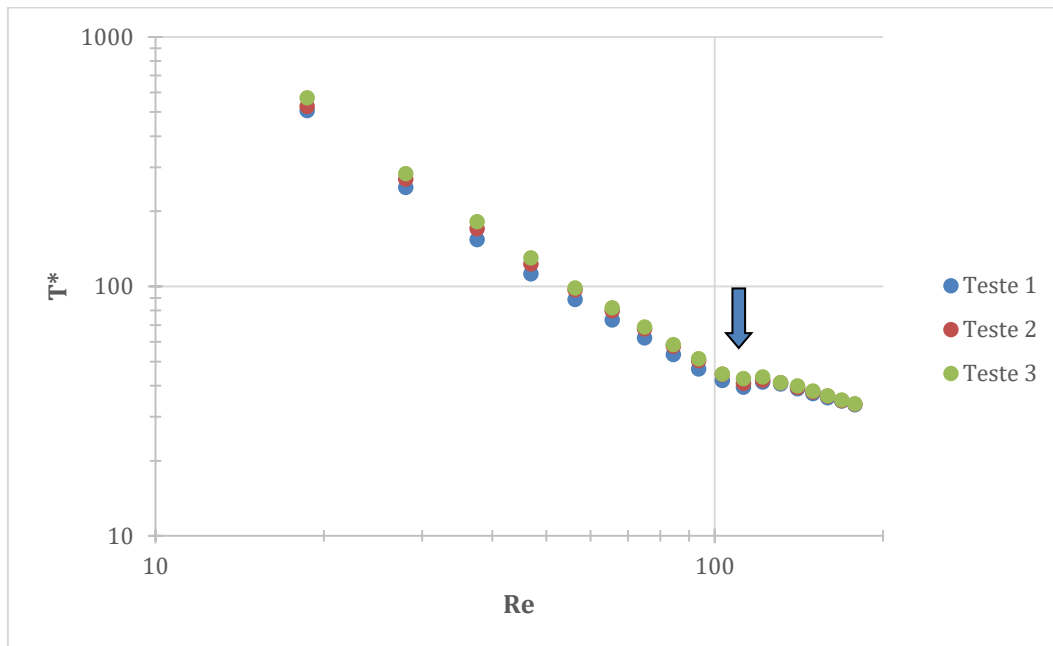


Figura 13. Torque adimensional em função do número de Reynolds.

Experimento: Fluido 2 (Solução 256 cP), Altura 1 (38mm), Partícula da faixa 1 (1-1,4mm).

As figuras 14 e 15 abaixo mostram resumidamente os resultados dos experimentos, onde estão plotados os números de Reynolds críticos, para os quais os vórtices de Taylor aparecem no escoamento, em função da relação da altura adimensional do leito de partículas, apenas para os dois fluidos com diferentes viscosidades (173 e 256 cP) que mostraram resultados relevantes (não é notado o aparecimento dos vórtices no fluido composto com a solução de 90 cP), variando-se os tipos de partículas e altura de leito das mesmas.

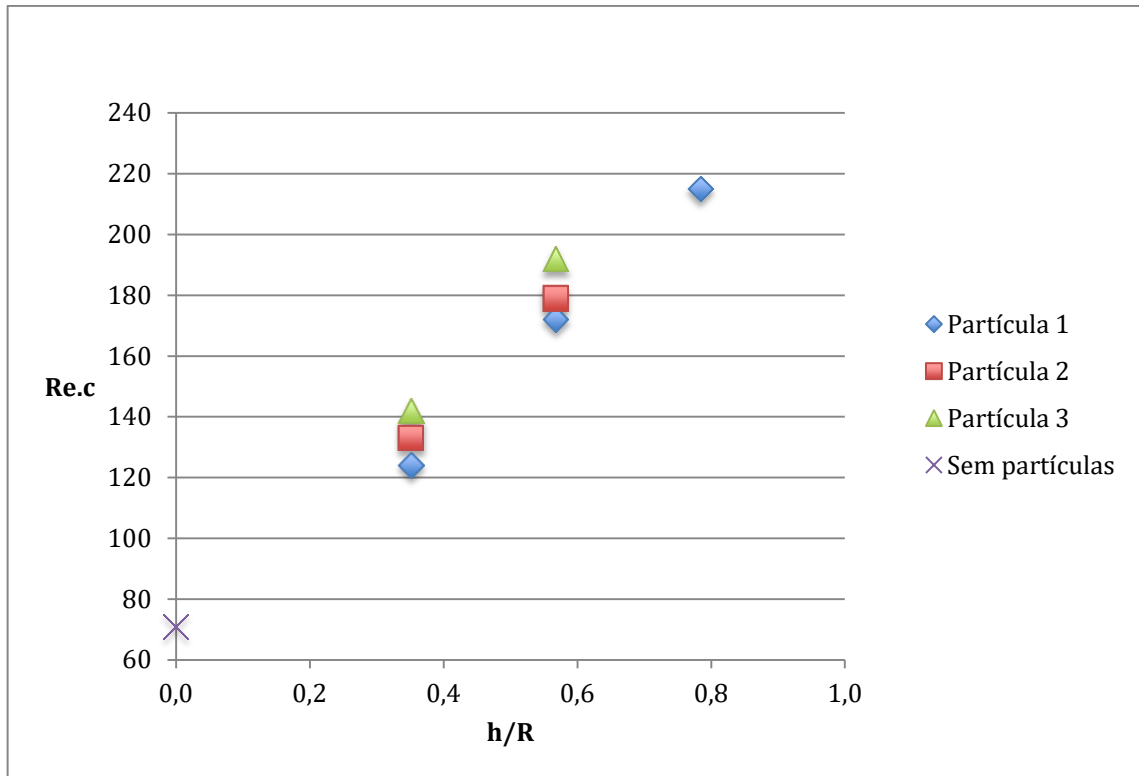


Figura 14. Reynolds crítico em função da relação de altura adimensional para o fluido 1 (173 cP).

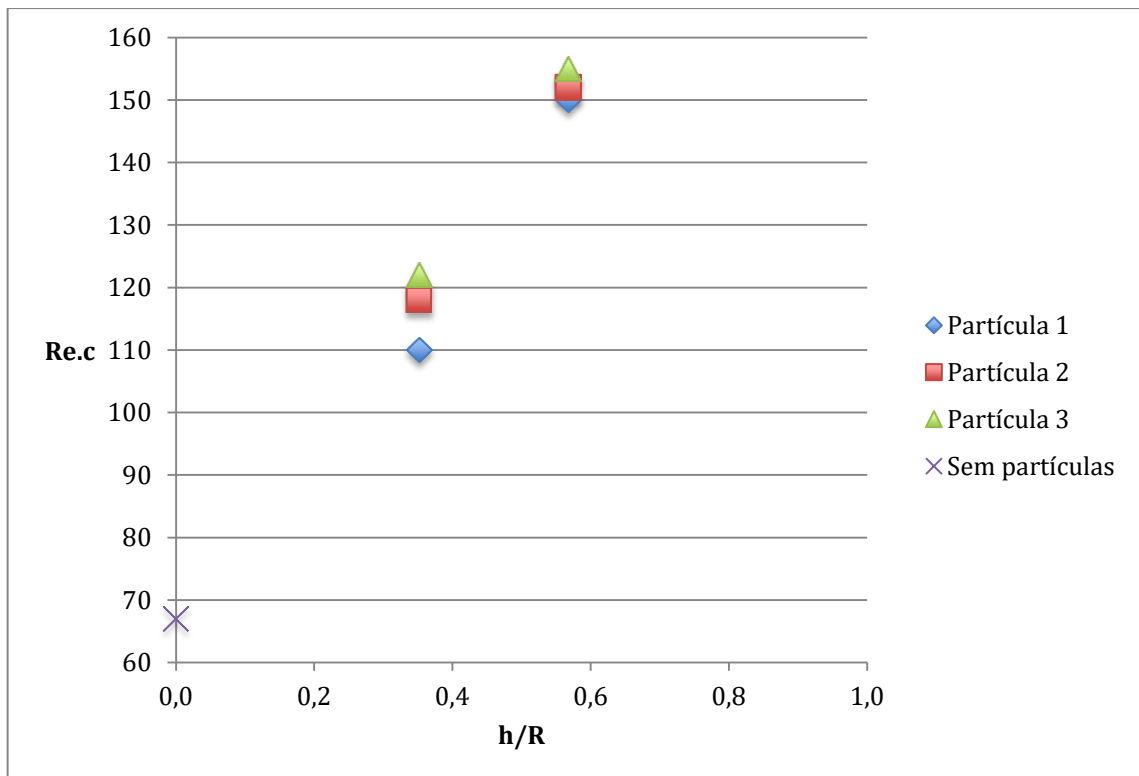


Figura 15. Reynolds crítico em função da relação de altura adimensional para o fluido 2 (256 cP).

Nota-se que com o aumento do diâmetro das partículas há também um aumento do número de Reynolds crítico comparando-se um mesmo teste para relação de altura adimensional igual. Uma comparação desses aumentos percentuais pode ser encontrado nas tabelas 4 e 5. Além do teste sem partículas, ou na altura zero, foram também testadas quatro alturas de leito, mas o aparecimento dos vórtices de Taylor ficaram evidentes até a altura de $0,784R$ para as partículas na faixa de diâmetro entre 1mm e 1,4mm, e até a altura $0,567R$ para as partículas na faixas de diâmetros entre 2,4mm e 3,5mm e também 4,0mm e 4,8mm.

Para o fluido 2, de maior viscosidade, nota-se que o número de Reynolds crítico não variou significativamente com o aumento da viscosidade para altura de leito zero o que corrobora com os estudos anteriores de Loureiro (2004) já que o Reynolds crítico é um parâmetro adimensional e não varia com as condições do problema. Fica evidente também, que esse número aumenta com o aumento do diâmetro das partículas. Isso se dá pelo fato das partículas demandarem um maior torque ao passo que os diâmetros das mesmas aumentam.

Tabela 4. Aumento percentual do Reynolds de transição em relação aos respectivos aumentos de altura do leito para o Fluido 1.

$(H_{\text{inicial}} - H_{\text{final}})$	Partícula1	Partícula 2	Partícula 3
H1 - H2	38,71%	34,58%	35,21%
H3 - H2	25,00%	---	---

Tabela 5. Aumento percentual do Reynolds de transição em relação aos respectivos aumentos de altura do leito para o Fluido 2.

$(H_{\text{inicial}} - H_{\text{final}})$	Partícula1	Partícula 2	Partícula 3
H1 - H2	36,36%	28,81%	27,05%
H3 - H2	---	---	---

É ainda relevante ressaltar que comparando-se as viscosidades dos fluidos de cada teste, para o fluido 1 (173 cP), de média viscosidade, houve uma redução desse

número Reynolds crítico com relação ao fluido 2 (256cP), de maior viscosidade. Tal comportamento pode ser evidenciado pelo fato de que a velocidade aumenta linearmente na direção radial, e assim teremos nas regiões periféricas uma maior velocidade. O que consequentemente possibilita um carregamento maior de partículas. Isso faz com que o escoamento demande mais torque, pois um número maior de partículas estarão em movimento. Este incremento no carregamento proporciona também um maior espaço entre o cilindro interno e o leito de partículas, por consequência, os valores dos números de Reynolds crítico serão menores visto que um maior espaço livre estará disponível para a rotação do fluido.

Isto está de acordo com um estudo feito por DiPrima et al. (1984) que estudou o efeito da razão de raios na estabilidade de Couette 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 16.

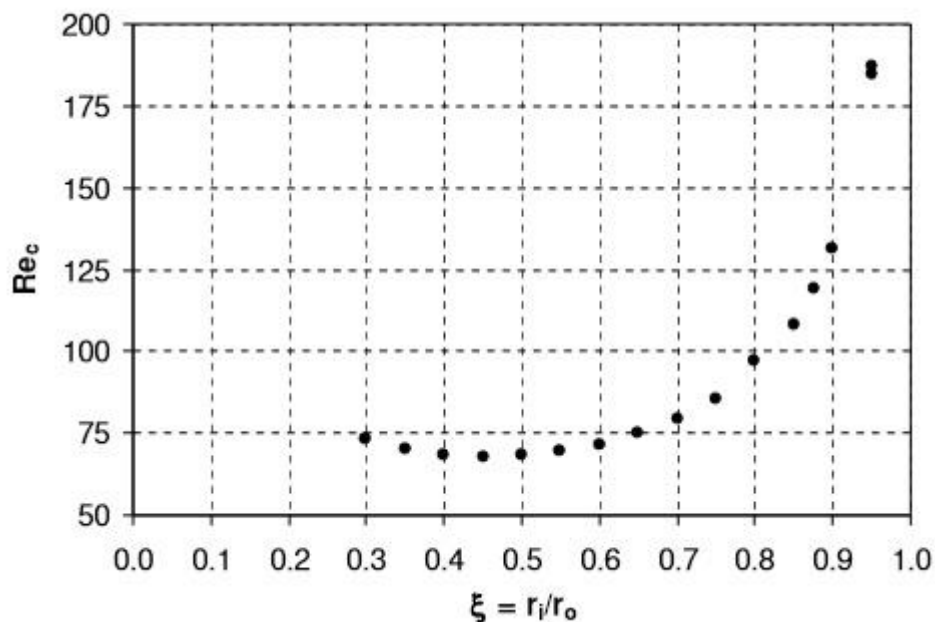


Figura 16. Valores críticos de Reynolds rotacional em função da razão de raios. DiPrima et al., (1984)

Quanto as diferentes alturas de leito podemos observar que um maior volume de

partículas no espaço anular representa uma restrição da simetria radial do escoamento. Para as alturas 1 e 2, e na altura 3 exclusivamente para o teste do fluido 1 com partículas de diâmetro 1, o carregamento de partículas foi suficiente para permitir a manutenção dessa simetria radial de escoamento e sua consequente formação dos vórtices de Taylor. Todavia, para os demais casos (alturas 3 e 4), a adição de partículas provocou uma quebra nessa simetria radial do escoamento na qual as partículas permaneciam faceadas a superfície do cilindro interno. O que impossibilitou a formação dos vórtices de Taylor.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Este projeto de graduação mostrou a influência da obstrução de um leito de partículas, simulando cascalho numa perfuração horizontal de poço de petróleo, sobre o escoamento dentro de um espaço anular.

O escoamento investigado foi governado a partir das equações do princípio de conservação de massa e de Navier-Stokes. A velocidade de rotação do cilindro interno do anular foi regulada aumentando-se gradativamente e a partir de um valor de Reynolds crítico, dependente da razão de raios dos cilindros que compões o anular, o escoamento de Couette apresentou instabilidades em forma de vórtices, passado a ser chamada de regime com vórtices de Taylor.

Os resultados obtidos permitem concluir que há uma influência considerável da altura de leito de partículas que preenchem o anular. A restrição do espaço anular de escoamento desfaz a simetria circunferencial do problema, e faz com que maiores velocidades de rotação e consequentemente maiores números de Reynolds crítico sejam necessários para o aparecimento dos vórtices de Taylor a medida que vai se aumentando a altura do leito de partículas de obstrução do escoamento. O diâmetro de partículas exerceu essa mesma influência sobre os vórtices de Taylor. Notou-se que quanto maior o diâmetro das partículas, maior também foi o número de Reynolds crítico necessário para o aparecimento dos vórtices, atrasando o

surgimento dos mesmos. Isto indica que houve um menor carreamento de partículas na região anular devido ao seu maior peso. Já para as diferentes viscosidades testadas observou-se o fenômeno inverso. Um aumento na viscosidade cinemática do fluido ajuda no carreamento de partícula, diminuindo assim, a velocidade de rotação do cilindro interno e o torque necessário para o aparecimento dos vórtices. Para alturas de leito elevadas, ou grandes quantidades de partículas obstruindo o espaço anular do escoamento, a quebra de simetria radial do escoamento impediu que os Vórtices de Taylor não aparecessem.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diversas aproximações do experimento tiveram grande simplificação em relação a complexidade real. Nos quais modelamentos mais complexos apresentariam resultados melhores e mais próximos dos obtidos em situações reais. Dentre elas podemos citar o fluido de perfuração usado, no nosso caso foi usado uma solução glicerina-água. Fluidos reais usados em perfurações de poços poderiam ter sido usados. Todavia, se tratam de fluidos não-newtonianos e suas propriedades são mais difíceis de serem caracterizadas. O que torna também seus estudos mais complexos. Pode-se também usar cascalho real, possivelmente até mesmo extraídos de perfurações de poços. No nosso estudo foi usado partículas de vidro pois estas apresentavam densidade similar ao cascalho real.

Em nosso estudo foi considerado somente o escoamento radial de fluido de perfuração. Entretanto, numa aplicação real temos um escoamento bidimensional com a fundamental função do escoamento axial, responsável por retirar os cascalhos do fundo do poço. Importantes resultados e conclusão poderão ser obtidos caso um novo estudo considerando esse escoamento bidimensional fosse feito.

6. REFERÊNCIAS

ANDERECK, C. D., LIU, S. S. & SWINNEY, H. L., Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 164, pp. 155-183, 1986.

COLES, D. Transition in Circular Couette flow. Harvard University, Cambridge, Massachusetts. 1964.

CORONADO-MATUTTI, O. Instabilidade de Taylor-Couette em escoamentos de fluidos viscoplásticos. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2002.

DIPRIMA, R. C., EAGLES, P. M. & NG, B. S., The effect of radius ratio on the stability of Couette flow and Taylor Vortex flow. *Physics Fluids*, vol. 27, n. 10, pp. 2403-2411, 1984.

DONNELLY, R. J. Taylor-Couette flow: the early days. *Physics Today*, November, pp. 32-39, 1991.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos, Guanabara Koogan, 4 ed. Rio de Janeiro, 1995. Tradução: Alexandre Matos de Souza Melo. *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons.

IYOHO, A. W. Drilled cuttings transport by non-Newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli. Tese de doutorado, University of Tulsa, Ok, 1980.

LIM, T.T., Chew, Y.T. & XIAO, Q., A new flow regime in a Taylor-Couette Flow, *Physics of Fluids*, v. 10, n. 12, 1998.

LOCKETT, T. J., RICHARDSON, S. M., WORRAKER, W. J. The importance of rotation effects for efficient cuttings removal during drilling, SPE/IADC 25768, p. 861-869, 1993.

LOUREIRO, B. V. Escoamento Secundário em um anular parcialmente obstruído com rotação do cilindro interno. Tese de doutorado: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

LOUREIRO, B. V., SIQUEIRA, R. N., FONTENELLE, F.C.N. Efeito da Rotação Coluna de Perfuração de Cascalhos Sedimentados em Poços Horizontais. ENAHPE, 2006.

LUEPTOW, R. M., DOCTER, A., MIN, K. Stability of axial flow in an annulus with a rotating inner cylinder. Physics of Fluids A, vol. 4, n. 11, 1992.

MARTINS, A. L. Modelagem e Simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 1990.

PHILLIP, Z; V SHARMA, M.M; CEHENEVERT, M.E.; "The role of Taylor Vortices in the transport of drill cuttings". SPE 39504, pp. 77-83, 1997.

TAYLOR, G.I. Stability of a Viscous Liquid contained between Two Rotating Cylinders Phil. Trans. Royal Society, 1923.

TAYLOR, G. I. Fluid friction between rotating Cylinders. I. Torque measurements. Proc. Soc. Lond., p. 546-564, 1936.

APÊNDICE A - TORQUE DIMENSIONAL

Para descrever os fenômenos decorrentes do escoamento utiliza-se a equação da continuidade (4). O escoamento do nosso experimento pode ser considerado permanente devido não haver nenhuma variação do fluido de trabalho, em nenhum ponto do fluido com o tempo, ou seja, nem a velocidade nem a pressão não variam com o tempo. Além disso o fluido pode ser considerado incompressível, pois a massa específica é a mesma no início e no fim do experimento. Portanto, pode ser representada da seguinte forma:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

Ou de outra forma, para melhor interpretação do nosso problema a equação da quantidade de movimento pode ser apresentada na forma de coordenadas cilíndricas, assim temos que:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ruv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Sabendo que o escoamento possui um eixo de simetria, podemos dizer que:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

Podemos assumir também para nosso experimento as hipóteses de que o escoamento é laminar num regime estacionário no espaço anular entre os cilindros, sendo as componentes axiais e radiais iguais a zero, com isso temos que:

$$v_z = 0 \quad (7)$$

e

$$v_r = 0 \quad (8)$$

Para descrever as forças que agem em um fluido durante o escoamento utilizaremos a equação de Navier-Stokes (9). Considerando o nosso experimento composto por processo adiabático e fluido newtoniano incompressível temos a seguinte simplificação:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \mu [\nabla^2 \cdot \vec{V}] \quad (9)$$

Sendo para o fluido:

V - velocidade;

ρ - massa específica;

P - pressão;

g - gravidade; e

μ - viscosidade dinâmica.

Em coordenadas cilíndricas, temos as componentes na direção radial, axial e angular dadas abaixo com as suas respectivas simplificações para o problema.

Na direção radial (r) temos:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \right] + \rho g_r \quad (10)$$

Simplificando com as equações achadas anteriormente, obtemos:

$$\frac{u_q^2}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (11)$$

Na direção angular (q) temos:

$$\rho \left(\frac{\partial v_q}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_q}{\partial r} + \frac{v_q}{r} \frac{\partial v_q}{\partial q} - \frac{v_q v_r}{r} + v_z \frac{\partial v_q}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial q} + \mu \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_q) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_q}{\partial q^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial q} + \frac{\partial^2 v_q}{\partial z^2} \right) \right] + r g_q$$

(12)

Fazendo as simplificações:

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_q \right) \frac{\partial}{\partial z} \quad (13)$$

Na direção axial (z):

$$r \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_q}{r} \frac{\partial v_z}{\partial q} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial q^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_q}{\partial q} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + g_z \quad (14)$$

Simplificando:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

Para o nosso estudo, faremos a modelagem para o cilindro interno girando enquanto o cilindro externo permanece parado, com isso o torque da coluna de perfuração irá depender do tipo de fluido, da geometria do poço e da velocidade de rotação da coluna.

O campo de velocidade do escoamento é puramente tangencial, com valores nulos para componentes de velocidade longitudinal e radial, caracterizando um fluxo estável conhecido como fluxo de Couette. Com essas hipóteses, integramos duas vezes os componentes de velocidade na direção angular e achamos que:

$$v_q = C_1 \frac{r}{2} + \frac{C_2}{r} \quad (16)$$

Usando as seguintes condições de contorno:

$$v_q(r = R_0) = 0; v_q(r = R_1) = \omega R \quad (17)$$

E substituindo as condições de contorno (17) em (16), obtemos:

$$0 = C_1 \frac{R_0}{2} + \frac{C_2}{r} \quad (18)$$

e

$$\omega R_1 = C_1 \frac{R_1}{2} + \frac{C_2}{R_1} \quad (19)$$

Substituindo (18) em (19), obtemos:

$$C_1 = - \frac{2\omega R_1}{R_0^2 - R_1^2} \quad (20)$$

e

$$C_2 = \frac{\omega R_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \quad (21)$$

Substituindo as equações (17) e (18) na (13), obtemos a expressão do perfil de velocidades como:

$$u_q(r) = - \frac{\omega R_1^2 r}{R_0^2 - R_1^2} + \frac{\omega R_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \frac{1}{r} \quad (22)$$

Onde:

$u_q(r)$ - velocidade tangencial;

ω - velocidade de rotação do cilindro interno;

R_1 - raio interno;

r - posição radial; e

R_0 - raio exterior.

A tensão de cisalhamento na parede externa do cilindro interno é dada por:

$$t_{rq} = t_{qr} = \eta r \frac{du_q}{dr} = \eta \left(- \frac{\omega R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} + \frac{\omega R_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \right) r$$

(23)

Neste problema,

$$t_{rq} = m \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = m \frac{2wR_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \quad (24)$$

Na parede externa do cilindro interno:

$$t_{rq}(R=R_1) = -2m \frac{wR_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \quad (25)$$

O produto da tensão de corte da parede pela área da superfície do cilindro interno, ou área banhada pelo fluido, representa a força tangencial que atua sobre o cilindro interno, dada por:

$$F_q = t_{rq} A = t_{rq} (2\pi R_1 L) = -4\pi m L \frac{wR_0^2 R_1}{R_0^2 - R_1^2} \quad (26)$$

À vista disso, obtemos o torque como produto dessa força pela distância para a linha de centro de rotação, que é dado pela equação (27), onde L é o comprimento do poço analisado, ou no nosso caso, o comprimento do cilindro externo do experimento.

$$T = F_q R_1 = 4\pi m L \frac{wR_0^2 R_1^2}{R_0^2 - R_1^2} \quad (27)$$

APÊNDICE B - TORQUE ADIMENSIONAL

Segundo o teorema dos Pi's de Buckingham, dada uma relação entre n parâmetros, eles poderão ser agrupados em (n-m) razões independentes adimensionais, os parâmetros Π , que podem ser expressos por uma função da pela equação (28) :

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (28)$$

Para o escoamento em um anular parcialmente obstruído analisado nesse projeto temos a necessidade de adimensionalizar o torque para o estudo dos resultados obtidos. Devido à complexidade do experimento ele deve ser representado em função de alguns parâmetros.

Seguindo os passos de determinação dos parâmetros adimensionais do Teorema dos Pi's de Buckingham, temos que:

Passo 1 – Listar os (n) parâmetros dimensionais envolvidos no estudo.

No nosso estudo o torque pode ser representado pela equação funcional simbólica (29).

$$T = f(\rho, \mu, V_T, G, h, d_p, L) \quad (29)$$

Portanto, número de parâmetros envolvidos são oito (n=8).

Passo 2 – Selecionar um conjunto de dimensões primárias.

Para o nosso caso pode-se utilizar o conjunto M (massa), L (comprimento) e t

(tempo). Com isso o número de dimensões primárias (r) utilizadas é igual a três (r=3).

Passo 3 – Listar dimensões primárias de todos os parâmetros dimensionais.

Os parâmetros dimensionais podem ser representados como mostrado na tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros dimensionais e suas respectivas dimensões primárias.

τ	$\frac{ML^2}{t^2}$
ρ	$\frac{M}{L^3}$
μ	$\frac{ML}{t}$
V_T	$\frac{L}{t}$
G	L
h	L
D_P	L
L	L

Passo 4 – Selecionar uma quantidade de parâmetros dimensionais (que irão se repetir nos adimensionais) igual ao número de dimensões primárias (os parâmetros selecionados devem possuir todas as dimensões primárias), ou seja, $m=r=3$.

Os três parâmetros escolhidos para serem selecionados são a massa específica do fluido (ρ), a velocidade tangencial do cilindro interno (V_T) e a folga entre os cilindros interno e externo (G).

Passo 5 – Estabelecer equações adimensionais, combinando os parâmetros selecionados, com cada um dos outros parâmetros.

Temos envolvidos no nosso problema oito parâmetros dimensionais, como três deles foram selecionados para ficar em função dos outros, teremos 5 “pis” ($n-m=5$), dispostos como mostrado na configuração da equação (30).

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5)$$

(30)

Como queremos encontrar o torque adimensional, ele será nomeado como Π_1 . Ele será representado em função dos parâmetros dimensionais previamente selecionados da seguinte forma:

$$\Pi_1 = \rho^a V_T^b G^c T$$

(31)

Substituindo os parâmetros dimensionais por suas respectivas dimensões primárias, temos que:

$$\left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{L^3}\right) = M^0 L^0 t^0$$

(32)

Equacionando os expoentes M, L e t, resulta em:

$$M: \quad a + 1 = 0 \quad ; \quad a = -1$$

(33)

$$L: \quad -3a + b + c + 2 = 0 \quad ; \quad c = -3 \quad (34)$$

$$t: \quad -b - 2 = 0 \quad ; \quad b = -2$$

(35)

Substituindo os valores encontrados nas equações (33), (34) e (35) em (31), obtemos o torque adimensional, representado pela equação (36).

$$\Pi_1 = \frac{T}{\rho V_T^2 G^3}$$

(36)

De forma análoga, fazendo para os outros quatro “pis” restantes (μ , L , h e d_p) chegamos na seguinte relação funcional que queríamos demonstrar:

$$\frac{T}{G^3 \rho v_t^2} = \left(\frac{\mu}{\rho v_t G}, \frac{L}{G}, \frac{h}{G}, \frac{d_p}{G} \right)$$

(37)