

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

BRENO ALMEIDA DORNELAS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA TENSÃO DE
CISALHAMENTO MÍNIMA PARA SUSPENSÃO DE
PARTÍCULAS EM UM LEITO HORIZONTAL**

VITÓRIA

2009

BRENO ALMEIDA DORNELAS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA TENSÃO DE
CISALHAMENTO MÍNIMA PARA SUSPENSÃO DE
PARTÍCULAS EM UM LEITO HORIZONTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Edson José Soares, D.Sc.

Co-orientador: Bruno Venturini Loureiro, D.Sc.

VITÓRIA

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

D713a Dornelas, Breno Almeida, 1977-
Análise experimental da tensão de cisalhamento mínima para
suspensão de partículas em um leito horizontal / Breno Almeida
Dornelas. – 2009.
78 f. : il.

Orientador: Edson José Soares.
Co-Orientador: Bruno Venturini Loureiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Cisalhamento. 2. Tensão - Concentração. 3. Erosão. 4.
Perfuração horizontal. I. Soares, Edson José. II. Loureiro, Bruno
Venturini, 1976-. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

PÁGINA RESERVADA AO TERMO DE APROVAÇÃO

À minha esposa Keli, que tanto amo, na gestação de nossa primeira filha.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP e do Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT por meio do “Programa Institucional da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES para o Setor Petróleo e Gás” - PRH29-ANP/MCT e também da Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo - FAPES e da Faculdade do Centro Leste - UCL.

Ao Edson José Soares, D.Sc. por aceitar orientar este trabalho e pelo incentivo à pesquisa.

Ao Bruno Venturini Loureiro, D.Sc. por propor o tema e abrir as portas do seu laboratório para o desenvolvimento do trabalho.

Aos colaboradores do Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte da UCL: David Fiorillo, Felipe Lagares, Lucas Silveira, Maurício Serafim, Max Coser, Robson Soares, Ronaldo Luz, Victor Martins e toda a equipe de apoio da UCL que ajudaram durante a realização dos testes.

Aos professores Carlos Loeffler, D.Sc.; Fernando Menandro, D.Sc.; João Donatelli, D.Sc.; Juan Saenz, D.Sc. e Oldrich Romero, D.Sc. pela contribuição à minha formação.

Aos mestrandos André Pitanga, Charles Stefenoni, Danilo Barbosa, Diego Calvi, Enilene Lovatte, Felipe Patrício, Garben Bravim, Gueder Assupção, Jackson Freitas, Jeanderson Sessa, Jonas Jardim, Luis Lavezzo, Rafael Chávez, Samuel Deoteronio, Samuel Velten, Thiago Alchaar, Thiago Lozer e demais contemporâneos pelo companheirismo.

Aos servidores Iury Pessoa e Maria José Santos pelo suporte durante toda minha permanência no Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica.

À minha família por me apoiar e por estar junto neste desafio.

À minha esposa que faz com que todos os meus sonhos se realizem e me faz feliz há mais de 14 anos.

Aos demais professores e amigos por contribuírem com esta conquista.

*O frio não existe, é uma definição da humanidade para uma sensação de perda de calor.
A escuridão também não existe, é na realidade uma definição para a ausência de luz.
E desta forma, o mal não existe, pelo menos, não existe por si mesmo, é simplesmente a
ausência do bem. É uma definição que a humanidade criou para descrever o resultado de
pensamento, palavra ou ação sem a presença de Deus.*

Albert Einstein

RESUMO

A remoção eficiente de cascalhos ainda é um desafio na perfuração de poços para produção de óleo e gás. O ponto crítico corresponde ao estágio horizontal da perfuração que intrinsecamente tende a formar um leito de partículas sedimentadas na parte inferior do poço em perfuração. A erosão desse leito de cascalhos oriundos do solo perfurado depende principalmente da tensão de cisalhamento promovida pelo escoamento do fluido de perfuração. Utilizando uma bancada experimental, composta de sistema para circulação de fluidos, caixa de cascalhos, unidade de bombeio e equipamentos de medição, investiga-se a tensão de cisalhamento mínima necessária para a erosão de um leito em função das propriedades do fluido e das partículas do leito. A área de observação consiste de uma caixa abaixo da linha de escoamento, para partículas calibradas de areia, em um duto de acrílico. Para as medições iniciam-se as bombas com baixa rotação e são feitos incrementos de frequência. A cada patamar de frequência são capturadas imagens de partículas carregadas pelo escoamento, registrando a vazão estabelecida. Com a análise do processamento das imagens define-se o momento em que o carregamento das partículas deixa de ser aleatório e esporádico e começa a ser permanente. A tensão de cisalhamento é determinada pela Correlação PKN (de Prandtl, von Kármán e Nikuradse) a partir da vazão mínima necessária para o arraste. Os resultados são obtidos para o escoamento de água e de solução água-glicerina.

Palavras-chave: Tensão de cisalhamento. Erosão de leito. Perfuração horizontal.

ABSTRACT

The efficient hole cleaning is still a challenge in the wellbore drilling for production of oil and gas. The critical point is the horizontal drilling that inherently tends to produce a bed of sediment particles at the bottom of the well. The erosion of this cuttings bed depends mainly on the shear stress promoted by the flow of drilling fluid. The shear stress required to drag cuttings bed is investigated according to the fluid and particles properties, using an experimental assembly, composed of a loop for circulation of fluids, of a particle box, of a pump system, camera and measuring equipment. The area of observation consists of a box below the line of flow, for calibrated sand particles, in an acrylic duct. The test starts with the pumps in low frequency and are made the increments. At each level of frequency are captured images of particles carried and it is records the established flow rate. The erosion criteria is defined when the drag particle no longer be random and sporadic, and begins to be permanent. The shear stress is determined by the PKN correlation (by Prandtl, von Kármán, and Nikuradse) from the minimum flow rate necessary to start the erosion process. Results were obtained for the flow of water; and of water and glycerin solution.

Keywords: shear stress, cuttings bed, horizontal drilling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfuração de alta inclinação.....	15
Figura 2 - Padrões de escoamento	16
Figura 3 - Circulação do fluido de perfuração [4].....	17
Figura 4 - Tipos de perfuração [5]	18
Figura 5 - Esquema da montagem experimental.....	21
Figura 6 - Visão geral da montagem experimental.....	31
Figura 7 - Dimensões da montagem experimental (cotas em mm)	39
Figura 8 - Caixa de cascalhos	40
Figura 9 - Posicionamento da câmera para registro do arraste de partículas	41
Figura 10 - Casa de bombas.....	41
Figura 11 - Tela do Sistema Supervisório	43
Figura 12 - Peneira para retirada de finos.....	44
Figura 13 - Estufa para secagem das partículas.....	45
Figura 14 - Armazenamento das partículas.....	45
Figura 15 - Preparação da amostra para captação de imagem	46
Figura 16 - Resultado do processamento de imagem.....	47
Figura 17 - Picnômetro de 25 ml, modelo GAY-LUSSAC, fabricante EXOM	48
Figura 18 - Balança modelo XS204, fabricante Mettler Toledo	49
Figura 19 - Banho de 2800W, modelo TV4000 da PM Tamson Instruments	49
Figura 20 - Reômetro modelo MCR 501, fabricante Anton Paar.....	50
Figura 21 - Copo e Rotor para formação da geometria <i>double gap</i>	51
Figura 22 - Perfil da viscosidade com a temperatura e a concentração de glicerina.....	52
Figura 23 - Processamento de imagem	57
Figura 24 - Curva de erosão de leito com o escoamento de água.....	59
Figura 25 - Curva da derivada da erosão em relação à vazão de água.....	59
Figura 26 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 1.....	60
Figura 27 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 1	60

Figura 28 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 2.....	61
Figura 29 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 2.....	61
Figura 30 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 3.....	62
Figura 31 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 3.....	62
Figura 32 - Imagem com 35 pixels de partículas na vazão de 17678 kg/h.....	63
Figura 33 - Imagem com 106 pixels de partículas na vazão de 18109 kg/h.....	63
Figura 34 - Imagem com 264 pixels de partículas na vazão de 18629 kg/h.....	64
Figura 35 - Imagem com 5195 pixels de partículas na vazão de 21274 kg/h.....	64
Figura 36 - Influência do diâmetro na tensão de cisalhamento mínima	67
Figura 37 - Influência do número de Reynolds na tensão de cisalhamento mínima adimensional para as seis classes de leito em cada fluido testado.....	69
Figura 38 - Influência da massa específica na tensão de cisalhamento mínima adimensional	70
Figura 39 - Influência do número de Reynolds da partícula na tensão de cisalhamento mínima adimensional	72
Figura 40 - Curvas de isotensão de cisalhamento mínima adimensional em função do número de Reynolds da partícula e da razão entre as massas específicas do fluido e da partícula.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dimensionais relevantes	33
Tabela 2 - Matriz dos expoentes das dimensões primárias	34
Tabela 3 - Características geométricas das partículas do leito	47
Tabela 4 - Massa específica dos fluidos de teste.....	48
Tabela 5 - Viscosidade dinâmica dos fluidos de teste.....	51
Tabela 6 - Valores de vazão mínima para erosão de leito sedimentado.....	58
Tabela 7 - Dados de referência e resultados de tensão de cisalhamento mínima	66
Tabela 8 - Dados adimensionais do problema de erosão de leito.....	68

NOMENCLATURA

τ : tensão de cisalhamento

\bar{u} : velocidade média do escoamento

g : aceleração da gravidade

μ : viscosidade de fluido newtoniano

ρ : massa específica do fluido

d_p : diâmetro médio de partículas

ρ_p : massa específica da partícula

B : largura do duto retangular

L : comprimento do duto retangular

h : altura do duto retangular

(M): dimensão de massa

(L): dimensão de comprimento

(t): dimensão de tempo

Π : grupo adimensional

Fr^2 : número de Froude ao quadrado

Re : número de Reynolds

D_t : diâmetro hidráulico corrigido

ν : viscosidade cinemática

D_h : diâmetro hidráulico

α : razão de aspecto

A : área da sessão transversal do duto de acrílico

P : perímetro da sessão transversal do duto de acrílico

F : representação de uma função genérica

f : fator de atrito Fanning

$a, b, c, J, K, R, S, X, Y, Z$: variáveis

SUMÁRIO

1 Introdução	14
1.1 Motivação	14
1.2 Caracterização do problema.....	19
1.3 Estado da arte	22
2 Montagem experimental	31
2.1 Análise dimensional do problema	32
2.2 Cálculo da tensão de cisalhamento	37
2.3 Descrição da bancada	38
2.4 Caracterização das partículas	44
2.5 Caracterização do fluido de teste	48
3 Procedimento experimental	54
3.1 Metodologia de obtenção dos dados experimentais.....	54
3.2 Método de processamento de imagens.....	56
3.3 Método de obtenção do instante inicial da erosão.....	58
4 Resultados	65
5 Conclusões e comentários finais	74
Referências	76

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O arraste de sólidos em escoamento de fluidos é um fenômeno explorado em diferentes processos industriais como transporte de minérios e perfuração de poços de petróleo. O transporte de partículas também está presente na hidráulica fluvial. A literatura apresenta muitos trabalhos sobre o assunto, dada a relevância dos recursos hídricos para a humanidade. Os sólidos imersos em fluidos tendem naturalmente a se depositar no fundo pelo efeito gravitacional. Para investigar a erosão do leito formado é necessária uma análise criteriosa dos mecanismos físicos envolvidos. A análise de cada sistema se diferencia pelo processo em que o mesmo está inserido e por sua finalidade ou ainda pelo foco da investigação.

Os rios têm um sistema natural de controle do transporte de sedimentos, conforme sua própria configuração, ou seja, a velocidade, a profundidade, as características dos sedimentos etc. Mas essa capacidade de transporte de sedimentos é alterada pela intervenção humana, com construções, desmatamentos, captação de água e descarga de produtos, ou por eventos inesperados da natureza, como grande volume de chuvas. Outra característica influente é a sinuosidade do rio e a diferença entre a velocidade superficial e a do fundo que podem gerar fluxos secundários. Nesse cenário, estudos são importantes para se analisar o acúmulo de

sedimentos ou a erosão do fundo de rios, podendo prever, por exemplo, seu assoreamento ou alterações de curso e posição das margens. [1]

Por outro lado, a exploração de campos de petróleo demanda altos custos, dos quais, uma parcela significativa é atribuída ao processo de perfuração. A broca ao perfurar o solo gera partículas (cascalhos) que podem se depositar na parte inferior da região anular, conforme mostra a Figura 1. A presença da coluna de perfuração no poço forma a região anular que é a denominação do espaço entre a parede do poço e a coluna de perfuração. Se o processo de perfuração não for eficiente no arraste destes sólidos pode ocorrer o travamento da coluna ou, por outro lado, a fratura da formação. Atualmente considera-se que grande parte do tempo perdido em eventos inesperados é associado ao travamento da coluna que ocorre principalmente pela remoção inadequada dos sólidos. [2]

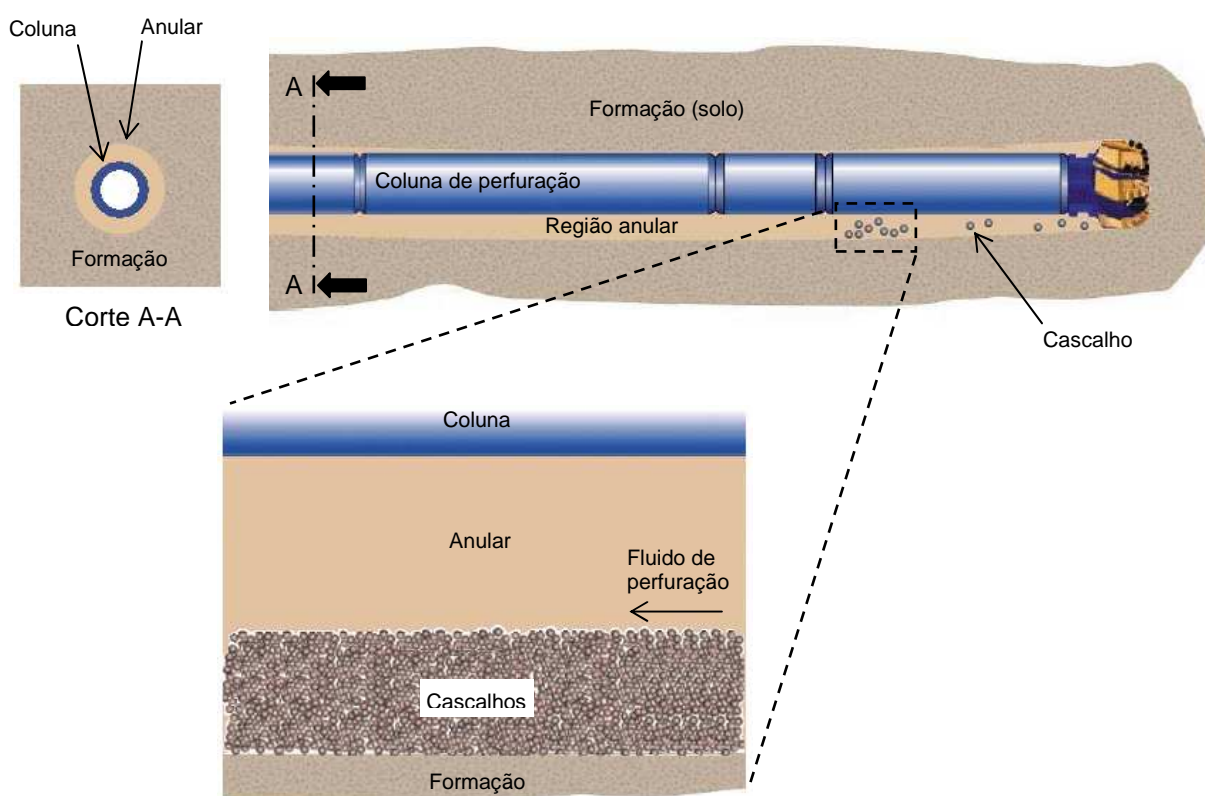


Figura 1 - Perfuração de alta inclinação

Segundo Iyoho [3] o escoamento na região anular de um poço horizontal pode se apresentar sob um padrão de total suspensão, com os sólidos uniformemente dispersos ou com um perfil heterogêneo de concentração ao longo da seção transversal, ou ainda se caracterizar pela deposição móvel ou estacionária de sólidos na parte inferior do poço, conforme mostra a Figura 2.

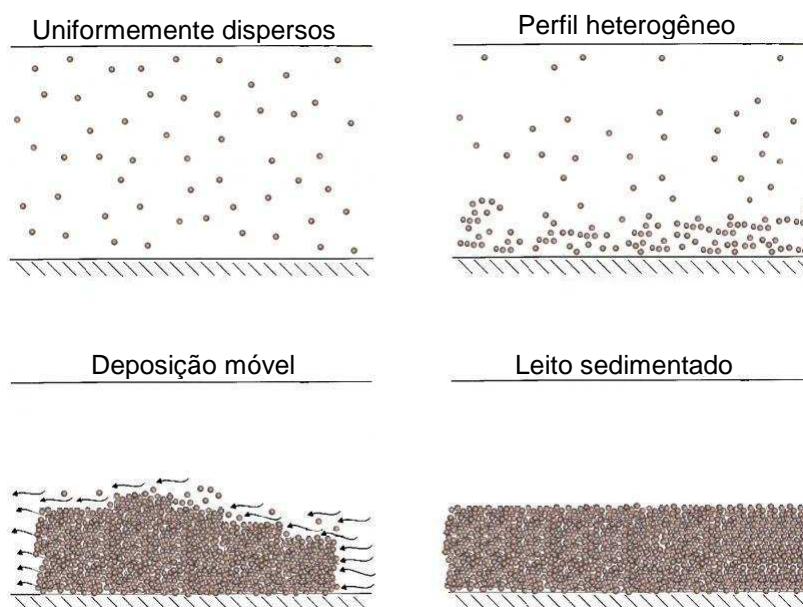


Figura 2 - Padrões de escoamento

No processo de perfuração de poços de petróleo o fluido é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna pela região anular até a superfície, onde há a separação dos sólidos. O fluido é então reinjetado, compondo um circuito fechado, conforme mostra a Figura 3.

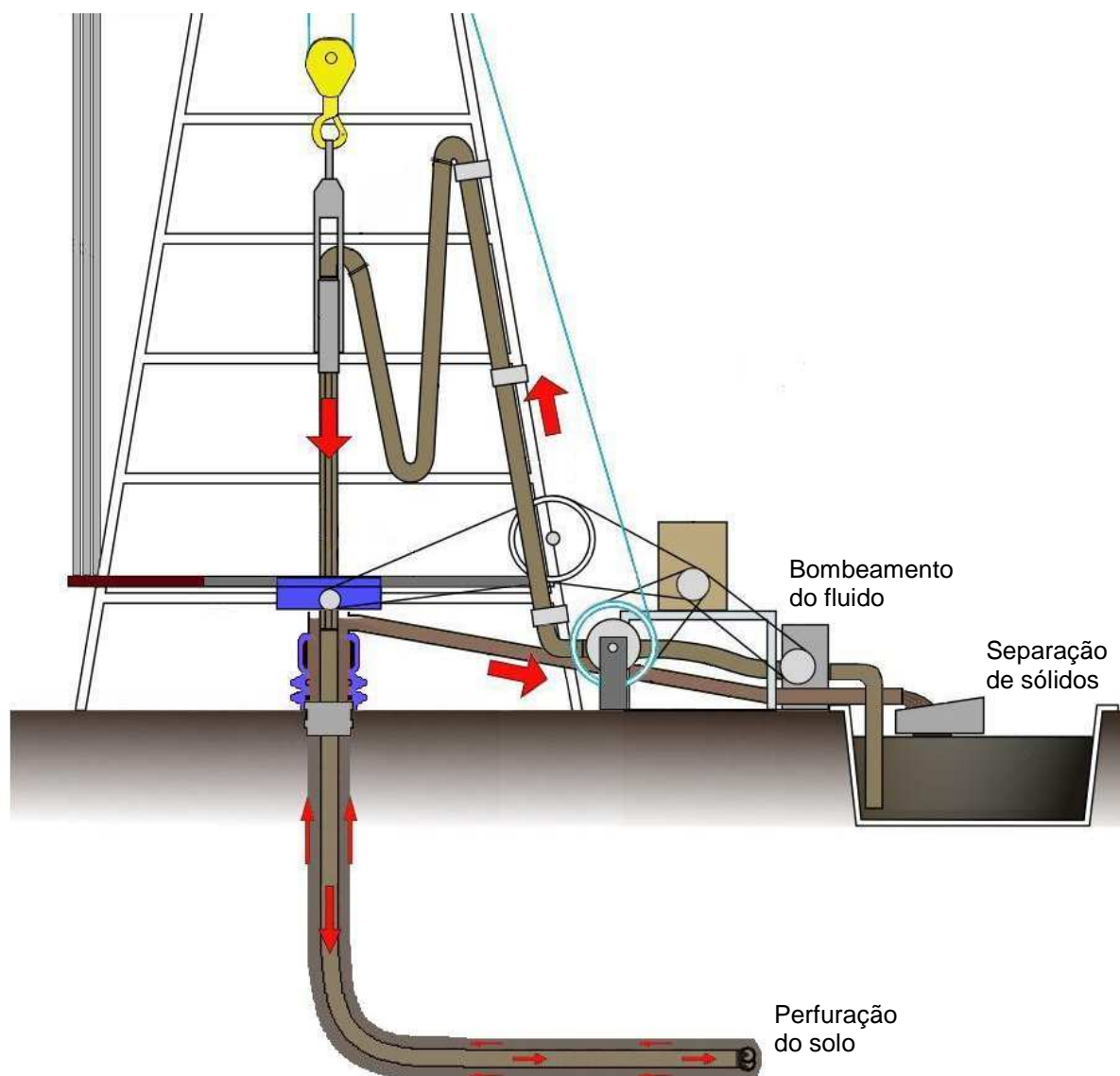


Figura 3 - Circulação do fluido de perfuração [4]

A perfuração direcional, amplamente utilizada no mundo, é a técnica de se desviar intencionalmente a trajetória da vertical para atingir objetivos que não se encontram diretamente abaixo das utilidades instaladas na superfície. Uma particularidade da técnica direcional é a perfuração horizontal que promove maior exposição ao reservatório, podendo melhorar a eficiência de drenagem, permitindo o uso de menor número de poços. Veja a Figura 4.

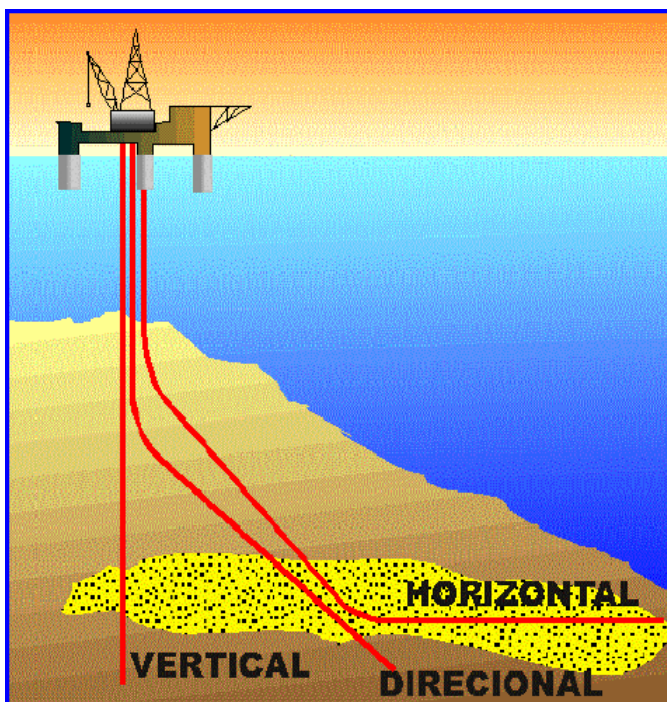


Figura 4 - Tipos de perfuração [5]

Na perfuração de poços verticais ou de pouca inclinação, a remoção de cascalhos pode ser adequadamente caracterizada pela relação entre a velocidade de ascensão dos sólidos e a velocidade do fluido no anular. Pode-se ocorrer a decantação dos sólidos, sob o efeito da gravidade, quando a velocidade do fluido de perfuração é insuficiente. [6]

Nos poços horizontais ou muito inclinados, a remoção de cascalhos é mais complexa, pois a ação da gravidade é perpendicular à direção do escoamento, tendendo a constituir um leito sedimentado de partículas. Neste contexto, analisa-se diferentes variáveis para caracterizar o problema como: concentração volumétrica de sólidos, altura do leito de cascalhos e velocidade mínima de transporte. Como a presença de um leito sedimentado no trecho horizontal da perfuração configura ainda hoje um cenário de grande dificuldade e complexidade para a limpeza de poço no processo de circulação do fluido, estudos são, portanto, de grande interesse. [6]

1.2 Caracterização do problema

Este trabalho investiga a tensão de cisalhamento suficiente para iniciar a erosão de um leito em função das propriedades do fluido e das partículas do leito. O carregamento ocorre a partir das partículas depositadas na superfície do leito horizontal. As partículas localizadas nesta área de interface com o fluido sofrem ação não apenas da força gravitacional, do empuxo e das forças de contato interparticulares, mas também da força de ressuspensão decorrente do escoamento do fluido. [7]

Neste estudo considera-se que o movimento das partículas ocorre quando se atinge o valor correspondente ao que se denomina tensão de cisalhamento mínima, abaixo da qual as partículas permanecem imóveis. Durante o processo real de perfuração são gerados cascalhos continuamente pela penetração da broca. Quando o fluido de perfuração não consegue carrear os cascalhos há a formação de um leito sedimentado. A altura do leito de cascalhos aumenta quando está submetido a valores de tensão abaixo da tensão de cisalhamento mínima.

O fenômeno físico de carregamento de partículas presente na perfuração de poços é bastante complexo, mas a montagem experimental proposta nesse estudo simplifica o problema, retirando influências como excentricidade e rotação da coluna de perfuração, permitindo uma análise focalizada na tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento axial sobre o leito de partículas sedimentadas. A erosão do leito é fortemente dependente do regime de escoamento, de características do fluido e da partícula, mas independe da geometria do problema, podendo ser analisada em geometrias cilíndricas, anulares ou retangulares.

Partindo dessa premissa, utiliza-se uma geometria retangular para estudar o problema, visto que o fenômeno físico pode ser melhor visualizado e mensurado por técnicas experimentais, além da facilidade de constituição de um leito plano. Os cálculos para obtenção da tensão mínima de cisalhamento podem ser realizados a partir do diâmetro hidráulico do duto retangular pela equação proposta por Jones Jr. [8], apresentada no Capítulo 2.

Os testes são realizados após a constituição de um leito regular, correspondente à altura da caixa de cascalhos do experimento projetado e abaixo da linha de escoamento. Quando se atinge no escoamento uma tensão de cisalhamento atuante igual a tensão de cisalhamento mínima ocorre a erosão do leito.

Para reproduzir o fenômeno físico de erosão existe sob o duto retangular uma bandeja (caixa de cascalhos) possibilitando confeccionar um leito sedimentado para estudo da ressuspensão de partículas em um leito já constituído. De forma diferente, a maioria dos trabalhos encontrados sobre o problema de limpeza de poço analisa o processo de formação do leito de cascalhos com o objetivo de evitar esta ocorrência. Destes trabalhos pesquisados muito se pode aproveitar quanto à análise dos parâmetros envolvidos e suas influências.

O presente trabalho estende os estudos apresentados por Loureiro, Siqueira e Martins [9] com alterações na montagem experimental para o uso de fluidos de diferentes propriedades reológicas. A montagem experimental é composta de uma caixa de cascalhos conectada a um sistema para circulação de fluidos, conforme a representação esquemática mostrada na Figura 5.

Dentre as modificações na planta, a unidade de bombeio com duas bombas centrífugas (Bombas 1 e 2) passa a possuir também uma bomba helicoidal (bomba 3) que pode operar de forma paralela ou individualmente por intervenção nas válvulas manuais 1 e 2 ou 3 e 4. As válvulas 5 e 6 são responsáveis pelo isolamento do duto de acrílico no momento das intervenções. As intervenções de colocação das partículas na caixa de cascalhos, nivelamento do leito e limpeza do duto são realizadas através de escotilhas localizadas na parte superior do duto. A bancada conta com um transdutor de pressão para o monitoramento operacional e um computador dedicado com sistema supervisório para controle da planta e registro dos dados coletados. Outras alterações que ocorreram foram: a substituição do sistema de medição de vazão do escoamento que utilizava placa de orifício por um medidor “Coriolis” e a instalação de uma câmera CCD para registro do arraste das partículas do leito sedimentado.

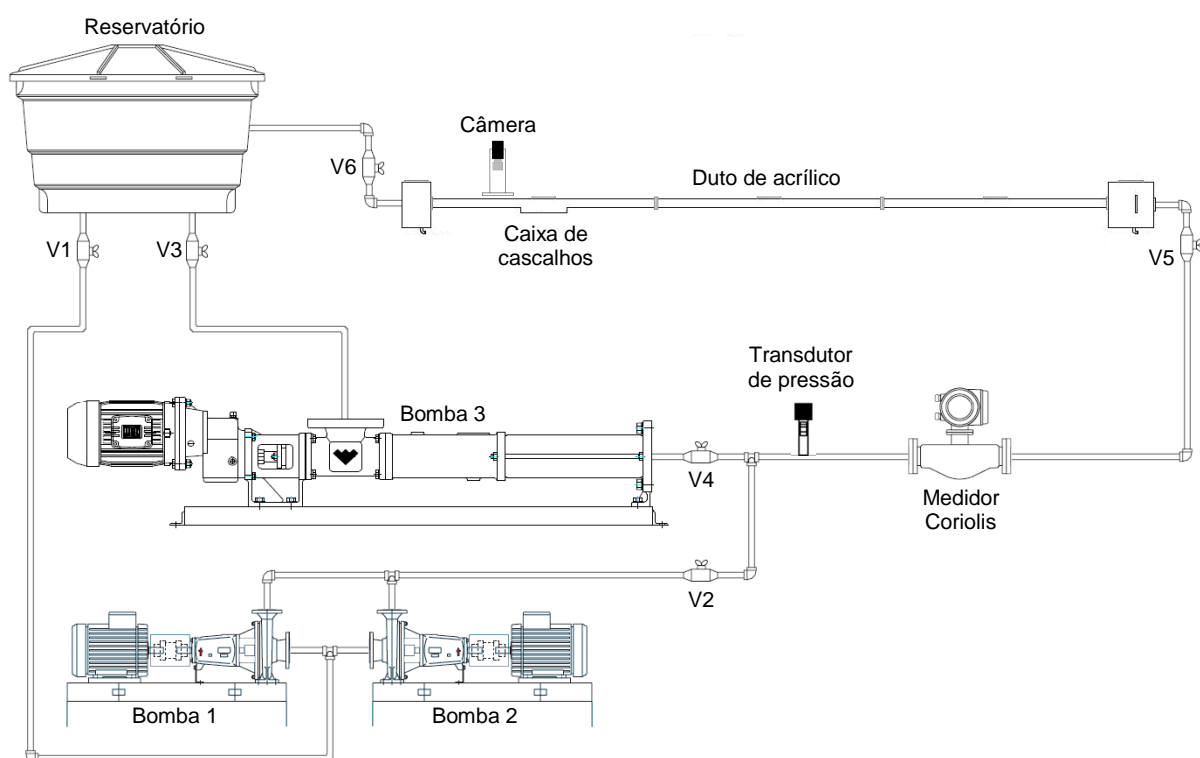


Figura 5 - Esquema da montagem experimental

1.3 Estado da arte

Nesta seção destacam-se os trabalhos que analisam a física da perfuração de poços e do carreamento de cascalhos, trabalhos que abordam a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento de um fluido e trabalhos que consideram a característica do fluido de perfuração.

A literatura revela um interesse antigo de pesquisadores pela área de perfuração de poços de petróleo. Beneficiado pelo empenho das grandes empresas de petróleo na busca de viabilização de novos projetos, esse é um tema sempre contemporâneo, uma vez que técnicas de otimização são adotadas, trazendo frequentemente consigo novos problemas operacionais a serem resolvidos.

Está sendo apresentado um levantamento geral, onde não houve a preocupação de listar todos os estudos existentes, mas todos aqueles considerados pertinentes para o entendimento ou aplicação no trabalho desenvolvido. Essencialmente são encontradas duas técnicas de desenvolvimento de pesquisas no assunto. A primeira constitui-se de observações experimentais, destacando correlações empíricas a partir de tratamento estatístico de dados gerados ou ainda empregando técnicas de análise dimensional para o agrupamento das variáveis envolvidas. A outra constitui-se de elaboração de modelos teóricos mecanicistas descrevendo o fenômeno físico. Muitas vezes, independente da técnica utilizada, delimita-se o universo de parâmetros considerados devido à complexidade do sistema real.

Iyoho e Azar [10] apresentam um modelo para obtenção de soluções analíticas de velocidade para o escoamento de fluido não newtoniano em um anular excêntrico. Os resultados mostram que a excentricidade da coluna de perfuração interfere no escoamento na região anular. O escoamento na região mais estreita do anular, onde a coluna de perfuração está mais próxima da parede do poço, apresenta velocidade menor que o escoamento na região mais larga. A região mais estreita do anular nos poços horizontais está normalmente na parte inferior onde os cascalhos tendem a se depositarem, agravando o processo de remoção.

Tao e Donovan [11] realizam um dos primeiros estudos de escoamento através de um espaço anular. O trabalho teórico e experimental mostra que um escoamento laminar ou turbulento em um anular com rotação do cilindro interno pode ser tratado como um escoamento de alta velocidade em um anular de grande comprimento com paredes estacionárias.

Okrajni e Azar [12] analisam o comportamento do transporte de cascalhos desde poços verticais e de pequenas inclinações até poços horizontais, mostrando que o escoamento laminar é mais eficaz em poços verticais enquanto que em poços horizontais o escoamento turbulento é mais eficiente no mecanismo de transporte. Os autores mostram também o efeito da reologia do fluido de perfuração, observando que a viscoplasticidade é influente em poços verticais e de pouca expressão ou insignificante em poços horizontais.

Martins [6] descreve o escoamento axial anular em trechos horizontais e inclinados através de um modelo matemático do comportamento de sólidos e de fluido não newtoniano. Trata-se de um modelo estratificado de duas camadas representando o mecanismo de deslizamento do leito. A abordagem permite, com uma formulação única, caracterizar o escoamento de acordo com quatro padrões de dispersão: sólidos em total suspensão uniformemente dispersos, perfil heterogêneo de concentração ao longo da seção transversal, deposição móvel de sólidos na parte inferior do poço e deposição estacionária. Martins avalia a sensibilidade do modelo a diversos parâmetros através de simulações numéricas e compara os resultados com observações experimentais. O autor quantifica os efeitos de cada parâmetro, classificando a vazão do fluido como o mais importante. No trabalho destaca-se também o aumento de densidade do fluido e a minimização da área da seção anular como itens para a melhora da eficiência da limpeza de poços, considerando secundário o tamanho e a forma das partículas.

Piggot [13] é considerado pioneiro na publicação sobre transporte de cascalhos e identifica os parâmetros que afetam a capacidade de carreamento do fluido de perfuração. Williams e Bruce [14] subseqüentemente reportam uma série de experimentos laboratoriais e de campo. Estes dois trabalhos são os primeiros a determinar a velocidade mínima no anular necessária para remover os cascalhos do poço.

Peden, Ford e Oyenevin [15] usam o conceito de velocidade mínima de transporte, na qual os cascalhos são movidos pelo fluido de perfuração para fora do poço. Os autores não consideram a ressuspensão de partículas em caso de sedimentação, ou seja, não analisam a erosão de leito de partículas sedimentadas. Eles supõem o escoamento do fluido com cascalhos em suspensão ou sob o padrão de leito móvel. No trabalho, desenvolve-se um modelo baseado na força da gravidade, elevação, arraste e atrito, incluindo constantes empíricas obtidas de dados experimentais. Utiliza-se uma bancada experimental para alterar a excentricidade, rotação e tamanho do cilindro interno do anular, assim como a inclinação do duto anular. São apresentados resultados para carreamento de cascalhos com tamanhos de 1,7 a 2,0 mm e de 2,8 a 3,35 mm e escoamento de fluidos com diferentes propriedades reológicas, desde água a fluidos de perfuração de base água com características não newtonianas e viscosidade aparente em torno de 10 cP, 60 cP e 120 cP. Os autores concluem que a limpeza de poço é fortemente dependente do grau de turbulência no anular, principalmente para poços horizontais. Ainda para poços de alta inclinação, Peden, Ford e Oyenevin verificam que o transporte de cascalhos é mais eficaz quando se utiliza fluidos de baixa viscosidade.

Larsen, Pilehvari e Azar [16] realizam estudos para cascalhos de 2,3; 4,4 e 7 mm e fluidos de perfuração de base água com cinco propriedades reológicas diferentes e viscosidades de até 29 cP. A parte experimental também foca na velocidade necessária para se evitar a sedimentação dos cascalhos no anular e mostra que, para poços horizontais, fluidos com menor viscosidade têm melhor desempenho. Mas, diferentemente do que se esperava pelo estudo de Peden, Ford e Oyenevin [15], os autores expõem que cascalhos de menor tamanho requerem maior vazão para atingir a velocidade crítica de transporte. Posteriormente Pilehvari, Azar e Shirazi [17] concordam com as observações, afirmando que as partículas menores formam leito mais compactado e plano.

Hemphill e Larsen [18] comparam fluidos de perfuração de base óleo e água. Eles mostram que, sob características reológicas semelhantes, ambos propiciam uma limpeza de poço similar. Os autores observam que a massa específica do fluido é um fator menos importante em poços de alta inclinação e seus efeitos não são marcantes quando comparado aos fluidos de viscosidades equivalentes.

Clark e Bickham [19] desenvolvem um modelo mecanicista para transporte de cascalhos a partir da identificação das formas de transporte. Eles assumem que associado ao conceito de velocidade crítica existe uma altura de equilíbrio do leito. No estágio horizontal da perfuração de poços pode ocorrer a deposição de cascalhos e a formação de leito. A deposição de cascalhos no anular aumenta a altura do leito e reduz a área de escoamento, aumentando a velocidade do fluido. Quando esta velocidade atinge a velocidade crítica os cascalhos são carregados, aumentando novamente a área de escoamento e reduzindo a velocidade. O ciclo se repete até atingir uma altura de equilíbrio do leito. Uma segunda seção compara o modelo com resultados experimentais. Nestes testes laboratoriais são observados três padrões de movimentação dos cascalhos. Para altas inclinações de poço, o movimento das partículas se apresenta sob o padrão de rolamento. Em inclinações intermediárias de poço as partículas se movimentam em elevação sob o padrão de leito móvel. Para poços verticais ou quase verticais as partículas se deslocam em suspensão. Posteriormente o modelo é aplicado a diferentes situações de campo para discussão de sua versatilidade, validando o modelo elaborado.

A prática nos campos petrolíferos de parar a perfuração periodicamente e executar a circulação de fluido para remoção de leito de cascalhos motiva um estudo de Martins et al. [20]. Este estudo apresenta uma série de experimentos visando a investigação da erosão de um leito de cascalhos depositados na parte inferior de uma seção anular horizontal. Os autores comparam a erosão de leito a trabalhos anteriores sobre deposição de sólidos durante a perfuração e concluem que a influência dos parâmetros operacionais se mostra semelhante apesar da física dos dois processos serem diferentes. Após uma análise dimensional dos fatores que caracterizam o problema são desenvolvidas correlações para a previsão da altura de leito e vazão crítica durante o processo de circulação. Os dados experimentais indicam que quanto maior é a turbulência menor será a altura do leito. Em consonância com a maioria dos autores anteriores, o trabalho mostra que partículas maiores são mais dificilmente erodidas. O estudo salienta o impacto da existência de leito sedimentado inclusive para a operação de cimentação de poços horizontais. Os autores expõem que na maior parte do tempo é possível concluir a perfuração de um poço com remoção deficiente de cascalhos, porém, a cimentação exige a completa

remoção dos sólidos para que a lama de cimentação possa ocupar inteiramente a lacuna anular.

Pilehvari, Azar e Shirazi [17] fazem uma extensa pesquisa e relatam grande parte dos trabalhos publicados até 1995 sobre transporte de cascalhos em poços horizontais. O estudo começa por uma série de trabalhos oriundos de um projeto de pesquisa em perfuração da Universidade de Tulsa, nos Estados Unidos, que se iniciou na década de 1970, de caráter predominantemente experimental. Este estudo é revisado e republicado por Pilehvari, Azar e Shirazi [21] incluindo uma lista de recomendações para a limpeza eficiente de poços, baseada no resultado de muitas pesquisas de laboratório e várias experiências de campo e observações. Os autores sugerem projetar as propriedades reológicas do fluido de perfuração de modo que seja aumentada a turbulência nas seções inclinadas e horizontais e mantendo as propriedades de suspensão suficientes na seção vertical.

Caenn e Chillingar [22] discutem as características e funções do fluido de perfuração. Levantam que a maioria dos livros e manuais sobre fluidos de perfuração lista de 10 a 20 funções que um fluido de perfuração executa ao perfurar um poço. Em geral, as principais funções são: carrear cascalhos e permitir sua separação na superfície; resfriar e limpar a broca; reduzir o atrito entre a tubulação e o poço; manter a estabilidade do poço; manter os sólidos em suspensão; não prejudicar a formação da produção; não causar perigo ao ambiente e ao ser humano. O trabalho salienta que em cada momento no processo de perfuração uma função é mais importante que outra. No caso de grandes alcances e poços horizontais a limpeza e a manutenção da integridade do poço são geralmente consideradas mais importantes.

Azar e Sanchez [23] discutem os parâmetros relevantes do processo de carreamento de cascalhos na perfuração de poços, suas influências e limitações. Dentre os parâmetros que têm impacto na limpeza do poço, a vazão do fluido de perfuração é o mais relevante. A vazão está limitada pela disponibilidade de potência hidráulica dos equipamentos, pela densidade circulante equivalente admissível e pela susceptibilidade das paredes da formação a erosão hidráulica. Segundo Azar e Sanchez a rotação da coluna de perfuração e as próprias propriedades do fluido de perfuração podem aumentar a suspensão dos cascalhos,

mas o limitante desses parâmetros é o fato dessa ser uma função secundária. A função principal da densidade seria estabilizar o poço e evitar a intrusão de fluidos na formação, com o risco de diminuir a taxa de penetração. A função principal da viscosidade seria também controlar a perda de fluidos para zonas permeáveis. Os autores consideram ainda, parâmetros influentes não controlados. Um destes parâmetros é a excentricidade positiva da coluna de perfuração que inevitavelmente provoca velocidades baixas do fluido na estreita região inferior. Um segundo parâmetro é a inclinação do poço, normalmente definida pelas condições geológicas diante do alvo da perfuração, que dificulta a limpeza em ângulos elevados, como em poços horizontais. Outros parâmetros são tamanho e forma dos cascalhos, estes sofrem novas quebras por recirculação na broca ou pela rotação da coluna de perfuração após serem gerados o que afeta o seu comportamento dinâmico no escoamento. A última alternativa adotada é a redução da taxa de penetração por ter impacto direto no custo à medida que atrasa a perfuração, mas esta ação pode compensar as perdas pelo benefício de evitar problemas como o travamento ou furo da coluna de perfuração. O estudo conclui que existem limitações em todas as variáveis que afetam a limpeza de poços e que, portanto, são obrigatórios planejamento e consideração simultânea dessas variáveis.

Kamp e Rivero [24] discutem pontos críticos na modelagem física do problema de transporte de cascalhos. Como estratégia de desenvolvimento de um modelo, os autores analisam trabalhos anteriores e fundamentam-se nas seguintes considerações: a velocidade do fluido é menor na região inferior de anulares excêntricos, o mecanismo de suspensão de cascalhos é provavelmente controlado pela tensão de cisalhamento interfacial e a formação do leito é um processo dependente do tempo. O trabalho busca a influência da vazão do escoamento, da taxa de penetração da broca, da viscosidade do fluido, do diâmetro dos cascalhos e da excentricidade da coluna de perfuração na altura de equilíbrio do leito. Os resultados das simulações feitas com o modelo são apresentados em forma de gráficos da altura do leito em função das variáveis citadas. O modelo indica que a altura do leito não sofre grande influência da viscosidade, mas que viscosidades maiores favorecem a redução do leito, não estando de acordo com os trabalhos anteriores comparados, como o de Larsen, Pilehvari e Azar [16]. Os autores concluem ser interessante incluir no modelo um termo que agregue a turbulência do

escoamento para possível correção deste resultado. Eles salientam que cascalhos menores são mais fáceis de serem carregados.

Silva e Martins [7] demonstram a importância da tensão de cisalhamento através da elaboração de um modelo matemático para a análise da influência do fator de forma na ressuspensão de partículas em dutos anulares horizontais, ou seja, a dependência da forma na qual uma partícula não esférica está depositada num leito sedimentado. A formulação inicia com base nas forças que atuam em uma partícula depositada na interface leito-fluido carreador, agindo no centro de gravidade da partícula e gerando um momento, sendo: Força gravitacional (FG), Empuxo (FE), Força de cisalhamento hidrodinâmico (FD) e Força de ressuspensão (FL). Eles consideram que na iminência do movimento o somatório dos momentos das forças é igual a zero. Posteriormente são agregadas equações para a definição de variáveis, como a de viscosidade aparente para um fluido Ostwald de Waele. Os autores obtêm uma equação para o cálculo da tensão de cisalhamento em função de características das partículas e do fluido. O estudo usa o programa comercial ANNFLOW para estimar a vazão requerida correspondente.

Niño, Lopez e Garcia [25] realizam um estudo experimental em um canal retangular aberto de 18,6 m de comprimento e 300 mm de largura. Duas diferentes séries de experimentos são conduzidas, uma correspondendo a um canal com paredes lisas e outro com o fundo rugoso. A profundidade do escoamento usada em ambas as séries de experimentos varia de 25 mm a 70 mm. O estudo utiliza cinco diferentes tipos de partículas de areia, cuja maior corresponde a um diâmetro médio de 0,53 mm. Os autores observam que no caso do escoamento liso as partículas são transportadas ao longo do leito rolando ou deslizando, enquanto que no caso do escoamento rugoso as partículas são transportadas em um movimento saltante ou apresentando pequenos intervalos. O trabalho usa um sistema de vídeo de alta velocidade para investigar condições para o arraste de partículas sedimentadas em um leito. O critério para o limite de arraste é uma função da relação entre a velocidade de cisalhamento do escoamento e a velocidade de deposição da partícula. Segundo os autores o conceito de tensão de cisalhamento limite para leito sedimentado tem ocupado posição central na teoria de transporte de sedimentos desde o final do século 19 e apesar de diferentes critérios desenvolvidos para sua

definição, sempre a turbulência do escoamento é assumida como a maior influência no fenômeno.

Loureiro, Siqueira e Martins [9] desenvolvem uma montagem experimental para identificar o início do processo de erosão de leito sedimentado. O estudo usa água como fluido de carreamento e um tubo de pitot para medição da velocidade do escoamento próximo a superfície do leito de cascalhos. Posteriormente os autores obtêm a tensão de cisalhamento mínima para erosão pela equação do perfil universal de velocidades para escoamento turbulento e compararam os resultados com simulação numérica, através do pacote comercial FLUENT 6.2. Eles destacam a importância de se estimar a tensão de cisalhamento mínima do processo de erosão, uma vez que estes valores podem ser tomados como referência para modelos numéricos de previsão de limpeza de poços utilizados em sondas de perfuração.

Costa [26] propõe um modelo transiente de duas camadas para simulação do escoamento anular na perfuração de poços de petróleo. Com o modelo numérico desenvolvido e o programa computacional elaborado é possível simular a formação do leito de cascalhos em um anular inicialmente vazio e simular a remoção de um leito já constituído. A principal característica do modelo é a possibilidade de avaliar oscilações de pressão no anular para diferentes situações, onde os parâmetros operacionais são modificados ao longo do tempo, representando de forma mais realista as condições de campo. O trabalho constata que a vazão do fluido é o parâmetro de maior influência na hidráulica de perfuração, de modo que seu acréscimo implica em aumento da pressão no anular e por outro lado redução na altura de leito de cascalhos. Costa observa ainda o aumento da pressão pelo acréscimo da taxa de penetração, uma vez que este gera aumento na altura do leito. No entanto este aumento de pressão é menos expressivo comparado ao aumento de pressão decorrente do incremento na vazão. O estudo considera fluidos de comportamento mecânico não newtoniano, verificando uma influência expressiva das propriedades reológicas do fluido na pressão no anular, mas moderada na altura do leito de cascalhos.

Martins [27] desenvolve um modelo matemático e um programa de simulação para o escoamento laminar de fluido newtoniano em anulares excêntricos. A análise dos resultados se baseia na manutenção de uma altura de equilíbrio do leito de cascalhos, cuja presença não prejudica o processo de perfuração de poço. O trabalho considera a hipótese de uma tensão de cisalhamento crítica, característica de cada sistema fluido/ partícula, como referência para a tensão de cisalhamento atuante. Os valores de tensão de cisalhamento atuante iguais a tensão de cisalhamento crítica são responsáveis pela manutenção da altura do leito de cascalho, valores maiores provocariam erosão do leito e valores menores permitiriam a deposição de cascalhos. A tensão de cisalhamento crítica seria função dos parâmetros influentes para a condição de carregamento dos sólidos, como diâmetro e massa específica dos cascalhos, massa específica do fluido e constante gravitacional. Enquanto a tensão de cisalhamento atuante, considerada a principal responsável pelo carregamento, depende das características do escoamento. O estudo conclui que de acordo com o escoamento laminar analisado quanto mais viscoso o fluido, menor é a vazão necessária para se manter a altura do leito. Outra conclusão do trabalho é que a excentricidade da coluna de perfuração reduz o escoamento na região mais estreita, onde se encontra o leito de cascalho, requerendo um aumento de vazão do fluido.

A continuação da dissertação (Cap. 2 a 5) encontra-se em outro arquivo.

12345678910111213141516171819202122232425262728293031323334353637