

**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)

Dornelas, Breno Almeida, 1977-
D713a 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]

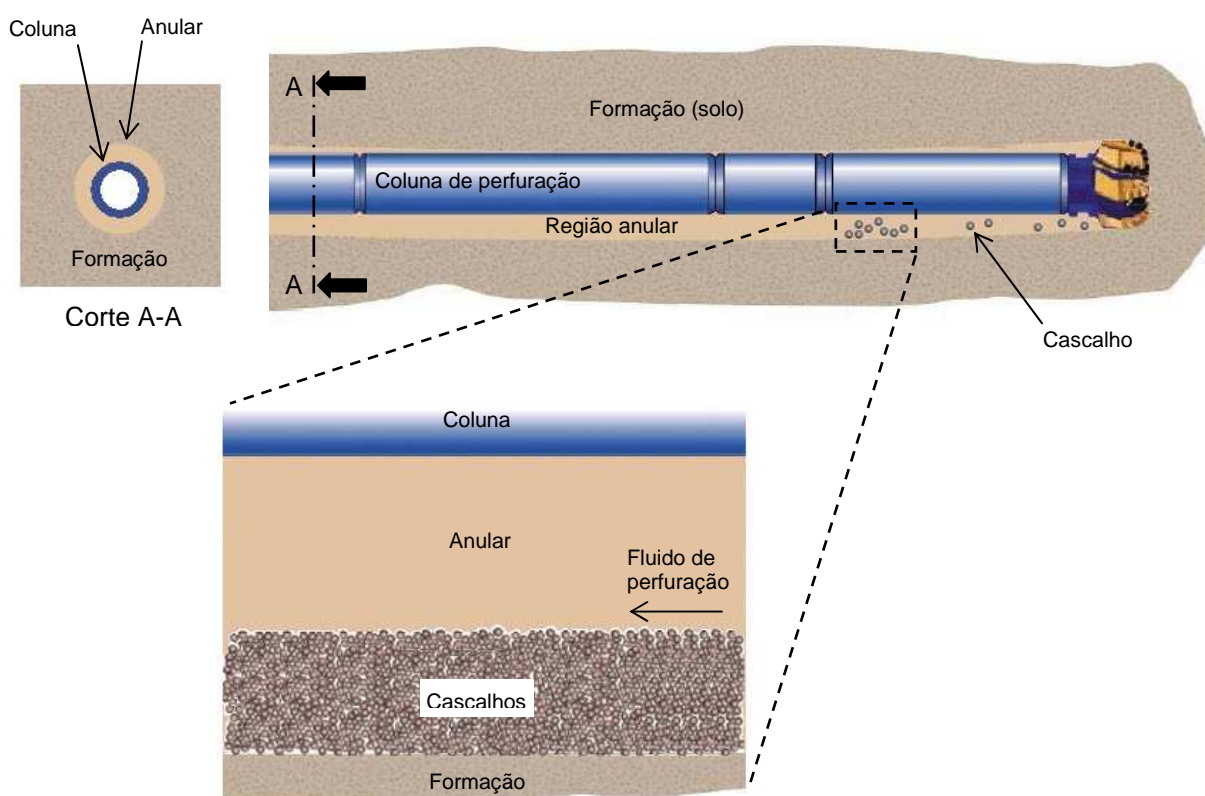


Figura 1 - Perfuração de alta inclinação

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.

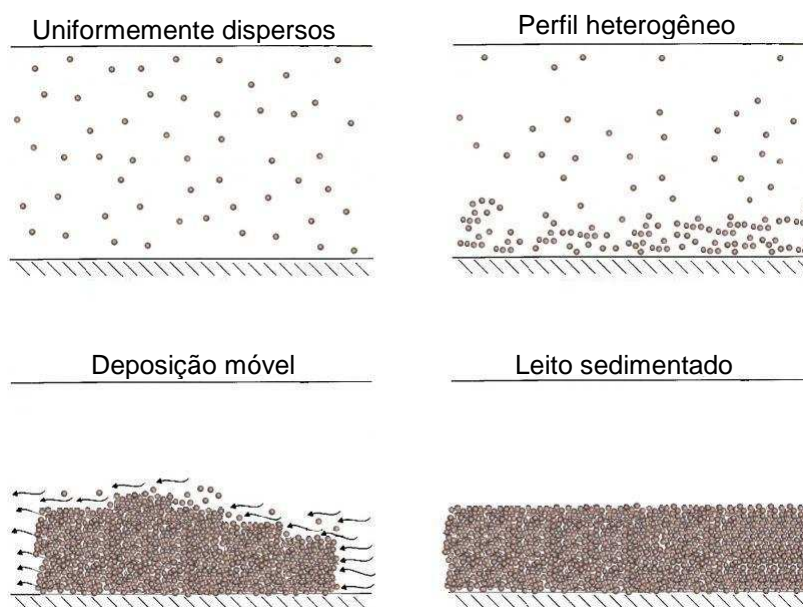


Figura 2 - Padrões de escoamento

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.

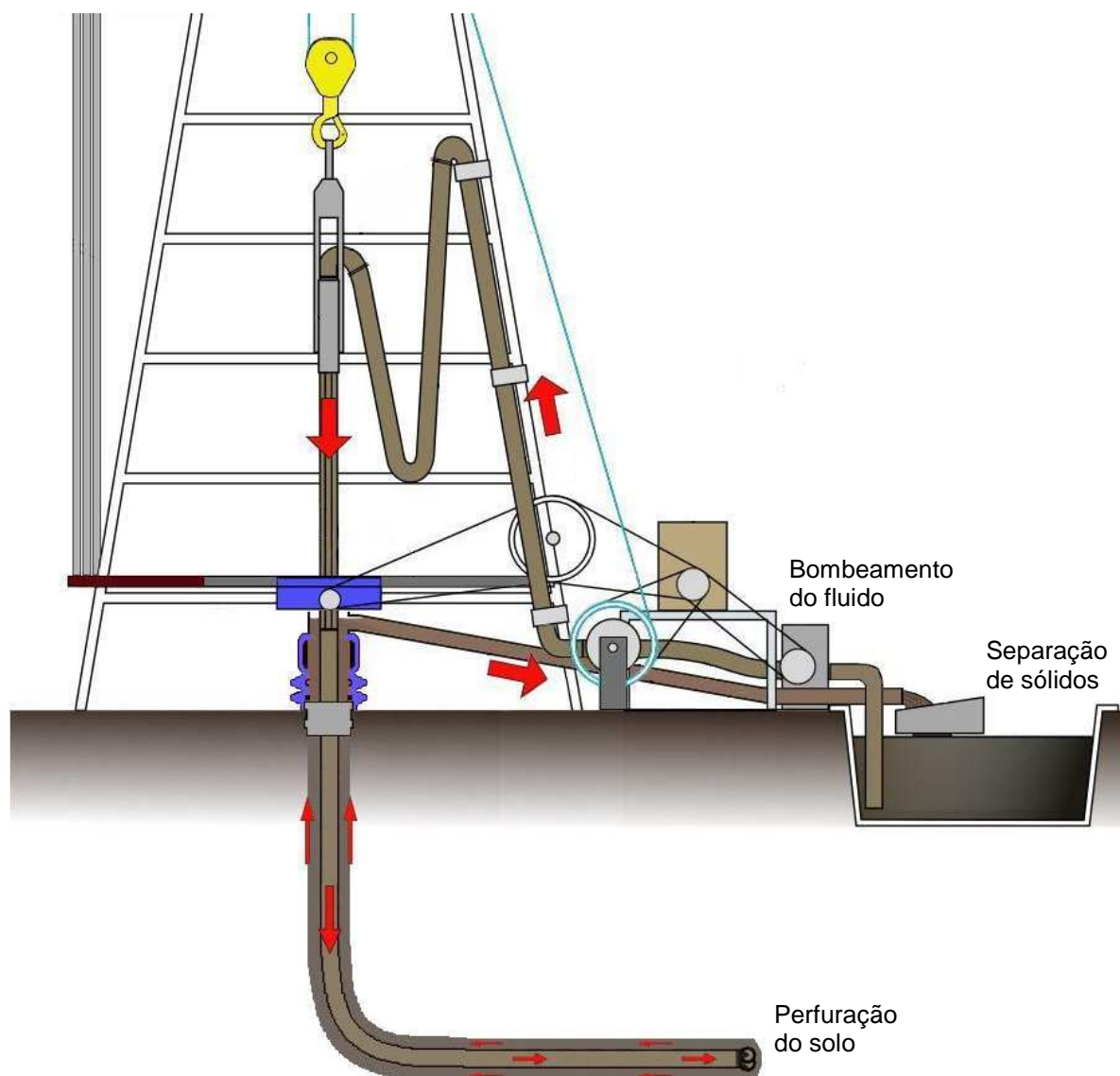


Figura 3 - Circulação do fluido de perfuração [4]

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.

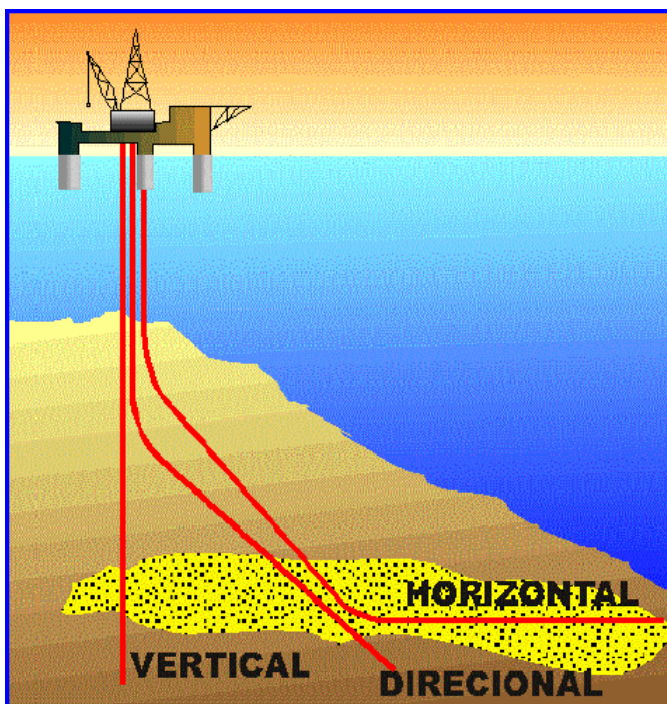


Figura 4 - Tipos de perfuração [5]

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 carreamento 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 carreamento 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.

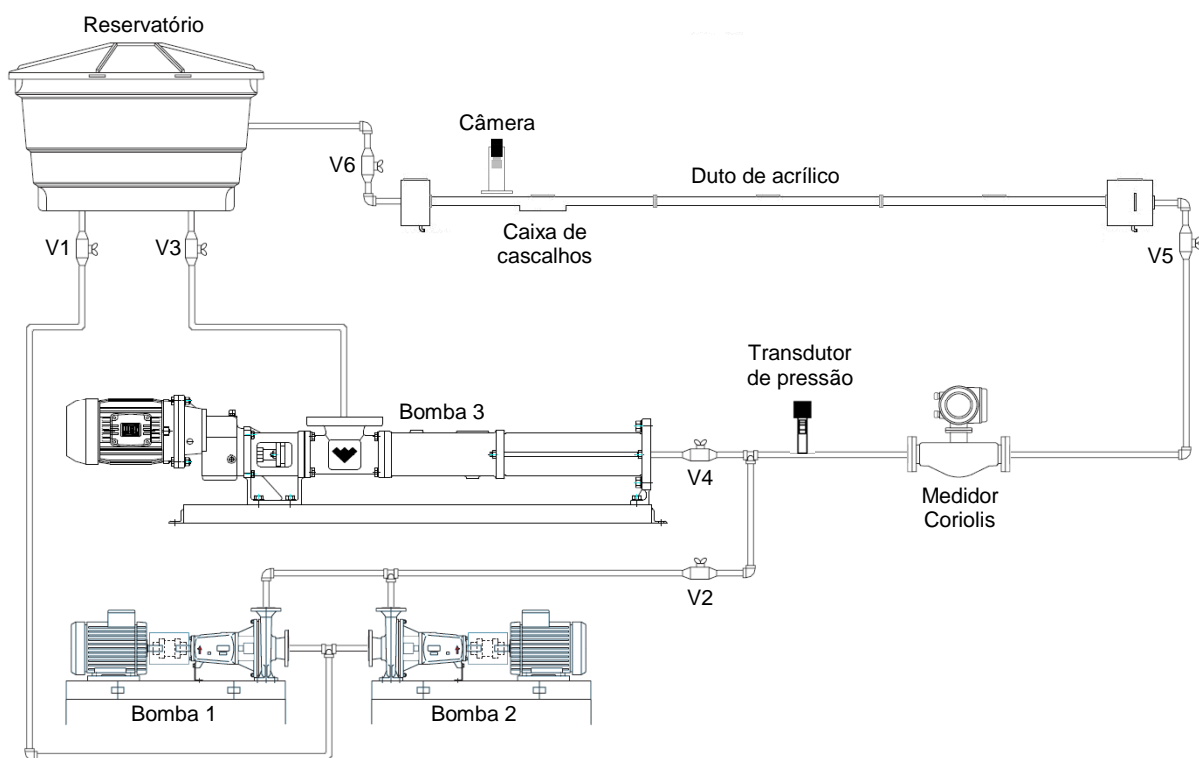


Figura 5 - Esquema da montagem experimental

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.

Capítulo 2

Montagem experimental

A bancada é utilizada na investigação do arraste de partículas motivada pela perfuração de poços horizontais para produção de óleo e gás. O aparato experimental consiste de uma caixa de cascalhos num duto de acrílico retangular de 6 metros de comprimento, conforme apresentado na Figura 6.



Figura 6 - Visão geral da montagem experimental

A caixa de cascalhos da bancada é preenchida com grãos de areia disponíveis em seis faixas de diâmetros, configurando seis leitos sedimentados. Neste capítulo são apresentados os valores médios de diâmetro e circularidade das partículas para as seis classes de leito. Entretanto, a circularidade não é controlada devido à dificuldade de se agrupar grãos de areia com a mesma configuração geométrica. A influência da geometria da partícula pode ser verificada no trabalho de Silva e Martins [7] que analisa o carreamento de partículas não esféricas na perfuração de poços de petróleo.

A montagem experimental forma um circuito fechado com capacidade de aproximadamente 600 litros de fluido. A primeira bateria de testes é realizada com água. Os demais fluidos de teste são obtidos por adição de glicerina líquida à água, exigindo cerca de 400 kg de glicerina para o preparo das soluções desejadas. As soluções preparadas são incolores permitindo a visualização da erosão do leito de partículas. Estas soluções newtonianas apresentam seus parâmetros, viscosidade dinâmica e massa específica, de acordo com a concentração de glicerina estabelecida em cada fluido.

2.1 Análise dimensional do problema

Para a caracterização física do problema de erosão de leito buscam-se os grupos adimensionais que governam o sistema de escoamento sobre o leito sedimentado. A obtenção destes grupos adimensionais parte da definição dos parâmetros dimensionais característicos do problema e utiliza a metodologia do teorema Pi de Buckingham [28]. Após análise da montagem experimental e do processo de teste verifica-se que os parâmetros dimensionais relevantes são:

- I. Tensão de cisalhamento;
- II. Velocidade média do escoamento;
- III. Aceleração da gravidade;
- IV. Viscosidade do fluido;
- V. Massa específica do fluido;
- VI. Diâmetro médio das partículas;
- VII. Massa específica das partículas, e
- VIII. Diâmetro hidráulico corrigido do duto de acrílico.

Os parâmetros dimensionais listados acima estão respectivamente simbolizados na Tabela 1 com suas correspondentes dimensões primárias. As dimensões dos parâmetros são especificadas pelo número mínimo de dimensões fundamentais como parte da metodologia para obtenção dos grupos adimensionais. As dimensões fundamentais requeridas são: massa (M), comprimento (L) e tempo (t).

Tabela 1 - Parâmetros dimensionais relevantes

Símbolo	τ	\bar{u}	g	μ	ρ	d_p	ρ_p	D_l
Dimensão primária	$\left(\frac{M}{Lt^2}\right)$	$\left(\frac{L}{t}\right)$	$\left(\frac{L}{t^2}\right)$	$\left(\frac{M}{Lt}\right)$	$\left(\frac{M}{L^3}\right)$	(L)	$\left(\frac{M}{L^3}\right)$	(L)

O teste experimental corresponde fundamentalmente ao escoamento de fluidos sobre leitos de partículas sedimentados. Dada esta situação física, considera-se a tensão de cisalhamento na interface entre a parte inferior do escoamento e a superior do leito como o parâmetro dependente em função dos demais parâmetros dimensionais. Essa relação entre as variáveis pode ser expressa na seguinte equação simbólica.

$$\tau = F(\bar{u}, g, \mu, \rho, d_p, \rho_p, D_l) \quad (1)$$

Segundo o teorema Pi de Buckingham, as razões adimensionais são obtidas agrupando os parâmetros da Equação 1. Inicialmente a metodologia exige a escolha de termos repetentes. A quantidade destes termos é de acordo com a

ordem da matriz expoente das dimensões primárias. A ordem da matriz é igual à ordem de seu maior determinante não nulo. A matriz é mostrada na Tabela 2 e possui ordem três, de modo que devem ser escolhidos três parâmetros repetentes. Após análise de todas as possibilidades de agrupamento, os parâmetros escolhidos como repetentes são: massa específica do fluido, velocidade média do escoamento e diâmetro corrigido do duto de acrílico, por resultarem melhores grupos adimensionais, alguns de significado físico e outros de simples interpretação.

Tabela 2 - Matriz dos expoentes das dimensões primárias

	τ	\bar{u}	g	μ	ρ	d_p	ρ_p	D_l
M	1	0	0	1	1	0	1	0
L	-1	1	1	-1	-3	1	-3	1
t	-2	-1	-2	-1	0	0	0	0

Os grupos Pi são obtidos com a formulação seguinte, combinando os parâmetros repetentes com cada um dos demais parâmetros dimensionais.

$$\Pi_1 = \rho^a \bar{u}^b D_l^c \tau = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{Lt^2}\right) = M^0 L^0 t^0 \quad (2)$$

$$\Pi_2 = \rho^a \bar{u}^b D_l^c g = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{L}{t^2}\right) = M^0 L^0 t^0 \quad (3)$$

$$\Pi_3 = \rho^a \bar{u}^b D_l^c \mu = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{Lt}\right) = M^0 L^0 t^0 \quad (4)$$

$$\Pi_4 = \rho^a \bar{u}^b D_l^c d_p = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c (L) = M^0 L^0 t^0 \quad (5)$$

$$\Pi_5 = \rho^a \bar{u}^b D_l^c \rho_p = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{L^3}\right) = M^0 L^0 t^0 \quad (6)$$

Os expoentes das dimensões primárias são equacionados para cada grupo Pi resultando nas razões adimensionais seguintes.

$$\Pi_1 \begin{cases} M: & a+1=0 \\ L: & -3a+b+c-1=0 \\ t: & -b-2=0 \end{cases} \rightarrow a=-1 \quad b=-2 \quad c=0 \quad \therefore \Pi_1 = \frac{\tau}{\rho \bar{u}^2} \quad (7)$$

$$\Pi_2 \begin{cases} M: & a=0 \\ L: & -3a+b+c+1=0 \\ t: & -b-2=0 \end{cases} \rightarrow a=0 \quad b=-2 \quad c=1 \quad \therefore \Pi_2 = \frac{gD_l}{\bar{u}^2} \quad (8)$$

$$\Pi_3 \begin{cases} M: & a+1=0 \\ L: & -3a+b+c-1=0 \\ t: & -b-1=0 \end{cases} \rightarrow a=-1 \quad b=-1 \quad c=-1 \quad \therefore \Pi_3 = \frac{\mu}{\rho \bar{u} D_l} \quad (9)$$

$$\Pi_4 \begin{cases} M: & a=0 \\ L: & -3a+b+c+1=0 \\ t: & -b=0 \end{cases} \rightarrow a=0 \quad b=0 \quad c=-1 \quad \therefore \Pi_4 = \frac{d_p}{D_l} \quad (10)$$

$$\Pi_5 \begin{cases} M: & a+1=0 \\ L: & -3a+b+c-3=0 \\ t: & -b=0 \end{cases} \rightarrow a=-1 \quad b=0 \quad c=0 \quad \therefore \Pi_5 = \frac{\rho_p}{\rho} \quad (11)$$

Finalmente, a caracterização física do problema pode ser expressa pela seguinte relação funcional:

$$\frac{\tau}{\rho \bar{u}^2} = F\left(\frac{gD_l}{\bar{u}^2}, \frac{\mu}{\rho \bar{u} D_l}, \frac{d_p}{D_l}, \frac{\rho_p}{\rho}\right) \quad (12)$$

O objetivo do trabalho não é desenvolver a forma desta função, mas determinar experimentalmente os valores da tensão de cisalhamento mínima para erosão dos leitos sedimentados. A caracterização física é um suporte auxiliar para a análise dos resultados experimentais.

Na Equação 12, o parâmetro dependente corresponde à adimensionalização da tensão de cisalhamento pela massa específica do fluido e pelo quadrado da velocidade média do escoamento. A velocidade do escoamento e também a tensão de cisalhamento atuante aumentam com o incremento de rotação nas bombas, entretanto, uma maior variação no denominador resulta em uma variação decrescente da tensão de cisalhamento adimensional.

A segunda razão adimensional é função da aceleração da gravidade local, de um comprimento característico e do inverso do quadrado da velocidade média do escoamento. O comprimento característico é representado pelo diâmetro hidráulico corrigido do sistema de escoamento. Esse grupo adimensional corresponde ao inverso do número de Froude ao quadrado. O número de Froude pode ser interpretado como o quociente entre as forças de inércia e as forças de gravidade. Este número adimensional é considerado importante para casos de escoamentos com efeitos de superfície livre. A segunda razão adimensional não é expressa nos resultados, visto que o problema em questão apresenta semelhança incompleta e o parâmetro de Reynolds sobrepuja em importância.

O terceiro grupo adimensional é equivalente ao inverso do número de Reynolds. Este é um parâmetro de grande influência no problema, onde o diâmetro corrigido representa um comprimento característico descritivo do campo de escoamento. O número de Reynolds nos traz a interpretação física do quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas.

O quarto grupo Π é a adimensionalização do diâmetro médio das partículas do leito pelo comprimento característico do problema. Este parâmetro permite analisar a influência do tamanho dos grãos de areia na erosão do leito.

O último parâmetro adimensional é a razão da massa específica das partículas pela massa específica dos fluidos. A variação de massa específica do

fluido é analisada mediante testes com quatro fluidos diferentes, sendo que as seis classes de partículas se diferenciam por tamanho, mas possuem a mesma massa específica.

2.2 Cálculo da tensão de cisalhamento

O cálculo dos valores de tensão de cisalhamento se baseia na clássica correlação PKN, proposta por Prandtl [29], von Kármán [30] e Nikuradse [31]. Esta correlação é mostrada na Equação 13 e tem sua aplicação em escoamento turbulento totalmente desenvolvido para uma faixa recomendada de número de Reynolds entre 4×10^3 e 10^7 . [32]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,7272 \ln(\text{Re} \sqrt{f}) - 0,3946 \quad (13)$$

É utilizada a Equação 14 proposta por Jones Jr. [8] para considerar o efeito do duto retangular em escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos. [32]

$$D_l = \frac{2}{3} D_h + \frac{11}{24} \alpha \cdot (2 - \alpha) \quad (14)$$

$$\text{Onde: } D_h = 4 \frac{A}{P} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{h}{b}$$

O diâmetro hidráulico corrigido, as características do fluido e a velocidade média do escoamento são usados na determinação do número de Reynolds, conforme definição mostrada na Equação 15. A velocidade média, presente na Equação 15, é calculada pelo quociente da vazão mínima medida nos testes pela área transversal do duto.

$$\text{Re} = \frac{\bar{u}\rho D_l}{\mu} \quad (15)$$

O número de Reynolds é aplicado à correlação PKN, apresentada anteriormente na Equação 13, para determinar o fator de atrito. Finalmente, calcula-se os valores da tensão de cisalhamento mínima para a erosão de leito pela definição do fator de atrito Fanning. Este método permite considerar a geometria do duto e a condição de escoamento turbulento totalmente desenvolvido, alinhando os resultados à realidade dos testes desenvolvidos.

$$f = \frac{\tau}{\rho \bar{u}^2 / 2} \quad (16)$$

2.3 Descrição da bancada

A bancada experimental possui uma seção construída em acrílico, possibilitando a visualização do escoamento e a captação das imagens dos testes. Esta seção é mostrada na Figura 7 de forma esquemática com a especificação de suas dimensões. A seção de teste é constituída de um duto retangular de 6 metros de comprimento, projetado com comprimento suficiente para o desenvolvimento do escoamento. A razão de aspecto (α) do duto é igual a 1/3, sendo 80 milímetros de altura e 240 milímetros de largura.

Uma caixa de acrílico de arestas iguais a 375 milímetros é responsável por reduzir a turbulência do escoamento no duto retangular. Esta câmara plena possui um defletor interno, montado a 70 milímetros de sua entrada, que impede o direcionamento do jato procedente da tubulação de recalque para dentro do duto de acrílico.

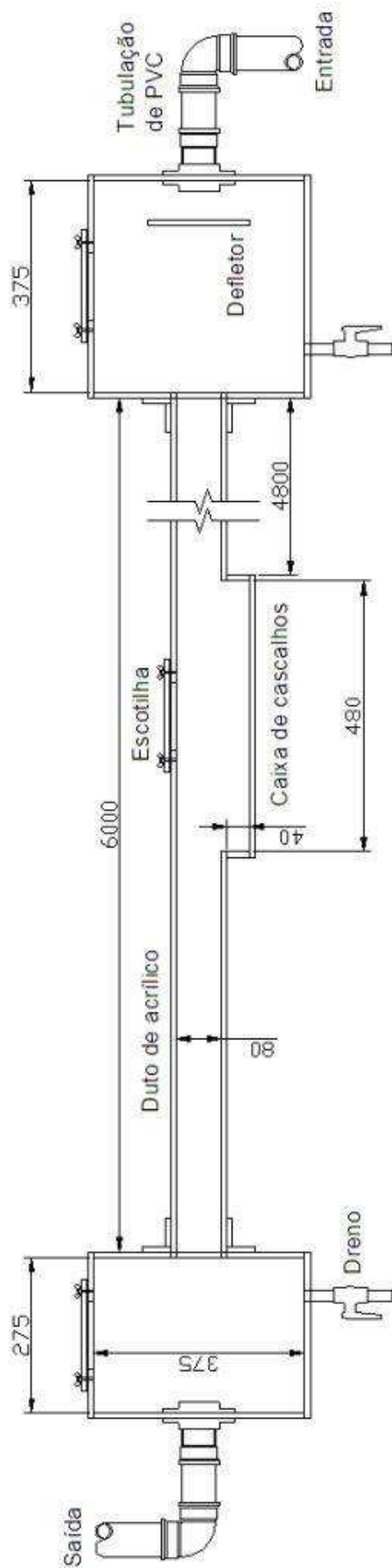


Figura 7 - Dimensões da montagem experimental (cotas em mm)

A caixa de cascalhos constitui-se de uma bandeja de acrílico montada a partir de 4,8 metros da entrada do duto retangular. Esta bandeja possui 480 milímetros de comprimento, 40 milímetros de profundidade e mesma largura do duto retangular. As partículas de areia de granulometria calibrada são colocadas na caixa de cascalhos utilizando-se uma escotilha instalada na parte superior do duto de acrílico. A foto e o desenho esquemático da Figura 8 mostram o leito sedimentado formado pelas partículas na caixa de cascalhos.



Figura 8 - Caixa de cascalhos

Para a limpeza da bancada existem três escotilhas ao longo dos seis metros do duto retangular. As caixas de acomodação a montante e a jusante do duto retangular também possuem uma escotilha na parte superior e um registro de dreno na parte inferior.

Sobre o duto de acrílico está instalada uma câmera monocromática analógica de varredura progressiva tipo CCD, conforme a Figura 9. A câmera posicionada logo após a caixa de cascalhos é responsável pela aquisição de imagens do escoamento durante o arraste das partículas. As imagens são posteriormente processadas no software Vision da National Instruments, permitindo mensurar o carregamento.

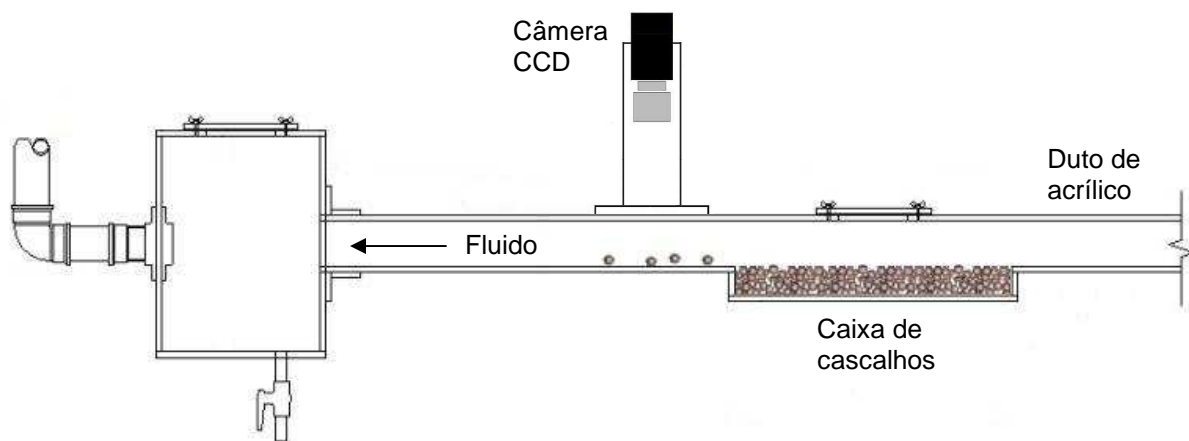


Figura 9 - Posicionamento da câmera para registro do arraste de partículas

Após a seção de acrílico, a tubulação de PVC conduz o fluido ao reservatório presente na casa de bombas. O reservatório alimenta a sucção das bombas instaladas abaixo de sua plataforma de sustentação, conforme Figura 10.



Figura 10 - Casa de bombas

A central de bombeamento é composta de duas bombas centrífugas e uma helicoidal que são responsáveis por estabelecerem o escoamento do fluido de teste. O escoamento induzido por gradiente de pressão é levado à seção de acrílico através de tubulações de PVC, tendo passado por válvulas e equipamentos de medição. As válvulas estão instaladas nas tubulações de interligação, permitindo o

funcionamento das bombas em paralelo ou apenas a bomba desejada. Para a segurança do sistema existe um botão de emergência que permite o desligamento imediato das bombas. A Bomba Helicoidal ou Bomba de Cavidades Progressivas (BCP) capacita a bancada a testar fluidos de alta viscosidade, inclusive fluidos não newtonianos. Para o acionamento das bombas centrífugas e da bomba helicoidal são utilizados motores de indução com rotor gaiola. A característica principal desse motor é manter a velocidade praticamente constante dentro da região de funcionamento. [33]

Uma das necessidades da montagem experimental é a variação da velocidade do escoamento. A alternativa adotada é o uso de um dispositivo interferindo diretamente no funcionamento do motor. Esse método de controle de velocidade faz a variação da frequência da fonte de alimentação através de inversores de frequência, onde o motor é controlado para prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica. O inversor de frequência varia a velocidade do motor com o sistema em funcionamento. [33]

Para medir a vazão do escoamento é instalado um medidor “Coriolis” na tubulação de recalque. Uma das vantagens do medidor “Coriolis” sobre outros medidores é não possuir partes móveis, tendo sua principal aplicabilidade na medição de fluidos pesados e viscosos, líquidos sujos e fluidos com alto teor de sólidos. Outras vantagens do medidor “Coriolis” são: apresentar baixo custo de manutenção e não possuir limitações de temperatura e pressão. O uso de medidores “Coriolis” é bastante difundido na indústria de petróleo para a medição de escoamento de massa e volume de uma ampla variedade de fluidos. [34]

A bancada é controlada, monitorada e protegida por uma Estação de Controle e Supervisão, que também armazena os dados dos testes realizados. A Estação é composta de um computador com alta capacidade de memória e de processamento que roda um programa, desenvolvido por Fiorillo e Calegário [35], no software LabVIEW da National Instruments. A Figura 11 mostra a tela do Sistema Supervisório, uma representação ilustrativa da bancada, onde se pode monitorar e comandar o funcionamento dos equipamentos. Uma das aplicações é dar partida e parar os motores, assim como, definir a rotação desejada. Uma segunda aplicação é o monitoramento da rotação dos motores através dos sinais enviados pelos

inversores de frequência, da vazão do escoamento enviada pelo medidor “Coriolis” e da pressão operacional da planta enviada pelo medidor analógico de pressão estática. A Estação se comunica com os inversores de frequência e com o medidor “Coriolis” através de uma rede de dados MODBUS. O sinal do transdutor de pressão é adquirido por uma placa de aquisição de dados 16 bits da National Instruments. O Supervisório expõe a situação das válvulas de permissão de fluxo, abertas ou fechadas, de acordo com o sinal elétrico que a Estação recebe do sensor magnético instalado em cada válvula. As variáveis monitoradas são também armazenadas em um banco de dados. Outra aplicação é a proteção da planta e seus equipamentos contra falhas humanas e sobrecargas. O estado fechado de determinada válvula ou o aumento da pressão estática acima de um valor estabelecido impedem o funcionamento das bombas.

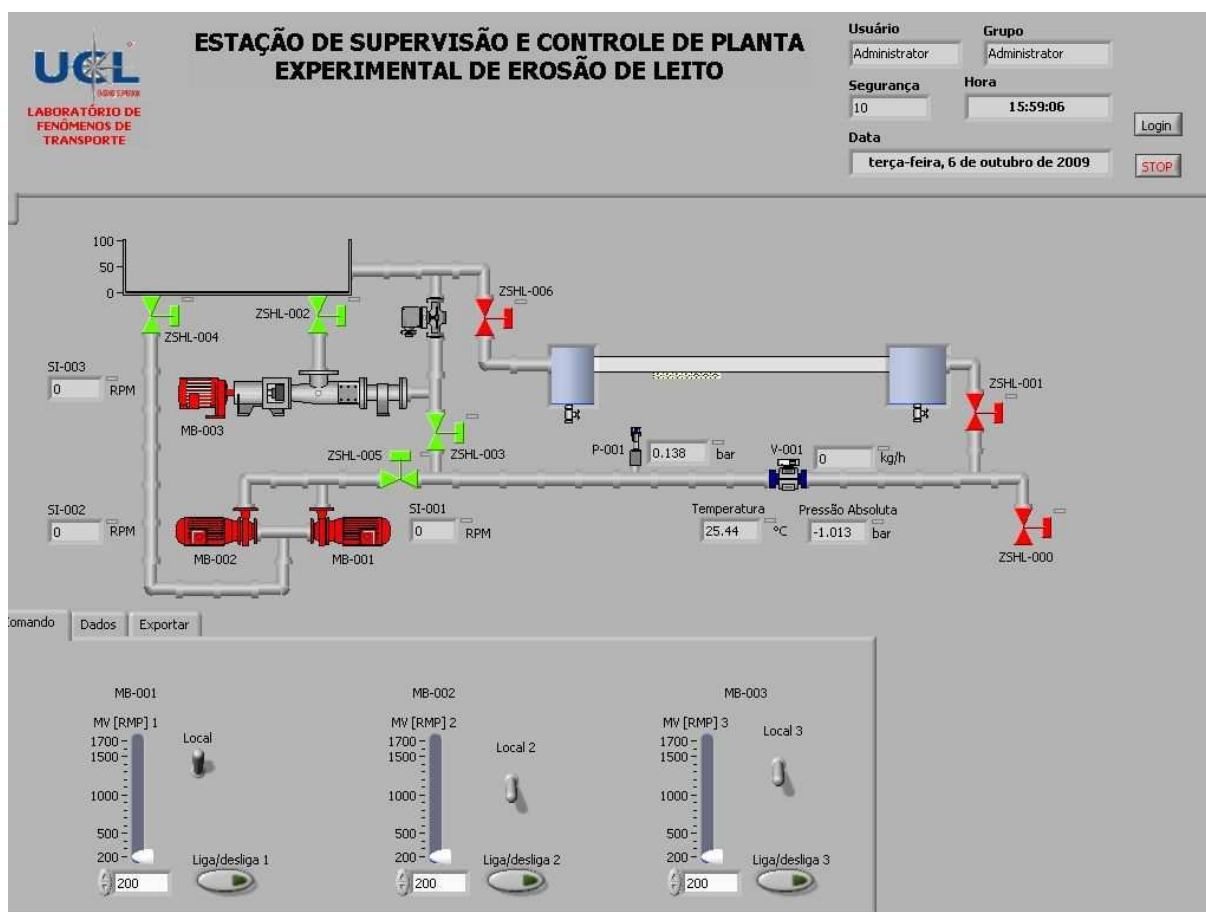


Figura 11 - Tela do Sistema Supervisório

2.4 Caracterização das partículas

Na empresa fornecedora da areia, as partículas são separadas por peneiramento em seis faixas granulométricas e colocadas em pacotes de 1kg que são identificados com os diâmetros mínimo e máximo dos grãos.

Inicialmente cada pacote de areia é peneirado para retirada de finos com o auxílio de uma peneira número 30 padronizada, mostrada na Figura 12. Os finos são gerados pelo atrito entre as próprias partículas durante a separação, empacotamento, transporte e manuseio.



Figura 12 - Peneira para retirada de finos

Depois do peneiramento é feita a homogeneização, misturando as partículas de mesma faixa granulométrica. As partículas são lavadas em água corrente para retirada de poeira e, depois de retirado o excesso de água, são secadas na estufa mostrada na Figura 13. Após cerca de 45 minutos na estufa, a temperaturas entre 100 e 120°C, as partículas são armazenadas em recipientes identificados, conforme Figura 14.



Figura 13 - Estufa para secagem das partículas



Figura 14 - Armazenamento das partículas

A verificação ou determinação das características das partículas de cada classe de leito pode ser realizada por peneiramento ou por processamento de imagens. O peneiramento consiste em separar os grãos de areia utilizando um conjunto de peneiras normalizadas pela ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Este método apresenta o resultado de forma rápida, para cada faixa de granulometria em fração de massa, embora possa degradar fisicamente a amostra em função do atrito de movimentação. A captura e processamento de imagens é um método moderno de análise de partículas e sua desvantagem é ser mais demorado que um método tradicional de peneiramento. Entretanto, o processamento de imagens é escolhido devido sua maior precisão e por obter mais informações, tais como a distribuição de diâmetro, circularidade, raio maior e raio menor, entre outras características.

A estação de trabalho utilizada é constituída de uma câmera para a captura da imagem das partículas e do programa Vision Assistant versão 7.1 da National Instruments para o processamento da imagem.

Para a captura das imagens são preparadas amostras de partículas, separadas nas seis faixas granulométricas. Cada grão de areia é colado de forma criteriosa e manual em cartões de aproximadamente quarenta centímetros quadrados. A colagem requer atenção, pois, o excesso de cola pode gerar brilho na captação da imagem prejudicando o processamento. Outra preocupação relevante é fazer uma separação suficiente das partículas a fim de não prejudicar a leitura do diâmetro de cada grão pelo programa. O controle da intensidade luminosa é importante para se obter contraste entre as partículas e o meio circunvizinho e impedir a formação de sombras ou áreas muito claras que sejam confundidas pelo programa como imagem de partícula a ser processada.

O programa é calibrado para converter pixels em milímetros a partir de uma referência incluída na parte superior do cartão de amostras, conforme mostra a Figura 15. O programa disponibiliza filtros que atuam no ajuste de brilho, de contraste e na retirada de ruídos, contribuindo na melhora da qualidade da imagem. O processamento é responsável por discretizar os contornos dos grãos, aplicar uma malha de leitura da imagem e converter cores e tons em uma máscara monocromática, com opções de configuração de sensibilidade ou método de conversão.

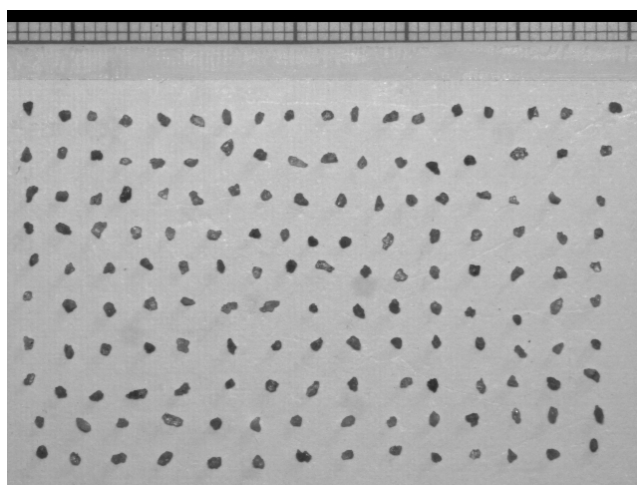


Figura 15 - Preparação da amostra para captação de imagem

Após o processamento, o programa gera uma imagem com as áreas correspondentes às partículas convertidas em pixel de acordo com os filtros aplicados, de modo que cada partícula é identificada. O resultado é apresentado através de uma planilha com os valores das características geométricas selecionadas para cada partícula, conforme mostra a Figura 16.

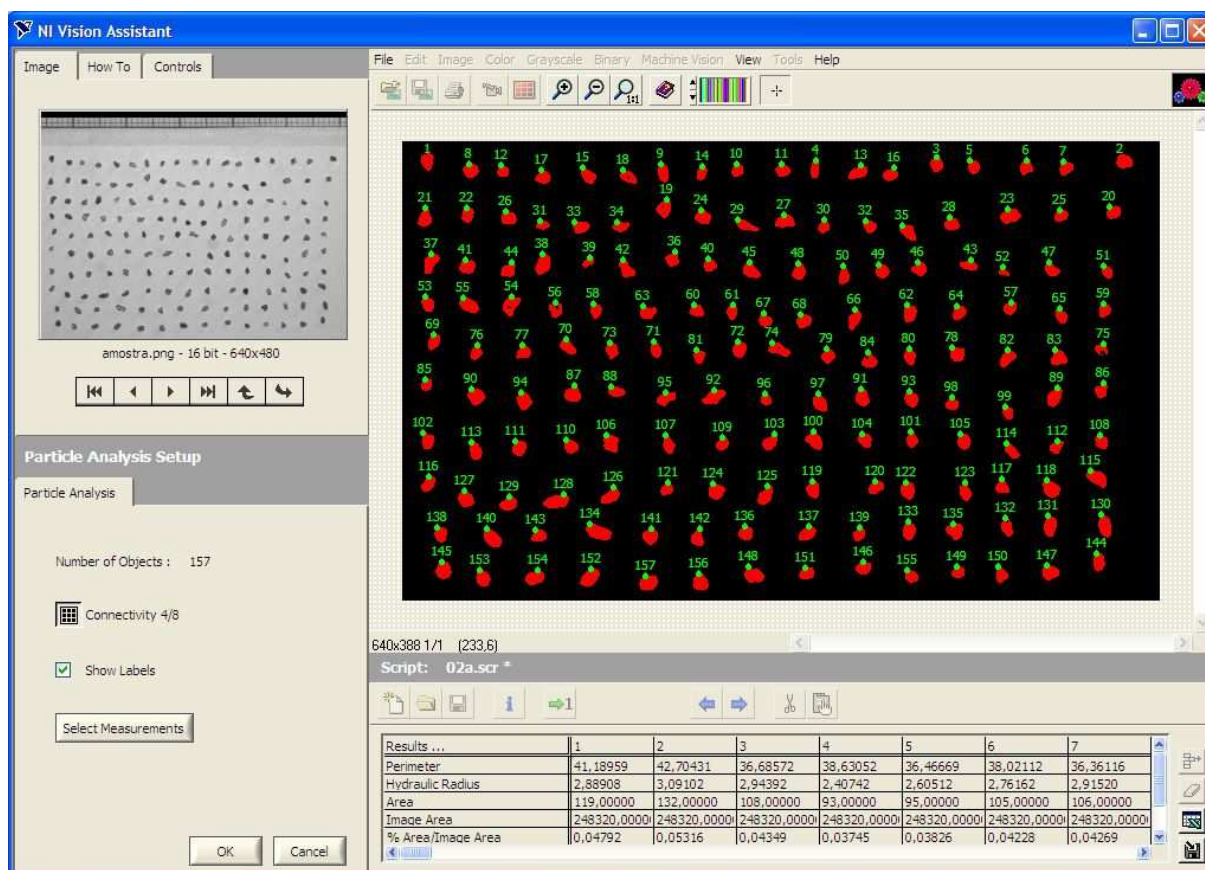


Figura 16 - Resultado do processamento de imagem

Na Tabela 3 estão as características das partículas. Os diâmetros médios obtidos são equivalentes a valores encontrados em processos reais de perfuração. A circularidade mostra o quão circular é a partícula em um plano, ou seja, quanto mais próximo o valor estiver da unidade, mais circular é a partícula.

Tabela 3 - Características geométricas das partículas do leito

Leito	Diâmetro médio	Circularidade
1	0,73 ± 0,09 mm	0,88 ± 0,05
2	0,79 ± 0,09 mm	0,86 ± 0,09
3	0,98 ± 0,11 mm	0,90 ± 0,06
4	1,20 ± 0,21 mm	0,85 ± 0,09
5	1,80 ± 0,16 mm	0,85 ± 0,09
6	2,20 ± 0,40 mm	0,93 ± 0,05

2.5 Caracterização do fluido de teste

A massa específica é medida a partir de um picnômetro de vidro de volume calibrado, conforme Figura 17, que deve ser limpo e manuseado com luvas para garantir a qualidade das medições.

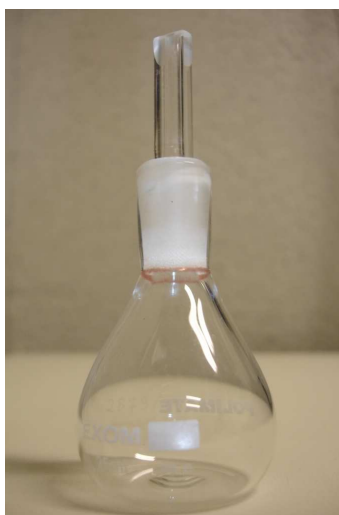


Figura 17 - Picnômetro de 25 ml, modelo GAY-LUSSAC, fabricante EXOM

O picnômetro vazio é pesado em uma balança de quatro casas decimais, conforme Figura 18. Posteriormente, o picnômetro é preenchido com o fluido de teste e colocado em um banho térmico para ajuste de temperatura. Em seguida o picnômetro é limpo externamente e pesado cheio na balança. O resultado de massa específica é determinado pela razão da diferença entre as duas pesagens pelo volume calibrado do picnômetro. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para medições realizadas a 25°C. O banho térmico mostrado na Figura 19 contém óleo de silicone onde são colocados o picnômetro e um termômetro para a confirmação da temperatura.

Tabela 4 - Massa específica dos fluidos de teste

Fluido	Massa específica
Água	997,048 kg/m ³
Solução água-glicerina 1	1082,04 kg/m ³
Solução água-glicerina 2	1139,69 kg/m ³
Solução água-glicerina 3	1161,23 kg/m ³



Figura 18 - Balança modelo XS204, fabricante Mettler Toledo



Figura 19 - Banho de 2800W, modelo TV4000 da PM Tamson Instruments

Em um viscosímetro, a viscosidade cinemática do fluido analisado é obtida através do produto de sua constante característica pelo tempo de escoamento vertical do fluido numa distância determinada do tubo capilar. A constante característica do viscosímetro é função principalmente do diâmetro de seu tubo capilar. Enquanto o viscosímetro capilar é um instrumento projetado para medir especificamente a viscosidade, o reômetro permite a medição de diversos parâmetros reológicos, sendo mais indicado para a caracterização de fluidos não newtonianos. Entretanto, devido à ausência de um viscosímetro capilar, as viscosidades dinâmicas dos fluidos de teste são medidas por um reômetro de rolamento a ar, conforme Figura 20. [36]



Figura 20 - Reômetro modelo MCR 501, fabricante Anton Paar

No reômetro é utilizada a alternativa de medição rotacional por geometria tipo cilindro coaxial. A composição básica da geometria corresponde a um cilindro externo e a outro interno, onde um dos dois não se move enquanto o outro pode girar. Uma amostra do fluido de teste é colocada na geometria de modo a preencher o espaço anular entre os cilindros. Quando um dos cilindros gira a amostra é submetida a um cisalhamento. O fluxo pode ser entendido como o deslocamento de camadas concêntricas situadas umas dentro das outras. [36]

A medição dos fluidos de teste é realizada por uma geometria *double gap*, ou seja, de dupla região anular para baixas viscosidades. Neste caso, o cilindro externo, denominado copo, possui também um cilindro interno formando por si só uma região anular e o rotor é um cilindro oco que ao se posicionar dentro do copo divide a área do fluido em duas regiões anulares, conforme Figura 21. O copo é fixo e envolto por um controlador de temperatura da amostra, composto por um trocador de calor externo. O rotor é movimentado por um motor que força a amostra fluir.



Figura 21 - Copo e Rotor para formação da geometria *double gap*

O modo de teste utilizado no reômetro é através da determinação da tensão de cisalhamento a partir do controle de taxa de cisalhamento. O motor do reômetro produz um torque no rotor e reagindo à esta ação a resistência da amostra cria uma tensão de cisalhamento relacionada à viscosidade do fluido. O valor de viscosidade é obtido mediante à atuação de um detector de torque entre o motor e a haste do rotor. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 5, para medições realizadas a 25°C, com taxa de cisalhamento fixa em 600 rad/s. [36]

Tabela 5 - Viscosidade dinâmica dos fluidos de teste

Fluido	Viscosidade dinâmica
Água	0,0010 Pa.s
Solução água-glicerina 1	0,0025 Pa.s
Solução água-glicerina 2	0,0070 Pa.s
Solução água-glicerina 3	0,0110 Pa.s

A Figura 22 apresenta a curva de variação da viscosidade da solução água-glicerina em função da variação da concentração de glicerina e também em função da variação de sua temperatura.

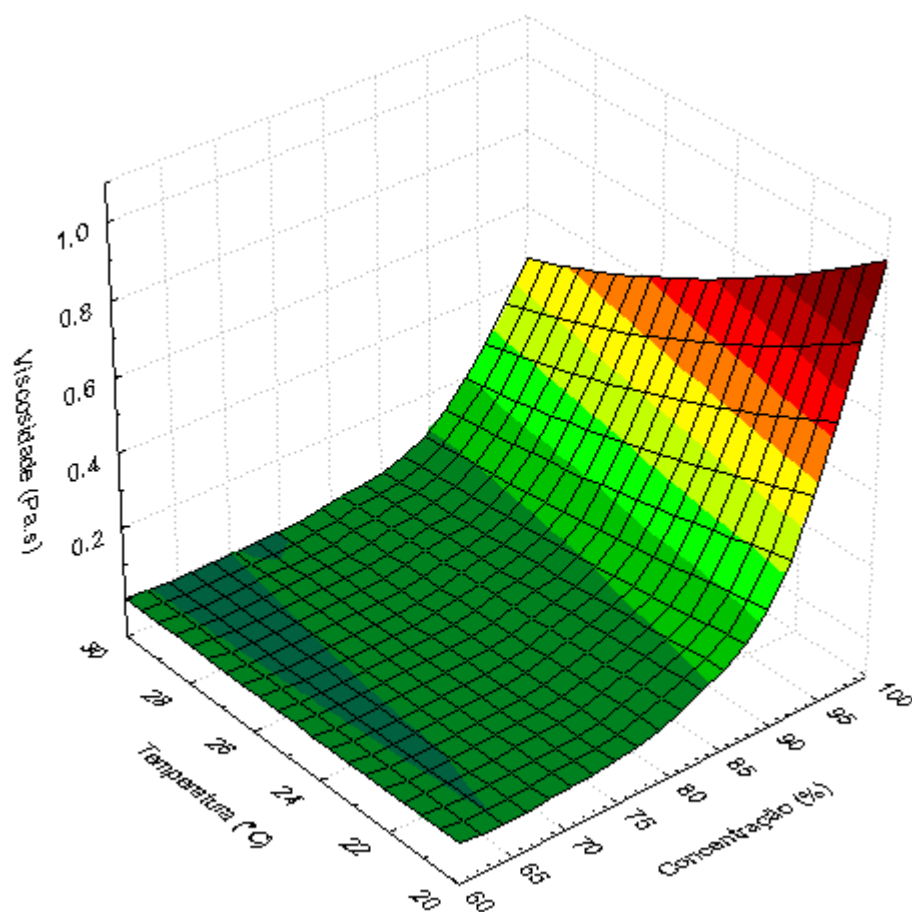


Figura 22 - Perfil da viscosidade com a temperatura e a concentração de glicerina

No gráfico, pode ser observado um perfil de variação não linear da viscosidade com a variação da concentração de glicerina, descrevendo maior variação para baixas temperaturas. Além disso, a solução demonstra maior decaimento de viscosidade em maiores concentrações de glicerina para uma mesma variação de temperatura. Isto significa que soluções água-glicerina de baixas e médias concentrações sofrem menos influência da variação de temperatura. Para obter a viscosidade desejada é possível saber no gráfico a concentração de glicerina requerida, tendo como referência a temperatura de trabalho do fluido.

O valor da viscosidade da solução água-glicerina depende de sua temperatura. Desta forma, a temperatura do fluido é monitorada em conjunto com a realização dos testes e registro dos resultados experimentais. Os testes experimentais são realizados com o fluido em torno de 25°C. Em consonância, para a caracterização dos fluidos é feito o controle da temperatura de medição em 25°C.

Capítulo 3

Procedimento experimental

O princípio básico dos testes experimentais é a medição da vazão do escoamento no início da erosão do leito de partículas. Posteriormente, determina-se a tensão de cisalhamento correspondente a essa vazão mínima de erosão do leito. Para a identificação do estágio inicial da erosão são capturadas imagens do escoamento. As fotos do arraste das partículas são processadas em um programa computacional permitindo mensurar o carreamento dos grãos de areia para a identificação do estágio inicial da erosão.

3.1 Metodologia de obtenção dos dados experimentais

O teste inicia com a preparação do leito de partículas. O duto de acrílico deve estar sem fluido para facilitar o nivelamento do leito sedimentado. As partículas são umedecidas do fluido a ser utilizado no teste e posteriormente colocadas na caixa de cascalhos através da escotilha. O leito é nivelado de modo que as partículas fiquem abaixo da linha de escoamento.

O fluido já caracterizado e ora armazenado em bombonas é recolocado no sistema a partir do reservatório. As válvulas são abertas gradativamente para que o fluido preencha o duto de acrílico de forma suave, sem prejudicar o nivelamento do leite de partículas e evitando o aparecimento de bolhas de ar.

Para as medições, iniciam-se as bombas com baixa rotação e então são feitos incrementos de frequência. A cada patamar de frequência são capturadas imagens do escoamento logo após a caixa de cascalhos. As medições de vazão do fluido, pressão na tubulação e rotação das bombas são apresentadas continuamente na tela do sistema supervisor, sendo armazenadas no banco de dados.

Após as medições e os registros das imagens, o duto de acrílico deve ser esvaziado para a substituição das partículas. O procedimento de medição e registro de imagens deve ser realizado para todas as classes de leite. Com a conclusão da primeira bateria de testes, um novo fluido deve ser preparado e caracterizado, substituindo o fluido anterior para permitir nova bateria de testes com todas as granulometrias de partículas.

Caso haja vazamentos no duto de acrílico é necessário identificar os pontos, esvaziar o duto, secar bem o local, proceder a colagem e esperar a secagem total da cola. Ao se esvaziar o duto de acrílico o fluido precisa ser armazenado em duas bombonas de cerca de 200 litros, uma vez que o sistema trabalha com aproximadamente 600 litros, mas seu reservatório pulmão tem capacidade de apenas 310 litros.

3.2 Método de processamento de imagens

Inicialmente é feito o posicionamento da câmera e são ajustados foco e intensidade luminosa. Com a circulação do fluido é executada uma seqüência de 30 fotos para cada patamar de vazão. As imagens são capturadas após dois minutos da alteração de rotação das bombas, permitindo a estabilização do escoamento. Posteriormente as imagens são individualmente processadas no programa NI Vision Assistant. A captura de uma foto da área de observação sem a presença de partículas é importante para aplicação no processamento das imagens como foto de referência.

Para o processamento de cada imagem, carrega-se a imagem de referência e aplicam-se as ferramentas do programa, obtendo dados quantitativos para análise. A seqüência do processamento pode ser observada na exemplificação apresentada na Figura 23, sendo:

- (a) imagem de referência;
- (b) imagem original;
- (c) imagem resultante da original subtraída a referência;
- (d) convertida de 16 para 8 bits;
- (e) ajustados brilho, contraste e gama;
- (f) atenuadas as variações de intensidade de luz;
- (g) com criação de uma malha de valores 0 e 1;
- (h) selecionada a amplitude de interesse na escala de cinza;
- (i) invertida a informação binária obtida.

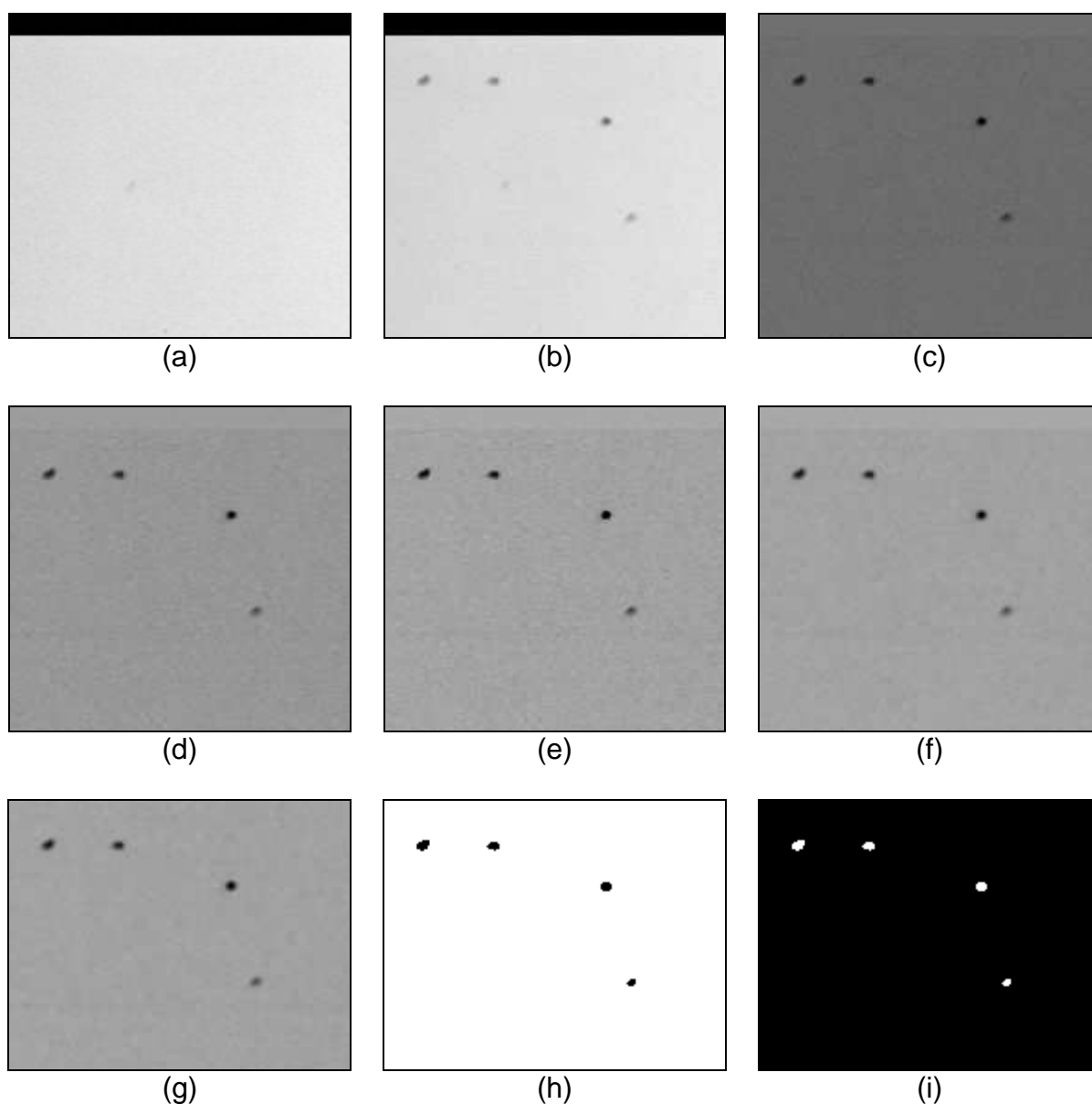


Figura 23 - Processamento de imagem

O resultado do processamento é a área das partículas presentes em cada imagem e a unidade de apresentação dos resultados é pixel. Posteriormente, para se obter a área média de partículas carregadas em cada patamar de vazão é feita a média entre as imagens de cada respectivo grupo de 30 fotos. Finalmente, analisando as imagens e os resultados numéricos é possível definir o momento em que o carregamento das partículas deixa de ser aleatório e esporádico e começa a ser permanente, caracterizando o início da erosão do leito.

3.3 Método de obtenção do instante inicial da erosão

O processamento da imagem fornece o valor total de pixel por foto. Este número corresponde à soma das áreas de todas as partículas presentes na foto. A câmera de captura de imagens é instalada logo após a caixa de cascalhos, registrando aumento da quantidade de partículas por foto, à medida que a erosão do leito aumenta. Conseqüentemente, o valor numérico resultante do processamento de imagem também é maior com o aumento da erosão, podendo ser adotado como parâmetro de medição da erosão de leito. A medida da erosão do leito é um valor médio decorrente da variação da quantidade de partículas presentes nas 30 fotos seqüenciais capturadas em cada patamar de vazão.

O objetivo dessa medição é definir o instante inicial da erosão de cada classe de leito de partículas, com os quatro fluidos testados. Para esta definição é analisada a variação da erosão do leito com o aumento da vazão do fluido e a variação da derivada da erosão em relação à vazão. A vazão do escoamento no momento inicial da erosão é considerada a vazão mínima de erosão de leito.

Os dados analisados são apresentados nas Figuras 24 a 31, identificando o instante inicial da erosão definido para cada classe de leito. A Tabela 6 apresenta os valores da vazão mínima de erosão identificados nos gráficos.

Tabela 6 - Valores de vazão mínima para erosão de leito sedimentado

Leito (Partícula)	Água (kg/h)	Solução água-glicerina 1 (kg/h)	Solução água-glicerina 2 (kg/h)	Solução água-glicerina 3 (kg/h)
1	18109	23447	25433	26415
2	18629	24715	27268	27661
3	19462	25120	27933	28804
4	22185	25584	29444	31176
5	26719	29862	30411	32400
6	28559	32505	33551	35982

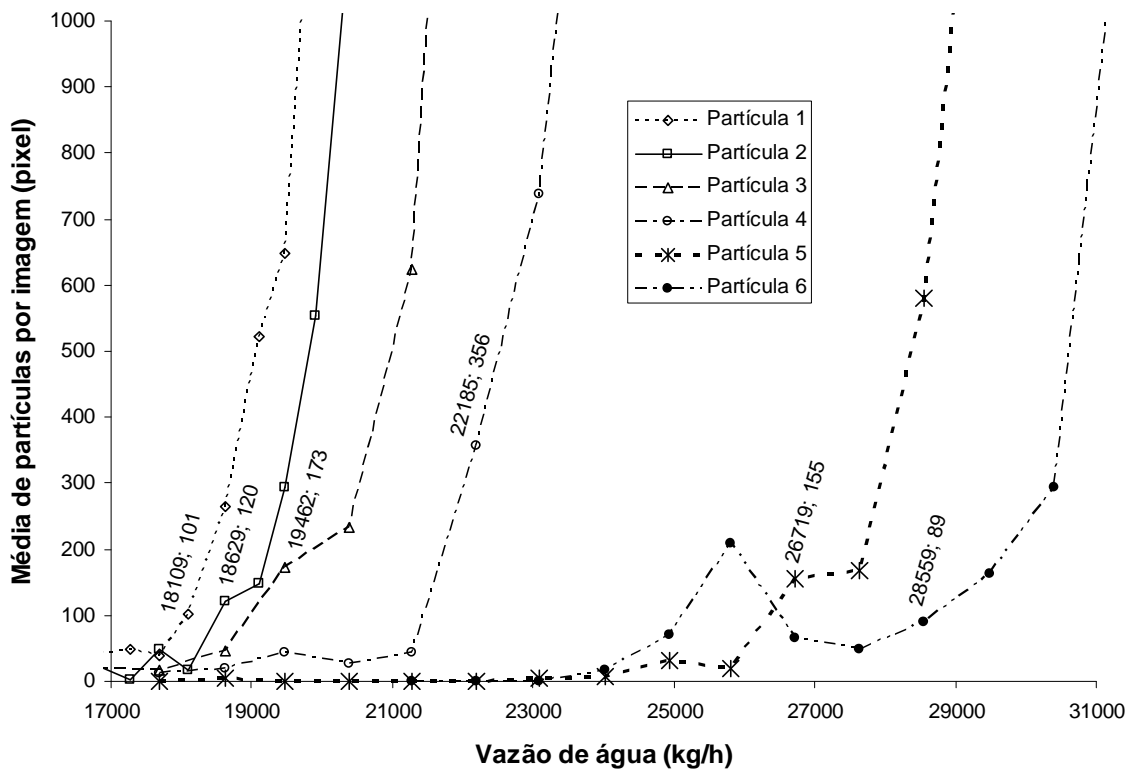


Figura 24 - Curva de erosão de leito com o escoamento de água

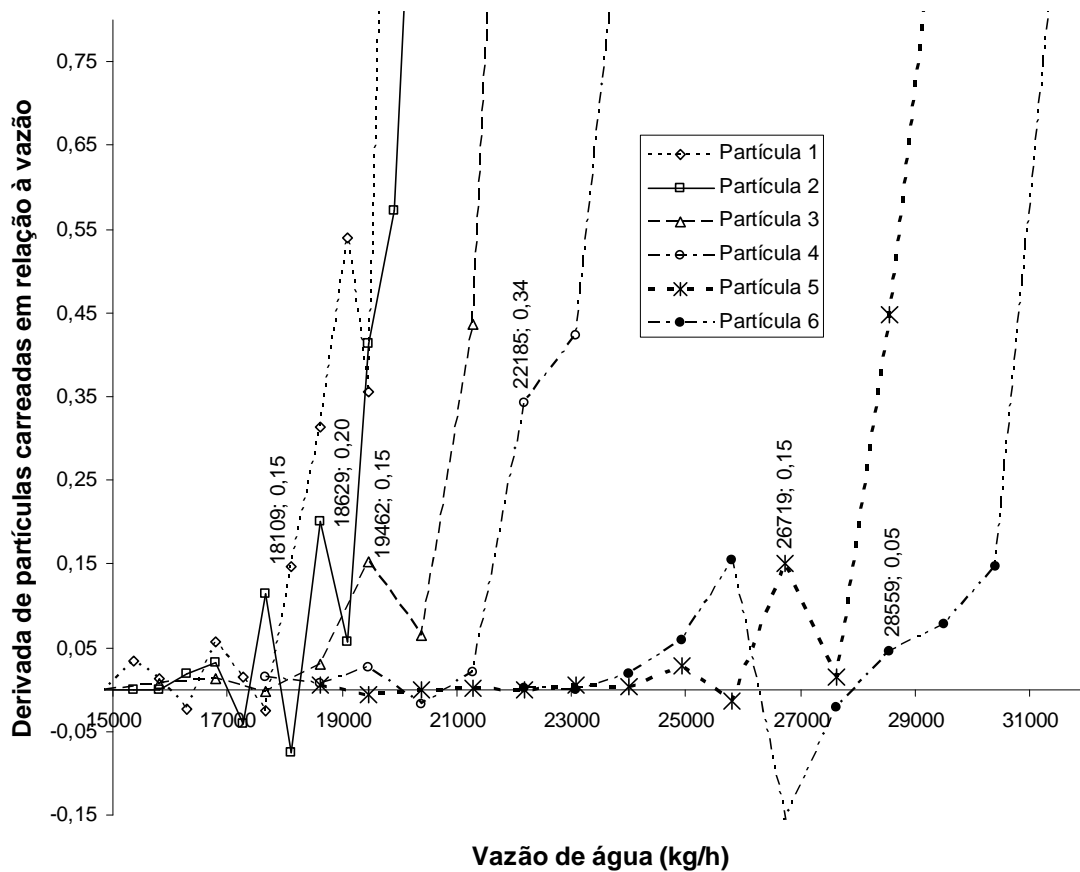


Figura 25 - Curva da derivada da erosão em relação à vazão de água

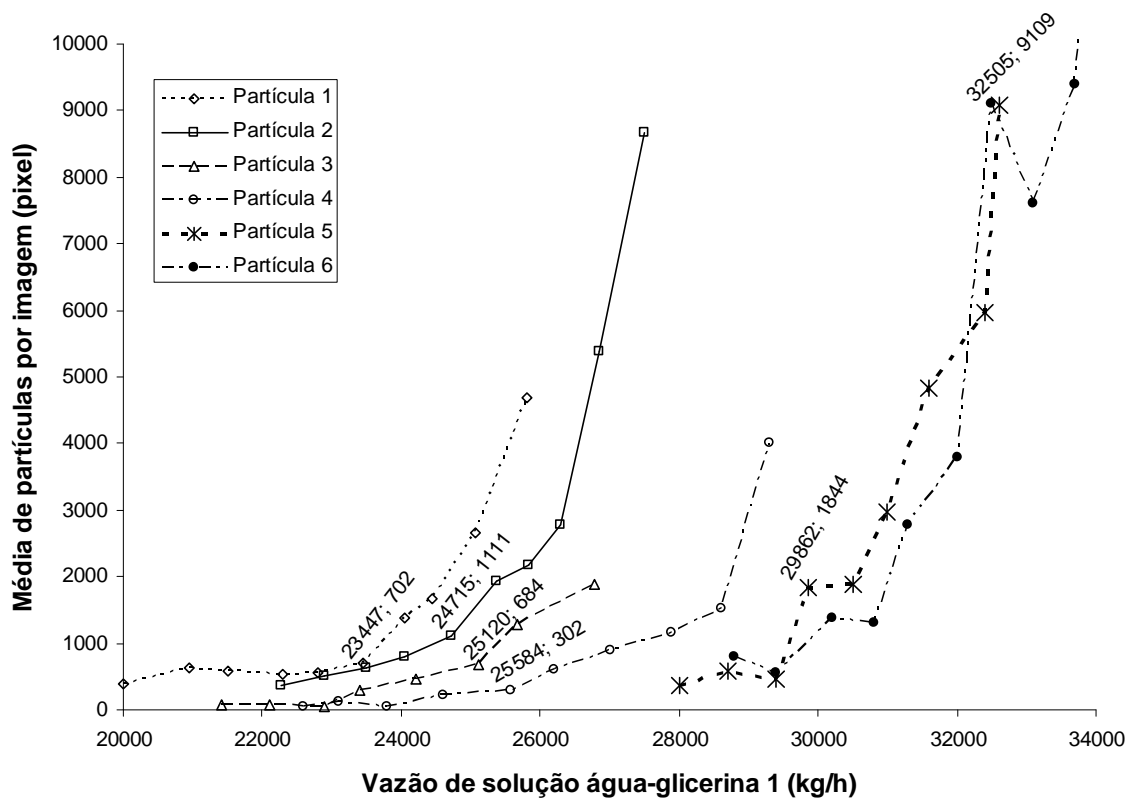


Figura 26 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 1

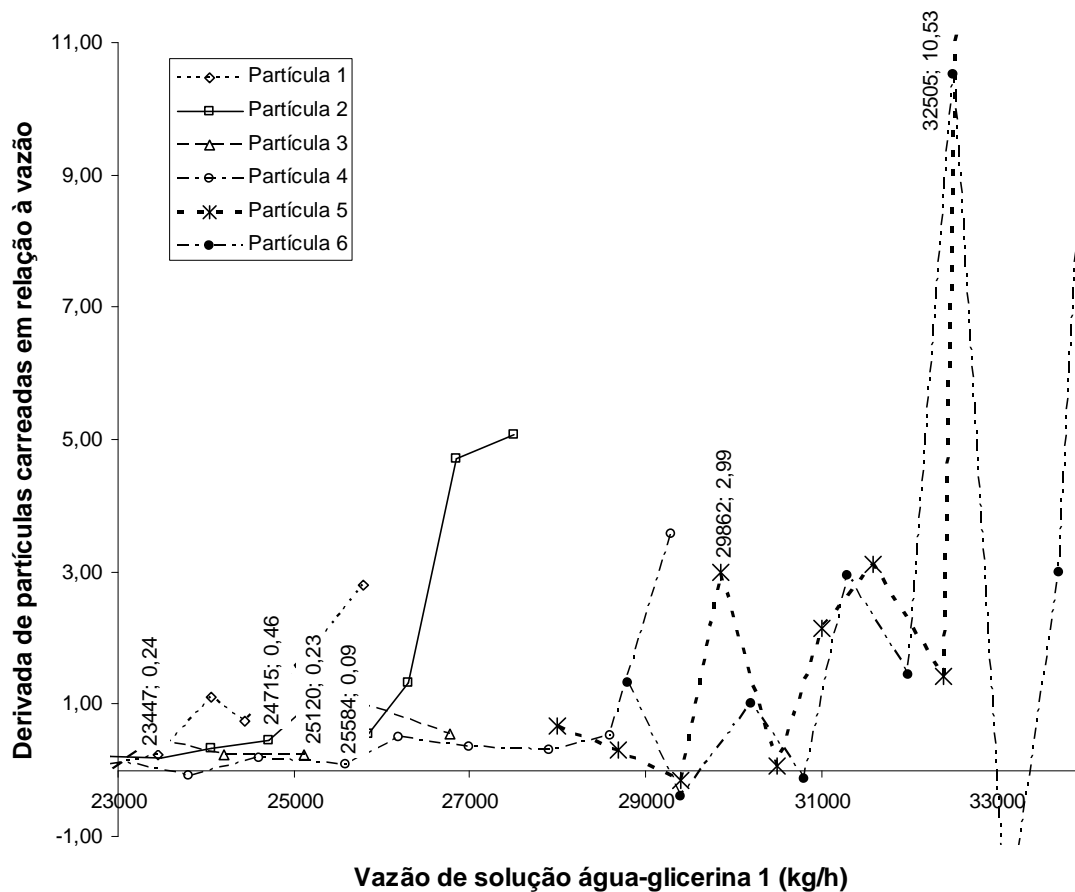


Figura 27 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 1

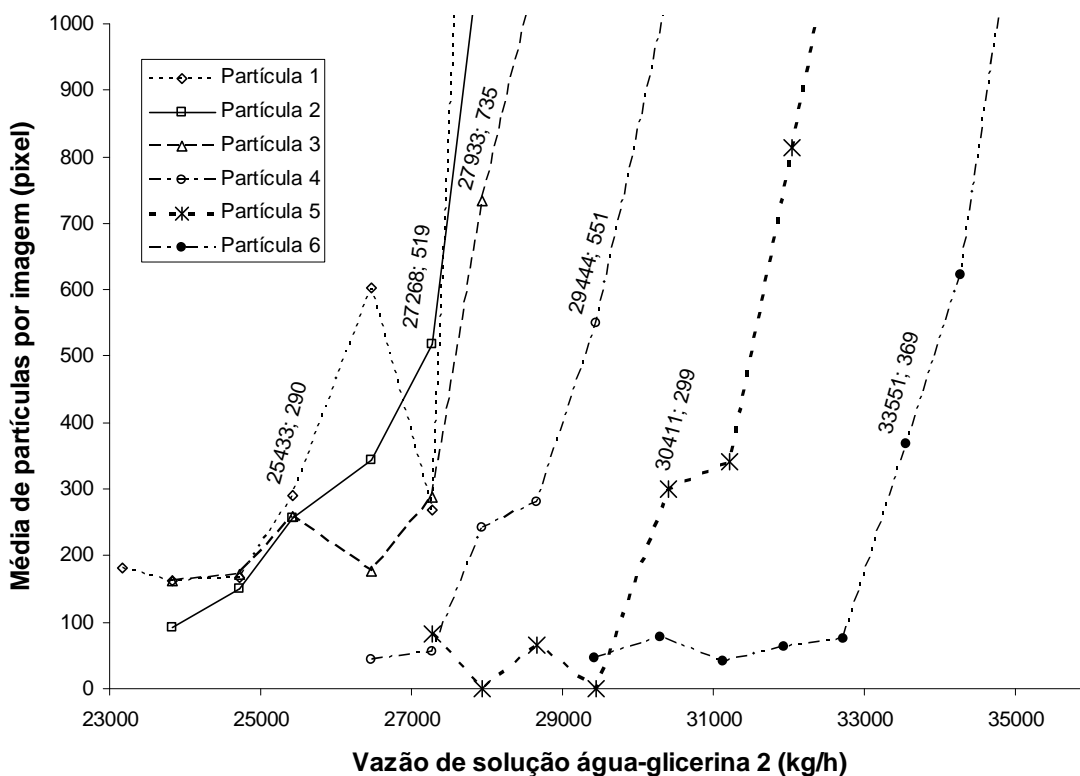


Figura 28 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 2

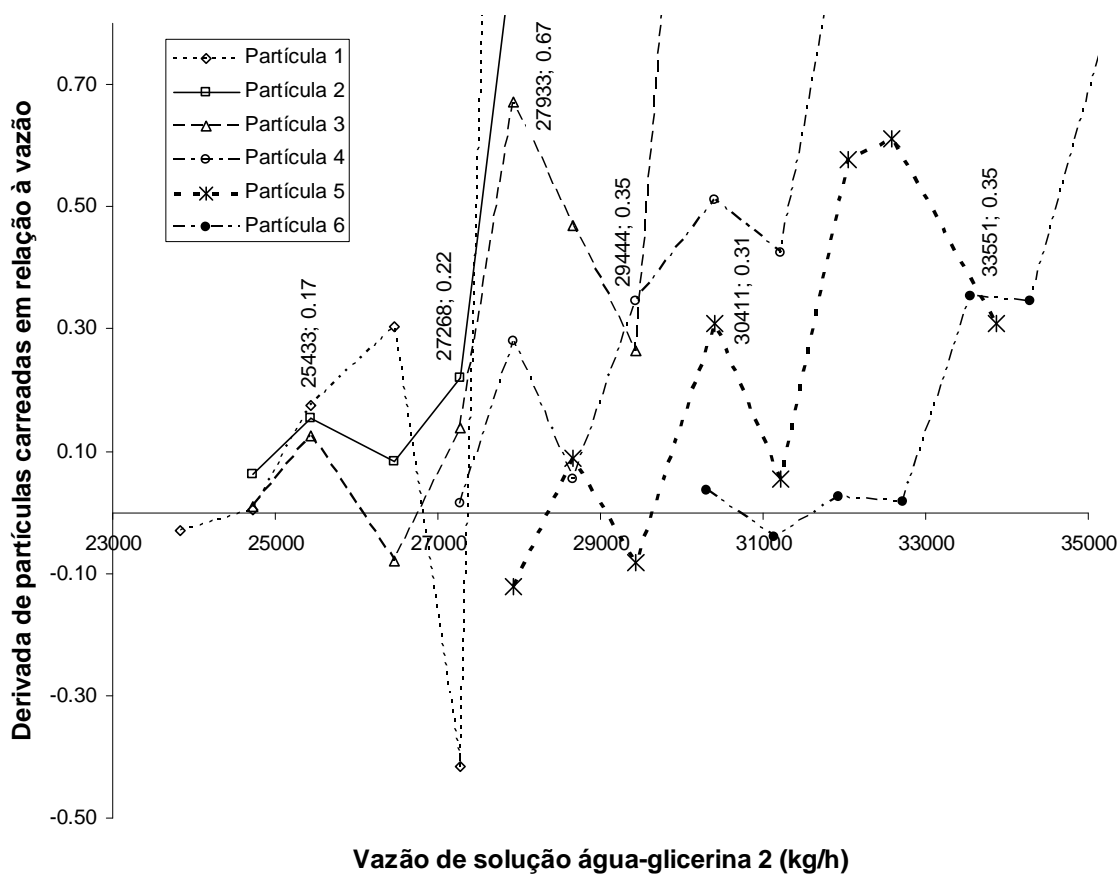


Figura 29 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 2

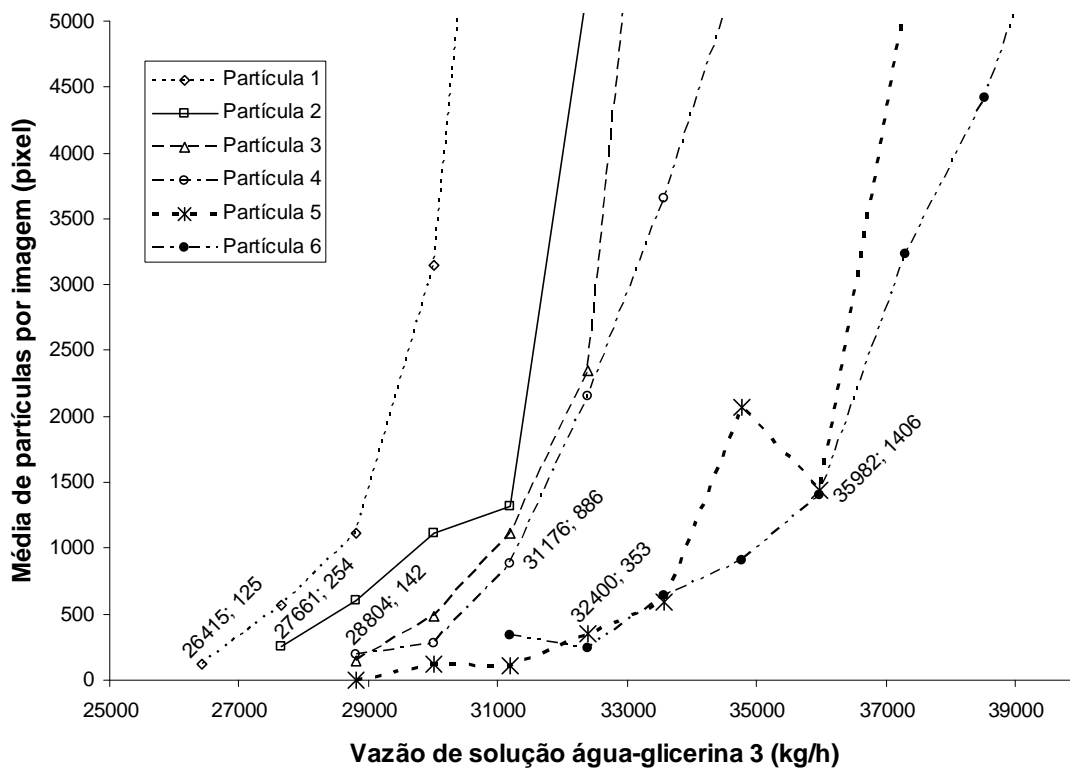


Figura 30 - Curva de erosão de leito com o escoamento da solução 3

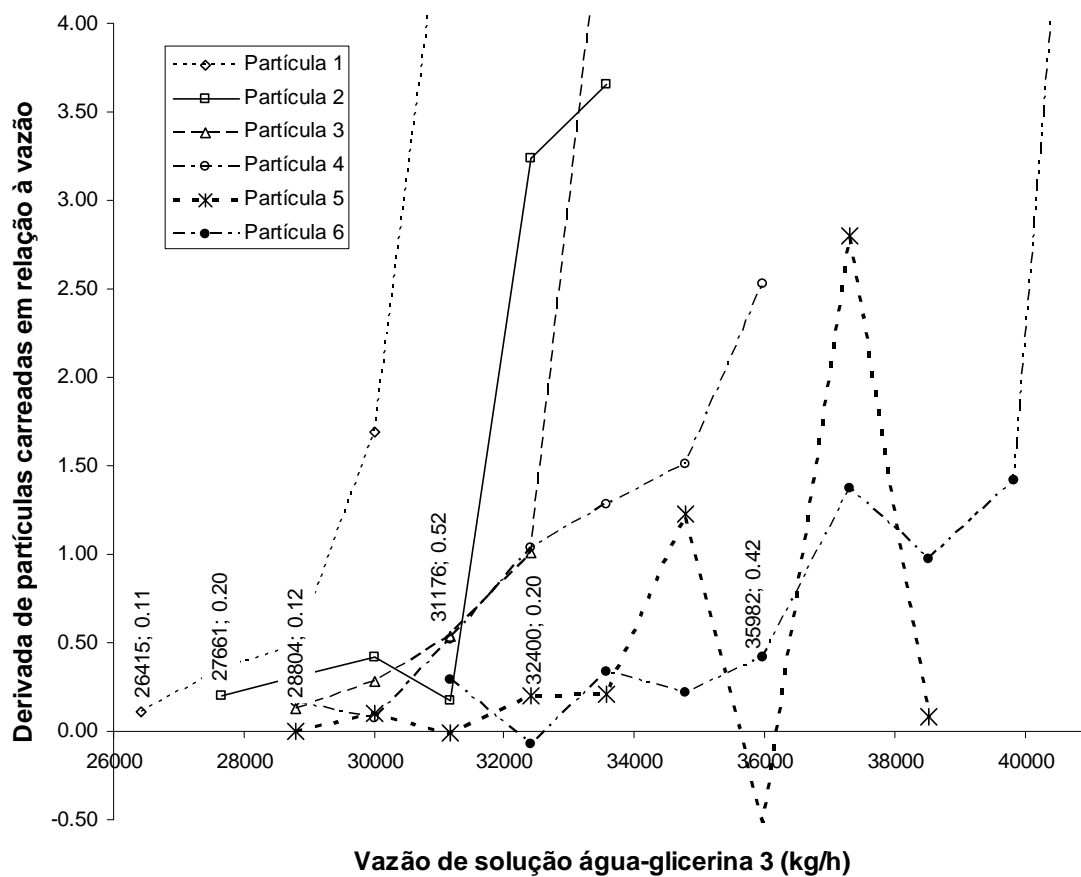


Figura 31 - Curva da derivada em relação à vazão da solução água-glicerina 3

As Figuras 32 a 35 exemplificam a progressão da erosão de leito através de fotos de partículas sendo carreadas logo após a caixa de cascalhos. O universo de imagens capturadas e processadas para geração dos dados numéricos são também utilizadas como auxílio visual na definição do instante inicial de erosão. As Figuras 32 a 35 correspondem aos testes realizados com água para o leito classe 1. Primeiramente, apresenta-se a Figura 32, sendo uma das 30 fotos capturadas no patamar de vazão anterior ao início da erosão do leito sedimentado. Em seguida, a Figura 33 refere-se ao momento inicial da erosão do leito. Posteriormente, a Figura 34 é uma das fotos do patamar de vazão posterior ao instante inicial da erosão. Por fim, é mostrada a Figura 35, que representa uma elevada taxa de erosão.



Figura 32 - Imagem com 35 pixels de partículas na vazão de 17678 kg/h



Figura 33 - Imagem com 106 pixels de partículas na vazão de 18109 kg/h

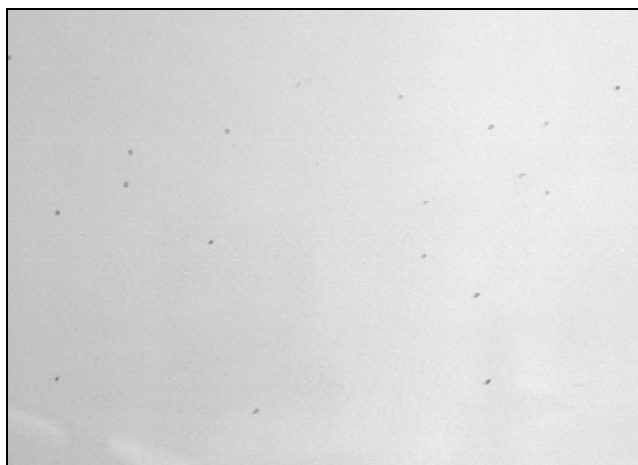


Figura 34 - Imagem com 264 pixels de partículas na vazão de 18629 kg/h

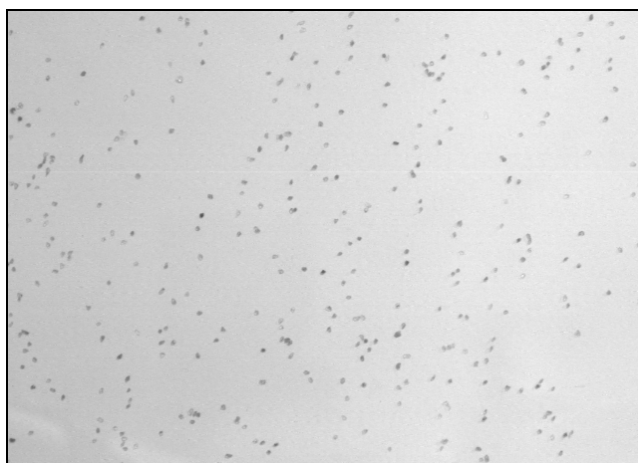


Figura 35 - Imagem com 5195 pixels de partículas na vazão de 21274 kg/h

Capítulo 4

Resultados

O trabalho considera a hipótese de que a força de cisalhamento é a única responsável pelo carregamento das partículas. Outra consideração é a existência de uma tensão de cisalhamento mínima, de modo que, para valores acima dessa tensão de referência ocorre a erosão do leito e, para valores abaixo as partículas não são carregadas.

Os testes experimentais permitem identificar e medir a vazão mínima para erosão do leito de partículas sedimentadas, observando quatro diferentes fluidos e seis leitos de partículas sedimentadas. A partir desses valores, é possível determinar a tensão de cisalhamento mínima para erosão de leito.

As vazões do escoamento durante o arraste das partículas são registradas no medidor “Coriolis” e de acordo com a definição do momento de início da erosão é estabelecida a vazão mínima para a erosão do leito sedimentado. O valor de vazão mínima obtido é utilizado para o cálculo da velocidade média e do número de Reynolds do escoamento.

A tensão de cisalhamento mínima para erosão de leito é determinada com base na correlação PKN para escoamento turbulento totalmente desenvolvido, apresentada no Capítulo 3. Os resultados de tensão de cisalhamento mínima são obtidos em função do leito sedimentado para os quatro fluidos newtonianos: água e soluções água-glicerina 1, 2 e 3.

A Tabela 7 mostra os dados característicos dos fluidos de teste e das partículas, assim como, os resultados decorrentes dos parâmetros medidos e dos cálculos implementados.

Tabela 7 - Dados de referência e resultados de tensão de cisalhamento mínima

Fluidos μ (Pa.s)	Fluidos ρ (kg/m ³)	Leitos d_p (m)	Escoamento \bar{u} (m/s)	Escoamento τ (Pa)
0,0010	997,048	0,00073	0,263	0,161
0,0010	997,048	0,00079	0,270	0,169
0,0010	997,048	0,00098	0,282	0,183
0,0010	997,048	0,00120	0,322	0,231
0,0010	997,048	0,00180	0,388	0,323
0,0010	997,048	0,00220	0,414	0,364
0,0025	1082,04	0,00073	0,314	0,287
0,0025	1082,04	0,00079	0,330	0,315
0,0025	1082,04	0,00098	0,336	0,324
0,0025	1082,04	0,00120	0,342	0,335
0,0025	1082,04	0,00180	0,399	0,441
0,0025	1082,04	0,00220	0,435	0,513
0,0070	1139,69	0,00073	0,323	0,401
0,0070	1139,69	0,00079	0,346	0,453
0,0070	1139,69	0,00098	0,355	0,473
0,0070	1139,69	0,00120	0,374	0,518
0,0070	1139,69	0,00180	0,386	0,549
0,0070	1139,69	0,00220	0,426	0,652
0,0110	1161,23	0,00073	0,329	0,472
0,0110	1161,23	0,00079	0,345	0,511
0,0110	1161,23	0,00098	0,359	0,548
0,0110	1161,23	0,00120	0,388	0,629
0,0110	1161,23	0,00180	0,404	0,673
0,0110	1161,23	0,00220	0,448	0,808

Outro dado característico da montagem experimental é o diâmetro hidráulico corrigido do duto retangular igual a 0,33 m, calculado conforme método apresentado no Capítulo 3. A massa específica dos cascalhos é 2650 kg/m^3 .

O gráfico da Figura 36 mostra a influência do diâmetro médio das partículas do leito sobre a tensão de cisalhamento mínima. Para os quatro fluidos testados, os valores da tensão de cisalhamento mínima para a erosão do leito possuem a mesma tendência de aumento com a substituição das partículas do leito por grãos de maior diâmetro. Isto significa dizer que os leitos constituídos de partículas de maior diâmetro requerem maior tensão de cisalhamento mínima para a erosão em quaisquer das viscosidades testadas.

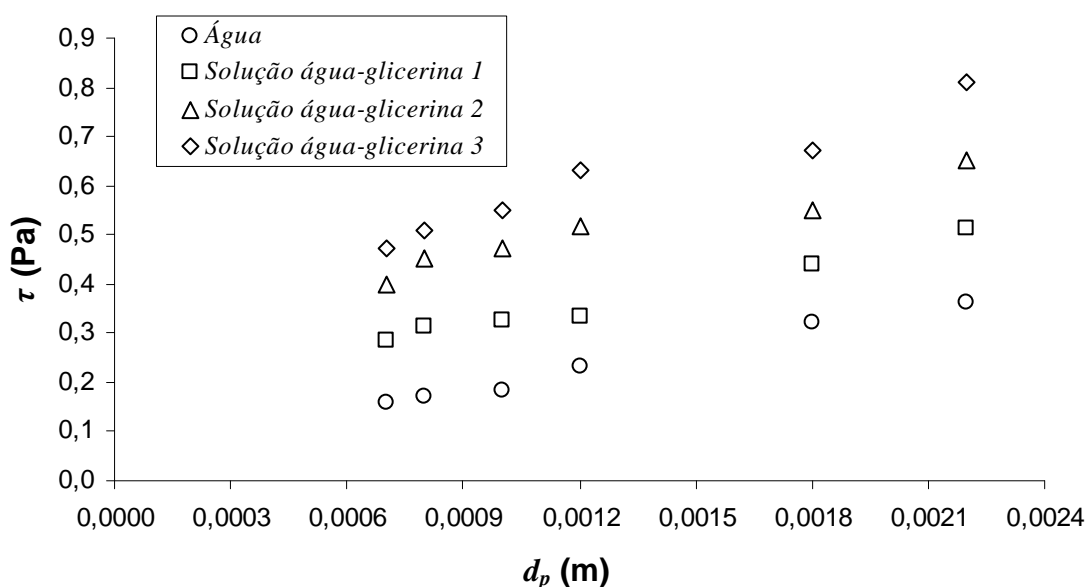


Figura 36 - Influência do diâmetro na tensão de cisalhamento mínima

A Tabela 8 mostra os dados obtidos para os grupos adimensionais que governam o problema de suspensão de partículas em um leito horizontal. São apresentados os valores da razão da massa específica dos fluidos pela massa específica das partículas, da razão do diâmetro médio das partículas pelo diâmetro hidráulico, de número de Reynolds do escoamento e da tensão de cisalhamento mínima adimensionalizada.

Tabela 8 - Dados adimensionais do problema de erosão de leito

Fluido	Partículas	Escoamento	Tensão de Cisalhamento Mínima
ρ / ρ_p	d_p / D_l	$\rho \bar{u} D_l / \mu$	$\tau / \rho \bar{u}^2$
0,376	0,0021	$8,77 \times 10^4$	$2,34 \times 10^{-3}$
0,376	0,0024	$9,02 \times 10^4$	$2,32 \times 10^{-3}$
0,376	0,0030	$9,42 \times 10^4$	$2,30 \times 10^{-3}$
0,376	0,0036	$1,07 \times 10^5$	$2,24 \times 10^{-3}$
0,376	0,0054	$1,29 \times 10^5$	$2,16 \times 10^{-3}$
0,376	0,0066	$1,38 \times 10^5$	$2,13 \times 10^{-3}$
0,408	0,0021	$4,54 \times 10^4$	$2,70 \times 10^{-3}$
0,408	0,0024	$4,79 \times 10^4$	$2,67 \times 10^{-3}$
0,408	0,0030	$4,86 \times 10^4$	$2,66 \times 10^{-3}$
0,408	0,0036	$4,95 \times 10^4$	$2,64 \times 10^{-3}$
0,408	0,0054	$5,78 \times 10^4$	$2,56 \times 10^{-3}$
0,408	0,0066	$6,29 \times 10^4$	$2,51 \times 10^{-3}$
0,430	0,0021	$1,76 \times 10^4$	$3,37 \times 10^{-3}$
0,430	0,0024	$1,89 \times 10^4$	$3,32 \times 10^{-3}$
0,430	0,0030	$1,93 \times 10^4$	$3,30 \times 10^{-3}$
0,430	0,0036	$2,04 \times 10^4$	$3,25 \times 10^{-3}$
0,430	0,0054	$2,10 \times 10^4$	$3,23 \times 10^{-3}$
0,430	0,0066	$2,32 \times 10^4$	$3,15 \times 10^{-3}$
0,438	0,0021	$1,16 \times 10^4$	$3,75 \times 10^{-3}$
0,438	0,0024	$1,22 \times 10^4$	$3,70 \times 10^{-3}$
0,438	0,0030	$1,27 \times 10^4$	$3,67 \times 10^{-3}$
0,438	0,0036	$1,37 \times 10^4$	$3,59 \times 10^{-3}$
0,438	0,0054	$1,43 \times 10^4$	$3,56 \times 10^{-3}$
0,438	0,0066	$1,58 \times 10^4$	$3,46 \times 10^{-3}$

A partir da adimensionalização realizada, pode-se obter a influência do número de Reynolds na tensão de cisalhamento mínima adimensional de erosão do leito sedimentado, conforme apresentado na Figura 37. São apresentados os pontos de início de carregamento das seis classes de partículas para os quatro fluidos newtonianos. O ponto de maior número de Reynolds, para um mesmo fluido, corresponde à partícula de maior diâmetro e os demais pontos correspondem de forma decrescente às demais classes de partículas. Verifica-se ainda pela Figura 37 que o escoamento de maior razão de massa específica apresenta menor variação de número de Reynolds com a substituição das partículas do leito sedimentado. Por outro lado, para a mesma classe de partículas, o processo de erosão de leito requer

uma tensão de cisalhamento adimensional menor no escoamento de menor razão de massa específica. Neste ponto o escoamento é caracterizado por maior turbulência, o que indica que a turbulência facilita a erosão do leito sedimentado de partículas.

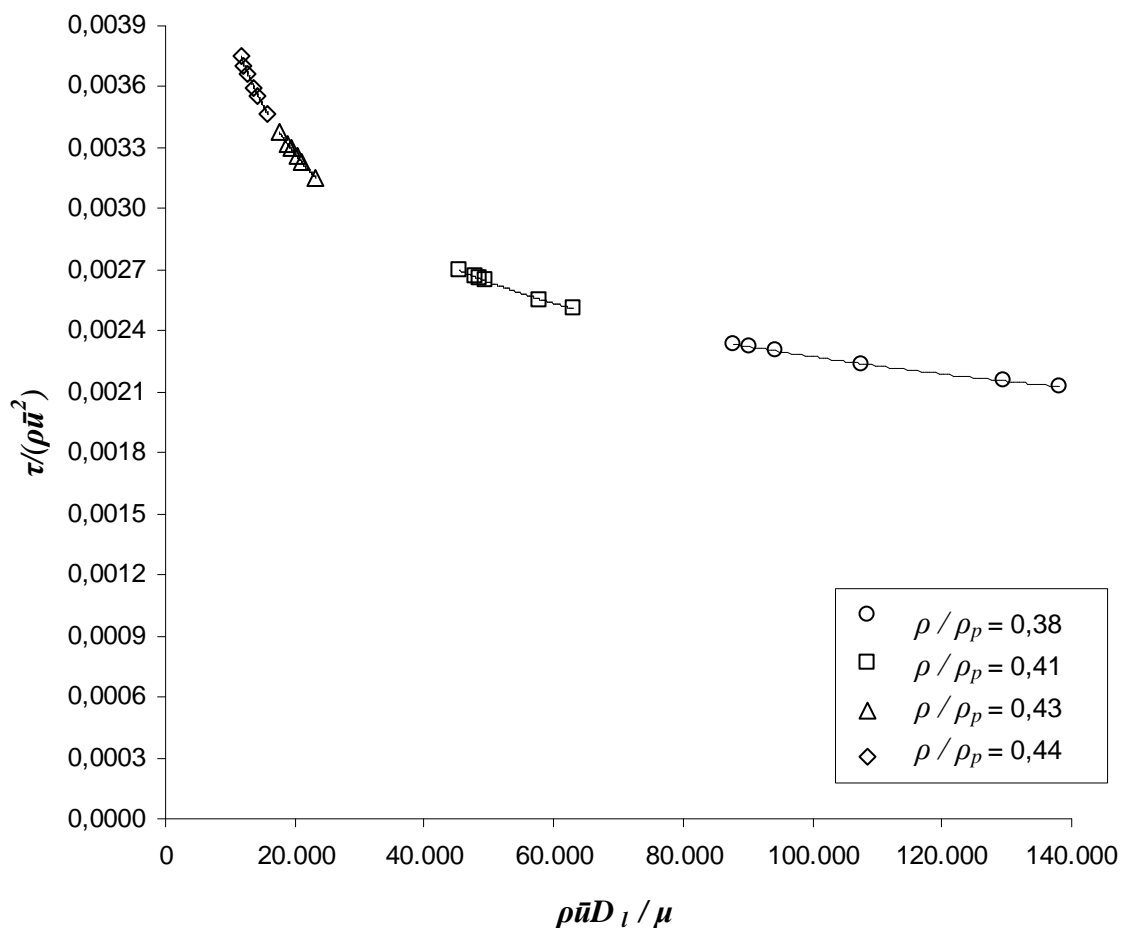


Figura 37 - Influência do número de Reynolds na tensão de cisalhamento mínima adimensional para as seis classes de leito em cada fluido testado

A influência da razão de massa específica e do diâmetro de partícula adimensional na tensão de cisalhamento mínima pode ser verificada na Figura 38. As curvas apresentadas no gráfico ilustram o ajuste polinomial realizado para obtenção de uma correlação experimental.

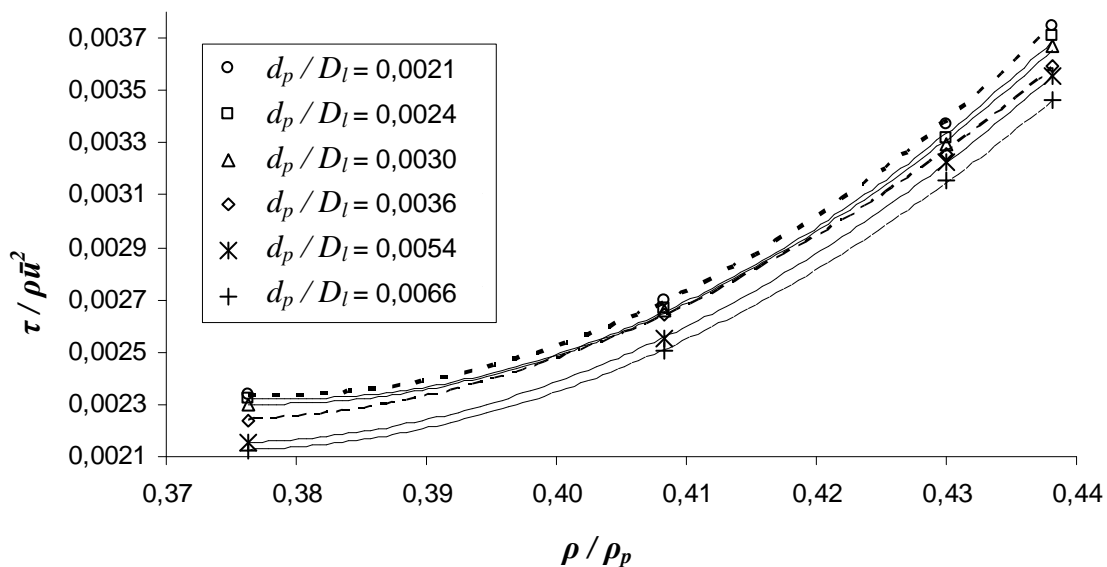


Figura 38 - Influência da massa específica na tensão de cisalhamento mínima adimensional

A partir dos ajustes de curvas da Figura 37 e da Figura 38 é possível obter as seguintes equações:

$$\frac{\tau}{\rho\bar{u}^2} = J \left(\frac{\rho\bar{u}D_l}{\mu} \right)^{-K} \quad (17)$$

$$\frac{\tau}{\rho\bar{u}^2} = X \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^2 - Y \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) + Z \quad (18)$$

Onde:

$$J = -0,6423 \left(\frac{d_p}{D_l} \right) + 0,0345 \quad (19)$$

$$K = -1,9374 \left(\frac{d_p}{D_l} \right) + 0,2377 \quad (20)$$

$$X = -15,4091 \left(\frac{d_p}{D_l} \right) + 0,4230 \quad (21)$$

$$Y = -12,4821 \left(\frac{d_p}{D_l} \right) + 0,3221 \quad (22)$$

$$Z = -2,5650 \left(\frac{d_p}{D_l} \right) + 0,0637 \quad (23)$$

Com a manipulação algébrica das Equações 17 e 18 é possível obter uma correlação experimental para a velocidade média mínima necessária para iniciar o processo de erosão de leito. A correlação define essa velocidade média em função da viscosidade e massa específica do fluido; do diâmetro e massa específica da partícula, e do diâmetro hidráulico da geometria do escoamento. Essa correlação experimental é apresentada na Equação 24, sendo uma importante ferramenta para aplicações em processos industriais permitindo estimar a vazão mínima de bombeio. O uso da equação deve considerar as características granulométricas das partículas utilizadas, as propriedades reológicas dos fluidos testados e os padrões de escoamento estabelecidos no experimento.

$$\bar{u} = \left(\frac{X \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^2 - Y \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) + Z}{J} \right)^{\frac{1}{K}} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho D_l} \right) \quad (24)$$

Os valores calculados através da Equação 24 apresentam um erro máximo de 7% quando são comparados aos resultados experimentais da velocidade média mínima de erosão de leito sedimentado.

A variação da tensão de cisalhamento mínima adimensional também pode ser visualizada em função do número de Reynolds da partícula, conforme mostra a Figura 39. O número de Reynolds da partícula é obtido do produto do diâmetro da partícula adimensional pelo número de Reynolds do escoamento.

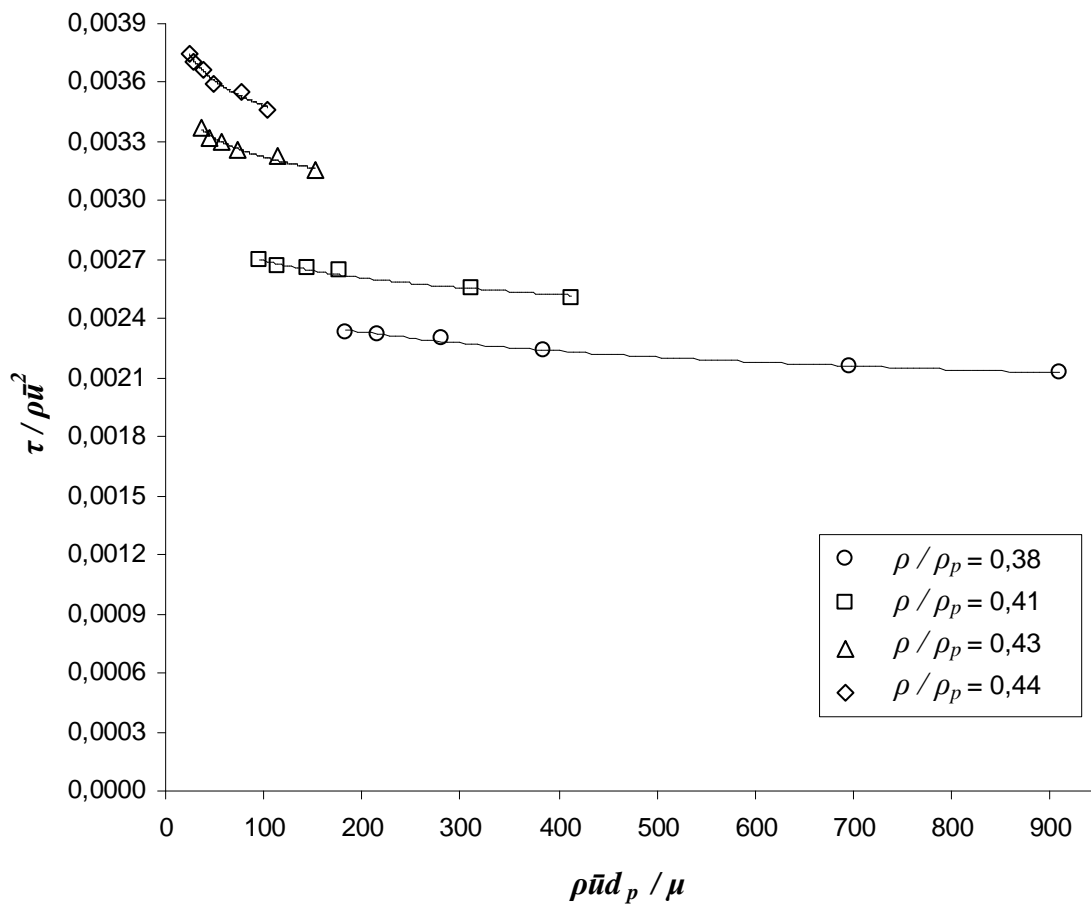


Figura 39 - Influência do número de Reynolds da partícula na tensão de cisalhamento mínima adimensional

A partir de ajuste de curva da Figura 39 é possível obter a correlação experimental mostrada na Equação 25. Essa equação fornece a tensão de cisalhamento mínima para erosão do leito sedimentado em função da razão entre as massas específicas do fluido e da partícula e do número de Reynolds da partícula.

$$\frac{\tau}{\rho \bar{u}^2} = R \left(\frac{\rho \bar{u} d_p}{\mu} \right)^{-S} \quad (25)$$

Onde:

$$R = 0,5162 \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^2 - 0,4024 \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) + 0,0816 \quad (26)$$

$$S = 9,4529 \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right)^2 - 7,9196 \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) + 1,7037 \quad (27)$$

Os valores calculados através da Equação 25 apresentam um erro máximo de 0,9% quando são comparados aos resultados experimentais da tensão de cisalhamento mínima de erosão de leito sedimentado.

Com a aplicação dos dados experimentais na Equação 25 visualizam-se as curvas de isotensão de cisalhamento mínima para erosão do leito sedimentado em função do número de Reynolds da partícula, e da razão entre as massas específicas do fluido e da partícula, conforme mostra a Figura 40.

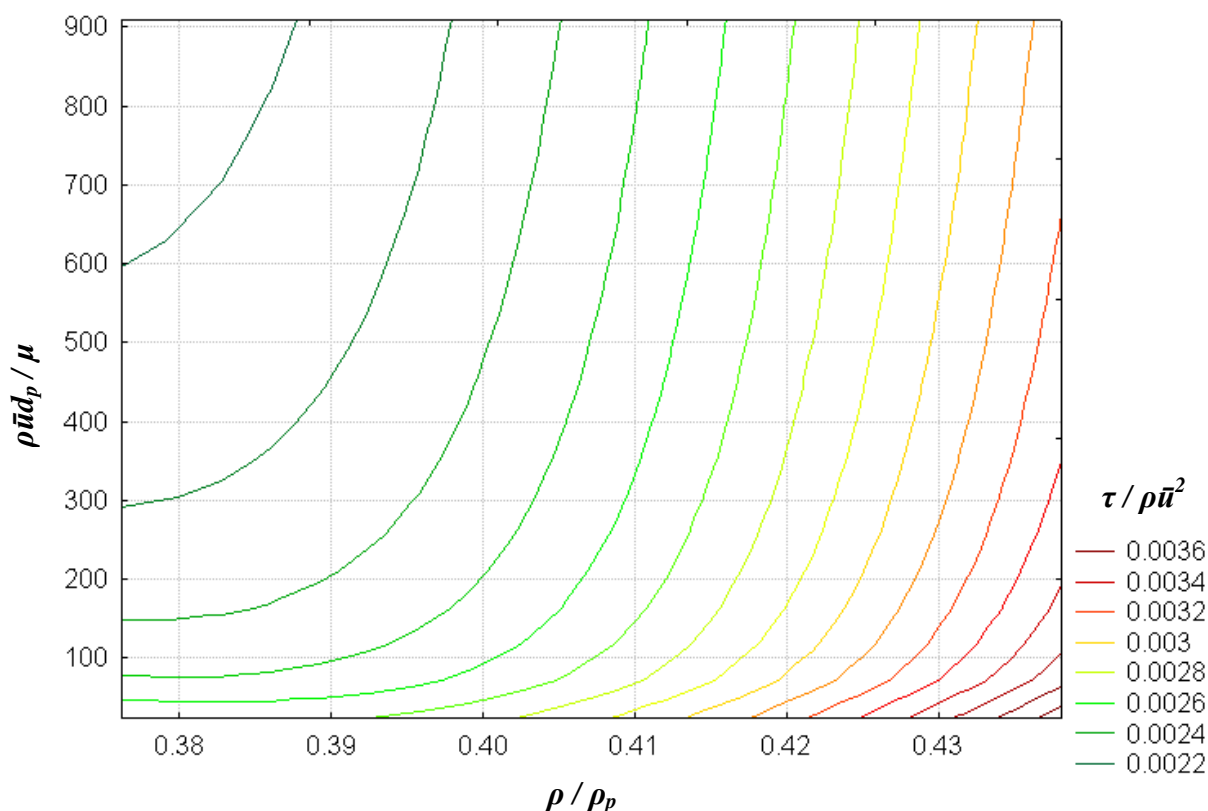


Figura 40 - Curvas de isotensão de cisalhamento mínima adimensional em função do número de Reynolds da partícula e da razão entre as massas específicas do fluido e da partícula

Capítulo 5

Conclusões e comentários finais

Neste trabalho é estudada a erosão de um leito de partículas sedimentado através de escoamento de fluidos newtonianos. O leito sedimentado é montado com partículas de areia de granulometrias controladas. Os fluidos recirculados são água e três fluidos newtonianos em diferentes concentrações de glicerina, sendo uma solução água-glicerina com viscosidade de 2,5cP, outra de 7cP e uma de 11cP. Os experimentos tratam da tensão de cisalhamento imposta no leito de partículas na interface com a parte inferior do escoamento. A montagem experimental projetada em acrílico permite a visualização do arraste das partículas para as análises quantitativas e qualitativas do fenômeno físico. O duto de acrílico possui comprimento suficiente para a hipótese de escoamento completamente desenvolvido na região do leito de partículas de acordo com estudos realizados por Loureiro e Siqueira [37]. Para todos os escoamentos é analisada a influência do diâmetro médio das partículas que constituem o leito e do número de Reynolds do escoamento. É feito um paralelo entre os resultados de tensão de cisalhamento mínima para os quatro fluidos testados.

Os resultados obtidos permitem concluir que o método de captura e processamento de imagens é satisfatório para a quantificação de partículas suspensas para o experimento realizado.

Os testes desenvolvidos possibilitam um bom entendimento físico quanto aos parâmetros relevantes para erosão de leito. Pode-se perceber também pelos

resultados uma forte dependência da tensão de cisalhamento mínima adimensional com o diâmetro adimensional da partícula, com o número de Reynolds e com a razão das massas específicas do fluido e da partícula.

A Equação 24 proposta pode ser de grande utilidade para aplicações em campo, visto que pode fornecer a vazão de bombeio necessária para iniciar o processo de erosão de um leito sedimentado em um poço horizontal. A Equação 25 proposta também pode auxiliar no problema de perfuração de poços horizontais fornecendo valores de referência da tensão de cisalhamento mínima imposta às partículas de leitos sedimentados capaz de iniciar a limpeza do poço.

A extensão desse estudo pode ocorrer a partir de três temas de trabalhos futuros, em que se sugere:

- Analisar o escoamento de fluidos não newtonianos, com o objetivo de investigar o efeito de tensão limite em fluidos pseudoplásticos para suspensão de partículas. Estes testes podem ser realizados com soluções de água e carbopol por apresentarem propriedades reológicas semelhantes aos fluidos de perfuração utilizados na indústria de petróleo. A solução de água e carbopol é indicada para os testes experimentais devido sua transparência, permitindo a visualização do arraste das partículas.
- Comparar os resultados experimentais obtidos nesse trabalho com resultados provenientes de modelos mecanicistas disponíveis na literatura.
- Realizar testes similares aos analisados, mas com diâmetros mais elevados de partículas.

Referências

- 1 OLSEN, N. R. B. **Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology** [online]. In: THE NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. Department of Hydraulic and Environmental Engineering. 5 ed. 2006. Disponível: [http:// folk.ntnu.no/nilsol/tvm4155/flures5.pdf](http://folk.ntnu.no/nilsol/tvm4155/flures5.pdf) [acesso em 16 set. 2009].
- 2 COSTA, S. S.; STUCKENBRUCK, S.; da FONTOURA, S. A. B.; MARTINS, A. L. **Simulation of Transient Cuttings Transportation and ECD in Wellbore Drilling**, SPE113893, 2008.
- 3 IYOHO, A. W. **Drilled cuttings transport by non Newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli**. 1980. Tese de Doutorado, Universidade de Tulsa.
- 4 TOSAKA. **Oil drilling rig**: simple illustration [online]. In: WIKIPEDIA. The free encyclopedia. Disponível: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Oil_Rig_NT8.jpg [acesso em 1 dez. 2009]. somente il.
- 5 SOBRE petróleo. Engenharia de poço [online]. In: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Departamento de Engenharia Civil e Departamento de Engenharia Mecânica. Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo. Disponível: http://www.gtep.civ.puc-rio.br/petro/f_sobre_petroleo_poco.php [acesso em 22 jan. 2009]. somente il.
- 6 MARTINS, A. L. **Modelagem e simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não newtoniano em dutos horizontais e inclinados**. 1990. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas.
- 7 SILVA, R. A.; MARTINS, A. L. Ressuspensão de partículas não esféricas em dutos anulares horizontais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS – ENEMP. **Anais...** 2002.
- 8 JONES JR., O. C. **An improvement in the calculation of turbulent friction in rectangular ducts**, J. Fluids Eng., 98, 173-181, 1976.
- 9 LOUREIRO, B. V.; SIQUEIRA, R. N.; MARTINS, A. L. Determinação experimental da tensão de cisalhamento para arraste de cascalhos sedimentados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS – ENEMP, 32, **Anais...** Maringá, PR. 2006.

- 10 IYOHO, A. W.; AZAR, J. J. **An accurate slot-flow model for non-newtonian fluid flow through eccentric annuli**, SPE 9447, 1981.
- 11 TAO, L. N.; DONOVAN, W. F. **Through flow in concentric and eccentric annuli of fine clearance with and without relative motion of the boundaries**, American Society of Mechanical Engineers, 1955.
- 12 OKRAJNI, S. S.; AZAR, J. J. **The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells**, SPE 14178: 297-308, Las Vegas, 1986.
- 13 PIGGOT, R. J. S. **Mud flow in drilling**, Oil and Gas Journal, 1941.
- 14 WILLIAMS, C. E.; BRUCE, G. H. **Carrying capacity of drilling muds**, AIME, v.192, 1951.
- 15 PEDEN, J. M.; FORD, J. T.; OYENEYIN, M. B. **Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity**, SPE 20925: 393 - 404, 1990.
- 16 LARSEN, T. L.; PILEHVARI, A. A.; AZAR, J. J. **Development of a new cuttings transport model for high – angle wellbores including horizontal wells**, SPE 25872: 129-135, 1993.
- 17 PILEHVARI, A. A.; AZAR, J. J.; SHIRAZI, S. A. **State -of -the –art cuttings transport in horizontal wellbores**, SPE 37079: 389 – 393, Calgary, 1995.
- 18 HEMPHILL, T.; LARSEN, T. I. **Hole – cleaning capabilities of water – and oil – based drilling fluids: a comparative experimental study**, SPE 26328: 201 - 207, Houston, 1996.
- 19 CLARK, R. K.; BICKHAM, K. L. **A mechanistic model for cuttings transport**, SPE 28306: 139 -153, 1994.
- 20 MARTINS, A. L.; SÁ, C. H. M.; LOURENÇO, A. M. F.; CAMPOS, W. **Optimizing cuttings circulation in horizontal well drilling**, SPE 35341, 1996.
- 21 PILEHVARI, A. A.; AZAR, J. J.; SHIRAZI, S. A. **State-of-the-art cuttings transport in horizontal wellbores**, SPE 57716, 1999.
- 22 CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. **Drilling fluids: State of the art**, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 14, pag. 221-230, 1996.
- 23 AZAR, J. J.; SANCHEZ, R. A. **Important issues in cuttings transport for drilling directional wells**, SPE 39020, 1997.
- 24 KAMP, A. M.; RIVERO, M. **Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores**, Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition, SPE 53942, Caracas, 1999.
- 25 NIÑO, Y.; LOPEZ, F.; GARCIA, M. **Threshold for particle entrainment into suspension**, Sedymentology, vol. 50, pag. 247-263, 2003.

- 26 COSTA, S. S. **Modelagem para o Escoamento Transiente Horizontal e Quase Horizontal na Perfuração de Poços de Petróleo**. 2006. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- 27 MARTINS, F. F. **Estudo da tensão de cisalhamento crítica como critério de remoção do leito de cascalho em anulares excêntricos**. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- 28 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.
- 29 PRANDTL, L. **Führer durch die Stömungslehre**, Vieweg, Braunschweig, p. 359, 1944.
- 30 VON KÁRMÁN, T. **Turbulence and Skin Friction**, J. Aerosp. Sci., 7, 1-20, 1934.
- 31 NIKURADSE, J. **Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren**, Forsch. Arb. Ing. Wes., 356, 1932, English translation, NASA TT F-10, 359, 1966.
- 32 ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. **Handbook of heat transfer**, McGraw-Hill, 3 ed. New York, 1998.
- 33 POSTÓL SOBRINHO, A. **Critérios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação**. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- 34 YON, M. **Coriolis in action: coriolis meters meet liquid hydrocarbons** [online]. Disponível: http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3739/is_200410/ai_n9420328/ [acesso em 28 ago. 2009].
- 35 FIORILLO, D. de A.; CALEGÁRIO, J. F. **Projeto e implantação de supervisorio em uma planta experimental de erosão de leito**. 2007. 107 p. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Faculdade do Centro Leste.
- 36 SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**, Artliber, 1 ed. São Paulo, 2006. Tradução e adaptação: MOTHE, Cheila G. et al.
- 37 LOUREIRO, B. V.; SIQUEIRA, R. N. Determinação da tensão de cisalhamento mínima para arraste de partículas em um leito sedimentado. In: ENCONTRO NACIONAL DE HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO E COMPLETAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS – ENAHPE. **Anais...** Domingos Martins, ES. 2006.