

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO KNESEBECK

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ROTAÇÃO NA FORÇA
DE RETIRADA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO
HORIZONTAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

RICARDO KNESEBECK

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ROTAÇÃO NA FORÇA
DE RETIRADA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO
HORIZONTAL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Cezar O. R. Negrão

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA ROTAÇÃO NA FORÇA DE RETIRADA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO DE UM POÇO HORIZONTAL", realizado pelo aluno Ricardo Knesebeck, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Cezar O. R. Negrão, Ph.D.
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 04 de dezembro de 2018

RESUMO

KNESEBECK, Ricardo. Avaliação experimental do efeito da rotação na força de retirada da coluna de perfuração de um poço horizontal. 62f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Com o crescente interesse em redução de custos na extração de petróleo, é necessária a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nos processos de extração. Neste documento, estuda-se a influência da rotação em uma manobra de retirada de uma coluna de perfuração de um poço horizontal na presença de leito de cascalhos. Apesar de haver diversos estudos sobre a influencia da rotação no leito de cascalhos, só há um estudo que considerou a translação da coluna, mas sem a rotação. Visando preencher essa lacuna, o presente estudo foi realizado utilizando a Unidade Experimental de Torque e Arraste existente no Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Foram simuladas manobras em que uma coluna é tracionada por dentro de uma tubulação representativa de um poço horizontal cheia de água. Como parâmetros, a velocidade de translação foi 30cm/s, com rotações de 50rpm, 100rpm e 150rpm e razões de leito de 0,22, 0,33 e 0,47. Foi medida a força de retirada durante a realização de cada ensaio através de uma célula de carga e analisado o comportamento em cada condição e comparado com o que era previsto pela literatura. Observou-se que a rotação acelera a formação de uma obstrução em todas as razões de leito. Na menor altura, diminuiu a força média quando a obstrução atinge tamanho de estado estacionário. Nas duas maiores altura, a rotação acelerou o entupimento do poço, condição em que a obstrução cresce indeterminadamente. Também foi observado que a interação da broca com o leito de cascalho teve uma influência maior do que o atrito da coluna com o leito.

Palavras-chave: perfuração horizontal, leito de cascalhos, arraste, rotação.

ABSTRACT

KNESEBECK, Ricardo. Experimental Evaluation of the Effect of Rotation on the Tripping Force of the Drill String on a Horizontal Well. 62f. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

With the growing interest in cost reduction in oil extraction, it is necessary to understand the physical phenomena involved in the extraction processes. In this paper, the influence of rotation in a tripping operation of a drill string in a horizontal well in the presence of cuttings bed is studied. Although there are several studies on the influence of rotation on cuttings bed, there is only one study that considered the translation of the drillstring, but without the rotation. Aiming to fill this gap, the present study was carried out using the Torque and Drag Experimental Unit at the Research Center for Rheology and Non-Newtonian Fluids (CERNN) of the Federal University of Technology of Paraná (UTFPR). Maneuvers were simulated in which a drillstring is pulled through a pipe representative of a horizontal well filled with water. As parameters, the translation speed was 30cm/s, with rotations of 50rpm, 100rpm and 150 rpm and bed ratios of 0.22, 0.33 and 0.47. The pull-out force was measured during each test run through a load cell and the behavior in each condition was analyzed and compared with what was predicted in the literature. It was observed that rotation accelerates the formation of an obstruction in all bed ratios. At lower height, the mean force decreased when the obstruction reached steady state size. At the two largest heights, rotation accelerated the clogging of the well, a condition in which the obstruction grows indeterminately. It was also observed that the interaction of the drill bit with the cuttings bed had a greater influence than the friction of the drill string with the bed.

Keywords: horizontal drilling, cuttings bed, drag, rotation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Investimentos Totais Planejados pela Petrobras para o Período de 2018 a 2022	9
Figura 2 - Ciclo de Vida de um Poço de Petróleo.....	10
Figura 3 - Fluxo de Fluido de Perfuração	11
Figura 4 - Componentes do BHA	11
Figura 5 - Classificação de Poços Segundo a Direção de Perfuração	12
Figura 6 - Perda de Simetria Axial em Poços Direcionais	13
Figura 7 - Formação e Estabilidade de Leitos de Cascalhos	14
Figura 8 - <i>Backreaming</i> com Presença de Leito de Cascalhos	15
Figura 9 - Regiões de Velocidade no Escoamento Anular com Cascalhos.....	19
Figura 10 - Regiões de Velocidade no Escoamento Anular com Cascalhos em Suspensão Devido à Rotação.....	19
Figura 11 - Formação de Obstrução no BHA (a) Sem Entupimento; (b) Com Entupimento	21
Figura 12 - Unidade Experimental de Torque e Arraste	24
Figura 13 – Movimentos do Sistema de Movimentação.....	25
Figura 14 - Conexão do Servo-motor com a Plataforma Móvel.....	25
Figura 15 - Montagem do Servo-motor	26
Figura 16 - Acoplamento do Eixo Motor com a Coluna	26
Figura 17 - Poço de Acrílico - Vista Superior.....	27
Figura 18 - Vedação Poço-Coluna	28
Figura 19 - Esquema do Sistema de Alimentação de Fluido.....	29
Figura 20 - Escotilhas da Tubulação de Acrílico (fechada e aberta)	30
Figura 21 - Niveladores de Leito	30

Figura 22 - Formação do Leito de Cascalhos.....	31
Figura 23 - Célula de Carga HBM-S2M/500N	32
Figura 24 - Fluxograma dos Ensaios.....	33
Figura 25 - Razão Altura de Leito por Diâmetro	34
Figura 26 - Ensaios sem Cascalho.....	34
Figura 27 - Ensaios com Cascalho.....	35
Figura 28 - Ensaios de Controle Sem Cascalho.....	36
Figura 29 - Força Média no Intervalo de Velocidade Constante.....	37
Figura 30 - Ensaios de Razão 0,22 - Correção do Perfil de Força	38
Figura 31 - Ensaios de Razão 0,22 - Rotação = 0rpm	39
Figura 32 - Ensaios de razão 0,22 - Rotação = 50rpm.....	40
Figura 33 - Ensaios de razão 0,22 - Rotação = 100rpm.....	40
Figura 34 - Ensaios de Razão 0,22 - Rotação = 150rpm	41
Figura 35 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,22	41
Figura 36 - Força Média no Intervalo (D) para Razão de 0,22	42
Figura 37 - Ensaios de Razão 0,33 - Correção do Perfil de Força	43
Figura 38 - Ensaios de Razão 0,33 - Rotação = 0rpm	44
Figura 39 - Ensaios de Razão 0,33 - Rotação = 50rpm	45
Figura 40 - Ensaios de Razão 0,33 - Rotação = 100rpm	45
Figura 41 - Ensaios de Razão 0,33 - Rotação = 150rpm	46
Figura 42 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,33	47
Figura 43 - Ensaios de Razão 0,47 - Correção do Perfil de Força	48
Figura 44 - Ensaios de Razão 0,47 - Rotação = 0rpm	49
Figura 45 - Ensaios de Razão 0,47 - Rotação = 50rpm	50
Figura 46 - Ensaios de Razão 0,47 - Rotação = 100rpm	50

Figura 47 - Ensaio de Razão 0,47 - Rotação = 150rpm	51
Figura 48 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,47	51
Figura 49 - Intervalo de Crescimento Linear - Comparação entre Razões de Leito..	52
Figura 50 - Contato com o Leito de Razão Baixa, (a.i) Sem Rotação; (a.ii) Com Rotação.....	53
Figura 51 - Contato com o Leito de Razão Alta, (a.i) Sem Rotação; (a.ii) Com Rotação.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do Sistema de Movimentação	27
Tabela 2 - Ensaio de Rotação x Razão de Leito	35
Tabela 3 - Força Média de Atrito por Rotação	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Perfuração de Poços	10
1.1.1	Poços Direcionais	12
1.2	Caracterização do Problema	14
1.3	Objetivos	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Backreaming	16
2.2	Torque e Arraste	17
2.3	Escoamento em um Espaço Anular e Leito de Cascalho	18
2.3.1	Simulação Numérica com Leito de Cascalhos	20
2.3.2	Análises Experimentais com Leito de Cascalhos	20
2.4	Sumário da Revisão da Literatura	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Descrição da Unidade Experimental	23
3.1.1	Sistema de Movimentação	25
3.1.2	Sistema Poço-Coluna	27
3.1.3	Sistema de Alimentação de Fluido	28
3.1.4	Fluido utilizado	29
3.1.5	Manutenção e Preparação de Ensaios	29
3.1.6	Célula de Carga e Aquisição de Dados	31
3.2	Descrição da Metodologia	32
3.2.1	Protocolo de Testes	32
3.2.2	Parâmetros	33
3.2.3	Ensaios sem Cascalho	34
3.2.4	Ensaios com Cascalho	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Ensaios sem Cascalho	36
4.1.1	Atrito Devido à Vedação	36
4.2	Ensaios com Cascalho	38
4.2.1	Razão de leito 0,22	38
4.2.2	Razão de leito 0,33	42
4.2.3	Razão de leito 0,47	47
4.2.4	Comparação Entre Razões de Leito de Cascalho	52
5	CONCLUSÕES	55
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Petróleo é um recurso natural valioso e muito importante para o desenvolvimento de um país, devido ao seu uso em diversas áreas tecnológicas. No Brasil, a indústria de extração de óleo e gás vem crescendo nos últimos anos, com a descoberta de jazidas na costa brasileira e investimentos em produção *off-shore*. Isso gera interesse em aperfeiçoamentos das técnicas de extração, visando reduzir custos e aumentar a produtividade onde for possível.

Conforme mostra a Figura 1, exploração e produção são os maiores focos de investimento da Petrobras. No plano de negócios e gestão da empresa brasileira, estas duas áreas tomam 81% do investimento total de US\$74,5 bilhões destinados ao período dos próximos quatro anos.

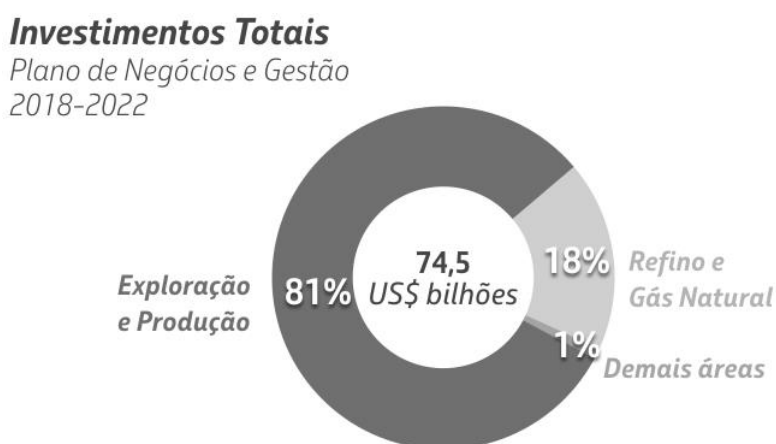


Figura 1 - Investimentos Totais Planejados pela Petrobras para o Período de 2018 a 2022
Fonte: Petrobras (2018)

A exploração de um reservatório consiste na procura de uma formação geológica que possa possuir um reservatório de óleo e gás, bem como sua avaliação para determinar sua viabilidade e todo o desenvolvimento do poço para que seja possível a produção. Uma vez que se tem uma região de interesse conhecida, se inicia o desenvolvimento de um poço para a extração. As etapas desses processos, ao longo da vida útil econômica do reservatório, podem ser classificadas conforme ilustrado na Figura 2. A primeira etapa a ser realizada é a de perfuração, que consiste em penetrar as formações rochosas e introduzir tubos de revestimento, a fim de construir um poço com integridade estrutural suficiente para alcançar a região de interesse. Em seguida, ocorre a completação, onde os componentes necessários

para o início da produção são introduzidos no poço recém perfurado. A produção, que é a etapa em que há o retorno econômico, consiste na extração de óleo e gás natural do reservatório para serem processados posteriormente. Durante a produção, várias etapas de manutenção, para garantir a produtividade do poço poderão ocorrer até que a reserva se esgote e o poço seja abandonado.

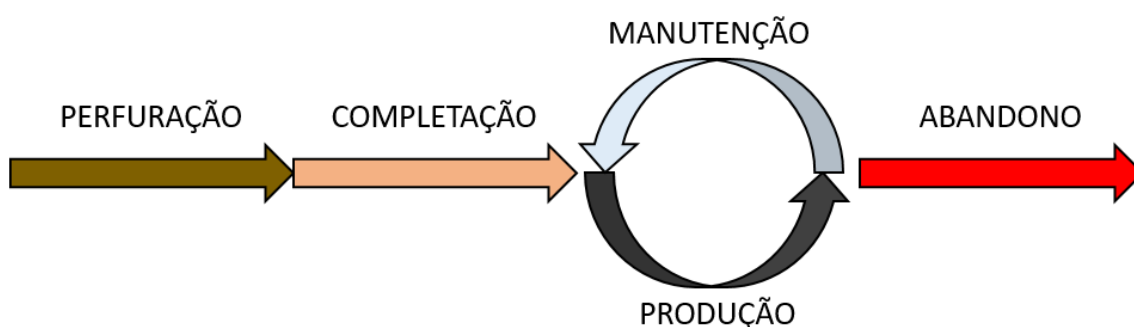


Figura 2 - Ciclo de Vida de um Poço de Petróleo
FONTE: Autoria Própria

O foco do presente trabalho é durante a etapa de perfuração de poços de extração de óleo e gás.

1.1 Perfuração de Poços

Durante a perfuração, é necessária a concentração de grande energia em uma broca para penetrar as diversas formações rochosas (CARVALHO *et al.*, 2012). Essa energia é aplicada em forma de rotação e peso, transmitido através de uma coluna de perfuração. Ainda há a necessidade da remoção dos cascalhos formados na operação. Para isso, bombeia-se um fluido de perfuração para promover a limpeza do poço, conforme ilustrado em um esquema simplificado na Figura 3. O fluido é bombeado por dentro da coluna em direção ao fundo do poço, saindo pela broca. Em seguida, o fluido retorna pelo espaço anular externo, carregando os cascalhos até a superfície.

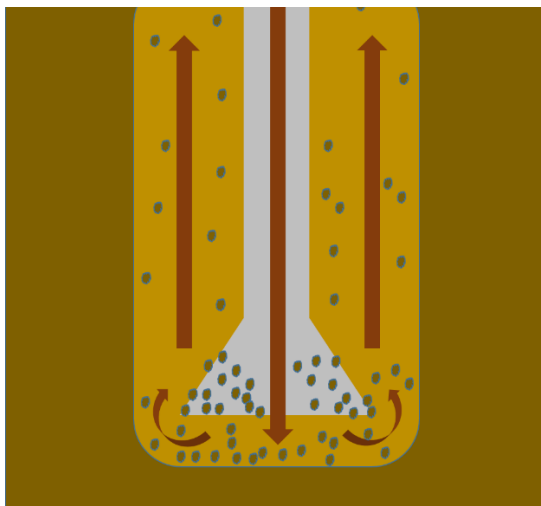
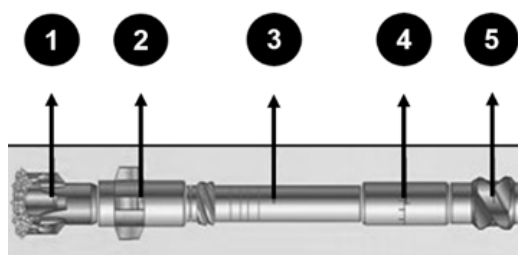


Figura 3 - Fluxo de Fluido de Perfuração
FONTE: Autoria Própria

Para auxiliar na perfuração, existe na extremidade inferior da coluna um sistema comumente chamado de BHA (*Bottom Hole Assembly*). É a parte entre a broca e a coluna de perfuração. Comandos, estabilizadores, alargadores, amortecedores, escareadores e broca fazem parte do BHA (WILLIAM, 1996). Uma possível configuração desse sistema é mostrada na Figura 4, ilustrando os principais componentes presentes na montagem. Na extremidade, a broca (1) e o alargador (2) são responsáveis pela quebra da formação rochosa e controle do diâmetro do poço, respectivamente. O motor de fundo (3) promove o aumento da rotação da broca. O substituto curvado (4) é utilizado para controlar a inclinação do sistema enquanto o estabilizador (5) mantém a coluna afastada das paredes do poço.



- 1- Broca
- 2- Alargador
- 3- Motor de Fundo
- 4- Substituto curvado
- 5- Estabilizador

Figura 4 - Componentes do BHA
FONTE: Adaptado de Dawson et al. (2010)

De maneira geral, esses componentes são responsáveis por guiar a broca e a direção da perfuração, além de transmitir aos operadores as informações das condições no fundo do poço. Seu uso eficiente é fundamental para as operações de poços direcionais.

1.1.1 Poços Direcionais

Uma das formas de classificar um poço é quanto à sua direção de perfuração. A Figura 5 mostra três possíveis configurações de poço: vertical, direcional e horizontal. O poço vertical é o mais comum, quando o alvo ou objetivo está diretamente abaixo da sonda e a única direção de perfuração é para baixo. Quando há desvio dessa orientação, o poço é considerado direcional, podendo chegar até o caso horizontal, quando a inclinação chega a 90° em relação à vertical.

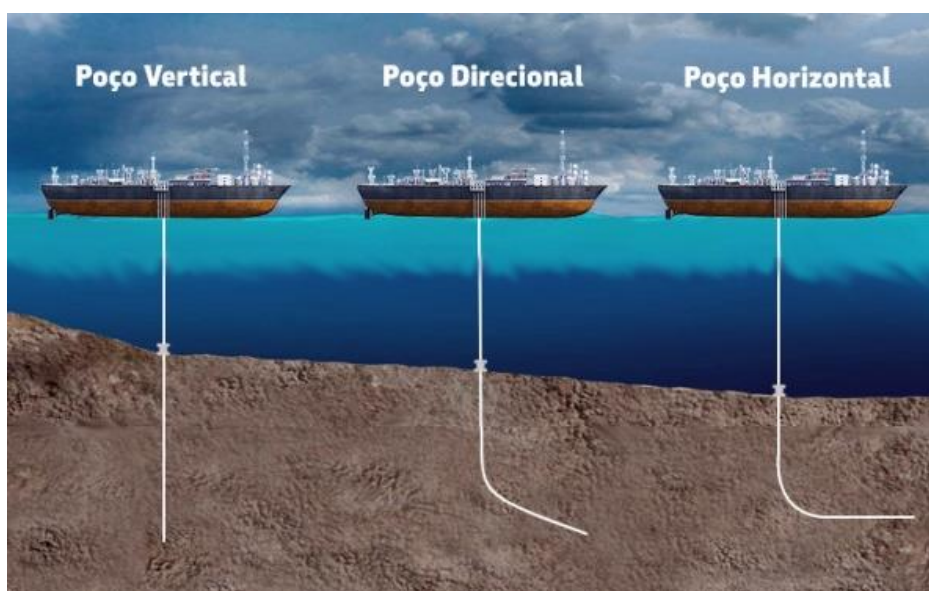


Figura 5 - Classificação de Poços Segundo a Direção de Perfuração
 Fonte: Adaptado de Petrobras (2015)

A perfuração direcional é utilizada para diversas finalidades, como, por exemplo:

- Alcançar regiões de interesse que não se localizam diretamente abaixo da plataforma de extração, conectando múltiplos poços à plataforma;
- Desviar de regiões com formações rochosas que possam comprometer o poço;
- Aumentar a área de contato com uma jazida, aumentando a taxa de extração;

- Abrir poços auxiliares para controle da pressão através do bombeamento de água ou lama;

Devido à inclinação, poços direcionais possuem características que dificultam sua operação. Uma das principais é a mudança da componente gravitacional que atua no sistema, conforme mostra a Figura 6. Como a orientação do poço deixa de ser vertical, a força da gravidade passa a atuar fora do eixo da coluna, fazendo com que o sistema perca sua simetria axial.

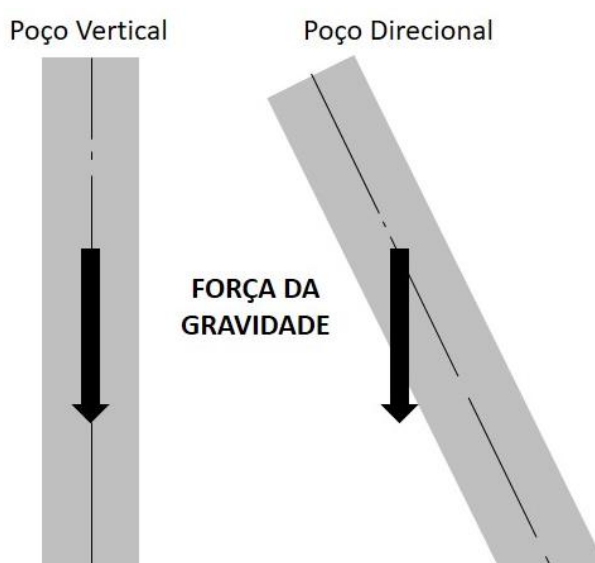


Figura 6 - Perda de Simetria Axial em Poços Direcionais
FONTE: Autoria Própria

Um dos problemas que essa mudança causa é a dificuldade da remoção de cascalhos. Conforme a orientação da coluna se aproxima da horizontal, há um crescente efeito de deposição das partículas na parede inferior do poço, como é ilustrado na Figura 7. Em inclinações entre 30° a 60° com relação à vertical, a limpeza se torna crítica e o poço se torna cada vez mais propenso à formação de um leito de cascalhos (MAY, RITCHIE & YARIM, 2010). Nesta faixa, o transporte de cascalho até a superfície já apresenta problemas, uma vez que as partículas acumuladas nas paredes acabam retornando ao fundo do poço através de transporte em dunas ou como um leito de cascalho móvel. Nota-se que em condições de inclinação acima de 60° , há uma tendência deste leito se tornar estacionário.

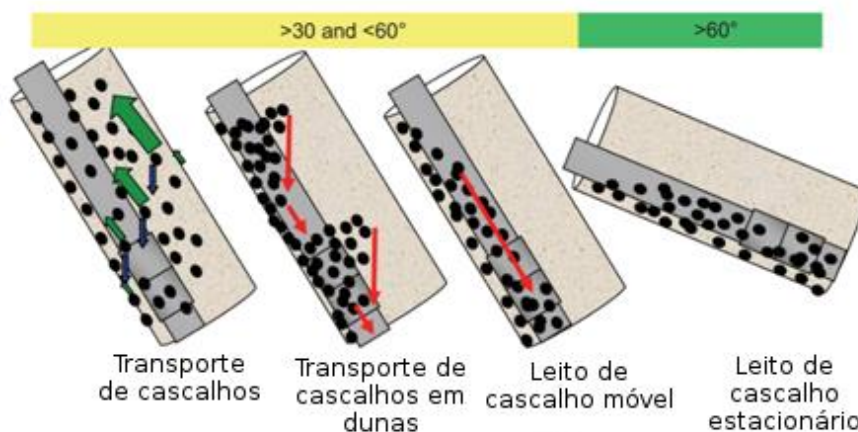


Figura 7 - Formação e Estabilidade de Leitos de Cascalhos
FONTE: Adaptado de May; Ritchie & Yarim (2010)

A formação desse leito de cascalhos é especialmente preocupante quando há a necessidade de realizar uma manobra de retirada da coluna de perfuração do poço. Durante a perfuração, para possibilitar a manutenção ou troca do equipamento, são realizadas manobras que consistem na retirada total da coluna de perfuração de dentro do poço. Durante essa operação, há o risco de danos à coluna, devido aos esforços de tração. Dependendo das condições, essa manobra pode ser feita com a simples tração da coluna ou empregando técnicas como *Backreaming*, que é a prática de bombear e rotacionar a coluna de perfuração enquanto a mesma é tracionada (MAY; RITCHIE & YARIM, 2010).

1.2 Caracterização do Problema

Em poços com inclinação muito grande ou horizontais, a formação de leito de cascalhos pode ser inevitável. A imprevisibilidade do comportamento mecânico do sistema nas operações de retirada pode causar falhas com custos operacionais extremamente elevados. Quando a inclinação do poço é suficiente para formação de um leito de cascalhos estável, há risco de obstruções da coluna durante uma manobra, conforme ilustrado na Figura 8.

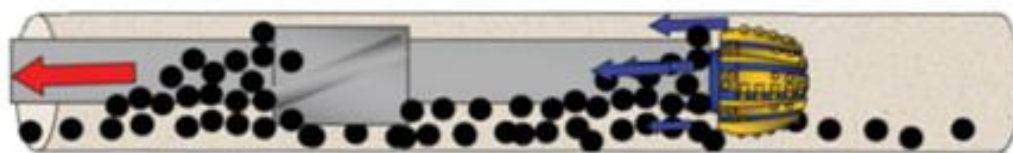


Figura 8 - *Backreaming* com Presença de Leito de Cascalhos
FONTE: Adaptado de May; Ritchie & Yarim (2010)

Nessas condições, pode ser difícil saber como proceder com a operação. O responsável pela perfuração pode continuar com a manobra de retirada ou aplicar uma técnica como a de *backreaming*, na esperança de reduzir os esforços. Porém faltam informações sobre como a coluna interage com o leito de cascalhos durante a manobra e qual seria a influência de sua rotação na redução da força de retirada.

1.3 Objetivos

O trabalho proposto tem como objetivo observar os efeitos da rotação durante a manobra da coluna de perfuração posicionada na horizontal e na presença de leito de cascalhos. Para isto, será utilizada a Unidade Experimental de Torque e Arrasto existente no Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da UTFPR.

A unidade experimental consiste de um tubo de alumínio submerso em água e um leito de cascalho, dentro de uma tubulação de acrílico (poço). A tubulação de alumínio (coluna) será tracionada a uma velocidade de 30cm/s com diferentes rotações: 0rpm, 50rpm, 100rpm e 150rpm. O leito é composto de esferas de vidro de 3,2mm até 3,8mm de diâmetro. A razão entre os diâmetros da coluna e do poço é de 0,47. Três níveis de leito de cascalho estacionário serão avaliados com razões entre a altura do leito e o diâmetro do poço de 0,22, 0,33 e 0,47, respectivamente.

A força axial atuante na coluna durante a manobra será medida através de uma célula de carga. Os perfis de força resultantes serão comparados com o objetivo de avaliar o efeito da rotação durante a manobra.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Com a expansão da indústria de exploração de petróleo nos últimos anos, houve um aumento nos estudos dos fenômenos físicos envolvidos na perfuração. Neste capítulo, listam-se os principais estudos que tenham relevância no projeto proposto.

Inicialmente, apresenta-se uma breve explicação sobre operações de *backreaming* e como são utilizadas durante a perfuração de poços de petróleo. Em seguida, estudos que modelam os esforços presentes nas colunas de perfuração, chamados comumente de torque e arrasto, são discutidos. Por fim, são resumidos diversos estudos em torno do escoamento em condições parecidas com a de uma perfuração horizontal, com e sem presença de cascalho, ou seja, escoamento em um espaço anular com ou sem obstrução.

2.1 Backreaming

May, Ritchie & Yarim (2010) estabeleceram um guia para operações de *backreaming*, definida como a prática de bombear e rotacionar a coluna de perfuração enquanto simultaneamente a puxa para fora do poço. Eles comentaram que a operação deve ser realizada com muito cuidado, pois pode ocasionar mais problemas do que soluções. Até então, a decisão de usar a técnica de *backreaming* era baseada na intuição e prática do responsável pela perfuração, sem instruções específicas de quando começar, quando aumentar ou diminuir a velocidade e quando parar. Assim, May, Ritchie & Yarim (2010) propuseram condições em que *backreaming* possa ser necessária e em quais deve ser evitada.

Condições propícias à utilização de *backreaming*:

- Manobra de retirada não pode ser feita sem risco de sobrecarga ou aprisionamento da coluna;
- Há preocupação com mudanças de pressão devido à movimentação da coluna;
- Não há pressão suficiente do fluido de perfuração para segurar a formação rochosa;

- Há problemas mecânicos conhecidos no poço que não possam ser resolvidos por circulação.

Condições em que se deve evitar o uso de *backreaming*.

- A manobra de retirada é possível sem circulação e/ou rotação;
- Possibilidade de desestabilização da formação rochosa;
- Presença de leito de cascalhos em poços de alto ângulo em relação à vertical;
- Bombeamento insuficiente para circulação;

Enfatiza-se que cada caso de perfuração deve ser tratado separadamente, não havendo uma solução única que resolverá o problema para todos os tipos de poços. Entretanto, consideram-se essas recomendações de boa prática para reduzir o risco de acidentes. Portanto, é importante conhecer as condições em que a coluna se encontra, assim como os esforços ao quais está submetida.

2.2 Torque e Arraste

Os esforços atuantes sobre a coluna de perfuração são comumente denominados torque e arraste, que são resistências aos movimentos de rotação e translação da coluna. Na procura de facilitar cálculos de torque e arraste, vários autores propuseram modelos para determinação dos fatores de atrito aos quais a coluna de perfuração está submetida. Aadnoy & Andersen (2001) comentaram que, devido ao aumento da profundidade dos poços perfurados, e conseqüente comprimento da coluna de perfuração, o atrito se torna um dos mais importantes fatores limitantes do processo. Eles realizaram um equacionamento para o cálculo do coeficiente de atrito a ser usado no projeto de poços, levando em consideração somente o atrito da coluna com o poço e as diferentes geometrias das seções da tubulação. Já Samuel (2010) utilizou o termo “fator de atrito” dentro da área de perfuração para descrever todos os fatores a que a coluna está submetida e que possam causar resistência ao seu movimento. Dentre os fatores citados, estão:

- Características do fluido de perfuração;
- Leito de cascalho;
- Curvatura do poço;
- Tortuosidade do poço;

- Diâmetro do poço;
- Coeficiente de atrito entre coluna de perfuração e poço;
- Rigidez flexional da coluna de perfuração.

Relacionando esses fatores, Samuel (2010) os equacionou de forma a compará-los com informações de estudo de caso. Baseado nos mesmos fatores, Chen *et al.* (2015) realizaram um estudo similar e elaboraram um método inverso para determinar fatores de atrito em poços com colunas multi-segmentadas, utilizando dados obtidos durante a perfuração. Os resultados também foram comparados com um estudo de caso, confirmando a eficácia do método. Mais recentemente, Elgibaly *et al.* (2017) retornaram ao modelo proposto por Aadnoy & Andersen (2001) para correlacionar o atrito com os esforços de torque e arraste presentes na coluna. Utilizando dados coletados por empresas de perfuração, demonstraram que as equações de projeto propostas são coerentes com as encontradas no campo.

Apesar dos estudos apresentados, a utilização de um fator de atrito de projeto não é muito eficiente, devido à variedade de parâmetros que podem influenciá-lo. Assim, é mais interessante estudar cada um desses efeitos separadamente, a fim de isolar os fenômenos que ocorrem durante a perfuração.

2.3 escoamento em um Espaço Anular e Leito de Cascalho

No intuito de focar em aspectos que influenciam no torque e arraste, há linhas de estudos que isolam os fenômenos que ocorrem durante uma operação de perfuração. Mims *et al.* (2013) comentaram sobre perfuração direcional, indicando, conforme mostra a Figura 9, que a presença de cascalhos cria regiões com diferentes velocidades de escoamento. Próximo ao leito a velocidade é menor enquanto na parte superior do espaço anular é maior.

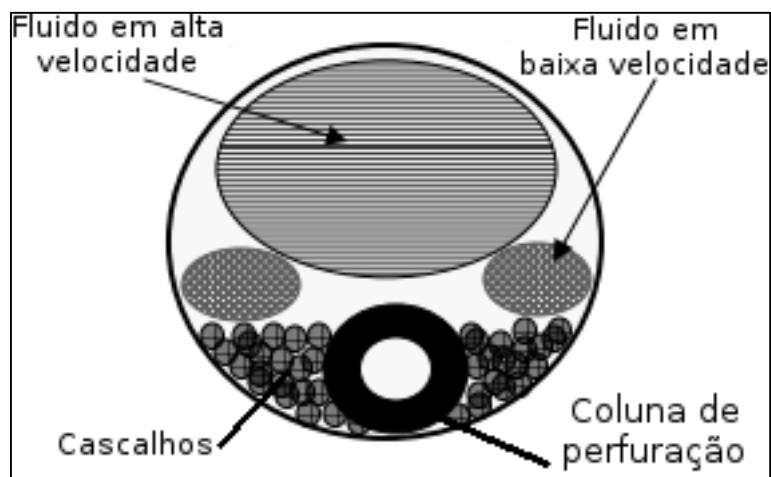


Figura 9 - Regiões de Velocidade no Escoamento Anular com Cascalhos
FONTE: Adaptado de Mims et al. (2013)

O leito de cascalho nessa situação permanece estável, com pouca movimentação. No entanto, Mims et al. (2013) ainda explicaram que a introdução da rotação da coluna causa uma perturbação nesse leito. A Figura 10 ilustra que esse efeito pode suspender o cascalho para a região de alta velocidade, facilitando o seu carregamento pelo fluido em alta velocidade.

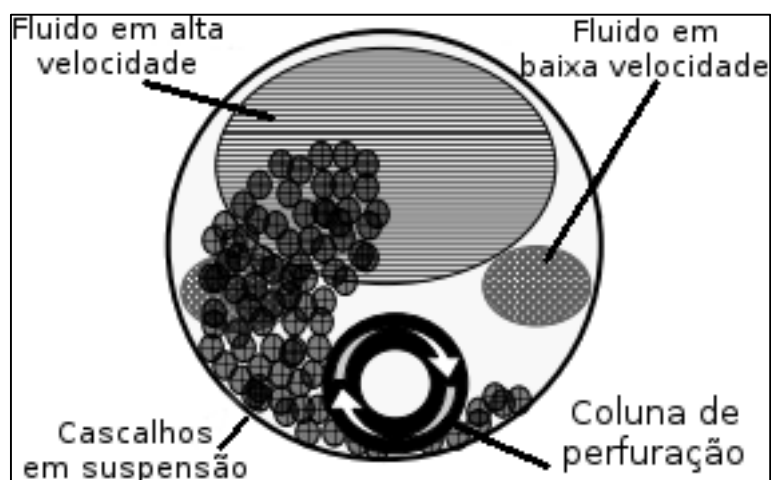


Figura 10 - Regiões de Velocidade no Escoamento Anular com Cascalhos em Suspensão
Devido à Rotação

FONTE: Adaptado de Mims et al. (2013)

A seguir, alguns estudos relacionam o escoamento no espaço anular com a característica instável da obstrução, podendo o leito de cascalho ser formado e desfeito durante o escoamento.

2.3.1 Simulação Numérica com Leito de Cascalhos

Diversos estudos matemáticos aprofundaram a questão do escoamento em um espaço anular horizontal, com foco no transporte de cascalhos. Guo; Hong & Wang (2008) observaram a influência da rotação sobre esse transporte, concluindo que a rotação facilita o escoamento por evitar a deposição dos cascalhos e consequente formação de leito. Sun; Tong & Zhu (2012) estudaram especificamente a formação e perturbação do leito de cascalhos, desenvolvendo um componente para ser acoplado à coluna de perfuração especificamente para perturbar o leito. Esse componente faz com que o cascalho depositado volte a ficar em suspensão e seja levado pelo escoamento. Akhshik; Behzad & Rajabi (2015) focaram na rotação do cilindro interno do espaço anular e na velocidade do escoamento, também para o estudo de transporte de cascalhos. No estudo observaram que a rotação na faixa de 100 até 120rpm reduziu a concentração de partículas de cascalho, facilitando o escoamento. Esses estudos de simulação numérica corroboram com a conclusão de que a perturbação do leito de cascalho é benéfica para o escoamento. O ideal é reduzir sua concentração para que sejam arrastados pelo escoamento, diminuindo a obstrução.

2.3.2 Análises Experimentais com Leito de Cascalhos

A fim de relacionar os estudos numérico e teóricos com casos reais, diversas análises experimentais foram feitas. Nota-se que esses estudos são recentes, devido à difusão da técnica de perfuração horizontal nos últimos anos. Allahvirdizadeh; Kuru & Parlaktuna (2016) comentaram que apesar dos avanços na área de perfuração horizontal, o transporte de cascalhos ainda é o maior desafio a ser estudado. Eles fizeram uma investigação experimental do transporte de cascalhos utilizando areia industrial com diâmetro médio de 2,75mm, comparando diferentes fluidos e concluíram que aumentar a viscosidade do fluido aumenta o transporte de cascalhos até certo ponto. Em altas taxas de cisalhamento, há a degradação das cadeias poliméricas do fluido, comprometendo o transporte de cascalhos. Bizhani; Corredor & Kuru (2016) fizeram um estudo experimental similar, relacionado a transporte de cascalhos com o tipo de fluido. Os cascalhos, porém, eram mais finos, com diâmetro médio entre 0,35mm e 1,2mm, para representar a erosão das laterais do poço. O foco deste estudo foi na formação do leito,

observando as chamadas “dunas” que são geradas com a deposição dos cascalhos. Para essas condições, eles concluíram que o uso de água foi melhor para o transporte do que fluidos poliméricos em cascalhos menores, enquanto o oposto é verdadeiro para cascalhos maiores. Yan *et al.* (2018) fizeram uma análise experimental sobre a formação do leito de cascalhos durante o escoamento em perfurações horizontais e inclinadas. O cascalho utilizado foi areia de quartzo com faixas de diâmetros médios variando entre 0,4mm até 12mm. O diferencial desse estudo foi a introdução da inclinação no escoamento, podendo atingir um ângulo de 20° em relação à horizontal. Neste estudo ainda foi avaliado o efeito da rotação da coluna. Observou-se que altas rotações causam instabilidade no leito de cascalho, facilitando a sua remoção.

Rasi (1994) estudou a interação da geometria fez experimentos consistindo em tracionar modelos de BHA na presença de leito de cascalho, medir a força de tração e observar a formação da obstrução, conforme mostra a Figura 11, relacionando a área transversal do poço que não possui cascalhos A_{Livre} com a área transversal da broca A_{Broca} . Ele concluiu que se A_{Broca} for menor que A_{Livre} , a obstrução formada cresce até uma condição de regime estacionário, onde para de crescer (a) e a força se mantém constante. No caso em que A_{Broca} foi maior que A_{Livre} , essa obstrução cresceu indeterminadamente até que houvesse um entupimento no poço (b), causando um aumento acelerado da força.

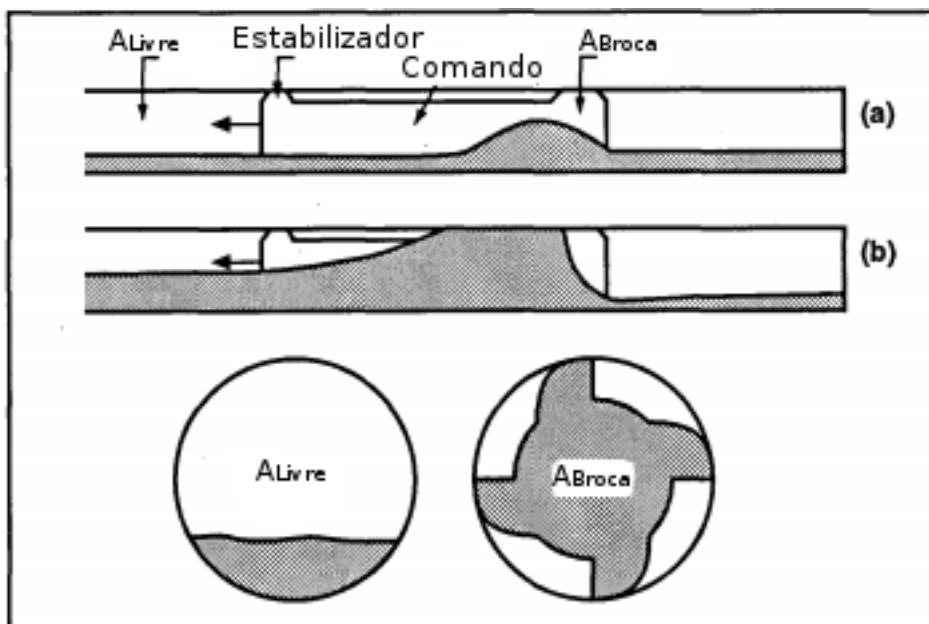


Figura 11 - Formação de Obstrução no BHA (a) Sem Entupimento; (b) Com Entupimento
 FONTE: Adaptado de RASI (1994)

2.4 Sumário da Revisão da Literatura

Existem diversos fatores que influenciam no torque e arraste sofridos por uma coluna de perfuração. Embora existam modelos que procuram consolidar vários parâmetros em um único fator de atrito de projeto, é melhor estudar cada um deles separadamente. Um dos fatores a ser considerado na perfuração horizontal é a existência de um leito de cascalhos. Assim, procura-se entender qual é o seu comportamento e como pode ser influenciado pelas condições de escoamento. Notou-se uma tendência de rotações, em certas faixas, facilitarem o transporte de cascalhos, sendo a conclusão compartilhada por vários autores. As análises experimentais estão de acordo com essa teoria, observando que a rotação da coluna facilita o escoamento e remoção do leito.

Apesar de vários estudos existentes, faltam análises experimentais que levem em consideração a translação da coluna de perfuração, principalmente em condições de perfuração horizontal, e nenhum que relacione tanto translação quanto rotação. O presente trabalho tem a intenção de preencher esse vazio seguindo a linha de pesquisa de Rasi (1994), realizando um experimento similar acrescentando a rotação da coluna até faixa de valores em que Akhshik; Behzad & Rajabi (2015) notam uma maior perturbação do leito de cascalho. Será comparado o comportamento observado nos ensaios com o descrito por Rasi (1994), visando achar uma relação da formação da obstrução com o perfil de força, e então observar se há uma faixa de rotações que altere esse comportamento, com base na análise de Akhshik; Behzad & Rajabi (2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos testes, será utilizada a unidade experimental de torque e arraste instalada no Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), da UTFPR. Atualmente a unidade encontra-se operacional e já conectada a um sistema de aquisição de dados.

3.1 Descrição da Unidade Experimental

A unidade experimental de torque e arraste tem a função de simular o movimento da coluna de perfuração durante uma manobra de retirada, especificamente para uma região horizontal de um poço direcional. A Figura 12 mostra um esquema da unidade, destacando os principais componentes e sistemas. Como se pode observar, fixada em uma estrutura metálica, encontra-se uma tubulação de acrílico horizontal representando o poço perfurado. Pela extremidade direita, passa uma coluna de alumínio que pode ser tracionada e rotacionada pelo sistema de movimentação. A razão de diâmetros entre coluna e poço é de 0,47 e o curso do movimento de retirada da coluna, ou seja, da sua posição inicial até a final, é de 2,93m. O poço é preenchido com água através do sistema de alimentação de fluido localizado na extremidade esquerda da tubulação de acrílico. O sistema de movimentação possui um motor elétrico que rotaciona a coluna e é fixado em uma plataforma móvel conduzida por guias lineares. Essa plataforma é movimentada por um servo-motor, proporcionando ao sistema a movimentação axial através de um conjunto pinhão/cremalheira.

Além da rotação e movimentação axial da coluna, o sistema possibilita a formação de um leito de esferas de vidro dentro da tubulação de acrílico. Essas esferas são introduzidas no poço através de escotilhas na tubulação de acrílico, que podem ser abertas e fechadas.

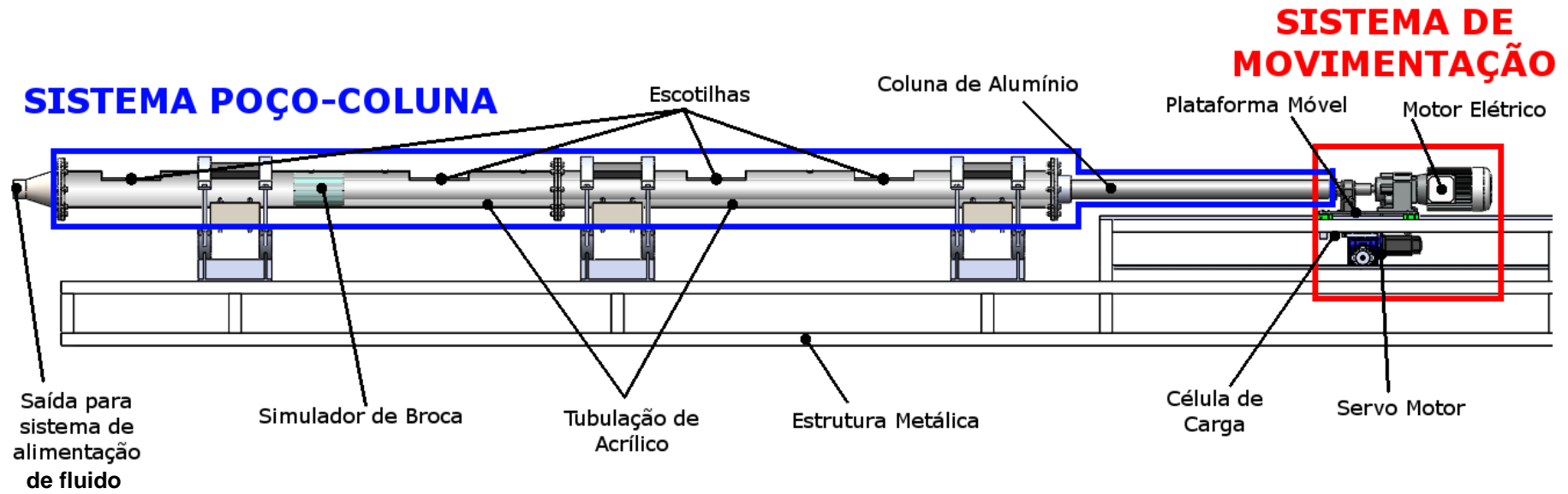


Figura 12 - Unidade Experimental de Torque e Arraste
FONTE: Autoria Própria

3.1.1 Sistema de Movimentação

O sistema de movimentação é responsável por controlar a posição e velocidade dos componentes móveis da unidade experimental. O sistema proporciona dois movimentos independentes, conforme mostra a Figura 13, rotação da coluna e translação da plataforma móvel.

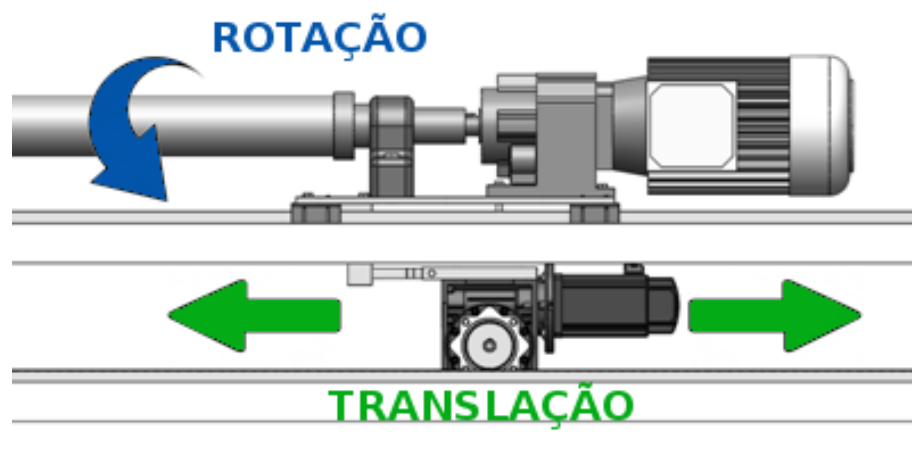


Figura 13 – Movimentos do Sistema de Movimentação
FONTE: Autoria Própria

A plataforma móvel (1) é um componente no qual está fixado o motor elétrico (2) e o mancal de rolamentos da coluna (3) e é conduzida por guias lineares (4), como mostrado na Figura 14. Ainda há uma célula de carga (5) posicionada entre a plataforma e o servo-motor (6).

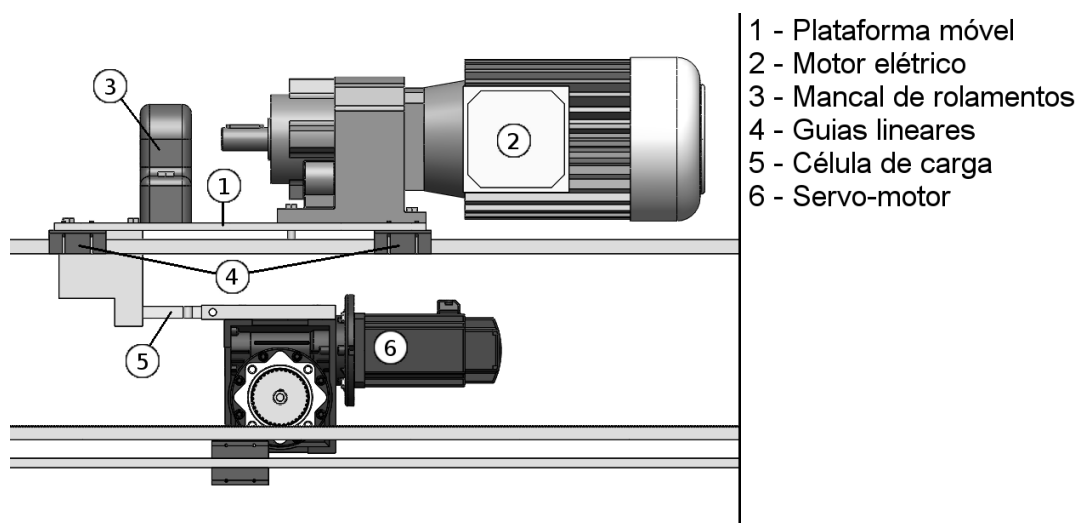


Figura 14 - Conexão do Servo-motor com a Plataforma Móvel
FONTE: Autoria Própria

A translação da plataforma é feita por um servo-motor que, por sua vez, trabalha com um sistema pinhão/cremalheira para se movimentar, também auxiliado por guias lineares, conforme mostra a Figura 15. O conjunto pinhão/cremalheira é o que transforma a rotação do servo-motor em translação. A guia linear garante a orientação do servo-motor, deixando somente um grau de liberdade para movimentação e evitando que o peso do servo-motor interfira na força medida pela célula de carga.

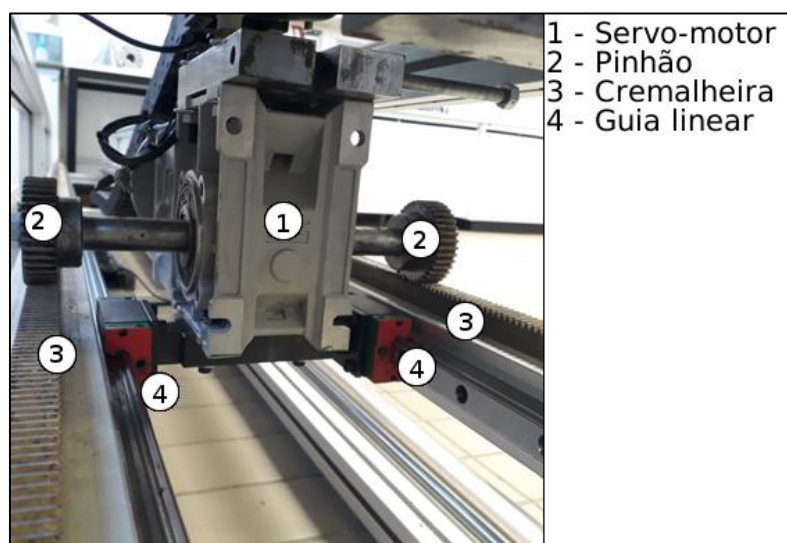


Figura 15 - Montagem do Servo-motor
FONTE: Autoria Própria

A rotação é realizada pelo motor elétrico fixado na plataforma móvel e acoplado à coluna. O acoplamento, apoiado em um mancal de rolamentos cônicos, é fixado ao motor através de uma chave, enquanto a coluna é fixada por pinos ao acoplamento, como mostra a Figura 16.

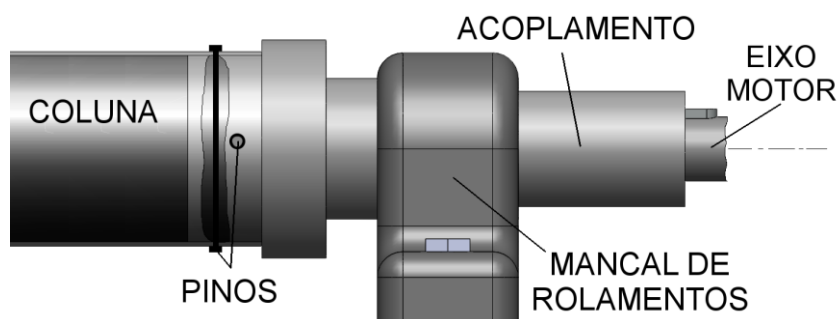


Figura 16 - Acoplamento do Eixo Motor com a Coluna
FONTE: Autoria Própria

Na Tabela 1, constam as especificações técnicas do motor elétrico e do servo-motor.

Tabela 1 - Especificações do Sistema de Movimentação

	<i>Motor elétrico</i>	<i>Servo-motor</i>
Fabricante	NORD	HIWIN
Modelo	172.1-80S/4	FRMS752B508C
Potência nominal [W]	550	750
Rotação máxima [RPM]	172	3000

FONTE: Aatoria Própria

3.1.2 Sistema Poço-Coluna

O sistema poço-coluna é o que simula os componentes de uma coluna de perfuração trabalhando dentro de um poço horizontal. A coluna, feita de alumínio, possui 4m de comprimento, um diâmetro interno de 70mm e externo de 76mm, com uma espessura de parede de 3mm. A coluna é acoplada ao motor elétrico em uma extremidade, enquanto que na outra está fixada uma peça de nylon que representa uma broca e pode ser substituída para testar a influência de sua geometria.

Para representar o poço perfurado, foram utilizados dois tubos de acrílico conectados por flange, conforme mostra a Figura 17. No total, o poço possui 3,98m de comprimento, com um diâmetro de 150mm. O material foi escolhido por sua transparência permitir a visualização do interior do poço durante o teste, assim como durante a preparação do ensaio, facilitando as atividades de formação do leito e manutenção da unidade. Essas atividades são feitas através de quatro rasgos na tubulação, denominados escotilhas.

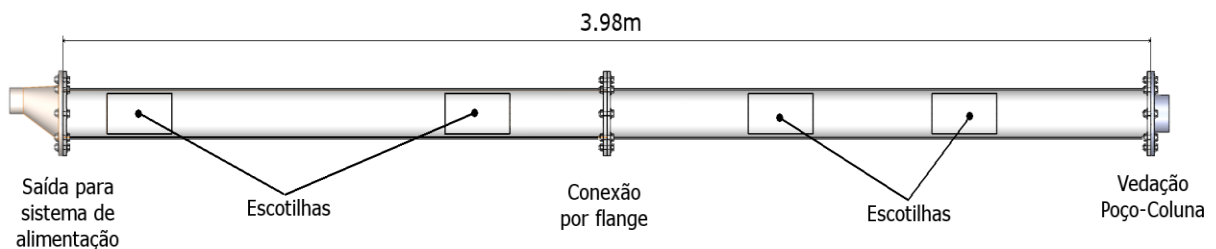


Figura 17 - Poço de Acrílico - Vista Superior
FONTE: Aatoria Própria

Na extremidade onde ocorre a entrada da coluna, utiliza-se uma vedação com anel retentor, conforme mostrado na Figura 18, para evitar que haja vazamento de fluido. Importante ressaltar novamente que esse contato com a vedação gera um atrito não desejado no sistema, captado pelo sistema de medição, e deve ser levado em conta na análise de resultados.

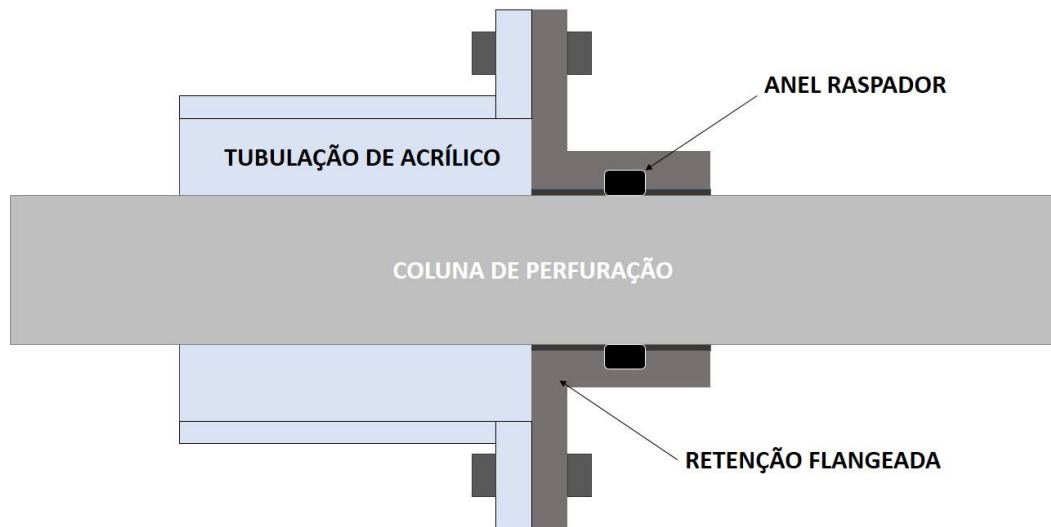


Figura 18 - Vedação Poço-Coluna
FONTE: Autoria Própria

Na extremidade oposta do poço há uma conexão para o sistema de alimentação de fluido.

3.1.3 Sistema de Alimentação de Fluido

O sistema de alimentação de fluido tem a função de encher o poço de fluido, assim como mantê-lo cheio durante o ensaio. Após o término do teste, ainda tem a função de esvaziá-lo. Um esquema do sistema é mostrado na Figura 19. Devido à elevação do reservatório em relação ao poço, o fluido escoar por gravidade, somente com a abertura da válvula V1, para enchê-lo. Porém, para o retorno do fluido ao reservatório, é necessária a atuação de uma bomba após a abertura da válvula V2. Há, ainda, um filtro em Y após a válvula V2 que impede que esferas de vidro sejam succionadas pela bomba, evitando que elas sejam bombeadas para o reservatório.

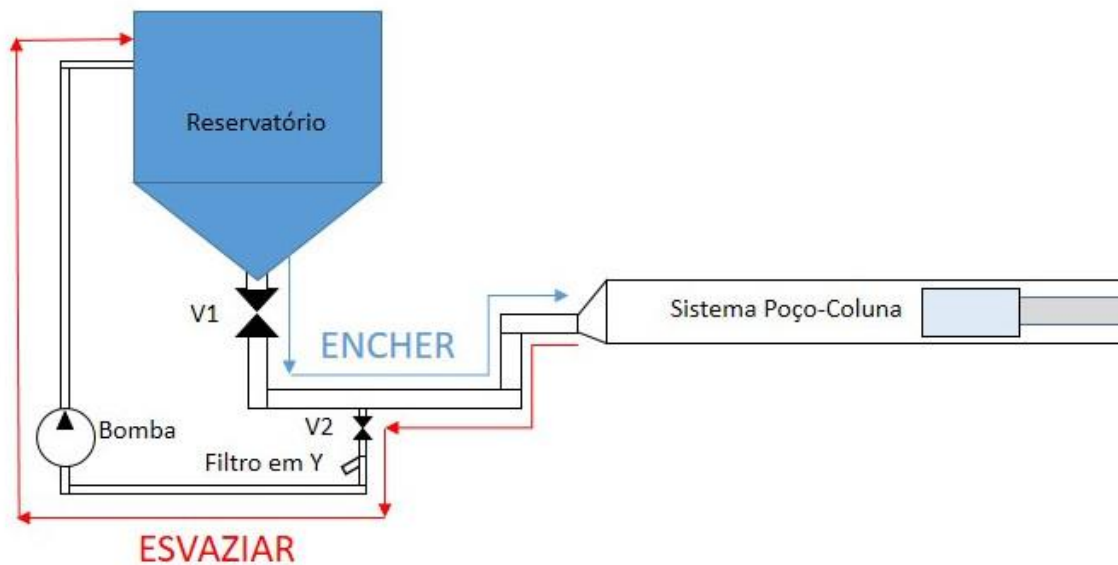


Figura 19 - Esquema do Sistema de Alimentação de Fluido
FONTE: Autoria Própria

3.1.4 Fluido utilizado

Como o sistema ainda não foi adaptado para a utilização de um fluido não newtoniano, será utilizada água para uma análise inicial. Isto é devido ao seu baixo custo de obtenção, previsibilidade quanto seu comportamento e facilidade de manuseio. Os resultados obtidos poderão ser utilizados como base de comparação para estudos futuros, com utilização de fluidos não newtonianos similares aos encontrados em campo.

3.1.5 Manutenção e Preparação de Ensaio

Além dos sistemas principais, há componentes que são utilizados somente antes e depois dos ensaios, para a preparação dos mesmos ou para manutenção da unidade experimental. Todas as operações realizadas dentro do poço são feitas através das escotilhas presentes nos tubos de acrílico, mostradas na Figura 20. Essas podem permanecer abertas durante qualquer atividade em que o poço não estiver com fluido. Para os ensaios, as escotilhas são fechadas com tampas, fixadas com braçadeiras.



Figura 20 - Escotilhas da Tubulação de Acrílico (fechada e aberta)
FONTE: Autoria Própria

Para simular o leito de cascalhos, utilizam-se esferas de vidro com diâmetros entre 3,2mm e 3,8mm. O material foi escolhido por apresentar uma massa específica similar à do cascalho encontrado em perfurações. Para a formação do leito, utilizam-se quatro pares de niveladores de acrílico de diferentes dimensões, ilustrados na Figura 21, para varrer as esferas acima da altura desejada, sem perturbar as que estão embaixo. O formato dos niveladores serve para preencher o espaço anular entre o poço e a coluna a partir de uma certa altura, impedindo a passagem de esferas.

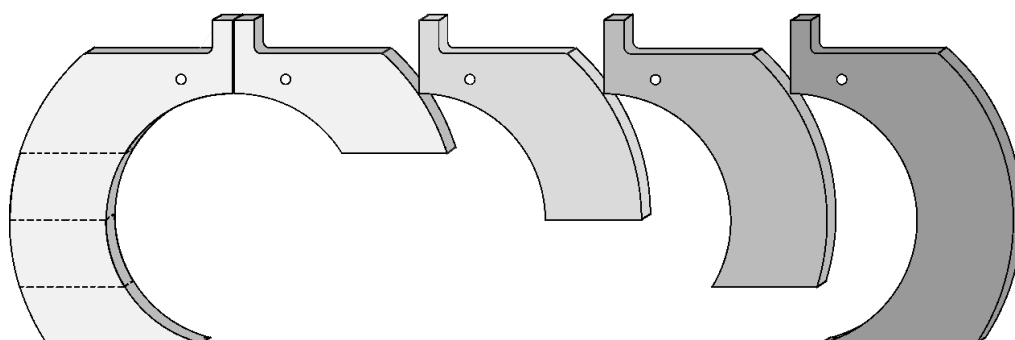


Figura 21 - Niveladores de Leito
FONTE: Autoria Própria

Os niveladores são fixados na coluna e utilizam-se de seu próprio movimento de translação para formar o leito, conforme mostrado na Figura 22. Enquanto a

coluna se desloca, o nivelador empurra as esferas introduzidas através das escotilhas abertas. As esferas que estão acima da altura desejada são levadas pelo nivelados, enquanto as que estão abaixo permanecem paradas, formando o leito. Uma vez formado, deve-se tomar cuidado para que não haja perturbação do leito, sendo recomendado nivelá-lo em um único sentido.

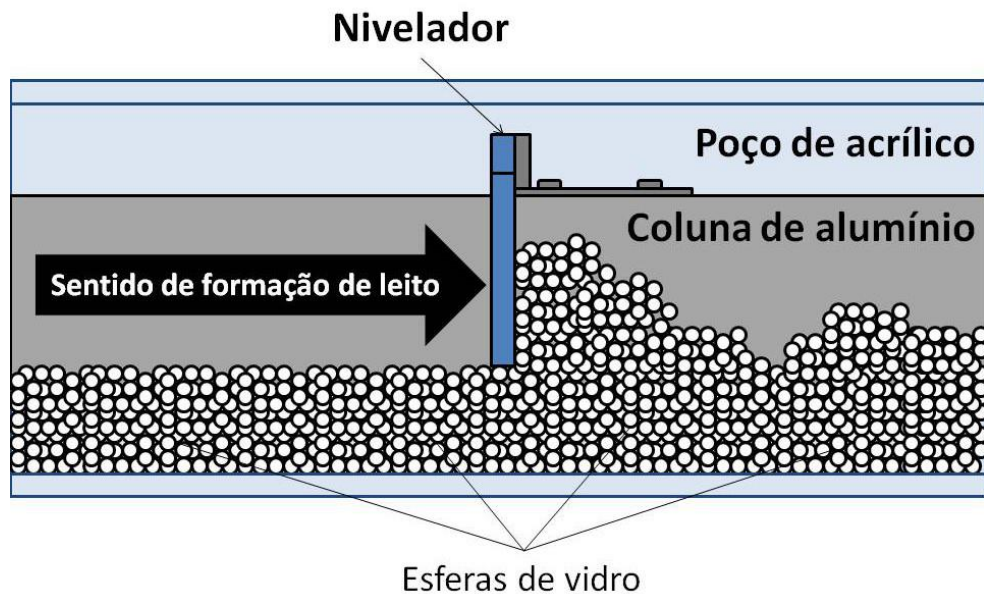


Figura 22 - Formação do Leito de Cascalhos
FONTE: Autoria Própria

3.1.6 Célula de Carga e Aquisição de Dados

Uma célula de carga de tração e compressão foi acoplada entre a plataforma móvel e o servo motor a fim de medir a força exercida sobre todos os componentes móveis. A célula de carga utilizada é um transdutor HBM-S2M, mostrada na Figura 23. O seu erro é de 2%, com confiabilidade até 750N. Para manter as medições dentro deste limite, a força máxima tolerável em um ensaio é de 700N. Se esse máximo for excedido, o sistema irá parar toda a movimentação e o ensaio será encerrado.

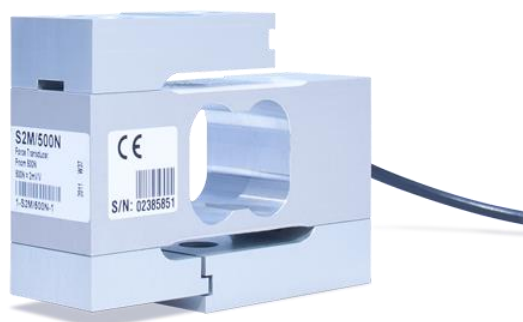


Figura 23 - Célula de Carga HBM-S2M/500N
FONTE: HBM(2018)

Já a aquisição de dados é feita pelo computador, através do *software* LabView. Os dados coletados pela célula de carga são enviados para uma placa de aquisição conectada a um chassi que troca sinais diretamente com o computador.

3.2 Descrição da Metodologia

O procedimento experimental será feito através de testes em triplicata, com diferentes combinações de parâmetros por ensaio, visando comparação posterior.

3.2.1 Protocolo de Testes

Para padronização dos ensaios, assim como servir de guia para execução dos mesmos, foi elaborado um fluxograma, mostrado na Figura 24. As etapas são: preparação da bancada (azul); ensaio (amarelo); e manutenção (vermelho).

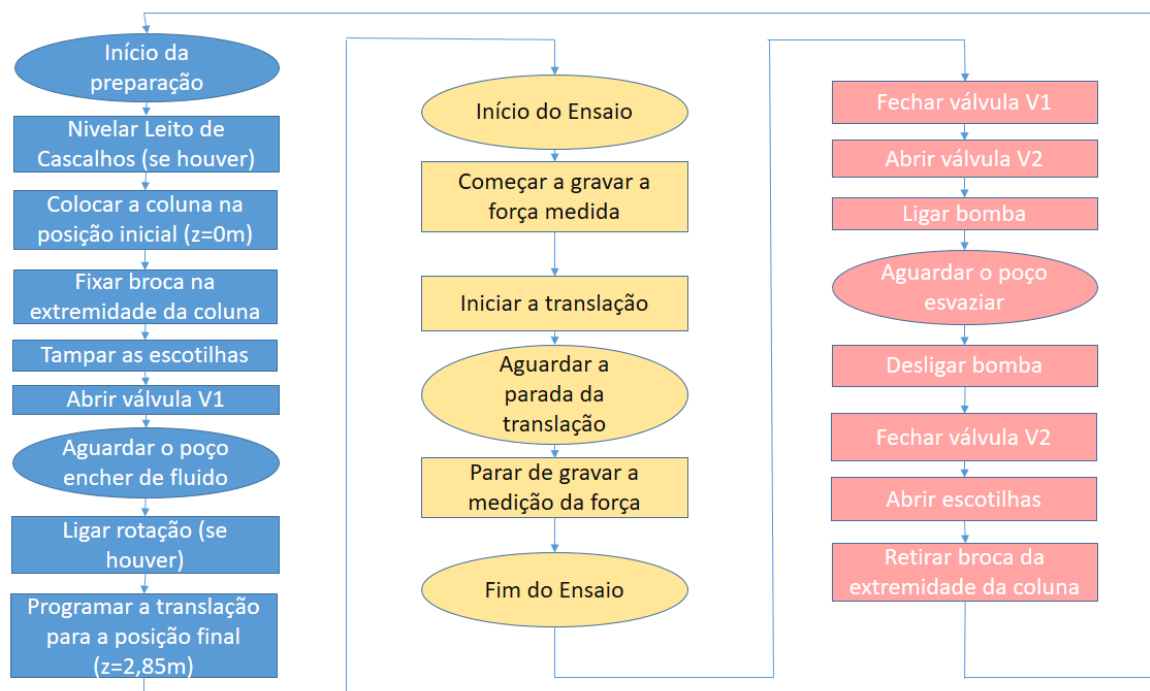


Figura 24 - Fluxograma dos Ensaios
FONTE: Autoria Própria

Como é possível observar, o ensaio em si é bem simples. Entretanto, as tarefas entre cada ensaio demandam uma grande porção do tempo total. A preparação leva de 40 até 60 minutos para um ensaios de até 15 segundos, seguido de cerca de 10 minutos para a manutenção.

3.2.2 Parâmetros

Os parâmetros fixos em todos os ensaios foram: o fluido utilizado foi água; os cascalhos são esferas de vidro com diâmetro entre 3,2mm até 3,8mm; o curso do ensaio de 2,93m e a velocidade de movimentação de 30cm/s. Outros dois parâmetros principais foram variados:

- Rotação da coluna;
- Altura de leito de cascalhos;

O foco desta pesquisa é nos efeitos da rotação sobre a força de retirada. Assim, foram comparados quatro valores de rotação, sendo eles 0rpm (coluna sem rotação), 50rpm, 100rpm e 150rpm. A altura do leito de cascalho foi variado para se fazer a análise em três condições diferentes. Para isto, utilizou-se três níveis de

cascalhos, baseados na razão entre a altura do leito (h) e o diâmetro do poço (D), conforme mostra a Figura 25. As três razões utilizadas são: 0,22; 0,33; e 0,47.

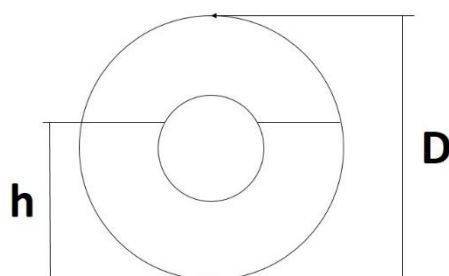


Figura 25 - Razão Altura de Leito por Diâmetro
FONTE: Autoria Própria

3.2.3 Ensaio sem Cascalho

Os primeiros ensaios foram feitos somente com a coluna submersa em água, sem a presença do leito de cascalho. O objetivo foi observar a resposta da força somente em função do efeito da rotação sobre o conjunto. O teste consiste em tracionar a coluna pelo curso total do ensaio com velocidade constante de 30cm/s, conforme mostra a Figura 26, através de um curso de 293mm. O teste foi repetido três vezes para cada valor de rotação da coluna. Assim, determina-se a influência dos componentes mecânicos da unidade experimental, como a vedação, que exerce uma força de atrito sobre a coluna.

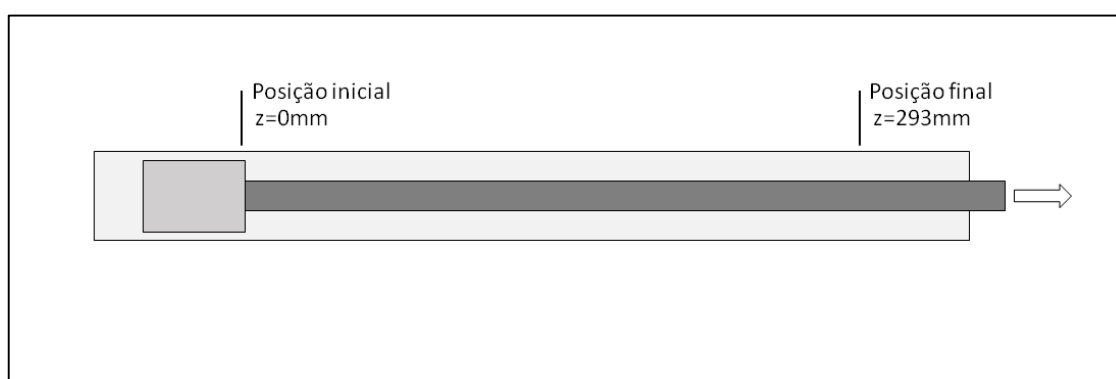


Figura 26 - Ensaio sem Cascalho
FONTE: Autoria Própria

3.2.4 Ensaio com Cascalho

Os ensaios seguintes são com cascalhos, para observar os efeitos da rotação sobre o leito e sobre a força de retirada. O curso e velocidade dos ensaios se mantêm iguais aos anteriores, conforme mostra a Figura 27, em 293mm e 30cm/s

respectivamente. O início do leito possui uma marcação em 82mm de curso, porém nota-se que o contato da broca com os cascalhos ocorre antes dessa marcação. Isso se deve a uma pequena movimentação dos cascalhos durante a preparação do ensaio e deve ser levado em consideração durante a análise dos perfis de força levantados.

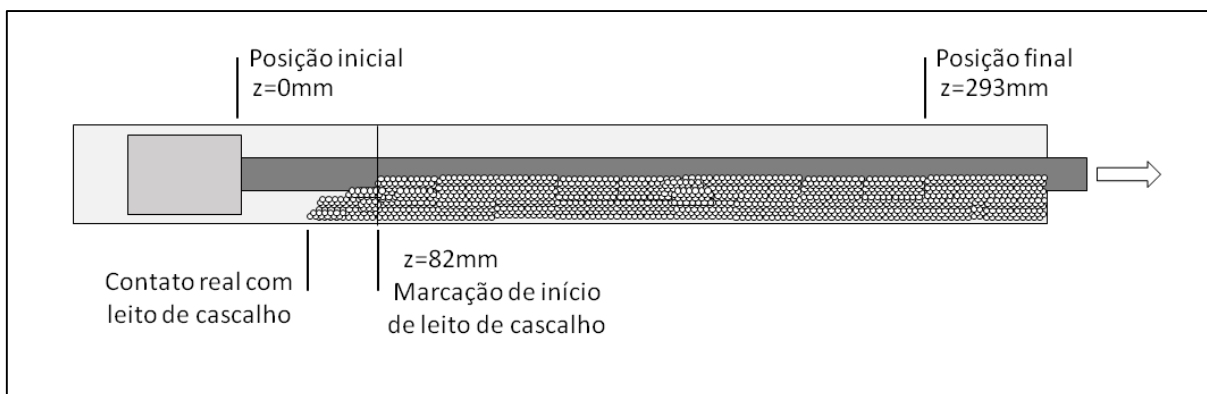


Figura 27 - Ensaio com Cascalho

FONTE: Autoria Própria

Os parâmetros a serem variados nesses ensaios são, como já citados, a rotação e a razão de altura de leito. As combinações dessas variáveis podem ser observadas na Tabela 2, totalizando doze condições diferentes de ensaios.

Tabela 2 - Ensaio de Rotação x Razão de Leito

<i>Ensaio</i>	<i>Razão de altura de Leito</i>	<i>Rotação [rpm]</i>
TR01	0,22	0
TR02		50
TR03		100
TR04		150
TR13	0,33	0
TR14		50
TR15		100
TR16		150
TR25	0,47	0
TR26		50
TR27		100
TR28		150

FONTE: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão os perfis de força levantados para cada condição de ensaio, seguido de explicações sobre seus comportamentos.

4.1 Ensaio sem Cascalho

Nos primeiros ensaios, sem a presença de leito de cascalho, foi observado o comportamento da unidade experimental. Conforme a Figura 28 mostra, esse comportamento pode ser dividido em três intervalos. Primeiro há o início da movimentação da coluna no qual a força deve vencer a inércia do sistema até atingir a condição de regime, resultando em um pico de força seguido de oscilações de alta amplitude. Com uma aceleração de 20cm/s^2 a velocidade de 30cm/s é atingida aos $1,5\text{s}$ de ensaio e a força assume um comportamento quase constante, somente com menores oscilações devidas ao ruído elétrico da aquisição de dados e vibrações do conjunto. Finalmente, há o intervalo de desaceleração, novamente com 20cm/s^2 , no qual a força decresce até que a coluna pare e o ensaio seja concluído.

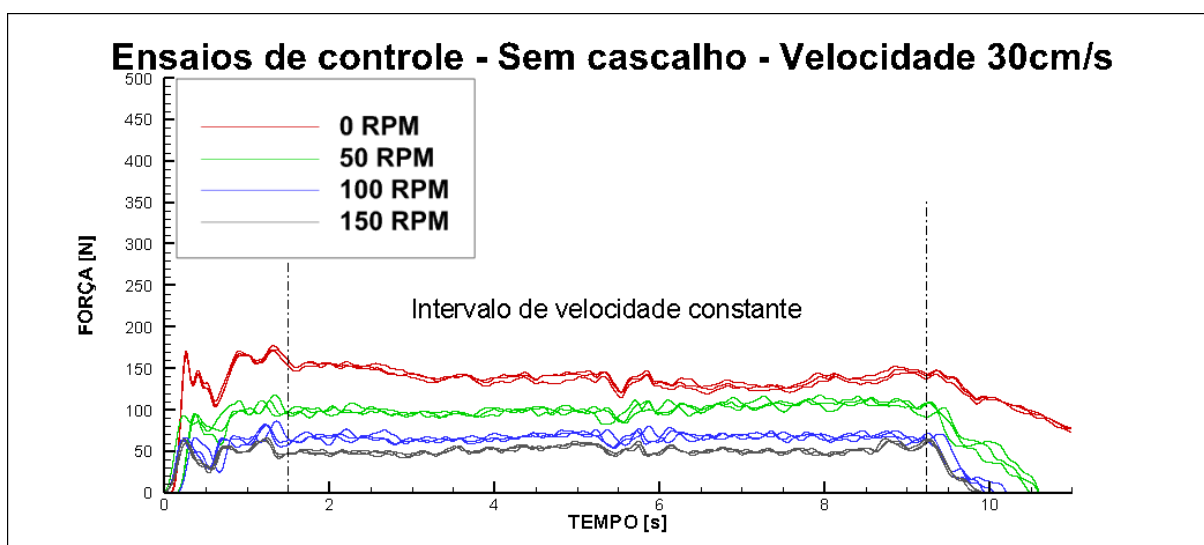


Figura 28 - Ensaio de Controle Sem Cascalho

FONTE: Autoria Própria

4.1.1 Atrito Devido à Vedação

Nota-se que a força média durante o intervalo de velocidade constante diminuiu com o aumento da rotação da coluna. Supõe-se que isso se deva principalmente à redução do atrito da coluna com a vedação conforme descrito na seção 3.1.2 (pag.

27). A Figura 29 mostra os valores médios da força no intervalo de velocidade constante em função da rotação da coluna.

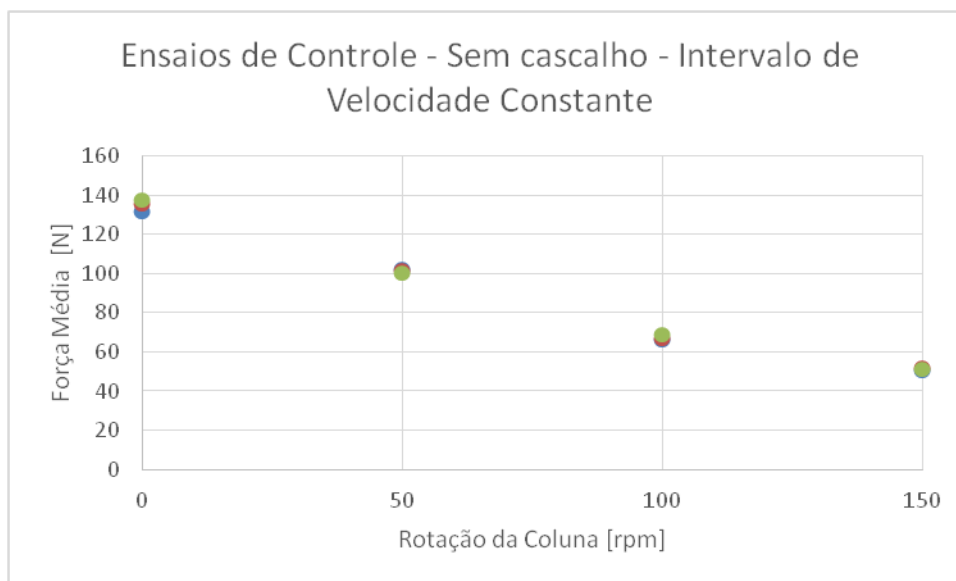


Figura 29 - Força Média no Intervalo de Velocidade Constante

FONTE: Autoria Própria

Tendo esses valores, é possível subtraí-los dos perfis de forças dos ensaios subsequentes, para que seja observado somente os efeitos do leito de cascalho. Isso pode ser colocado na forma da Equação (1), onde F_{leito} é a força somente devida ao leito de cascalho, F é o perfil de força medido e $F_{méd}$ é a força média de atrito calculada.

$$F_{leito} = F - F_{méd} \quad (1)$$

Essa equação será aplicada em todos os próximos perfis de força levantados. Os valores a serem utilizados como $F_{méd}$ são indicados na Tabela 3, variando conforme a rotação.

Tabela 3 - Força Média de Atrito por Rotação

<i>Rotação [rpm]</i>	<i>F_{méd} [N]</i>
0	135,0
50	101,4
100	67,3
150	51,5

FONTE: Autoria Própria

4.2 Ensaio com Cascalho

Após obter o comportamento da unidade experimental sem a presença de cascalhos, foram feitos os ensaios com a presença do leito de cascalho.

4.2.1 Razão de leito 0,22

A razão de leito de 0,22 é uma condição onde a coluna completou o curso total dos ensaios em todas as rotações, sem que a movimentação fosse interrompida pela força medida ultrapassar o valor de 700N, considerado o critério de parada.

4.2.1.1 Subtração do Atrito da Vedação

Feitos os ensaios, é necessário subtrair a força de atrito da vedação. Após obter todos os perfis de força, foi aplicada a Equação (1) com os valores da Tabela 3, conforme mostra a Figura 30.

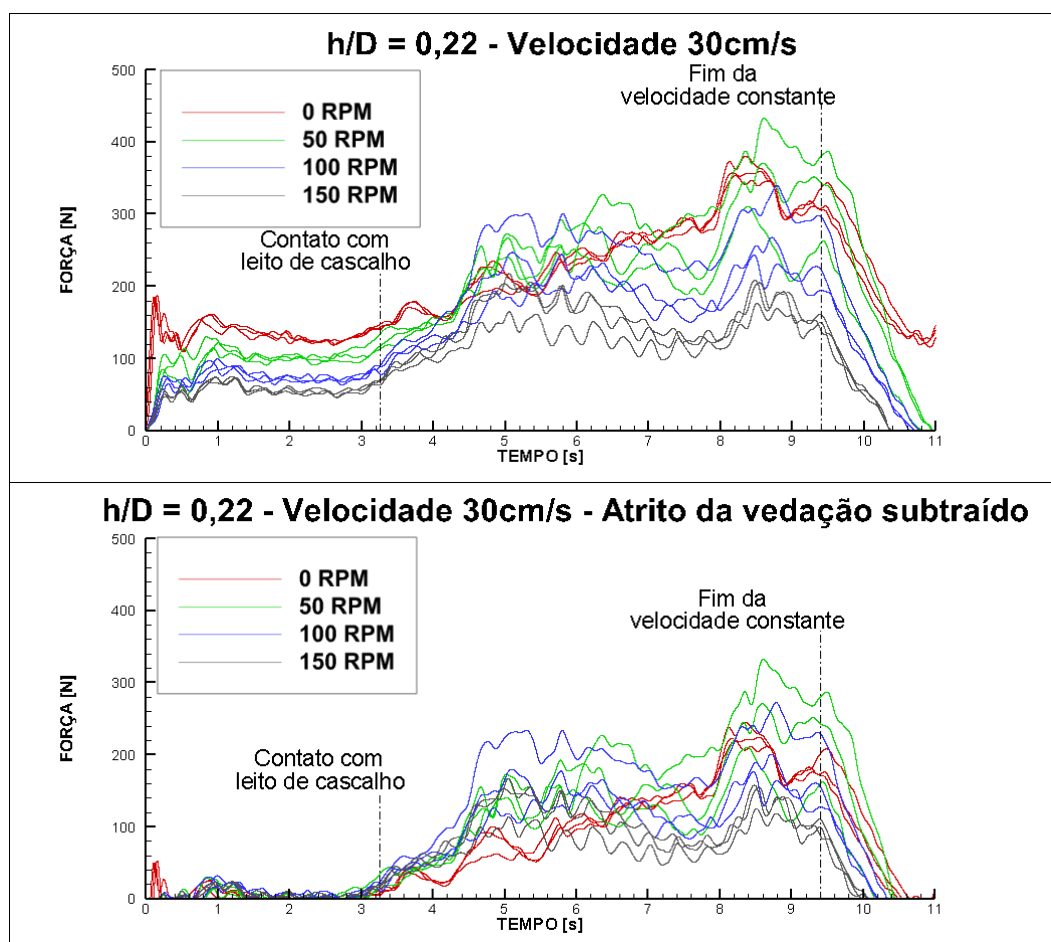


Figura 30 - Ensaio de Razão 0,22 - Correção do Perfil de Força
 FONTE: Autoria Própria

Nota-se que a correção somente desloca o perfil de força para baixo, deixando o valor médio da força antes do contato da broca com o leito de cascalho próximo de 0N. Para uma melhor análise, a seguir são mostrados as médias dos perfis de força corrigidos para cada rotação, sendo descrito os comportamentos observados.

4.2.1.2 Influência da Rotação no Perfil de Força

Nos perfis dos ensaios sem rotação, mostrados na Figura 31, nota-se o mesmo comportamento de aceleração (A) dos ensaios sem cascalho, seguido de um intervalo de velocidade constante (B) que se inicia em t_{VC} . Foi observado que a força de retirada tem um crescimento aproximadamente linear (C) após o contato da broca com o leito de cascalhos em t_L . Em seguida, há um intervalo (D) no qual a força aumenta bruscamente em t_P e sofre uma grande oscilação antes da desaceleração (E) se iniciar em t_F .

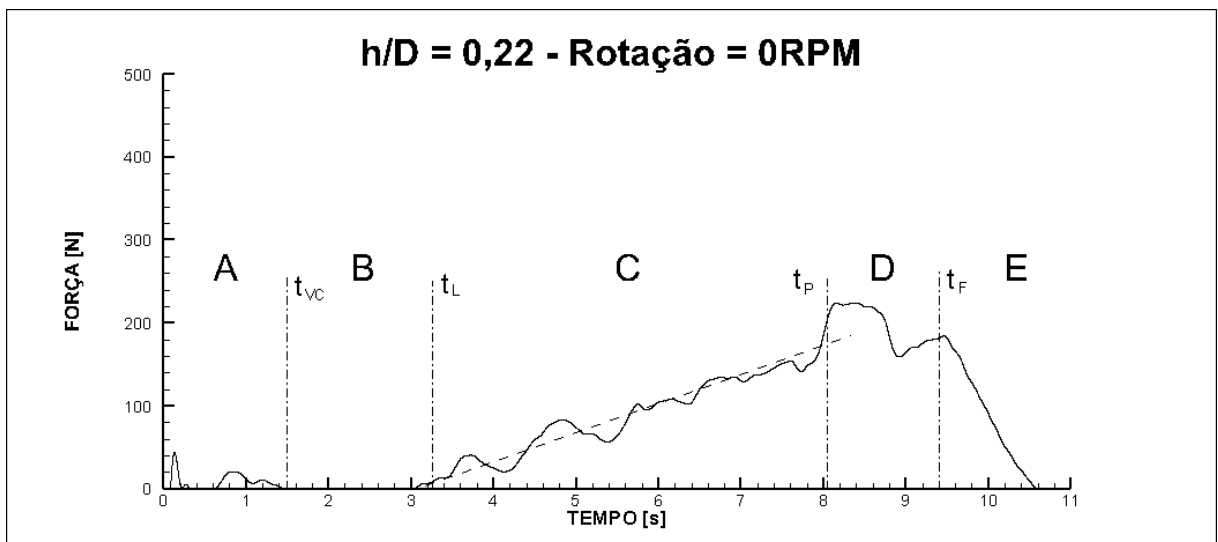


Figura 31 - Ensaios de Razão 0,22 - Rotação = 0rpm

FONTE: Autoria Própria

Os ensaios com rotação de 50rpm , mostrados na Figura 32, seguem o mesmo comportamento inicial (A) e (B), nos mesmos tempos t_{VC} e t_L . Foi observado o mesmo comportamento de crescimento linear (C) do ensaio sem rotação, porém em um intervalo de tempo muito menor antes de t_P . Em seguida há um intervalo no qual a força aumenta bruscamente e assume um comportamento com grandes oscilações (D), mas com uma redução no seu crescimento, até que alcance t_F e ocorra a desaceleração (E). Supõe-se que nesse intervalo (D), a obstrução tenha atingido o

seu tamanho de regime estacionário e cessado seu crescimento, conforme previsto pelo estudo de Rasi (1994).

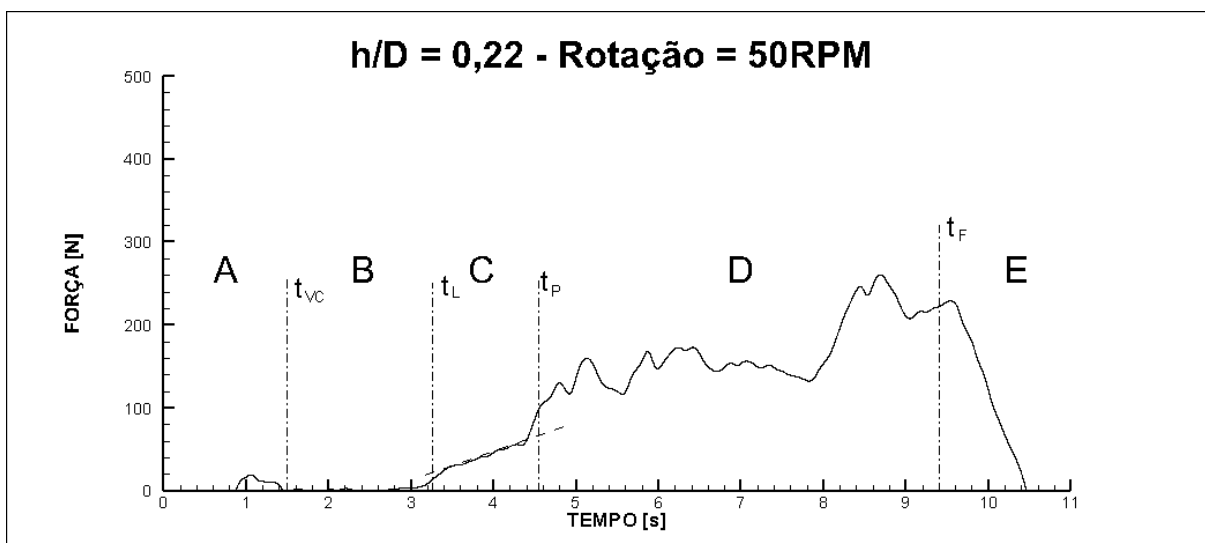


Figura 32 - Ensaio de razão 0,22 - Rotação = 50rpm

FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 100rpm, nota-se um perfil de força similar ao de 50rpm, com os mesmos intervalos (A) e (B) e tempos t_{VC} e t_L , seguidos do crescimento linear (C) e o aumento brusco de força em t_P . No entanto, o intervalo de comportamento oscilatório (D) possui uma faixa de valores menores do que os observados na rotação mais baixa até que a desaceleração (E) ocorra em t_F .

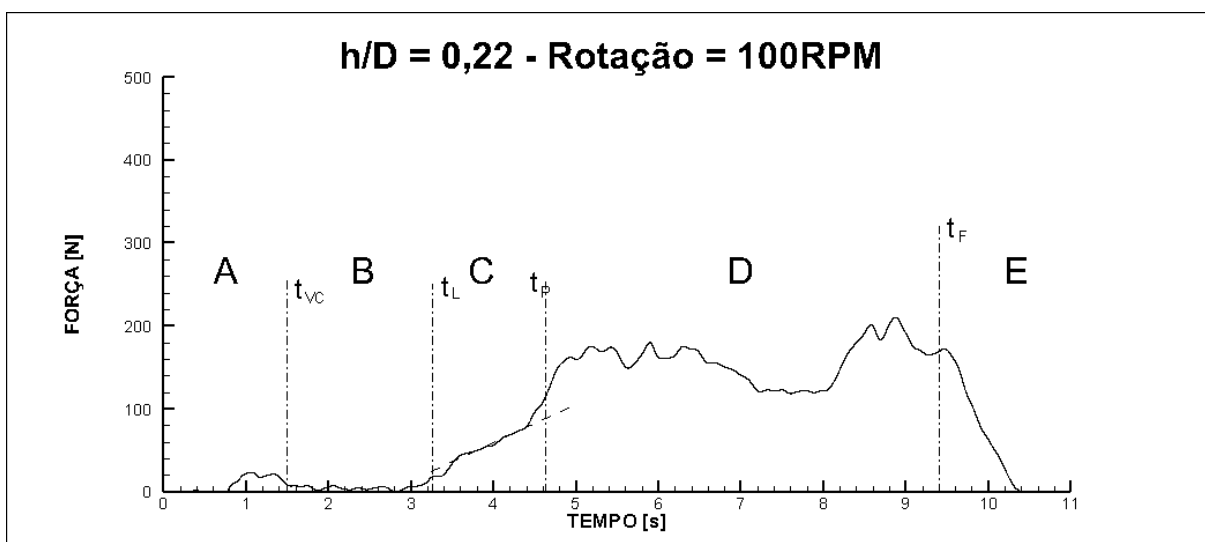


Figura 33 - Ensaio de razão 0,22 - Rotação = 100rpm

FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 150rpm, mostrados na Figura 34, nota-se um perfil de força similar, tanto ao de 50rpm quanto ao de 100rpm, com os mesmos

intervalos (A) e (B) e tempos t_{VC} e t_L , seguidos do crescimento linear (C) e o aumento brusco de força em t_P . Entretanto o valor médio da força no intervalo de oscilações (D) novamente foi reduzido, em relação às rotações mais baixas, até a desaceleração (E) em t_F .

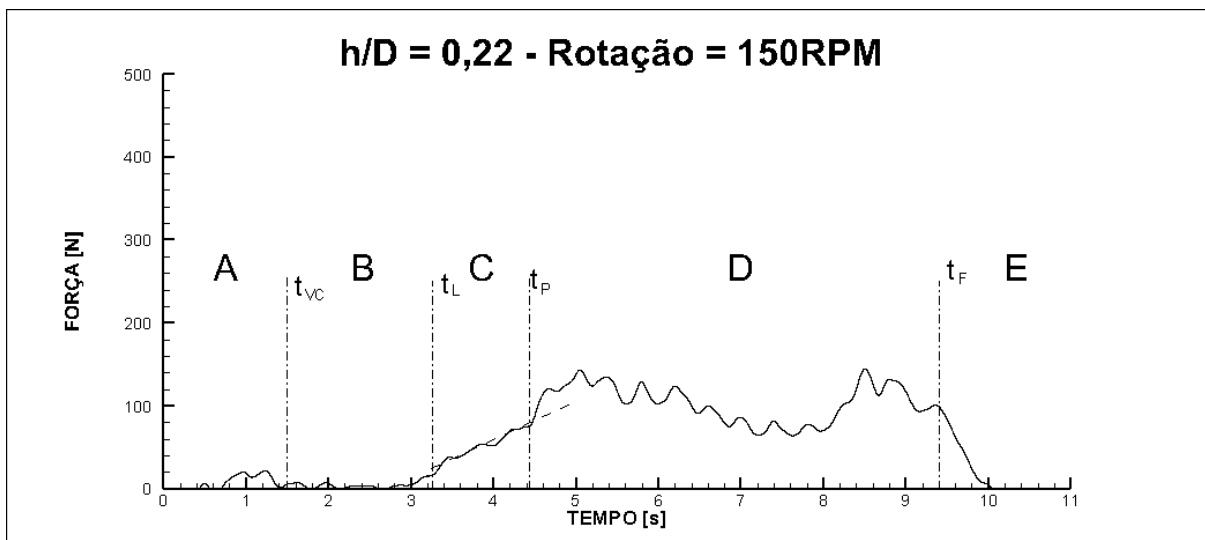


Figura 34 - Ensaio de Razão 0,22 - Rotação = 150rpm

FONTE: Autoria Própria

Ao comparar os perfis de força em relação à rotação de cada ensaio, é possível notar sua influência no intervalo de crescimento linear, definido como a diferença entre t_P e t_L . A Figura 35 mostra que o intervalo cai de aproximadamente 5s no caso sem rotação para aproximadamente 1s em todos os casos com rotação.

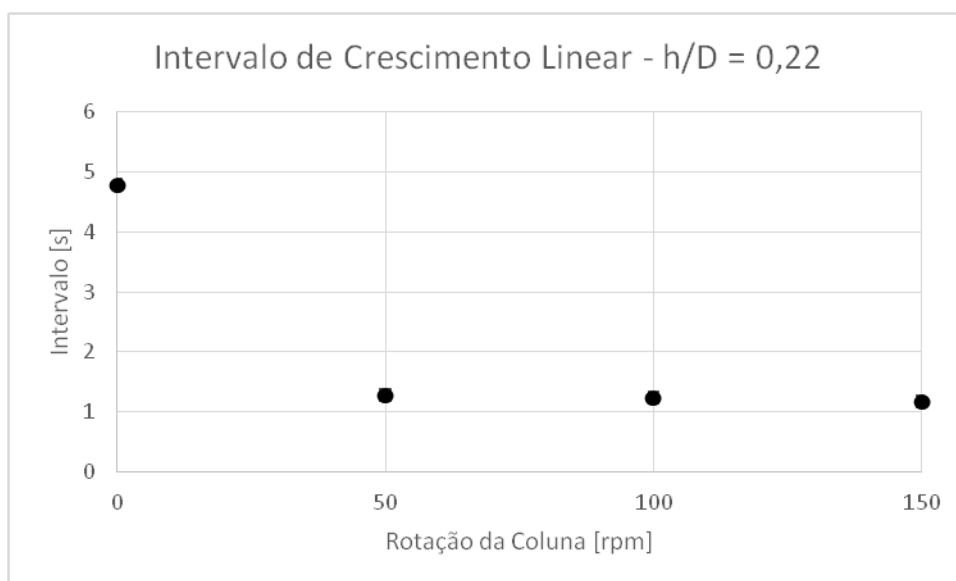


Figura 35 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,22

FONTE: Autoria Própria

Ainda é possível observar que a rotação tem influência no intervalo (D) após o crescimento linear onde há grandes oscilações. A Figura 36 mostra a tendência da força média diminuir com o aumento da rotação, sendo reduzida quase pela metade do caso sem rotação para o caso de rotação de 150rpm.

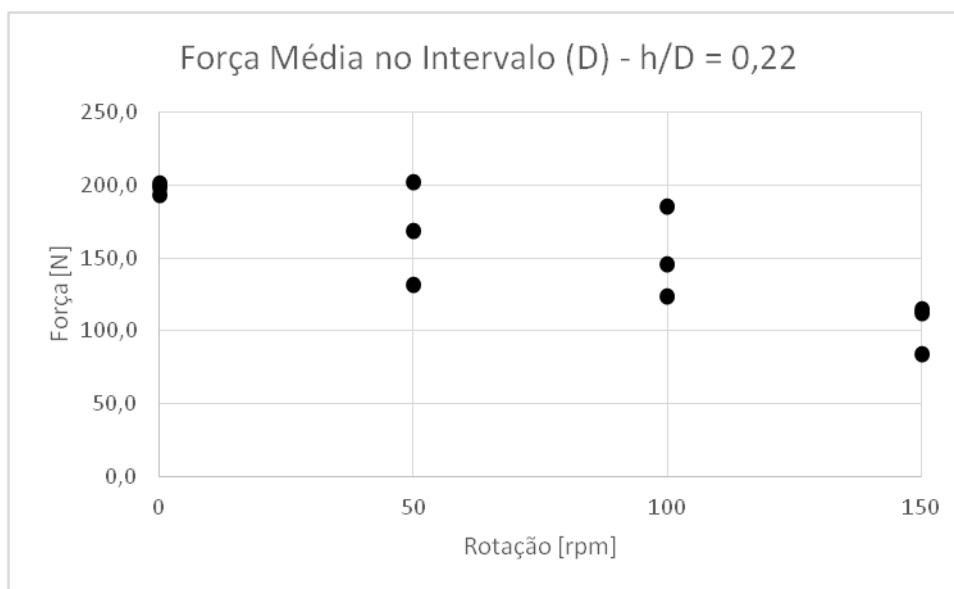


Figura 36 - Força Média no Intervalo (D) para Razão de 0,22

FONTE: Autoria Própria

Com base nesses dados, supõe-se que a presença da rotação nessa altura de leito causa o crescimento da obstrução da coluna mais rapidamente do que sem rotação, causando o aumento súbito de força observado nos perfis de força. No entanto, por ser um caso em que o tamanho da obstrução atinge o regime estacionário descrito por Rasi (1994), a rotação diminui o valor médio da força nesse regime, possivelmente devido à maior perturbação do leito de cascalho facilitar seu carregamento pelo fluido, conforme simulado numericamente por Akhshik; Behzad & Rajabi (2015).

4.2.2 Razão de leito 0,33

Os ensaios com a razão de leito 0,33 foram os primeiros a ultrapassarem a força de 700N, portanto não completaram o curso total de 293mm. Isso se deve ao fato de uma altura de leito maior aumentar o acúmulo de cascalho próximo à broca e, conseqüente, ser mais indesejável durante uma manobra.

4.2.2.1 Subtração do Atrito da Vedação

Feitos os ensaios, é necessário aplicar a correção da força de atrito da vedação. Após obter todos os perfis de força, foi aplicada a Equação (1) com os valores da Tabela 3, conforme mostra a Figura 37.

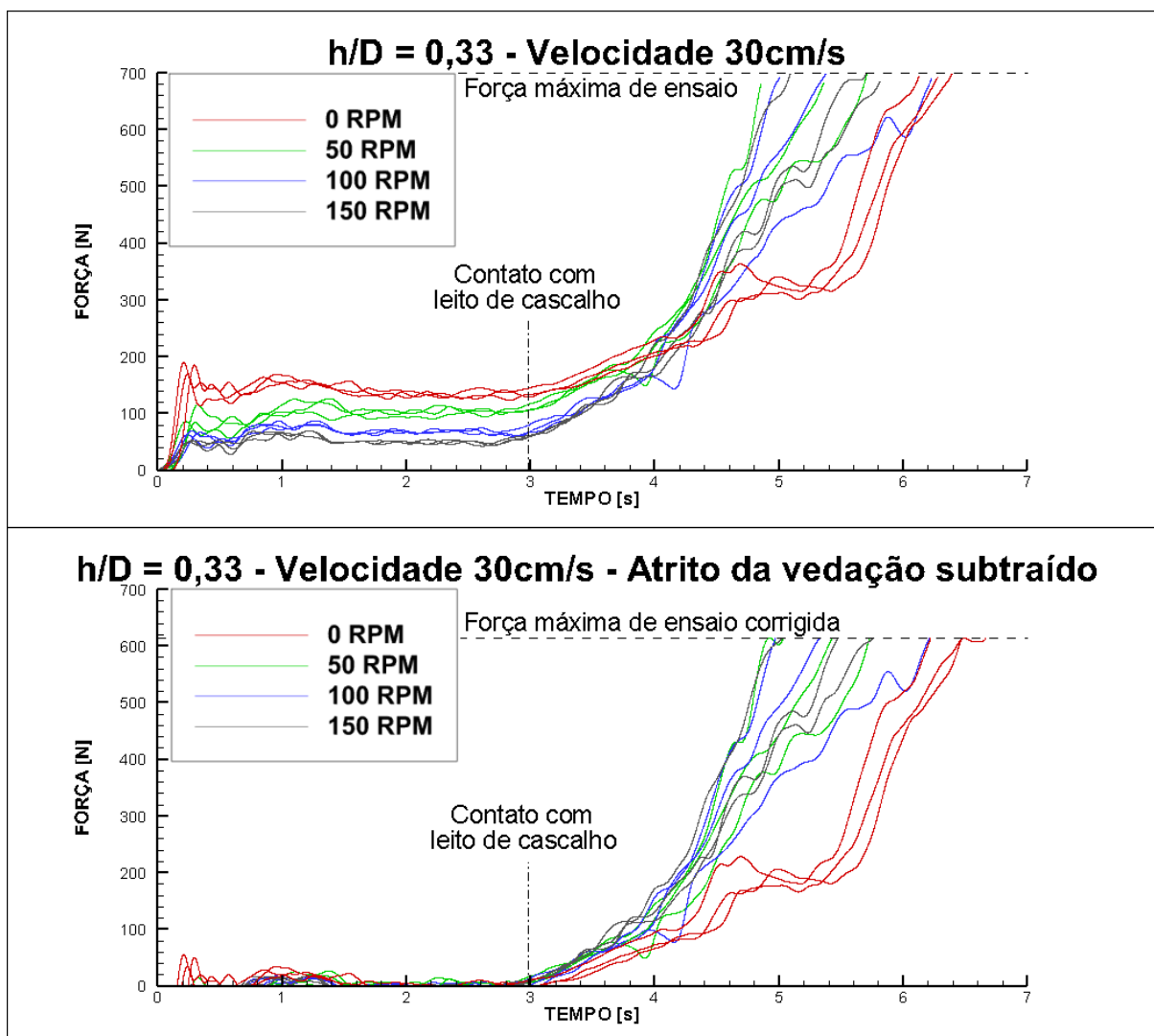


Figura 37 - Ensaio de Razão 0,33 - Correção do Perfil de Força

FONTE: Autoria Própria

Nota-se novamente que a correção somente desloca o perfil de força para baixo. No entanto, neste caso, foi corrigida também a força máxima de ensaio para que os valores ainda estejam dentro da faixa de medição da célula de carga. Para uma melhor análise, a seguir são mostrados a média dos perfis de força corrigidos para cada rotação, sendo descrito os comportamentos observados.

4.2.2.2 Influência da Rotação no Perfil de Força

Nos ensaios sem rotação, mostrado na Figura 38, há o mesmo comportamento inicial de aceleração (A) até atingir velocidade constante (B) em t_{vc} . Foi observado novamente que a força de retirada tem um comportamento de crescimento aproximadamente linear (C), com uma breve oscilação em aproximadamente 4,5s de ensaio devido à interferência da tampa de uma das escotilha com o leito de cascalho mais alto. Porém, ao contrário da razão de leito mais baixa, ao sofrer um aumento brusco em t_{crit} devido ao entupimento do poço, a força exercida sobre o sistema cresce rapidamente e ultrapassa o valor de 700N (D), considerado o critério de parada.

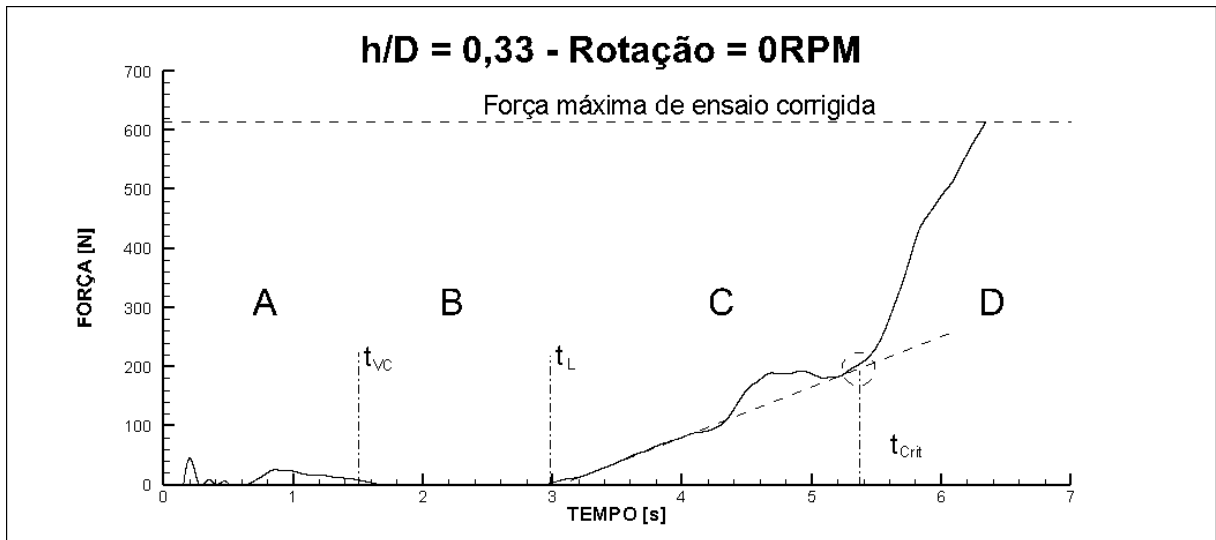


Figura 38 - Ensaio de Razão 0,33 - Rotação = 0rpm

FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 50rpm, mostrado na Figura 39, o intervalo crescimento aproximadamente linear (C), após o contato da broca com o leito de cascalhos em t_L , segue a mesma tendência dos ensaios de razão 0,22 em que a força diminui com a rotação. Mais uma vez, ao sofrer um entupimento em t_{crit} , a força exercida sobre o sistema ultrapassou o valor de 700N (D).

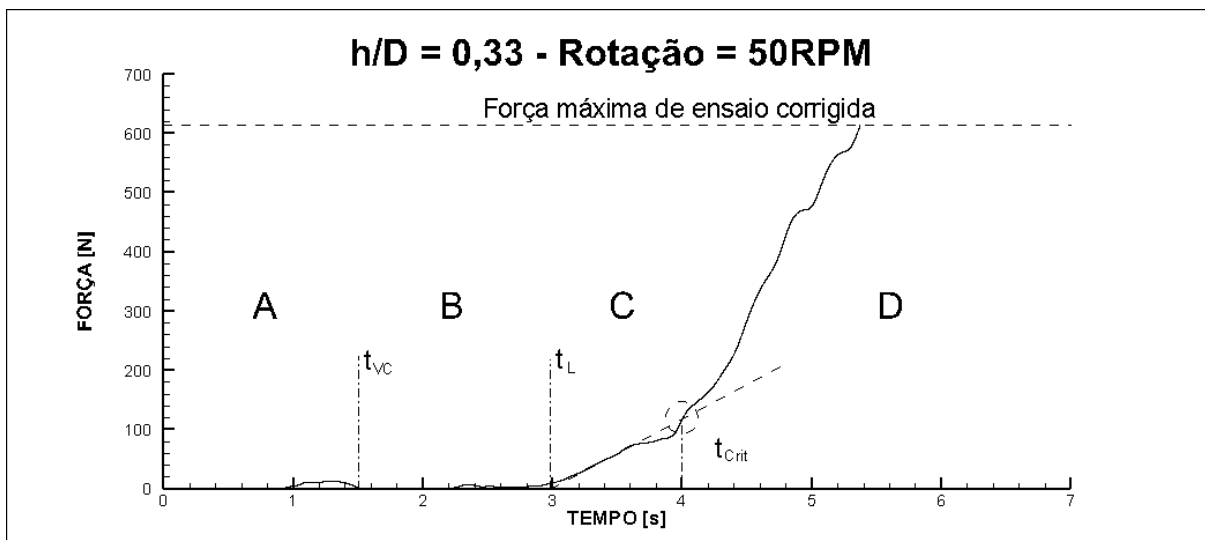


Figura 39 - Ensaio de Razão 0,33 - Rotação = 50rpm
FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 100rpm, mostrado na Figura 40, o intervalo de crescimento aproximadamente linear (C), após o contato da broca com o leito de cascalhos em t_L , novamente é reduzido com o aumento de rotação antes de sofrer o aumento brusco em t_{crit} .

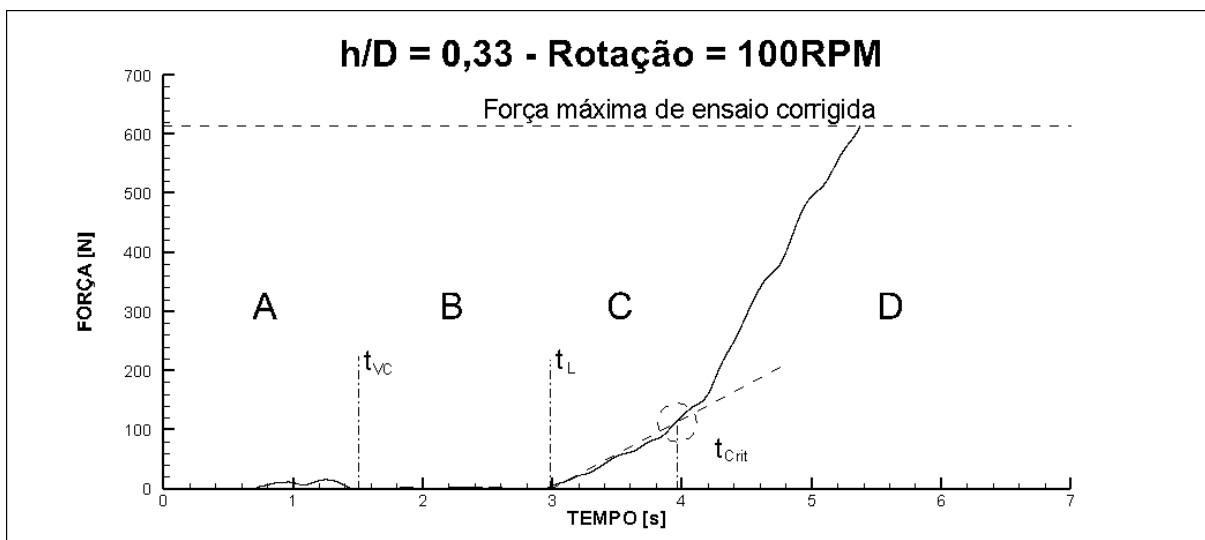


Figura 40 - Ensaio de Razão 0,33 - Rotação = 100rpm
FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 150rpm, mostrado na Figura 41, há o mesmo comportamento dos ensaios anteriores, porém novamente com uma redução no intervalo de crescimento linear da força.

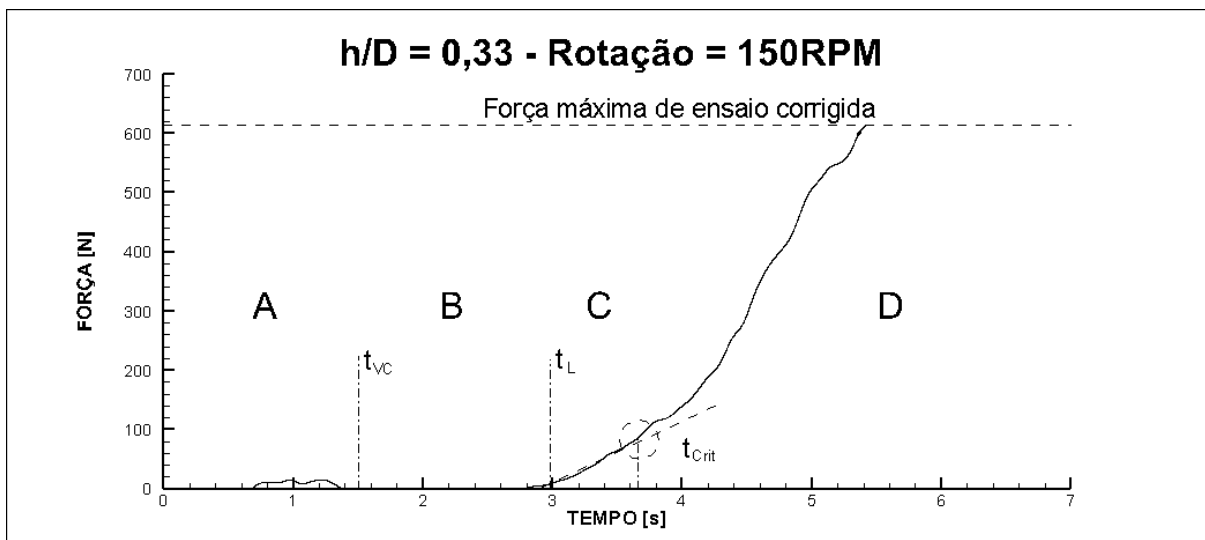


Figura 41 - Ensaio de Razão 0,33 - Rotação = 150rpm
FONTE: Autoria Própria

Nota-se que em todos os ensaios para esta razão, o perfil de força segue um comportamento linear até que se inicia no instante t_{crit} um intervalo de instabilidade com um crescimento brusco e que causa o fim do teste devido ao critério de parada. Novamente se comprova o comportamento descrito por Rasi (1994), no caso em que o tamanho da obstrução não atinge o regime estacionário e cresce indefinidamente. Ainda observa-se, conforme mostrado na Figura 42, que o intervalo de crescimento linear, definido pela diferença entre t_{crit} e t_L , diminui com o aumento da rotação. Esse efeito é maior entre a rotação de 50rpm e sem rotação e menor ao aumentar a rotação para 100rpm e 150rpm.

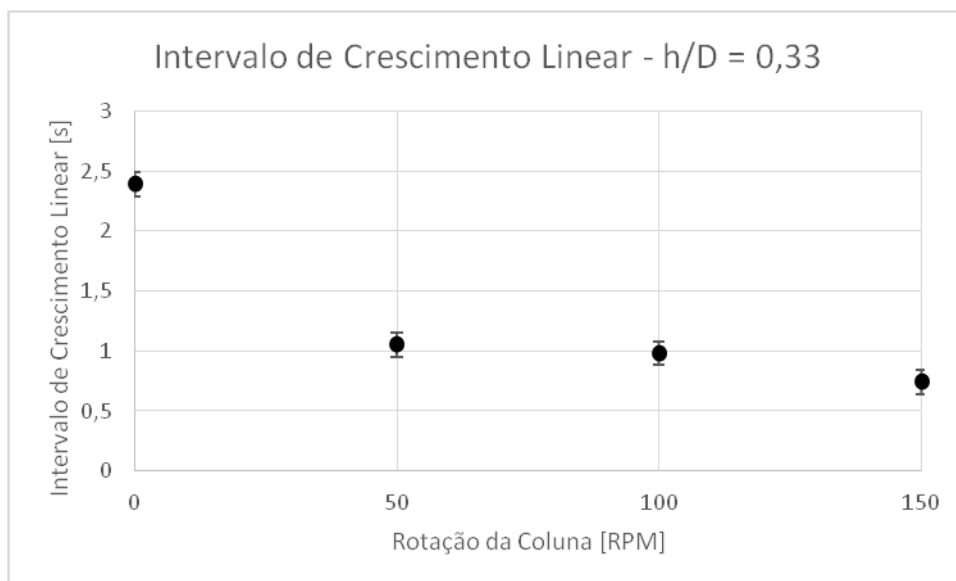


Figura 42 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,33

FONTE: Autoria Própria

Novamente a presença da rotação acelera a formação da obstrução da coluna, mas nessa altura de leito, causa o entupimento precoce ao invés do regime estacionário descrito por Rasi (1994). Após o entupimento, não há efeito aparente da rotação no perfil de força dos ensaios.

4.2.3 Razão de leito 0,47

Os ensaios com a razão de leito 0,44 também ultrapassaram a força de 700N, portanto não completaram o curso total de 293mm. Os perfis de força se comportaram da mesma maneira que nos ensaios de razão de leito de 0,33, porém a altura maior fez com que a broca acumulasse ainda mais cascalho, atingindo o critério de parada mais rapidamente.

4.2.3.1 Subtração do Atrito da Vedação

Feitos os ensaios, é necessário aplicar a correção da força de atrito da vedação. Após obter todos os perfis de força, foi aplicada a Equação (1) com os valores da Tabela 3, conforme mostra a Figura 43.

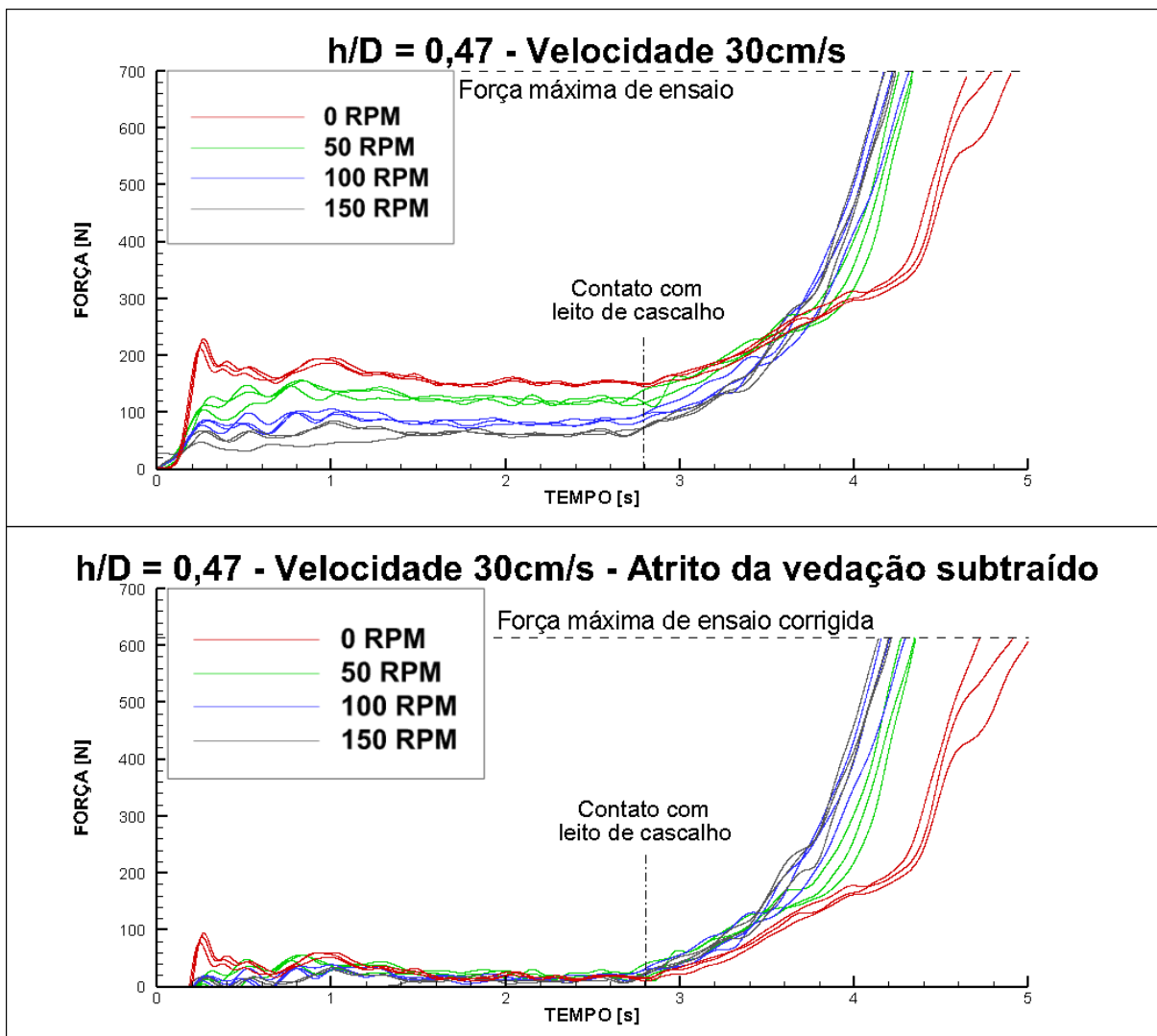


Figura 43 - Ensaios de Razão 0,47 - Correção do Perfil de Força

FONTE: Autoria Própria

Novamente a correção desloca o perfil de força para baixo, junto com a força máxima de ensaio, porém o valor médio da força antes do contato da broca com o leito de cascalho fica acima de 0N. Isso se deve ao efeito do atrito da coluna com os cascalhos ser mais pronunciado que nos ensaios anteriores, por possuírem maior contato devido à maior altura do leito. Para uma melhor análise, a seguir são mostrados a média dos perfis de força corrigidos para cada rotação, sendo descrito os comportamentos observados.

4.2.3.2 Influência da Rotação no Perfil de Força

Nos ensaios sem rotação, mostrado na Figura 44, há o mesmo comportamento inicial de aceleração (A) até atingir velocidade constante (B) em t_{VC} demonstrados em todos os ensaios anteriores. Foi observado novamente que a força de retirada

tem um comportamento de crescimento aproximadamente linear (C) após o contato da broca com o leito de cascalhos em t_L . Ao sofrer um aumento brusco de força em t_{crit} , assume um crescimento instável e ultrapassa o valor de 700N (D).

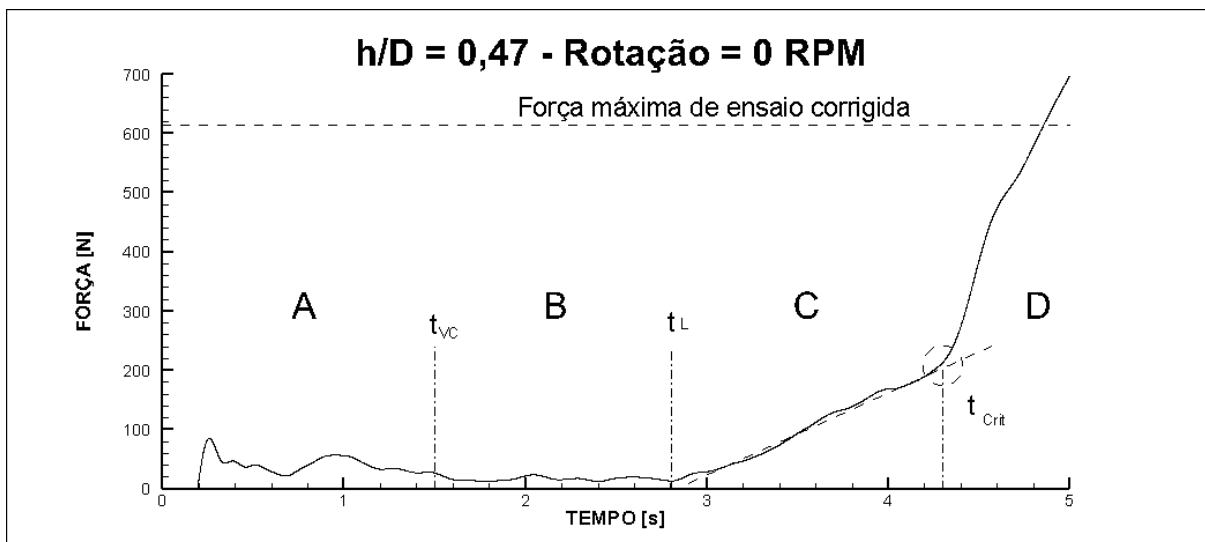


Figura 44 - Ensaio de Razão 0,47 - Rotação = 0rpm

FONTE: Autoria Própria

Nos ensaios com rotação de 50rpm, 100rpm e 150rpm, mostrados na Figura 45, na Figura 46 e na Figura 47, respectivamente, novamente se observa a redução do intervalo de crescimento linear (C) com o aumento da rotação após o contato da broca com o leito de cascalhos em t_L , ultrapassando o critério de parada de 700N (D). Esses resultados são similares aos ensaios de razão de altura de leito de 0,33, com a diferença que o crescimento da força é mais acelerado após o entupimento.

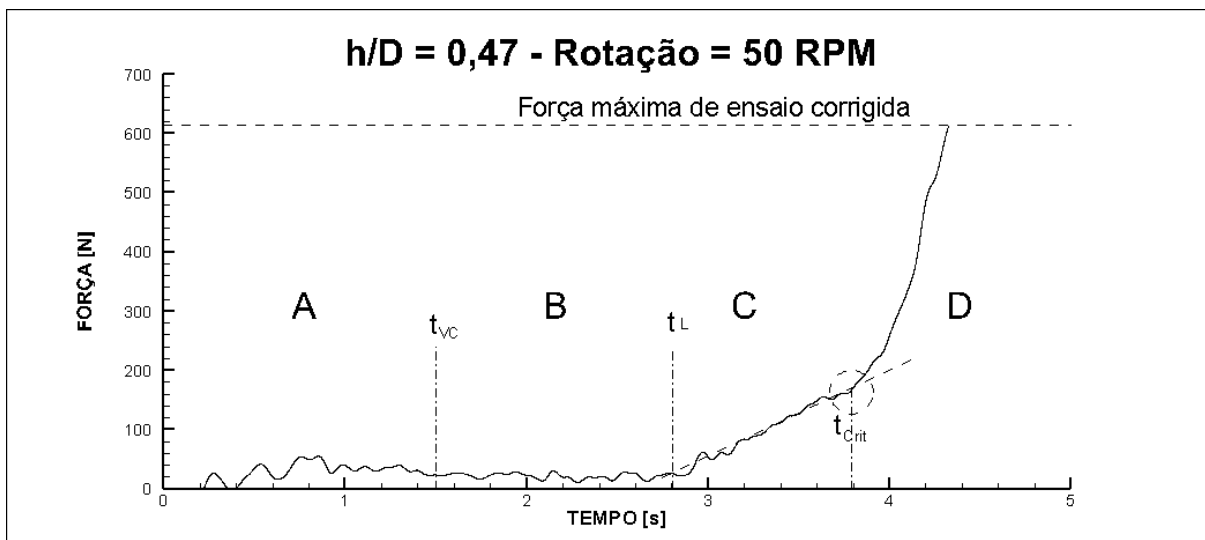


Figura 45 - Ensaio de Razão 0,47 - Rotação = 50rpm
FONTE: Autoria Própria

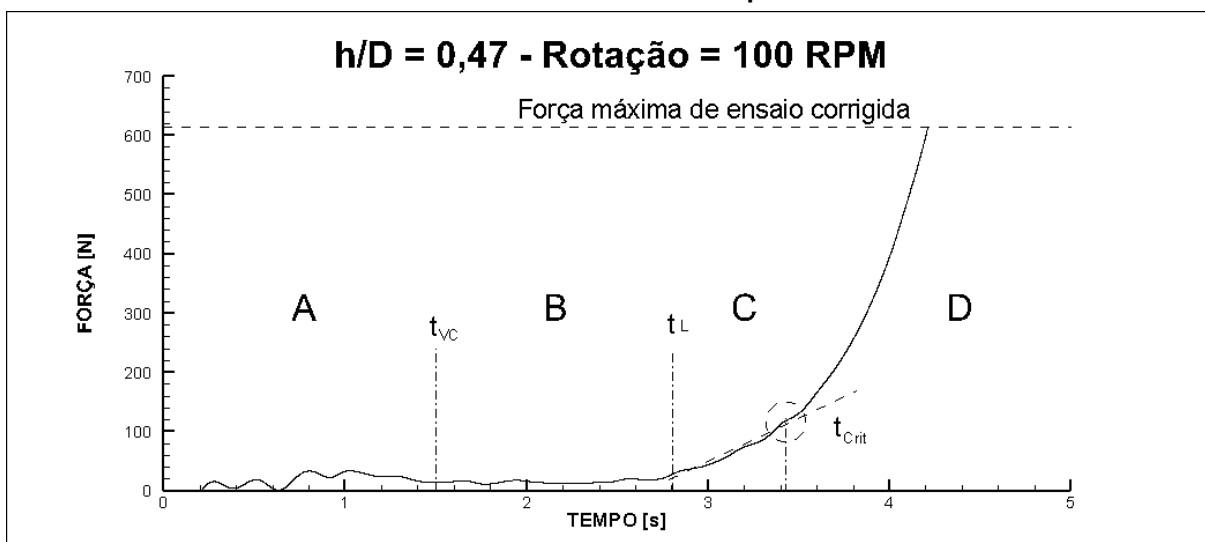


Figura 46 - Ensaio de Razão 0,47 - Rotação = 100rpm
FONTE: Autoria Própria

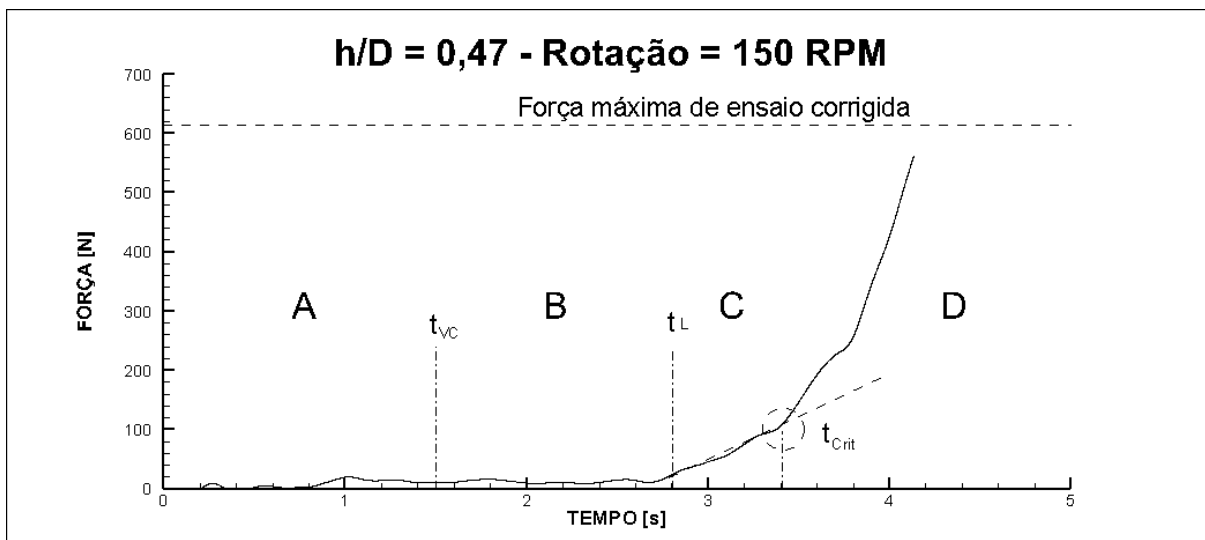


Figura 47 - Ensaio de Razão 0,47 - Rotação = 150rpm
FONTE: Autoria Própria

Ao comparar o intervalo de crescimento linear para cada rotação, definido como a diferença entre t_{crit} e t_L , nota-se novamente que o mesmo diminui conforme a rotação aumenta. É possível observar esse comportamento na Figura 48, sendo que esse efeito é menor conforme a rotação aumenta, similar aos resultados das razões de leito anteriores. Como já citado, supõe-se que a rotação acelera a formação da obstrução que causa o aumento súbito da força.

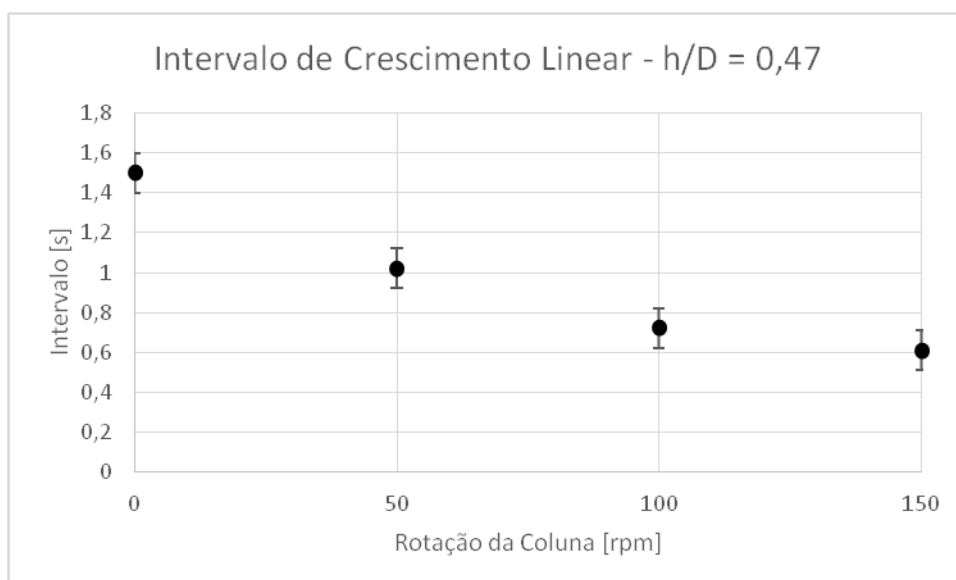


Figura 48 - Intervalo de Crescimento Linear para Razão de 0,47
FONTE: Autoria Própria

4.2.4 Comparação Entre Razões de Leito de Cascalho

Tendo analisado a influência da rotação para cada razão de leito, se nota dois principais efeitos, a diminuição do intervalo de crescimento linear com o aumento da rotação e alterações na formação da obstrução.

4.2.4.1 Intervalo de Crescimento Linear

Em todas as alturas foi observado o efeito da redução do intervalo de crescimento linear com a rotação. A Figura 49 mostra a comparação entre os resultados das três razões de leito de cascalho. A maior redução ocorre da condição sem rotação para a rotação mais baixa em todas as alturas, sendo mais evidente na razão de 0,22. Após 50rpm, o intervalo continua a diminuir com o aumento da rotação, porém cada vez menos.

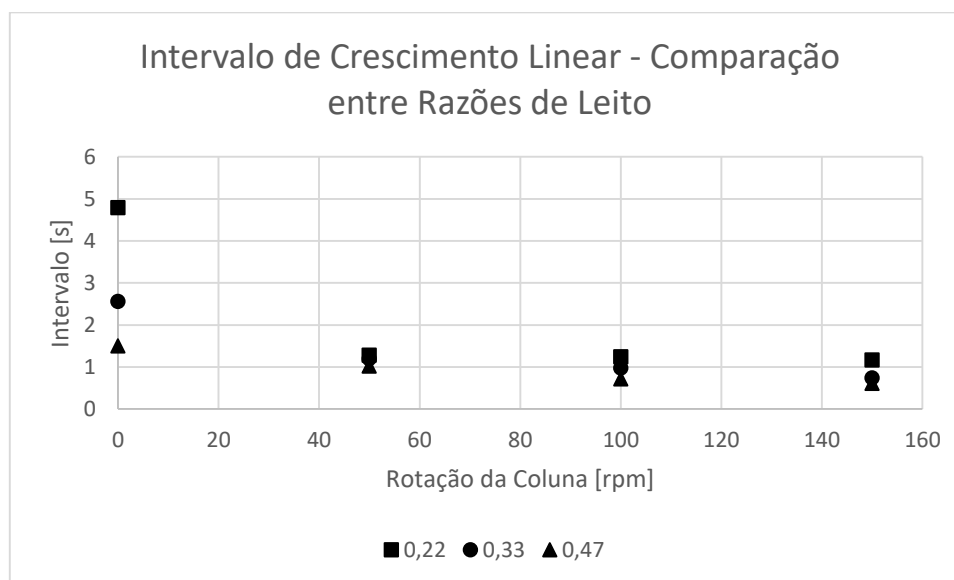


Figura 49 - Intervalo de Crescimento Linear - Comparação entre Razões de Leito

FONTE: Autoria Própria

Um possível motivo para este comportamento é a dispersão dos cascalhos devido à rotação da coluna acelerar a obstrução do poço, causando o aumento súbito na força observado nos perfis de força.

4.2.4.2 Formação da obstrução

Durante os ensaios foi observado visualmente o efeito que a rotação tem sobre o leito de cascalho. Houve movimentação nos cascalhos que estavam em contato com a coluna, porém não o suficiente para perturbar o leito de maneira significativa. Já o cascalho que entra em contato com a broca é bastante afetado pela rotação.

Conforme mostra a Figura 50, no leito mais baixo o contato com a broca rotacionando (a.ii) levanta o particulado o suficiente para que ele seja suspenso e mais facilmente carregado pelo fluido, ao contrário da condição sem rotação (a.i), que não tem esse efeito e acumula mais cascalhos na frente da broca.

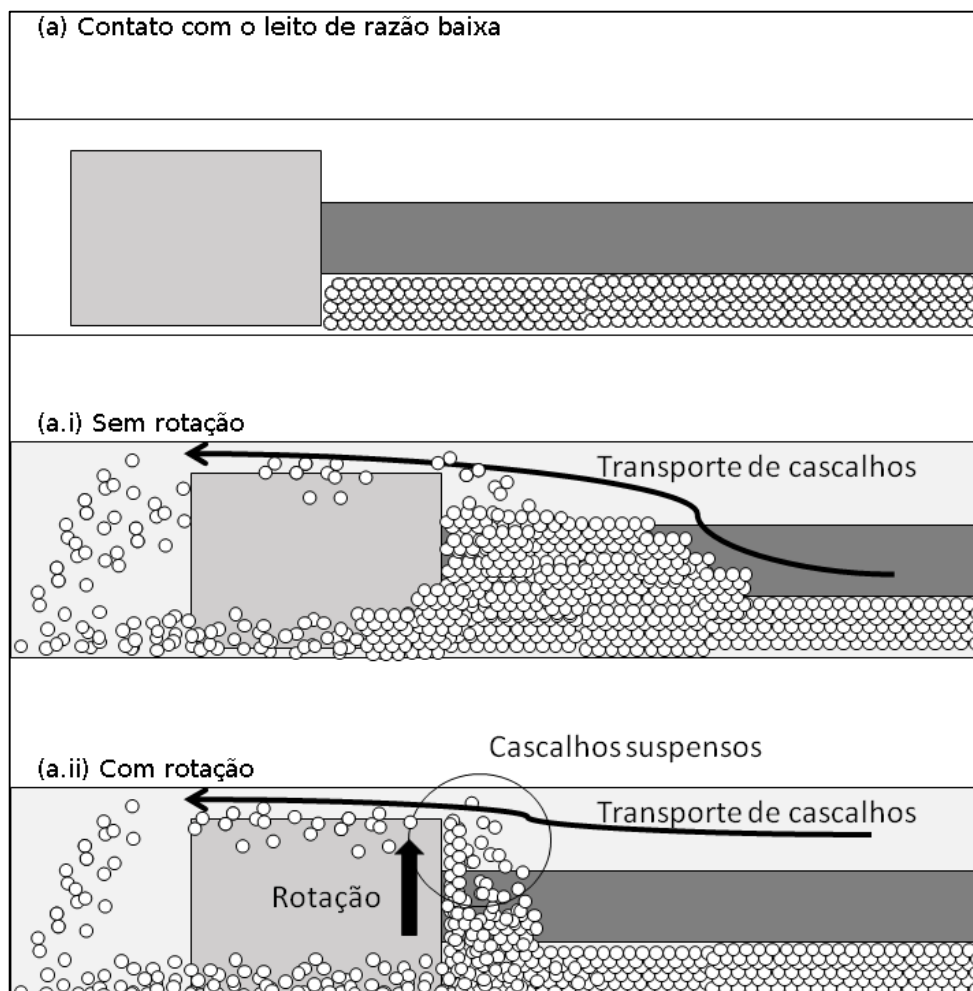


Figura 50 - Contato com o Leito de Razão Baixa, (a.i) Sem Rotação; (a.ii) Com Rotação
FONTE: Autoria Própria

Isso reflete o comportamento observado nos perfis de força dos ensaios de razão de altura de leito de 0,22. Sem rotação, demora mais para se formar a obstrução em regime estacionário, por isso um tempo de crescimento linear maior comparado ao caso com rotação, que forma a obstrução rapidamente. No entanto essa obstrução é mais perturbada nos casos com rotação, diminuindo seu tamanho e resultando em uma força média de regime estacionário menor.

Já nas outras duas condições onde o leito é maior, a obstrução não para de crescer devido entupimento do poço e a rotação de acelerar a formação dessa

obstrução. A Figura 51 mostra que ocorre um entupimento precoce quando há rotação (a.ii), devido à menor área transversal disponível para o cascalho ser carregado ao ser erguido, que faz com que ainda menos cascalhos passem pela broca. No caso em que não há rotação (a.i), demora mais para o acúmulo causar esse entupimento.

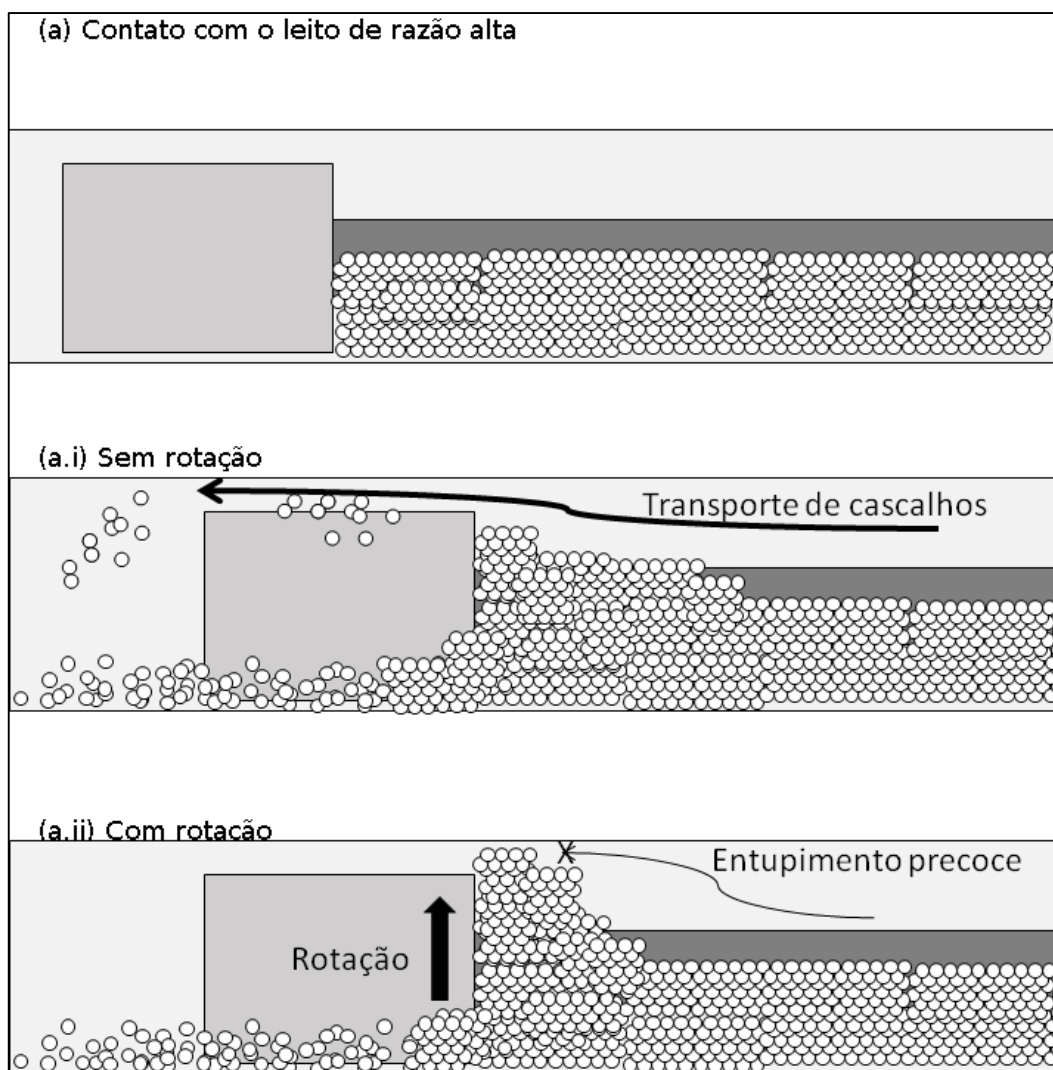


Figura 51 - Contato com o Leito de Razão Alta, (a.i) Sem Rotação; (a.ii) Com Rotação
FONTE: Autoria Própria

Após o entupimento, a tendência é a obstrução acumular rapidamente os cascalhos do leito, causando um aumento acelerado da força de retirada da coluna. Esse crescimento parece ser independente da rotação. Essas observações refletem os resultados obtidos nos ensaios com razão de altura de leito de 0,33 e 0,47.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi utilizada a unidade experimental de torque e arrasto para avaliar a influência da rotação em uma manobra de retirada de uma coluna de perfuração horizontal na presença de leito de cascalho. Foram levantados perfis de força em três razões de leito: 0,22; 0,33 e 0,47 em rotações de 0rpm, 50rpm, 100rpm e 150rpm.

No revisão da literatura notou-se que a relação da força na coluna com cascalho é pouco explorado, sendo a maioria focado na influência da rotação no transporte de cascalhos e limpeza de poço. Nos estudos experimentais foi encontrado apenas um que explorou o tema levando em conta a translação, a avaliação de Rasi (1994). Em comparação com esse estudo, foi comprovado o comportamento de formação de obstrução descrito pelo autor e correlacionado com comportamento da força exercida sobre a coluna. Na menor altura, a força cresce linearmente e proporcional ao tamanho da obstrução, seguido de um regime estacionário onde a obstrução para de crescer e a força oscila em torno de um valor médio. Nas duas maiores alturas ocorre o entupimento previsto pelo autor, causando o crescimento indeterminado da obstrução junto com um crescimento acelerado da força.

Rotacionando a coluna foi observada uma aceleração da formação da obstrução em todas as alturas, refletindo em um menor intervalo de crescimento linear da força de retirada. Na altura mais baixa, além desse efeito, a rotação ainda diminuiu a força média durante o regime estacionário, principalmente na maior rotação. Isso condiz com o estudo numérico de Akhshik; Behzad & Rajabi (2015), que previu que após uma certa faixa de rotação, ocorre uma maior perturbação do leito de cascalho que causa sua suspensão e facilita seu carregamento pelo fluido. Com isso é possível que a rotação seja benéfica nesse caso, porém isso não considera demais problemas que a rotação possa causar, como desestabilização estrutural do poço e danos em componentes devido a vibrações. Já nas condições de altura de leito maior, rotacionar a coluna durante a manobra diminuiu o intervalo desde o contato da broca até o entupimento do poço, sem nenhum efeito posterior de perturbação do leito.

Nota-se ainda que a influência do leito de cascalho foi muito maior ao entrar em contato com a broca do que seu contato contínuo com a coluna, que foi desprezível nos ensaios realizados. Isso pode indicar que a interação de componentes do BHA da coluna com o leito é mais influente na força de retirada do que o atrito entre coluna e leito. Portanto deve se dar grande importância à geometria durante o projeto desses componentes, principalmente visando diminuir sua área transversal o máximo possível.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por ser um tema pouco explorado cientificamente, há grande potencial no uso da Unidade Experimental de Torque e Arrasto para elaboração de mais trabalhos acadêmicos. Como novos parâmetros a serem explorados e/ou modificações a serem implementadas, segue uma lista de sugestões:

- Variar o fluido utilizado, com reologia aproximada aos utilizados em campo;
- Variar a granulometria do cascalho utilizado, bem como sua densidade, para simular diferentes formações rochosas;
- Variar a geometria da broca ou adicionar outros componentes a serem simulados na coluna;
- Modificar o sistema de alimentação para simular um escoamento anular mais próximo ao real.
- Instalar instrumentos fotográficos para analisar visualmente a movimentação do cascalho e formação da obstrução

REFERÊNCIAS

AADNOY, B. S., ANDERSEN, K. Design of oil wells using analytical friction models. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 32, p 53-71, set. 2001.

AGOSTINI, C. E. **Modelagem da Dinâmica e Análise de Vibrações de Colunas de Perfuração de Poços de Petróleo em Operações de Backreaming**. Tese de doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2015.

AKHSHIK, S., BEHZAD, M., RAJABI, M. CFD-DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 127, p 229-244, jan. 2015.

ALLAHVIRDIZADEH, P., KURU, E., PARLAKTUNA, M. Experimental investigation of solids transport in horizontal concentric annuli using water and drag reducing polymer-based fluids. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. n. 35, p 1070-1078, set. 2016.

ARIARATNAM, S. T., DONG, S., YAN, X., ZENG, C. Horizontal directional drilling: State-of-the-art review of theory and applications. **Tunnelling and Underground Space Technology**. n. 72, p 162-173, nov. 2017.

AYDIN, I., OZBAYOGLU, M. E., SORGUN, M. Friction factors for hydraulic calculations considering presence of cuttings and pipe rotation in horizontal/highly-inclined wellbores. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 78, p 407-414, jun. 2011.

BIZHANI, M., CORREDOR, F. E. R., KURU, E. Experimental investigation of cuttings bed erosion in horizontal wells using water and drag reducing fluids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 147, p 129-142, mai. 2016.

CAI, L., XU, G., POLAK, M. A., KNIGHT, M. Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods – A critical review. **Tunnelling and Underground Space Technology**. n. 69, p 85-93, mai. 2017.

CARVALHO, M. *et al.* Perfuração e Poços de Petróleo: Métodos e Equipamentos Utilizados. In: **CADERNOS DE GRADUAÇÃO – CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**. v. 1, n. 15, p 103-108, Sergipe, out. 2012.

CHEN, P., GAO, D., WANG, Z., HUANG, W. Study on multi-segment friction factors inversion in extended-reach well based on an enhanced PSO model. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. n. 27, p 1780-1787, nov. 2015.

CHEN, P., LIU, Y., MA, T., YANG, C. Method and apparatus for monitoring of downhole dynamic drag and torque of drill-string in horizontal wells. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 164, p 320-332, jan. 2018.

CHIEZA, C. P. **Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo**. Dissertação de mestrado: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

COSTA, M. T. A. T. L., RIGATO, S. F., SIQUEIRA, R. N. Efeito da rotação sobre o torque da coluna de perfuração em poços horizontais, **Anais do V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás**, Teresópolis-RJ, 2013

DAWSON G. *et al.* **Directional casing while drilling applied to improve high-angle top-hole drilling from producing platform**. 2010. Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/directional-casing-while-drilling-applied-to-improve-high-angle-top-hole-drilling-from-producing-platform-6383>> Acesso em junho de 2018.

ELGIBALY, A. A., FARHAT, M. S., TRANT, E. W., KELANY, M. A study of friction factor model for directional wells. **Egyptian Journal of Petroleum**. n. 26, p 53-71, mar./set. 2001.

GUO, Y., HONG, Y., LI, M., WANG, Z. EFFECT OF DRILLPIPE ROTATION ON BOREHOLE CLEANING FOR EXTENDED REACH WELL. **Journal of Hydrodynamics**. n. 21(3), p 366-372, ago. 2008.

HAO, S., LI, Q., MO, H., SHI, Z. Analysis and Application of Treatment Techniques in Horizontal Directional Drilling Borehole Accident. **Procedia Earth and Planetary Science**. n. 3, p 273-279, 2011.

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

RASI, M. Hole Cleaning in Large, High-Angle Wellbores. In: **SPE/IADC Drilling Conference**. 1994.

MAY, R. B., RITCHIE, G. M., YARIM, G. A Guide to Successful Backreaming: Real-Time Case Histories. **SPE Drilling & Completion**. v. 25 n. 1, p 27-38, mar. 2010.

MIMS, M. et al. Drilling design and implementation for extended reach and complex wells. **K&M Technology Group, LLC**, Houston, Texas, 2003.

NETO, J. L. V. **Estudo Experimental e de Simulação por CFD de Escoamentos em Seções Anulares**. Tese de doutorado: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

PETROBRAS. **Conheça os diferentes tipos de poços de petróleo e gás natural**. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-diferentes-tipos-de-pocos-de-petroleo-e-gas-natural.htm>> Acesso em abril de 2018.

PETROBRAS. **Orçamento de Investimento**. 2017. Disponível em: <<http://transparencia.petrobras.com.br/despesas/orcamento-investimento>> Acesso em abril de 2018

PETROBRAS. **Plano de Negócios e Gestão**. 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>> Acesso em abril de 2018.

SAMUEL, R. Friction factors: What are they for torque, drag, vibration, bottom hole assembly and transient surge/swab analyses?. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 73, p 258-266, jul. 2010.

SORGUN, M., ULKER, E. Comparison of computational intelligence models for cuttings transport in horizontal and deviated wells. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. n. 146, p 832-837, jul. 2016.

SUN, C., TONG, H., ZHU, X. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. **Journal of Hydrodynamics**. n. 25(4), p 628-638, dez. 2012.

WILLIAM C. L., **Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineers**. Houston Texas: Gulf Publishing Company. 1996.

YAN, X., YANG, S., ZENG, C., ZENG, Z. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling. **Tunnelling and Underground Space Technology**. n. 76, p 21-29, 2019.