



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**E DE MATERIAIS – PPGEM**

**HOLMES ABEL RIPOLL SIERRA**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VARIAÇÕES DE**  
**PRESSÃO PROVOCADAS PELA MOVIMENTAÇÃO**  
**DA COLUNA DE PERFURAÇÃO**

CURITIBA

MAIO – 2018

**HOLMES ABEL RIPOLL SIERRA**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE VARIAÇÕES DE  
PRESSÃO PROVOCADAS PELA MOVIMENTAÇÃO  
DA COLUNA DE PERFURAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia Térmica, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão,  
Ph.D.

CURITIBA

MAIO – 2018

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

S572a 2018 Sierra, Holmes Abel Ripoll  
Avaliação experimental de variações de pressão provocadas pela movimentação da coluna de perfuração / Holmes Abel Ripoll Sierra.-- 2018.  
95 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2018.  
Bibliografia: p. 84-87.

1. Escoamento. 2. Colunas. 3. Reologia. 4. Pesquisa experimental. 5. Poços de petróleo - Perfuração. 6. Engenharia térmica. 7. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Negrão, Cezar Otaviano Ribeiro, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

---

**Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba**  
**Bibliotecária Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271**

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 324

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Avaliação Experimental de Variações de Pressão Provocadas pela Movimentação da Coluna de Perfuração**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Holmes Abel Ripoll Sierra**, no dia 28 de maio de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia Térmica, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, Ph.D. - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira - UTFPR

Prof. José Viriato Coelho Vargas, Ph.D. - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

---

## AGRADECIMENTOS

Durante este percurso não posso deixar de prestar meu especial agradecimento a todos os familiares, amigos e mestres que contribuíram de alguma forma com essa trajetória. Contudo, durante a construção deste trabalho, devo mencionar algumas pessoas que participaram desse momento:

Aos meus pais Holmes Ripoll e Mercedes Sierra por todo o apoio e incentivo na minha formação pessoal e acadêmica, por sempre acreditarem em mim e desejarem que eu alcançasse o meu melhor. Essa conquista com certeza não seria possível sem todo o amparo, conselhos e amor que me proporcionaram para seguir em frente e concluir essa etapa de estudos no Brasil.

Aos meus irmãos Hankel Ripoll e Helmut Ripoll por poderem acompanhar e conhecer o desenvolvimento deste projeto durante suas visitas ao país. Por me incentivarem a enfrentar os desafios, me apoiarem nas minhas decisões e serem meus companheiros.

Ao meu grande amigo Daniel Carvalho que me aconselhou e me incentivou para a realização no mestrado do Brasil e teve papel fundamental para que esse objetivo fosse traçado, desenvolvido e concluído. Sou muito grato por tudo que a nossa amizade me proporciona.

Ao Prof. Cezar O. R. Negrão por confiar em mim e ter me oferecido uma oportunidade de desenvolver um trabalho à nível de mestrado e também pela orientação, paciência e pelos conselhos.

Ao Eng. Gabriel pela dedicação fundamental à orientação desse trabalho e por todos os conselhos essenciais.

Aos membros da banca pelas sugestões, contribuições e, principalmente, por terem disponibilizado seu tempo.

Aos amigos Ernani Maieski Kopp e Saul V. Peliano que se tornaram grandes companheiros e me acolheram desde o início da mudança para Curitiba, compartilhando todas as angústias, alegrias, risadas e desesperos durante essa etapa.

Aos amigos da *UTFPR* que muito me ajudaram: Cássio Luis Schneider, Yamid Garcia Blanco, Bárbara de Abreu, Vinicius Poletto, Juliano Scholongo, Guilherme Mattoso, Giovanni Montagnoli..

A todos os membros do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN).

SIERRA, HOLMES RIPOLL. **Avaliação Experimental de Variações de Pressão Provocadas pela Movimentação da Coluna de Perfuração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 97 páginas, 2018.

## RESUMO

Durante a perfuração de poços de petróleo a coluna de perfuração é movimentada constantemente ao longo do poço, o que pode gerar variações de pressão na região anular. Caso tais alterações sejam significativas, problemas operacionais podem ocorrer e elevar consideravelmente o custo final do poço. Estudos precursores constataram que a variação de pressão gerada pela movimentação axial da coluna é influenciada, principalmente, pela velocidade de translação da coluna, pela geometria do poço, pelas propriedades reológicas dos fluidos, pelo regime de escoamento e pela presença ou não de revestimentos. Tendo isto em vista, o objetivo do presente trabalho é avaliar experimentalmente as variáveis que influenciam o comportamento da pressão dentro do poço. Para isso foi construída uma unidade experimental que permite reproduzir o efeito da movimentação da coluna de perfuração. A unidade possibilita o controle da velocidade e rotação da coluna, assim como o monitoramento da temperatura e pressão do fluido de trabalho. O aparato experimental construído consiste em duas tubulações que representam a coluna de perfuração e o poço, nesta última tubulação foram instalados transdutores de pressão absoluta. Durante os experimentos o fluido de trabalho pode sofrer variações na pressão conforme a coluna é movimentada. Os resultados dos testes com fluidos viscoplásticos corroboram a existência de uma parcela de pressão que não é transmitida após a movimentação da coluna. Além disso, foi observado que essa pequena parcela de pressão que não era transmitida diminuía com a rotação da coluna. Dessa forma, conclui-se que a rotação da coluna influencia a transmissão da pressão, razão pela qual este parâmetro deve ser considerado em simuladores que analisam o perfil de pressões no poço durante e após a movimentação da coluna.

**Palavras-chave:** Escoamento Axial, Movimentação da Coluna, Propriedades Reológicas, Estudo experimental, Rotação da coluna.

SIERRA, HOLMES RIPOLL. **Avaliação Experimental de Variações de Pressão Provocadas pela Movimentação da Coluna de Perfuração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 97 páginas, 2018.

## ABSTRACT

During drilling of oil wells, the drill string is constantly moved along the well, which can generate pressure variations in the annular region. If such changes are significant, operational problems may occur and substantially increase the final cost of the well. Precursor studies have shown that the pressure variation generated by the axial movement of the column is influenced mainly by the velocity of the drill string, geometry of the well, rheological properties of the fluids, flow regime and the presence or absence of coating. Considering this, the objective of the present work is to evaluate experimentally the variables that influence the pressure behavior inside the well. For that reason, an experimental unit that allows to reproduce experimentally the effect of the movement of the drilling string was constructed. The unit allows the control of the speed and rotation of the column, as well as the monitoring of temperature and pressure of the working fluid. The experimental apparatus consists in two pipes representing the drilling string and the well, along the well absolute pressure transducers were installed. During the experiments, the working fluid may suffer variations in pressure as the drilling string is moved. The result of the test with viscoplastic fluids corroborate the existence of a portion of pressure that is not transmitted after the movement of the column. In addition, it was observed that this small amount of pressure that was not transmitted decreased with the rotation of the drilling string. Thus, it is concluded that the rotation of the column influences the transmission of pressure, therefore, this parameter must be considered in simulators that analyze the pressures inside the well during and after the movement of the drilling string.

**Key words:** Axial flow, Rheological properties, Experimental analysis, Drilling string rotation.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
LISTA DE SIGLAS .....	11
LISTA DE SÍMBOLOS .....	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização .....	13
1.2 Perfuração de poços de petróleo.....	14
1.3 Descrição do problema .....	16
1.4 Objetivos.....	18
1.5 Estrutura do trabalho .....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Revisão de Conceitos fundamentais sobre fluidos .....	20
2.2 Revisão da literatura sobre pressões provocadas pela movimentação da coluna de perfuração .....	23
2.2.1 Modelos estacionários .....	23
2.2.2 Modelos transitórios .....	25
2.2.3 Medições de campo .....	27
2.2.4 Trabalhos experimentais.....	29
2.3 Síntese do Capítulo 2.....	34
3 DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL.....	35
3.1 Descrição geral do aparato experimental.....	35
3.2 Descrição dos componentes.....	37
3.2.1 Sistema estrutural e de movimentação .....	37
3.2.2 Sistema Hidráulico .....	38
3.2.3 Sistema de medição e controle .....	40
3.3 Operação da unidade experimental.....	42
3.3.1 Fluido de trabalho .....	45
3.3.2 Seção de testes .....	48
3.4 Procedimentos experimentais .....	50
3.4.1 Condição Inicial.....	51
3.4.2 Teste de movimentação axial .....	52
3.4.3 Teste com rotação da coluna .....	52
3.5 Síntese do Capítulo 3.....	55
4 RESULTADOS .....	56
4.1 Experimentos com solução aquosa de glicerina.....	56
4.1.1 Verificação das pressões absolutas durante a movimentação da coluna utilizando glicerina como fluido de trabalho.....	56
4.1.2 Diferença de pressão em regime permanente durante a descida da coluna utilizando glicerina como fluido de trabalho.....	60
4.1.3 Influência da velocidade na variação da pressão durante a descida da coluna.....	64



4.1.4	Variação da pressão durante a rotação da coluna de perfuração .....	65
4.2	Experimentos com solução aquosa de Carbopol .....	69
4.2.1	Variação da pressão da solução aquosa de Carbopol durante a movimentação da coluna .....	69
4.2.2	Variação da diferença de pressão da solução aquosa de Carbopol durante a descida da coluna.....	72
4.2.3	Influência da rotação na variação de pressão na solução aquosa de Carbopol.....	74
4.3	Síntese do Capítulo 4.....	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	82
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	83
	REFERÊNCIAS .....	84
	APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL.....	88
A.1	Cálculo das incertezas de medição .....	88
A.1.1	Propagação de incertezas.....	88
A.2	Cálculo das pressões hidrostáticas e de regime permanente para a glicerina.....	90
	APÊNDICE B – ELABORAÇÃO DO FLUIDO DE TRABALHO.....	92
B.1	Solução aquosa de Carbopol® .....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da profundidade dos poços perfurados. ....	13
Figura 1.2 - Fluxo de fluido de perfuração dentro do espaço anular.....	14
Figura 1.3 - Esquema da janela de pressões durante o processo de perfuração no mar.....	16
Figura 1.4 – Fenômeno de surge .....	17
Figura 1.5 – Fenômeno de swab.....	17
Figura 2.1 – Viscosidade aparente em função da taxa de de deformação para fluidos newtonianos generalizados. Fonte: autoria própria. ....	21
Figura 2.2 – Efeito da tensão limite de escoamento sobre a pressão de surge (Lal, 1983). ....	26
Figura 2.3 – Pressão no anular medida durante um teste de movimentação da coluna (Wagner et al. 1993). ....	28
Figura 2.4 – Bancada experimental utilizada por Crespo(2013) para determinar as pressões de surge e swab. Fonte: adaptado de Crespo (2013). ....	30
Figura 2.5 – Efeito do tempo nas medições de pressão de surge (1.0% Xanthan Gum;0.05 ft/sec).Fonte: adaptado de Crespo (2013). ....	31
Figura 2.6 – Protótipo de torre de perfuração utilizando por Wolski et al (2014). ....	32
Figura 2.7 – Variação da pressão com o tempo devido ao deslocamento descendente da coluna, em poço preenchido com glicerina. Wolski et al (2014). ....	32
Figura 2.8 – Variação da pressão com o tempo devido ao deslocamento descendente da coluna, em poço preenchido com fluido de perfuração. Wolski et al (2014) .....	33
Figura 3.1 – Desenho esquemático do aparato experimental. ....	36
Figura 3.2 – Estrutura de suporte da unidade experimental .....	38
Figura 3.3 – Reservatórios de fluidos da unidade experimental instalados nas dependências na UTFPR.....	39
Figura 3.4 – Exemplo de válvula eletropneumática (na imagem: V2). ....	40
Figura 3.5 – Transdutor de pressão P3 instalado no poço da unidade experimental.....	41
Figura 3.6 – Termoresistor PT100 instalado no poço. ....	42
Figura 3.7 – Tela de controle da movimentação da coluna da SEW.....	43
Figura 3.8 – Tela de monitoramento do processo no Labview. ....	44
Figura 3.9 – Curvas de viscosidade em função da temperatura para a glicerina.....	45
Figura 3.10 – Curvas de escoamento resultantes do testes realizados com o reômetro para uma solução aquosa de Carbopol. ....	47
Figura 3.11 – Desenho esquemático da seção de testes. ....	48
Figura 3.12 – Tampa de nylon instalada no fundo da coluna para evitar o influxo do fluido de trabalho. ....	49

Figura 3.13 – Reservatório auxiliar da seção de testes.....	50
Figura 3.14 – Posição inicial e final da coluna de perfuração durante os testes de movimentação da coluna.....	51
Figura 4.1 – Pressões medidas pelo sensor P1, P2 ,P3 , P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de descida da coluna de 2 m/min para a glicerina.....	57
Figura 4.2 – Pressões medidas pelos sensores P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de retirada da coluna de 2 m/min para à glicerina.....	59
Figura 4.3 – Diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 em função do tempo durante a descida da coluna com uma velocidade de 2 m/min para à glicerina.....	61
Figura 4.4 – Diferença entre as pressões P4 e P5 em função do tempo, para três testes velocidade de descida da coluna de 3 m/min para a glicerina. ....	63
Figura 4.5 – Variação da pressão medidas pelo sensor P3 em função do tempo, para velocidades da coluna de 2,3,4 e 5 m/min para a glicerina. ....	64
Figura 4.6 – Oscilações das pressões medidas pelos transdutores P1, P3, P4 e P5 em função do tempo, para rotações da coluna de : a) 4 rpm , b) 12 rpm e c) 33 rpm.....	66
Figura 4.7 – Oscilações das pressões medidas pelo transdutor P3 em função do tempo, para uma rotações da coluna de : a) 4 rpm , b) 12 rpm e c) 33 rpm.....	68
Figura 4.8 – Pressões medidas pelo sensor P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de descida da coluna de 1 m/min dentro do poço preechido com uma solução aquosa de carbopol. ....	69
Figura 4.9 – Pressões medidas pelo sensor P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para um velocidade de 1 m/min durante a retirada da coluna de dentro da solução aquosa de carbopol. ....	71
Figura 4.10 – Diminuição da pressão residual em relação ao tempo coletada pelo transdutor de pressão P3 depois de uma descida da coluna com velocidade de 1 m/min para uma solução aquosa de carbopol. ....	72
Figura 4.11 – Variação da diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 durante a movimentação da coluna com uma velocidade de 1 m/min dentro de uma solução aquosa de carbopol. ....	73
Figura 4.12 – Repetibilidade dos testes de diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 durante a movimentação da coluna com uma velocidade de 1 m/min dentro de uma solução aquosa de carbopol. ....	74
Figura 4.13 – Efeito de três rotações da coluna parada numa profundidade de 5,33 m para rotações da coluna de a) 4 rpm, b) 12 rpm e c) 33 rpm.....	75
Figura 4.14 – Comparação da pressão residual com rotação e sem rotação da coluna coletas pelo transdutor de pressão P3. ....	76
Figura 4.15 – Variação da pressão durante a descida da coluna sem rotação e com rotação de 4 rpm,12 rpm e 33 rpm no transdutor de pressão P3 para uma solução aquosa de carbopol. ....	78
Figura 4.16 – Efeito da rotação intermediária da coluna no transdutor de pressão P3. ....	79
Figura 4.17 – Efeito da rotação intermediária final da coluna no transdutor de pressão P3. ....	80
Figura A.1 – Reômetro utilizados na medição das propriedades reológicas dos fluidos de trabalho .....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades da solução aquosa de Carbopol utilizada na unidade experimental .....	47
Tabela 3.2 - Matriz de testes para experimentos de subida e descida com coluna fechada e poço preenchido com soluções de glicerina e carbopol. ....	54
Tabela 3.3 – Matriz de testes para experimentos de subida e descida com rotação, coluna fechada e poço preenchido com soluções de glicerina e carbopol. ....	54
Tabela 4.1 - Pressão hidrostática teórica e medida.....	57
Tabela 4.2 – Comparação entre a diferença de pressão medida e teórica durante a descida da coluna com uma velocidade de 2 m/min para a glicerina.....	63
Tabela 4.3 - Pressões absolutas registradas pelos transdutores durante as fases I e V.....	70
Tabela 4.4 - Comparação entre as pressões iniciais e finais para testes com e sem rotação da coluna. ....	78
Tabela 5. Incertezas relativas dos instrumentos utilizados.....	89

## LISTA DE SIGLAS

CERNN	Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
FNG	Fluido newtoniano generalizado
NPT	National Pipe Thread
BSP	British Standard Port
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos romanos:

$A$	Área transversal	[m <sup>2</sup> ]
$D$	Diâmetro	[-]
$f$	Fator de atrito	[-]
$L$	Comprimento	[m]
$m$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$P$	Pressão	[bar]
$P1, P2, P3, P4$	Transdutores de pressão instalados no poço da torre de ensaios	[bar]
$Q$	Vazão volumétrica	[L.s <sup>-1</sup> ]; m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$R$	Raio	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
$t$	Tempo	[s]
$T1, T2, \dots, T10$	Termopares instalados na serpentina	[°C]
$V$	Velocidade média	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V1, V2, V3$	Válvulas de entrada e saída do aparato experimental	[-]

## Símbolos gregos:

$\Delta P$	Diferença de pressão	[bar]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[cP, Pa.s]

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Em meados de 1860 intensificou-se a busca por reservas de petróleo no Brasil, período no qual a indústria petrolífera dava seus primeiros passos com a descoberta da primeira jazida comercial nos Estados Unidos, em 1859. A partir de então, inúmeras jazidas foram descobertas no mundo. No entanto, o mesmo só ocorreu no Brasil 70 anos mais tarde na Bahia, devido à baixa ocorrência de exsudações naturais de petróleo em solo brasileiro (Dias e Quaglino, 1993).

Com o avanço da exploração de petróleo e gás no Brasil e no mundo, as reservas convencionais mostraram esgotamento. A partir de então, tornou-se necessário ampliar a fronteira exploratória para regiões de difícil acesso. No Brasil, isto significou o começo das atividades exploratórias em áreas marítimas (*offshore*), inicialmente na Bacia de Campos, e, nos dias atuais, na camada do Pré Sal. A exploração dessas áreas é acompanhada pelo aumento da profundidade dos poços perfurados e da lâmina d'água, conforme ilustrado na Figura 1.1, o que impõe uma série de obstáculos às etapas de exploração e produção de petróleo.

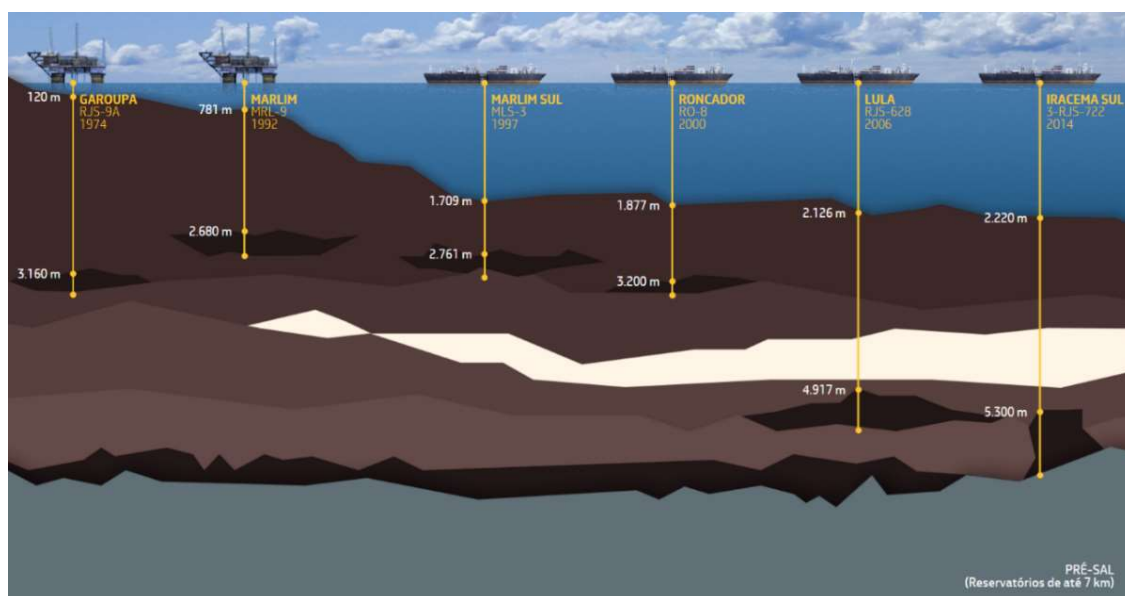


Figura 1.1 - Evolução da profundidade dos poços perfurados.

(Fonte: PETROBRAS,2015)

Desta forma, para que o desenvolvimento do campo seja interessante economicamente e operacionalmente seguro, são necessários investimentos significativos em novas tecnologias e pesquisas, que ajudem a compreender melhor as questões que afetam a integridade e controle do poço durante as operações.

## 1.2 Perfuração de poços de petróleo

A perfuração de um poço de petróleo pode ser explicada, resumidamente, da seguinte maneira: o fluido de perfuração é bombeado continuamente dos tanques de armazenamento para o poço por meio da coluna de perfuração; então, o fluido percorre os orifícios da broca em direção ao espaço anular e retorna à plataforma; ao percorrer o espaço anular, o fluido transporta fragmentos de rocha (cascalhos) gerados pelo movimento de rotação da broca, quando esta entra em contato com a formação; por fim, o fluido é submetido a um processo de filtragem e o ciclo inicia novamente. O trajeto percorrido pelo fluido de perfuração é ilustrado na Figura 1.2.

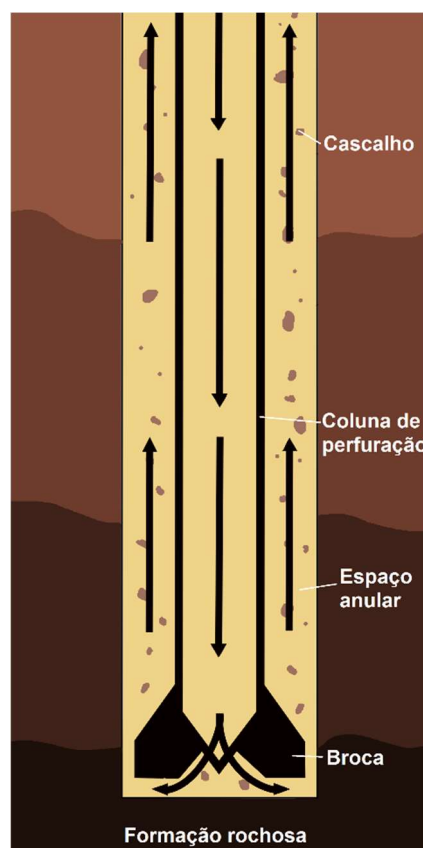


Figura 1.2 - Fluxo de fluido de perfuração dentro do espaço anular

Fonte: autoria própria



O êxito da perfuração está intrinsicamente relacionado as principais funções do fluido de perfuração, algumas destas, segundo Darley e Grey (1988), são:

- i. Remover os cascalhos gerados na perfuração, garantindo a limpeza do poço.
- ii. Manter o controle dos fluidos contidos nas formações rochosas, evitando o influxo desses fluidos para o poço.
- iii. Lubrificar a coluna de perfuração.
- iv. Resfriar a broca.
- v. Manter a estabilidade estrutural do poço.
- vi. Aplicar uma pequena camada de lama nas paredes do poço, selando-o.
- vii. Manter os cascalhos de rocha em suspensão quando o fluido está em repouso, para evitar a obstrução da broca.

O item (ii) está diretamente relacionado à janela operacional, que consiste no intervalo compreendido entre a pressão de poros (limite inferior) e a de fratura da formação (limite superior). A primeira se refere à pressão dos fluidos contidos nos poros da formação rochosa. A segunda faz referência à pressão que o fluido deve exercer sobre a mesma para provocar uma fratura hidráulica. Tais conceitos são indispensáveis durante o planejamento de poço, pois são essenciais para garantir a estabilidade deste durante a perfuração (Corrêa,2011). Caso a pressão exercida pelo fluido de perfuração sobre a formação seja menor que a pressão de poros, ocorre o influxo indesejado de fluidos da formação rochosa para o poço. Na situação em que a pressão do poço excede o limite superior da janela operacional, uma fratura hidráulica é induzida na rocha, podendo ocasionar perda de fluido para a formação. Para manter as pressões do poço entre os limites da janela operacional, controla-se a massa específica do fluido de perfuração, pressões e vazões (SANTOS,2006). Na Figura 1.3, observa-se que a janela operacional fica mais restrita à medida em que a lâmina d'água aumenta, o que dificulta o controle operacional do poço.

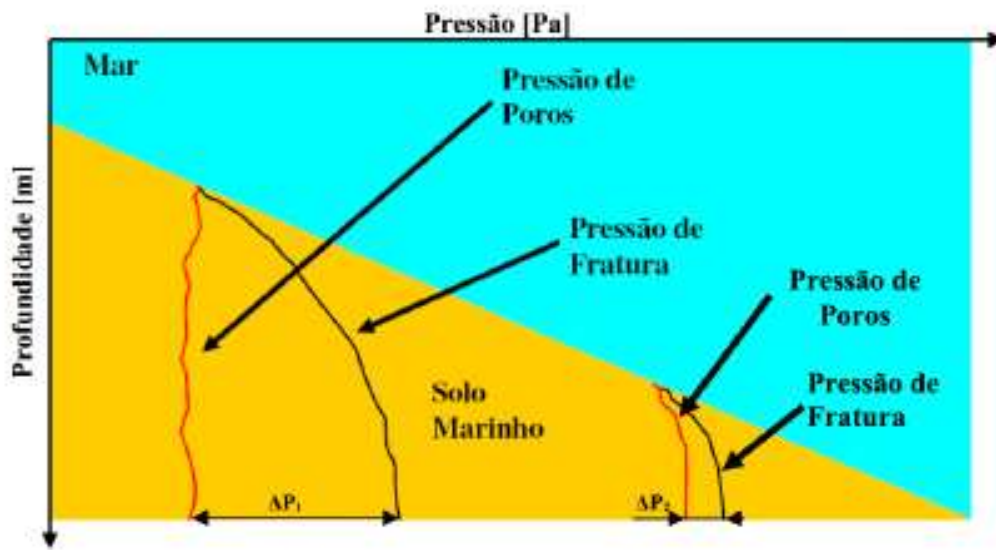


Figura 1.3 - Esquema da janela de pressões durante o processo de perfuração no mar.

Fonte: Oliverira (2011)

### 1.3 Descrição do problema

A coluna de perfuração é constantemente movimentada durante a perfuração, cimentação e completação de um poço de petróleo. Quando tais movimentos envolvem a retirada e reinscrição da coluna, dá-se o nome de manobra, que tem como objetivos principais: trocar equipamentos danificados, alterar a configuração do *bottom hole assembly* e/ou recuperar um componente perdido dentro do poço.

Tais deslocamentos provocam variação da pressão no interior do poço. Durante a inserção da coluna, nota-se o aumento da pressão na região anular devido à compressão do fluido. Este fenômeno, conhecido como *surge*, dependendo de sua intensidade pode ocasionar fratura da formação rochosa e, conseqüentemente, perda de fluido de perfuração. Compreende-se melhor o evento, considerando a região delimitada pelo tracejado em vermelho como sendo o volume controle (VC), de volume constante, que não permite fluxo de fluidos através de suas fronteiras. Assim sendo, no início da análise, Figura 1.4 a, o fluido encontra-se confinado em um volume  $V_1$  e está submetido à pressão  $P_1$ . A medida em que a coluna de perfuração é introduzida em VC (Figura 1.4 b), o volume de confinamento do fluido reduz até  $V_2$  ( $V_1 < V_2$ ), o que propicia a elevação da pressão para  $P_2$  ( $P_2 > P_1$ ).

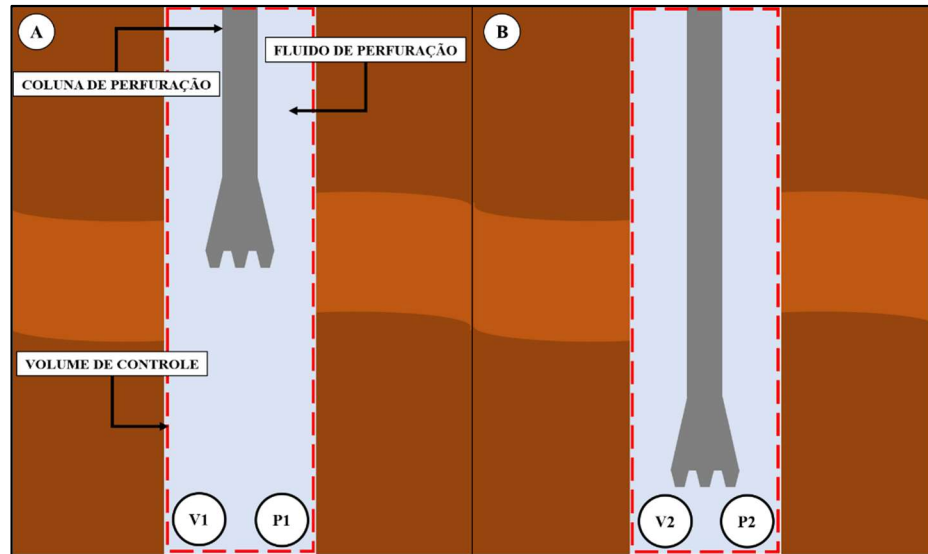


Figura 1.4 – Fenômeno de surge

Fonte: autoria própria

Quando a coluna é removida do poço, o fluido de perfuração se expande e ocupa o espaço liberado por ela, ocorrendo assim um decréscimo na pressão. Esse evento, denominado *swab*, pode tornar a pressão do poço mais baixa que a pressão de poros da formação e, conseqüentemente, gerar influxo de fluido contidos dentro da formação rochosa para a região anular. De forma análoga, esse fenômeno pode ser explicado com o auxílio do mesmo volume de controle citado anteriormente. Inicialmente, o fluido ocupa um volume  $V_1$  e encontra-se submetido a pressão  $P_1$ , Figura 1.5 a. O deslocamento axial da coluna provoca o aumento do volume de confinamento até  $V_2$  ( $V_2 > V_1$ ), o que provoca a redução da pressão até  $P_2$  ( $P_2 < P_1$ ).

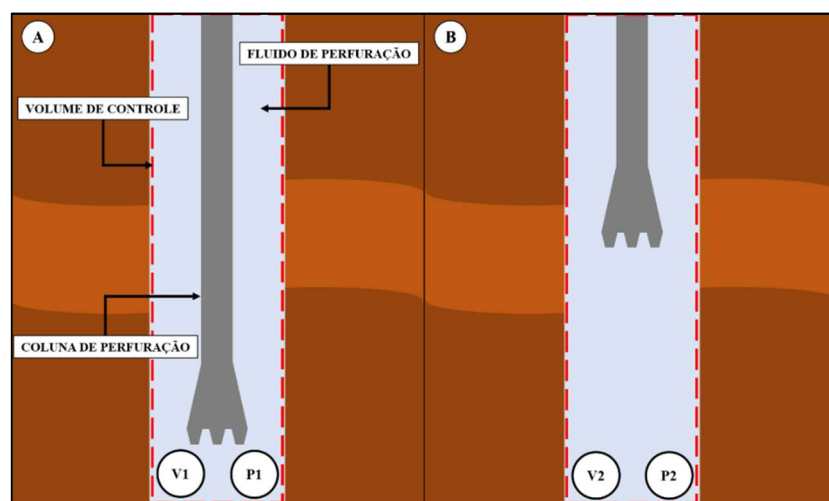


Figura 1.5 – Fenômeno de swab

Fonte: autoria própria

Para evitar as complicações operacionais causadas pelo *surge* e *swab*, é importante manter a pressão do poço dentro da janela operacional. Tal tarefa não é trivial, pois inúmeros fatores podem influenciar a pressão na região anular durante uma manobra. Dentre estes, destacam-se a velocidade e a rotação da coluna de perfuração, que podem gerar picos ou vales de pressão no decorrer do *surge* e do *swab*, respectivamente. Considerando os fatos expostos, é possível concluir que é importante o estudo dos fenômenos de *surge* e *swab* para garantir que as pressões dentro do poço respeitem sempre os limites impostos pela janela operacional.

Grande parte dos trabalhos que tratam sobre o tema estudam a variação da pressão durante a movimentação da coluna, no entanto, poucos avaliam esta variável quando o movimento é interrompido. A análise da pressão nesta situação é importante devido à pressão residual observada após o repouso da coluna, evento este atribuído às propriedades reológicas do fluido de perfuração e que pode influenciar o perfil de pressões ao longo do poço. Pressões residuais podem proporcionar interpretações erradas da pressão no fundo do poço e intensificar a variação de pressão com uma movimentação subsequente. Portanto, caso tais pressões sejam mal estimadas, problemas de fratura da formação e influxo de fluidos para o poço podem ocorrer.

## 1.4 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é avaliar experimentalmente o efeito da movimentação da coluna de perfuração, tanto axial quanto rotacional, na pressão atingida na região anular formada pelo poço e a coluna de perfuração. As pressões foram avaliadas tanto durante a movimentação como no repouso. Esta última com o objetivo de observar pressões que podem ocorrer devido às características viscoplásticas do fluido de trabalho. Os seguintes parâmetros serão variados no estudo: velocidade de subida e descida da coluna de perfuração, rotação da coluna e reologia fluido.

Para isso, foi construída e instalada uma unidade experimental no Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Esta unidade permite medir variações de pressão durante e após a movimentação da coluna, através de transdutores que possuem uma alta taxa de aquisição de dados. Além disso, o aparato experimental possui dois servomotores que permitem a movimentação da coluna e a sua rotação. Os testes foram realizados com um fluido newtoniano, a glicerina, e com uma solução aquosa de carbopol, que é um fluido viscoplástico cujas características são similares ao fluido de perfuração.

## 1.5 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão dos trabalhos experimentais e de simulação numérica sobre as pressões *surge* e *swab* para fluidos newtonianos e não newtonianos.

O Capítulo 3, é responsável por apresentar a descrição do aparato experimental utilizado, o funcionamento de seus componentes e os procedimentos experimentais adotados no trabalho.

Já no Capítulo 4, expõe-se a análise dos resultados experimentais com glicerina e uma solução de carbopol, na qual é verificada experimentalmente o diferencial de pressão ocasionado pela movimentação da coluna e o efeito da rotação sobre a pressão residual.

No Capítulo 5, são expostas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. Na sequência são apresentadas as Referências bibliográficas e os Apêndices.

No Apêndice A são apresentadas as seguintes etapas de validação da unidade experimental: cálculo das incertezas de medição, cálculo das pressões hidrostáticas e variação da pressão no regime permanente.

No Apêndice B é detalhado o processo de elaboração da solução de Carbopol.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dividido em duas partes. A primeira parte foca na revisão de conceitos fundamentais sobre fluidos não-newtonianos e a segunda parte apresenta uma revisão da literatura de trabalhos de modelagem matemática e estudos experimentais sobre pressões que surgem durante a movimentação da coluna de perfuração.

### 2.1 Revisão de Conceitos fundamentais sobre fluidos

O comportamento dos fluidos, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, define a sua classificação em newtonianos e não-newtonianos. Nos fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, como visto na Equação (1.1) e a viscosidade não depende da solicitação ou do tempo em que o material é submetido, mas exclusivamente da temperatura e pressão.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (0.1)$$

Onde  $\tau$  é o tensor tensão e  $\dot{\gamma}$  é o tensor taxa de deformação. A constante  $\mu$  é a viscosidade do fluido, que indica a resistência de um fluido a qualquer deformação irreversível de seus elementos (SCHRAMM,2006).

Entretanto, o comportamento de fluidos não-newtonianos é mais complexo, pois a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação não é linear; a viscosidade depende da solicitação ou do tempo em que o material é submetido à solicitação. Além disso, para certos fluidos não-newtonianos, a tensão ainda depende de outros parâmetros, como o histórico de deformação (TANNER, 2002). Por isso, na tentativa de melhor descrever o comportamento não-newtoniano dos fluidos, várias relações empíricas têm sido propostas e estão disponíveis na literatura (BIRD et al., 1987). Algumas dessas relações que caracterizam o comportamento reológico dos fluidos que são utilizados nos estudos sobre escoamentos na área de petróleo são apresentadas na Figura 2.1, seguida de uma breve descrição sobre cada um deles. Outras relações constitutivas para fluidos não-newtonianos podem ser encontradas em Bird et al. (1987) e Macosko (1994).

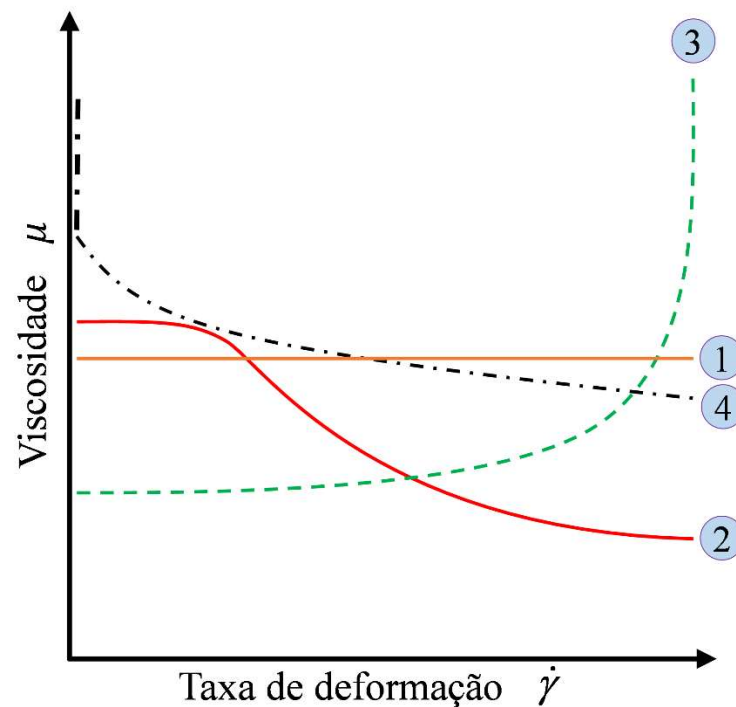


Figura 2.1 – Viscosidade aparente em função da taxa de de deformação para fluidos newtonianos generalizados.  
Fonte: autoria própria.

### Fluido Newtoniano (1)

É um tipo de fluido cuja viscosidade é independente da taxa de deformação a que o fluido está submetido, isso quer dizer que mostra um único valor de viscosidade, a uma dada condição de temperatura e pressão. Este tipo é caracterizado pela equação 1.1.

### Fluido Pseudoplásticos (2)

São substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e, quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior for esta força, maior será o grau de ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente.

Este tipo de fluido pode ser caracterizado através do Modelo Power Law ou Lei de Potência, representado pela equação:

$$\tau_{yx} = K \left| \frac{du_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{du_x}{dy} \quad (1.2)$$

Onde  $K$  é o índice de consistência do fluido,  $n$  é a inclinação da curva, no caso apresentado no gráfico, este valor é menor que 1. (A inclinação da curva só atinge o valor da unidade para taxas de deformação muito baixas ou muito altas, nesses casos o fluido tende a apresentar um comportamento mais newtoniano)

### Fluido Dilatantes (3)

Apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. Em suspensões, à medida que a tensão de cisalhamento aumenta, o fluido que lubrifica a fricção entre as partículas não consegue preencher os espaços devido ao aumento de volume que acompanha este fenômeno, ocorrendo, dessa forma, contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente.

Este tipo de substância pode ser representado pelo modelo Power Law (equação 1.2). No entanto, para este caso,  $n$  é maior que a unidade.

### Fluido viscoplástico (4)

Este tipo de fluido se caracteriza pela existência de uma tensão limite de escoamento  $\tau_0$  que deve ser superada para que o fluido possa escoar.

Alguns modelos matemáticos que representam este tipo de fluidos são:

#### a) Bingham

Este tipo de fluido apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de deformação superior a tensão limite de escoamento.

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \pm\tau_0 - \mu_0 \frac{du_x}{dy}, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0| \\ \frac{du_x}{dy} &= 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0| \end{aligned} \quad (1.3)$$

Onde  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento e  $\mu_0$  é uma constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

Ou seja, esses fluidos só escoam se a tensão aplicada for maior que a tensão limite de escoamento do material,  $\tau_0$ . Abaixo deste patamar, a viscosidade do fluido tende a um valor muito grande.



### b) Hershel-Bulkley

Diferentemente do fluido de Bingham, a tensão de cisalhamento varia como lei de potência, acima da tensão limite de escoamento. O modelo de Herschel-Bulkley é uma combinação dos modelos de Bingham e Lei de Potência, e pode representar fluidos com tensão limite de escoamento  $\tau_0$  e viscosidade aparente variável de acordo com a Lei de Potência quando  $|\tau_{yx}| > |\tau_0|$ . A viscosidade aparente pode ser representada pela seguinte equação:

$$\tau_{yx} = \pm\tau_0 - \mu_0 \left( \frac{du_x}{dy} \right)^n, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0| \quad (1.4)$$

$$\frac{du_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$

## 2.2 Revisão da literatura sobre pressões provocadas pela movimentação da coluna de perfuração

### 2.2.1 Modelos estacionários

Para desenvolver os modelos matemáticos em regime permanente são utilizadas as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento associadas com uma equação constitutiva para um fluido de perfuração, de modo que o efeito viscoso é o único considerado para o cálculo da diferença de pressão. Este tipo de modelo tem sido aplicado para investigar como a reologia do fluido e a geometria do poço afetam a queda de pressão durante a subida e descida da coluna de perfuração. Estes estudos também foram fundamentais para determinar uma velocidade segura para a coluna de perfuração.

Cardewell (1953) e Ormsby (1954) tentaram explicar a natureza física e magnitude da pressão durante a subida e descida da coluna de perfuração. Ambos os estudos apresentam técnicas quantitativas para determinar as pressões para fluidos Newtonianos no regime laminar e turbulento. Apenas as perdas de pressão decorrentes do arrasto viscoso do fluido móvel com a parede do tubo estacionário foram levadas em consideração no desenvolvimento dos modelos.

Clark (1955) introduziu o caso de um tubo movimentando-se concentricamente no interior de um tubo de diâmetro maior, considerando que a região anular era preenchida por fluido de Bingham. As variações de pressão causadas por mudanças repentinas na velocidade do tubo, além das decorrentes de arrasto viscoso foram incluídas na análise. Seu trabalho diferencia-se de seus antecessores por usar um fluido Não-newtoniano no modelo.

Fontenot e Clark (1974) criaram um modelo que considerava a variação das propriedades do fluido de perfuração com a profundidade do poço, cujos resultados foram comparados com medições em campo. Nos cálculos, os autores consideraram a solução baseada no fator de atrito que apresentou as seguintes características:

- i. Coluna e o poço concêntricos e fluido escoando em regime permanente no espaço anular cilíndrico.
- ii. Fluido de perfuração comporta-se como fluido de lei de potência e de Bingham.

Lin e Hsu (1980) apresentaram um procedimento numérico para o caso de fluidos de lei de potência dentro da região anular. No entanto, o procedimento era muito complexo para ser usado em operações de campo. Outro estudo realizado por Chukwu e Blick (1989) considerou o escoamento de Couette com gradiente de pressão para estabelecer uma relação entre a velocidade da coluna e a variação da pressão dentro do poço, resultante da movimentação da coluna. Eles relacionaram a vazão com a variação da pressão resultante da movimentação da coluna. Os autores apresentaram as soluções do seu modelo como uma família de curvas para diferentes diâmetros.

Bing et al. (1995) desenvolveram um modelo que leva em consideração a excentricidade que existe entre o poço e a coluna de perfuração. Os autores consideraram que as propriedades do fluido são constantes e que o fluido de perfuração pode ser modelado pela equação de Herschel-Bulkley. Como conclusão, perceberam que a excentricidade diminui as pressões de *surge* e *swab*. No mesmo ano, Yang e Chukwu (1995) analisaram a variação de pressão no espaço anular de duas tubulações durante a subida e descida da coluna e, através de um modelo matemático, considerando o escoamento laminar, determinaram a influência da excentricidade da coluna. O fluido de perfuração neste caso foi caracterizado como lei de potência. Nesse estudo, o tubo interno se movia com velocidade constante enquanto o externo estava parado. Todas as equações de movimento que caracterizavam o problema foram resolvidas analiticamente.

Sampaio Jr (2002) estudou as pressões durante a subida e descida da coluna, considerando o escoamento do fluido em regime permanente e analisando apenas configurações em que a coluna de perfuração é concêntrica em relação ao poço. O autor desenvolveu um programa que emprega uma solução para avaliar pressões de origem viscosa na região anular e o cálculo de pressões de natureza inercial. Neste modelo, o fluido de perfuração é aproximado como Lei de Potência e Bingham. Sampaio Jr (2002) concluiu no seu trabalho que os efeitos viscosos e de inércia são dependentes tanto do tempo quanto da posição axial.

### 2.2.2 Modelos transitórios

Os modelos transitórios consideram tanto os efeitos viscosos quanto de inércia do fluido que é afetado pela compressibilidade. Esta abordagem conduz a modelos muito mais complexos, mas também mais completos. O primeiro modelo dinâmico proposto para estudar o fenômeno de *surge* e *swab* foi desenvolvido por Lubinski (1977), cujo trabalho é considerado o precursor dos modelos dinâmicos de análise de pressões em um poço. Este modelo apresentou resultados mais preciso em relação aos medidos em poços reais do que os modelos estacionários mais conversadores.

Lal (1983) apresentou um modelo considerando parâmetros como a reologia do fluido, geometria do poço e variações na velocidade da coluna. O seu modelo previa a pressão máxima durante a subida e descida da coluna de perfuração, além da variação desta pressão ao longo do poço. O modelo de Lal (1983) também mostrava o efeito da tensão limite de escoamento sobre a pressão resultante da movimentação da coluna. Os cálculos realizados pelo autor mostraram que quanto maior os valores de tensão limite, maiores são os valores de pressão absoluta atingidas no fundo do poço durante a descida da coluna, como mostra a Figura 2.2 . Finalmente, o modelo permitia estimar a velocidade máxima na qual a coluna podia se movimentar sem produzir um incremento ou decréscimo na pressão capaz de superar uma faixa de pressão predeterminada.

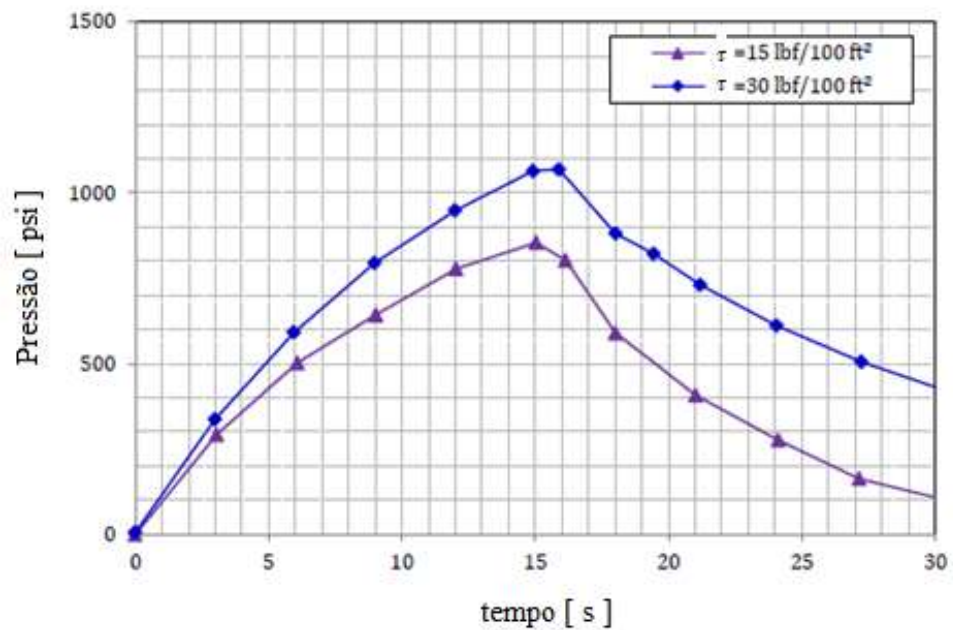


Figura 2.2 – Efeito da tensão limite de escoamento sobre a pressão de surge (Lal, 1983).

Mitchell (1988) considerou a extremidade da coluna aberta e dividiu a geometria em duas partes: uma relativa à coluna e à região anular e outro referente ao fundo do poço. Os resultados aproximaram-se bastante do pico de pressão medido para um determinado poço em Mississippi, enquanto o modelo estacionário mostrou valores de pressão muito maiores em relação aos dados de pressão obtidos em campo.

Bing e Kaiji (1996) realizaram estudos sobre a dinâmica do fenômeno de *surge* e *swab*. Os resultados do modelo foram comparados com valores medidos em regime transitório e permanente em um poço experimental no campo de Zhong Yuan, na China, e com resultados do modelo estacionário de Burkhardt (1961). Quando a velocidade da coluna foi reduzida a zero, tanto as medições quanto o modelo dinâmico mostraram que as pressões continuam a se propagar no interior do poço por um determinado intervalo de tempo. A comparação mostrou que o modelo estacionário não prevê pressões de *Surge* e *Swab* após a parada da coluna de perfuração, pois não considera os efeitos de elasticidade do poço e compressibilidade do fluido. Os resultados do modelo dinâmico concordaram bem com os valores medidos em campo.

Kimura (2008) desenvolveu um programa computacional para o cálculo das pressões de *surge* e *swab* considerando a compressibilidade de um fluido newtoniano utilizando o método dos volumes finitos. Kimura (2008) considerou, ainda, o conjunto coluna de perfuração-poço como tendo seção transversal constante e única.

Almeida (2009) continuou o trabalho de Kimura (2008), considerando o fluido de perfuração como de Bingham e lei de potência. Apesar da mudança dos fluidos, o poço continua tendo uma única seção transversal ao longo do seu eixo. Em ambos trabalhos, a coluna de perfuração é considerada fechada na sua extremidade inferior.

Shimming He et al (2015) apresentaram um modelo de regressão que permite previsões precisas das pressões de *surge* e *swab*, para uma ampla gama de razão de diâmetros (0,4 – 0,85) e utilizando duas soluções aquosas de goma de xantana (XG) e celulose polianiônica (PAC). Para verificar as previsões dos modelos, foram conduzidos experimentos de laboratório em uma unidade experimental de pequena escala que simulou o movimento de subida e descida da coluna.

Um trabalho mais recente foi desenvolvido por Ming Tang et al (2016) que apresentaram um novo modelo de *surge* e *swab* para anulares excêntricos. Para desenvolver este modelo, os autores estudaram o escoamento de um fluido de lei de potência ao longo do anular, utilizando simulações numéricas nas quais foram avaliados os efeitos das propriedades reológicas do fluido, da velocidade da coluna e da geometria do poço. Para validar seu novo modelo Ming Tang et al (2016) modificaram a unidade experimental utilizada por Shimming He et al (2015) acrescentando um parafuso que permitiu inclinar a coluna e assim atingir a excentricidade desejada para os experimentos.

### 2.2.3 Medições de campo

Canon (1934) foi o primeiro a identificar que os movimentos de descida e subida da coluna de perfuração produziam variações de pressão em um poço preenchido com fluido de perfuração. Esta conclusão foi obtida a partir de diversas medições nas quais variações nas pressões foram coletadas através de um manômetro de superfície que era fixado no fundo da coluna de perfuração ou deixado no fundo poço enquanto o tubo era removido. A partir desses experimentos, foram determinadas as relações entre queda de pressão, viscosidade e massa específica do fluido.

Burkhardt (1961) apresentou os dados de pressões medidas dentro de um poço de 100 ft (30,48 m), especialmente instrumentado para medir as pressões no fundo do poço. Os dados adquiridos foram satisfatórios para serem comparados com modelos analíticos, mas não representam a situação real, uma vez que suas dimensões eram significativamente menores do que um poço real. Resultados mais satisfatórios foram coletados por Clark e Fontenont (1974)

que realizaram medições da pressão durante a movimentação da coluna em dois poços. Os poços estavam localizados um em Mississippi e outro no estado de Utah, com profundidades de 18,500 ft (5635,8 m) e 15,270 ft (4654,3 m), respectivamente. Eles forneceram informações importantes sobre as propriedades do fluido de perfuração e pressões ocasionadas pela movimentação da coluna. Concluíram, assim, que controlar a velocidade de descida da coluna é necessário para minimizar as pressões de *surge*.

Wagner et al. (1993) coletou os dados de pressão obtidos em uma série de três testes de campo que foram realizados em poços com profundidades de 19,600 ft (5974,08 m) e 15,384 ft (4689,04 m) em Mississippi e Louisiana, respectivamente. Os resultados mostraram que a velocidade da coluna é proporcional à pressão durante a subida e descida. Além disso, observou-se a diminuição da pressão com o tempo, devido à redução da pressão hidrostática em função da profundidade. O autor comparou todos os resultados obtidos em campos com seu modelo que considerava as respostas transiente da pressão durante a movimentação da coluna. A Figura 2.3 apresenta um gráfico da variação da pressão na região anular em função do tempo dos dados coletados quando a coluna era retirada de três seções de diâmetros diferentes depois da cimentação do poço. Nesta figura se observam picos de pressão, que, segundo o autor, representam claramente o efeito da aceleração inicial imposta na coluna quando esta era retirada de cada uma das seções.

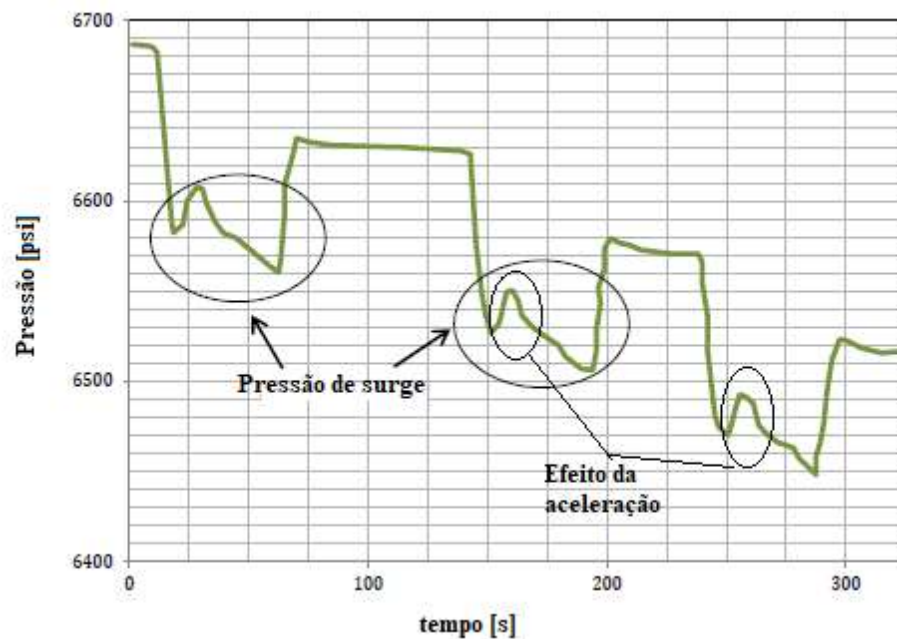


Figura 2.3 – Pressão no anular medida durante um teste de movimentação da coluna (Wagner et al. 1993).

White e Zamora (1997) apresentaram os dados de pressão obtidos durante a movimentação da coluna dentro de um poço de 12.710 ft (3874,08 m) localizado no Golfo de México. Apesar das limitações técnicas ao utilizar um poço de profundidade menor, conseguiram observar o efeito da velocidade e aceleração da coluna sobre a pressão do poço. Os resultados também constataram uma pressão consideravelmente maior durante a descida da coluna no fundo no poço do que na superfície do mesmo.

Outros estudos realizados por Rudolf e Suryanarayana (1998) efetuados em um poço de 15.000 ft (4572 m) de profundidade mostram os picos de pressão que aparecem quando a coluna começa a se movimentar. O aumento súbito da velocidade da coluna resulta em uma aceleração que aumenta a pressão durante a descida da coluna (*surge*).

#### 2.2.4 Trabalhos experimentais

Ooms e Kampman-Reinhartz (1996), através de estudos experimentais e numéricos, investigaram a influência da rotação da coluna e excentricidade na queda de pressão durante a perfuração de um poço, considerando um escoamento laminar de um fluido newtoniano entre dois cilindros excêntricos com rotação do cilindro externo. Seus experimentos confirmaram que a rotação do cilindro interno em um anular concêntrico não tem efeito na queda de pressão para um fluido newtoniano escoando em regime laminar. A queda de pressão aumentava somente quando a rotação do cilindro interno era alta o suficiente para formar vórtices de Taylor ou até turbulência.

Crespo e Ahmed (2013) apresentou um modelo numérico para fluidos de Herschel-Bulkley que é validado através de resultados experimentais obtidos em um aparato de pequena escala. A unidade experimental utilizada por Crespo e Ahmed (2013), ver Figura 2.4, consiste em dois tubos de policarbonato completamente transparente e o tubo que representa o poço tem um diâmetro interno de 0,05008 m, enquanto aquele que representa a coluna tem um diâmetro externo de 0,0335 m. O uso de um motor e uma polia possibilita a movimentação axial do sistema. Os estudos experimentais foram conduzidos para determinar o efeito da velocidade da coluna de perfuração, das propriedades dos fluidos e da excentricidade do poço na variação da pressão durante a movimentação da coluna. Neste trabalho foi concluído que:

- i. A velocidade da coluna e a tensão limite de escoamento do fluido podem aumentar significativamente a pressão gerada durante a descida da coluna.
- ii. Em poços horizontais, inclinados e até verticais, a excentricidade da coluna de perfuração pode diminuir significativamente (acima de 45%) as pressões geradas durante a movimentação da coluna.
- iii. A Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos durante simultâneas descidas da coluna enquanto a região anular do aparato experimental estava preenchida com Xanthan nesta figura observou-se o aumento da pressão enquanto a coluna desce até atingir o regime permanente e na sequência a diminuição da pressão assim que a coluna cessou sua movimentação.
- iv. Quando cessava a movimentação da coluna, os transdutores de pressão não marcavam a mesma queda de pressão inicial como acontecia com outros fluidos. Isso se deve à tensão limite de escoamento que gera uma pressão adicional.

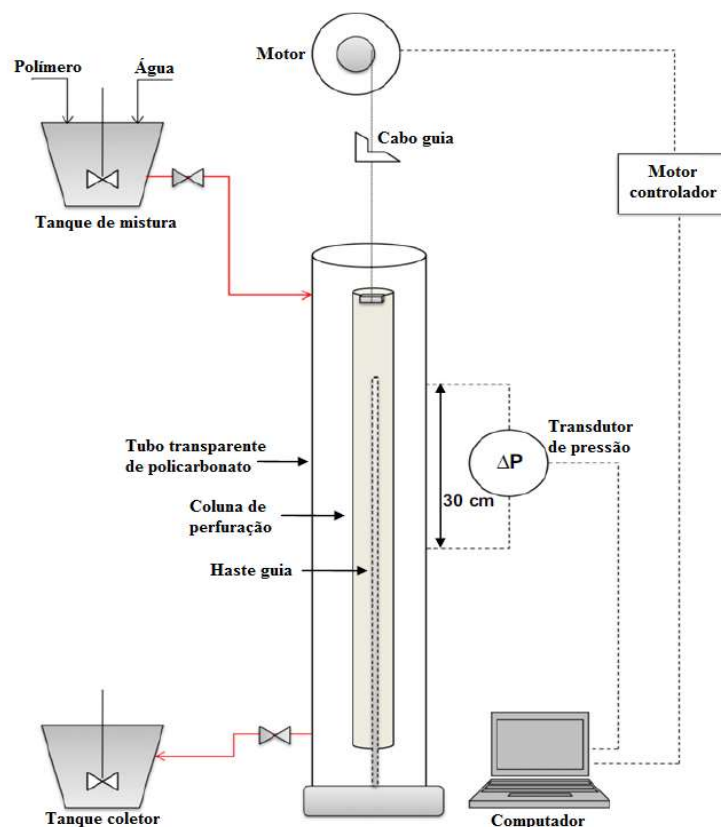


Figura 2.4 – Bancada experimental utilizada por Crespo(2013) para determinar as pressões de *surge* e *swab*.  
Fonte: adaptado de Crespo (2013).



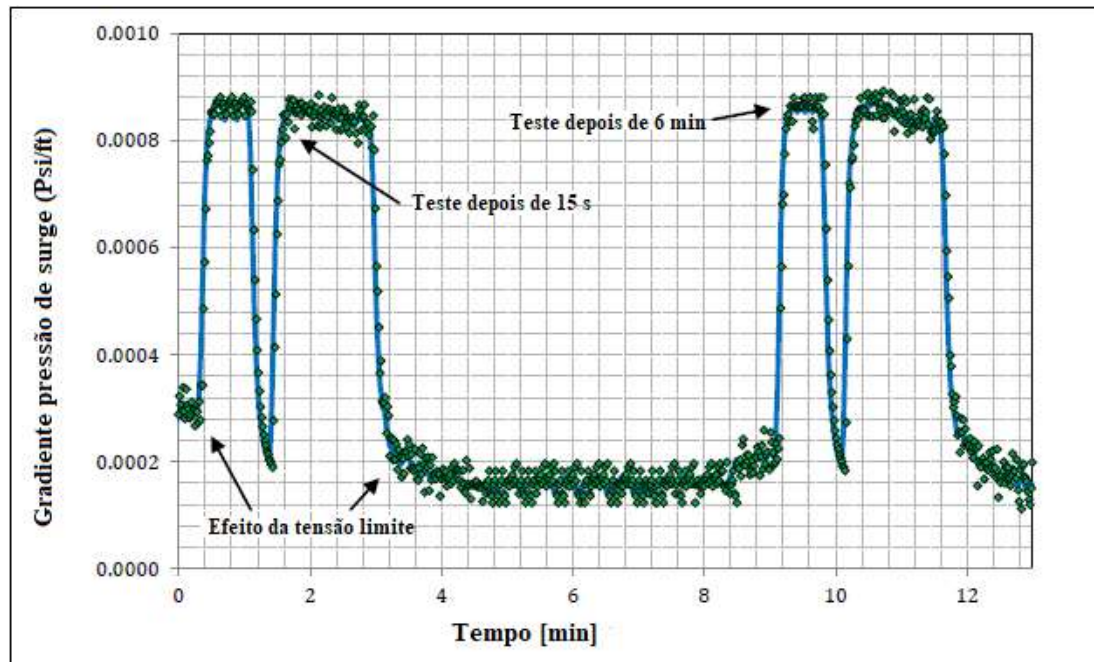


Figura 2.5 – Efeito do tempo nas medições de pressão de *surge* (1.0% Xanthan Gum; 0.05 ft/sec). Fonte: adaptado de Crespo (2013).

Wolski et al. (2014) realizaram ensaios experimentais de movimentação da coluna de perfuração em um aparato experimental mostrado na Figura 2.6. A unidade experimental é constituída de um tubo de acrílico com um diâmetro interno de 0,14 m e comprimento de 2,5 m, preso a uma estrutura metálica. Um segundo tubo de acrílico de 2,5 m de comprimento estava instalado de maneira concêntrica em relação ao primeiro, sendo um motor elétrico responsável pelo movimento de subida e descida deste tubo. Um termopar monitorava a temperatura do fluido e dois transdutores de pressão tinham como principal função medir a pressão diferencial no anular durante a movimentação do tubo interno.

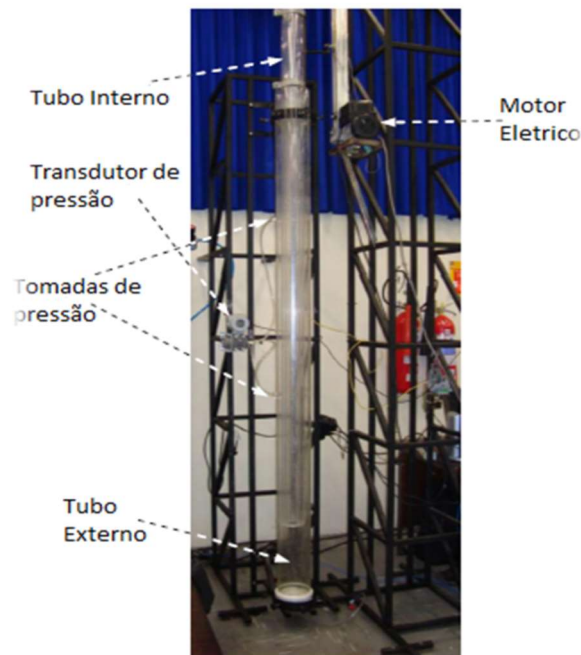


Figura 2.6 – Protótipo de torre de perfuração utilizando por Wolski et al (2014).

Os testes realizados neste aparato experimental consistiam na subida e na descida da coluna de perfuração dentro do poço preenchido com glicerina ou fluido de perfuração. O experimento era realizado durante 13 s, durante o qual eram coletadas amostras da diferença de pressão. Os resultados obtidos nestes experimentos mostram que para glicerina, mostrados na Figura 2.7, durante a descida da coluna, a pressão aumenta em relação ao tempo tendendo a atingir um valor constante. Assim que a coluna para de se movimentar, a pressão volta a zero. Neste experimento foi utilizado um transdutor de pressão diferencial que estava preenchido com outro fluido, portanto a pressão hidrostática era compensada e era medida unicamente a variação de pressão causada pela movimentação.

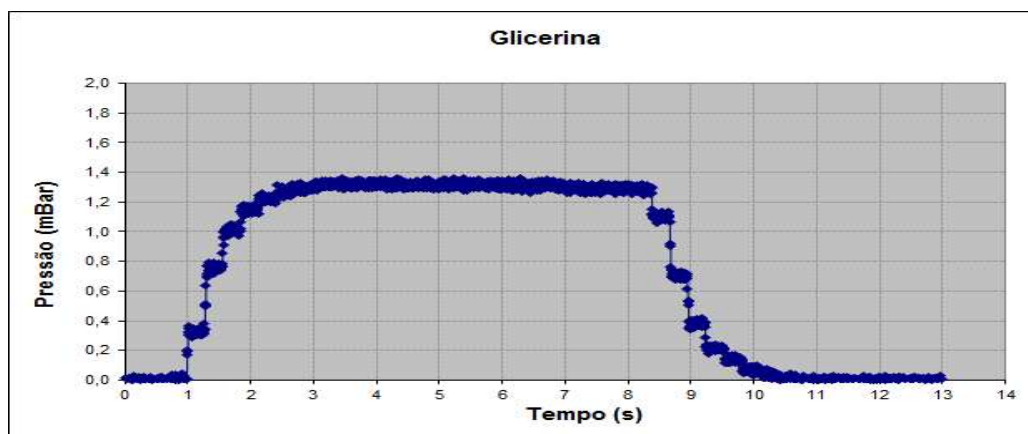


Figura 2.7 – Variação da pressão com o tempo devido ao deslocamento descendente da coluna, em poço preenchido com glicerina. Wolski et al (2014).

Experimentos realizados com fluido de perfuração mostraram um comportamento similar, onde a pressão cresce conforme a coluna desce dentro do poço. Quando a coluna para, no entanto, a diferença de pressão coletada pelo transdutor de pressão instalado na tubulação que simula o poço não retorna ao seu valor original, como mostra a Figura 2.8. Observa-se uma diferença de pressão que se mantém após o experimento. Essa pressão remanescente foi chamada pelo autor como “memória de pressão”. Esse termo faz referência à pressão que não retorna ao seu valor inicial.

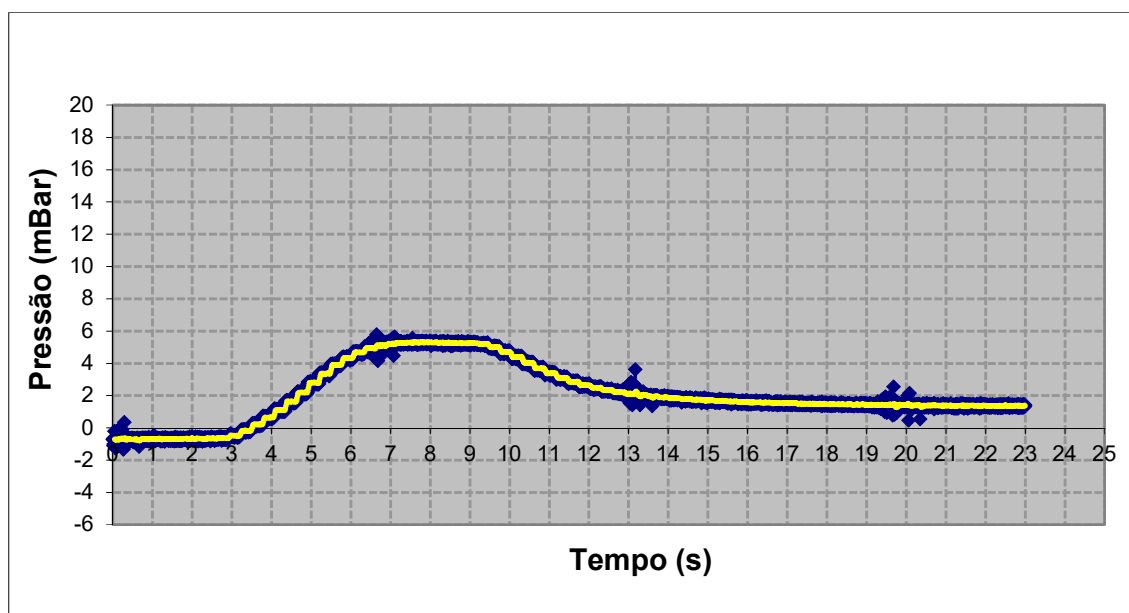


Figura 2.8 – Variação da pressão com o tempo devido ao deslocamento descendente da coluna, em poço preenchido com fluido de perfuração. Wolski et al (2014)

No mesmo ano, Erge et al (2014) construíram um aparato experimental que representava um poço horizontal e uma coluna de perfuração. Os resultados mostram que girar a coluna de perfuração pode aumentar ou diminuir as perdas viscosas. O efeito mais pronunciado da rotação é observado na região de transição, entre o escoamento laminar e o turbulento. Os experimentos onde incluíram a broca na coluna de perfuração mostraram a redução significativa de perdas de pressão por atrito em comparação com a configuração sem broca. Do estudo pode se destacar a seguinte conclusão:

- i. O efeito da rotação da coluna é mais pronunciado na região de transição entre o escoamento laminar e turbulento.

## 2.3 Síntese do Capítulo 2

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica que contempla alguns estudos sobre o fenômeno do *surge* e *swab* durante a movimentação da coluna. Da revisão, é possível retirar as seguintes informações importantes:

- i. A variação da pressão em um poço de perfuração devido a movimentação da coluna é proporcional à velocidade, aumentando a pressão dentro do poço durante a descida da coluna e diminuindo durante a sua retirada.
- ii. Os modelos transientes, apesar de serem mais complexos, proporcionam resultados mais próximos da realidade do que os modelos estacionários.
- iii. A excentricidade da coluna reduz significativamente a pressão de *surge* durante a descida da coluna.

Como foi verificado na revisão bibliográfica, existem poucas unidades experimentais direcionadas ao estudo da variação de pressão no poço durante a movimentação e parada da coluna de perfuração. Apenas Crespo e Ahmed (2013) e Wolski et al. (2014) desenvolveram aparatos experimentais capazes de monitorar a variação da pressão durante a movimentação da coluna utilizando fluidos newtonianos e não-newtonianos. Entretanto, esses aparatos experimentais apresentam algumas limitações operacionais como: comprimento da seção de teste, controle da velocidade e aceleração da coluna, taxa de aquisição de dados dos transdutores e impossibilidade de rotação da coluna. Essas limitações dificultaram a realização de estudos que permitissem explorar mais a fundo a interferência de outros parâmetros que influem diretamente na variação da pressão dentro do poço. Por outro lado, os trabalhos de Ooms e Kampman-Reinhartz (1996) e Erge et al (2014) apesar de considerarem a rotação da coluna, tem objetivos diferentes ao propostos no presente trabalho, o primeiro avaliava a pressão para fluido newtonianos e se enfoca na visualização do efeito da rotação, enquanto o trabalho do segundo autor considera unicamente a rotação da coluna sem movimentação axial.

Em face do exposto, buscando compreender melhor a influência dos parâmetros anteriormente mencionados, foi projetada e construída uma unidade experimental que permitisse aprofundar o conhecimento dos fenômenos decorrentes da movimentação axial e rotacional da coluna durante a perfuração de poços de petróleo.

## 3 DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é apresentada a instrumentação e os principais componentes da unidade experimental utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho. Na primeira parte, apresenta-se a descrição do circuito experimental e o funcionamento de cada um dos equipamentos que o compõem. Na sequência, é descrito o sistema de aquisição de dados e controle. Finalmente, são apresentados os procedimentos experimentais e o roteiro de testes.

### 3.1 Descrição geral do aparato experimental

O aparato experimental foi inicialmente projetado com objetivo de avaliar experimentalmente pressões obtidas durante e após movimentação da coluna de perfuração. O aparato denominado “torre de ensaios” possui altura de 15,5 metros. A unidade permite não somente avaliar as pressões durante a movimentação, como também após a parada da coluna.

O desenho esquemático da torre de ensaios é apresentado na Figura 3.1. A bancada é composta de quatro tanques reservatórios que mantêm homogênea a suspensão que compõe o fluido de trabalho, uma bomba helicoidal cuja finalidade é circular o fluido de trabalho ao longo da unidade experimental, doze válvulas de esfera eletropneumáticas que permitem direcionar o fluido, dois Servomotores encarregados da movimentação da coluna, dois quadros de comando onde se encontram instalados os componentes que realizam tanto a aquisição como o controle dos equipamentos, da seção de testes que é composta por duas tubulações que representam o poço e a coluna de perfuração, cinco transdutores de pressão absoluta e uma termoresistência responsáveis pela medição e o monitoramento da pressão e temperatura, respectivamente. A possibilidade de se avaliar quatro fluidos de testes diferentes, sem a necessidade de substituição total do fluido do interior do tanque, elucida a versatilidade da torre de ensaios.

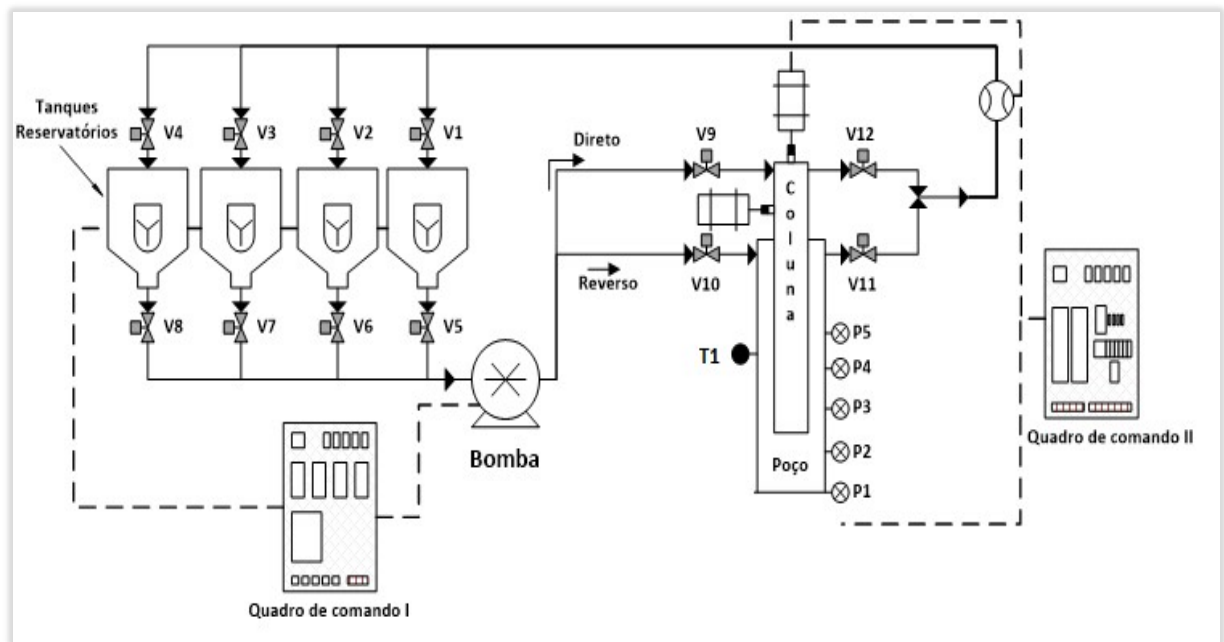


Figura 3.1 – Desenho esquemático do aparato experimental.

A bomba succiona os fluidos dos quatro tanques aonde existem quatro válvulas V8, V7, V6 e V5 que possibilitam a escolha de diferentes fluidos de trabalho. O fluido escolhido para realizar os testes pode ser inserido diretamente no poço através da abertura da válvula V10 ou através da coluna por meio da válvula V9. Na sequência, o fluido entra na seção de testes, onde foram instalados transdutores de pressão que medem a variação da pressão durante e depois dos testes de movimentação da coluna. Conforme o desenho esquemático, no poço estão localizados os transdutores de pressão P1, P2, P3, P4 e P5, que medem as pressões do fluido de trabalho durante a movimentação da coluna e uma termoresistência T1, encarregada de monitorar a temperatura dentro do poço. Depois do preenchimento da seção de testes, o fluido de trabalho realiza a abertura das válvulas V11 ou V12, permitindo, dessa forma, o retorno do fluido de trabalho aos seus respectivos tanques de armazenamento através das válvulas V1, V2, V3 ou V4.

Os sinais dos transdutores de pressão e da termoresistência são enviados ao painel de controle, que é conectado ao computador da unidade experimental. A unidade experimental possui dois painéis elétricos. O primeiro é o painel dos inversores de frequência que controlam os motores da bomba e os agitadores de fluido. O segundo é o painel de controle, onde estão instaladas as placas de aquisição de dados. Todos os equipamentos de aquisição de dados e controle estão aterrados para evitar interferência eletromagnética nas medições.

## 3.2 Descrição dos componentes

A descrição dos componentes foi dividida em seções, onde cada um engloba uma função principal. A seção testes se refere ao local em que foram realizadas as medições experimentais. Durante os experimentos foram utilizados dois fluidos que apresentam a composição reológica dos fluidos similar aos utilizados no campo em uma perfuração de poço real. O sistema hidráulico é responsável pelo armazenamento e transporte do fluido de trabalho. O sistema de medição e controle é responsável pelo controle dos equipamentos que movimentam a coluna e aquisição dos sinais de pressão medidos dentro do poço em tempo real. O sistema estrutural foi projetado para sustentar as cargas e evitar vibrações excessivas nos equipamentos, podendo, assim, garantir uma operação segura.

### 3.2.1 Sistema estrutural e de movimentação

O sistema estrutural (I) consiste em uma estrutura metálica que possui um comprimento total de 15,5 m e peso aproximado de 1210 kg, sendo fixado ao prédio de forma garantir a estabilidade ao sistema. Esta estrutura metálica foi fabricada em tubo industrial quadrado (50,8 x 50,8 x 6,3 mm) de aço carbono ASTM A-36. Duas guias lineares (II) foram instaladas na estrutura superior, com comprimento total de 8 m. Esses guias são responsáveis por guiar o carrinho. O carrinho é uma pequena estrutura metálica que se movimenta ao longo das guias anteriormente mencionadas, suporta o sistema de rotação e sustenta a coluna de perfuração. A Figura 3.2 apresenta os componentes do sistema estrutural descritos. O sistema de elevação (III), responsável pelo movimento de translação vertical da coluna de perfuração, é composto por um servomotor, fabricado pela empresa SEW. Este equipamento possui uma velocidade de saída no eixo do redutor de 52 rpm e torque máximo de 1550 N.m. O sistema de rotação (IV) é encarregado de proporcionar movimento rotacional para a coluna. Este equipamento, também fabricado pela empresa SEW, é composto por um servomotor responsável pela rotação da coluna de perfuração, possuindo 67 rpm na saída do redutor, 85 N.m de torque máximo e 25,23 N.m de redução.

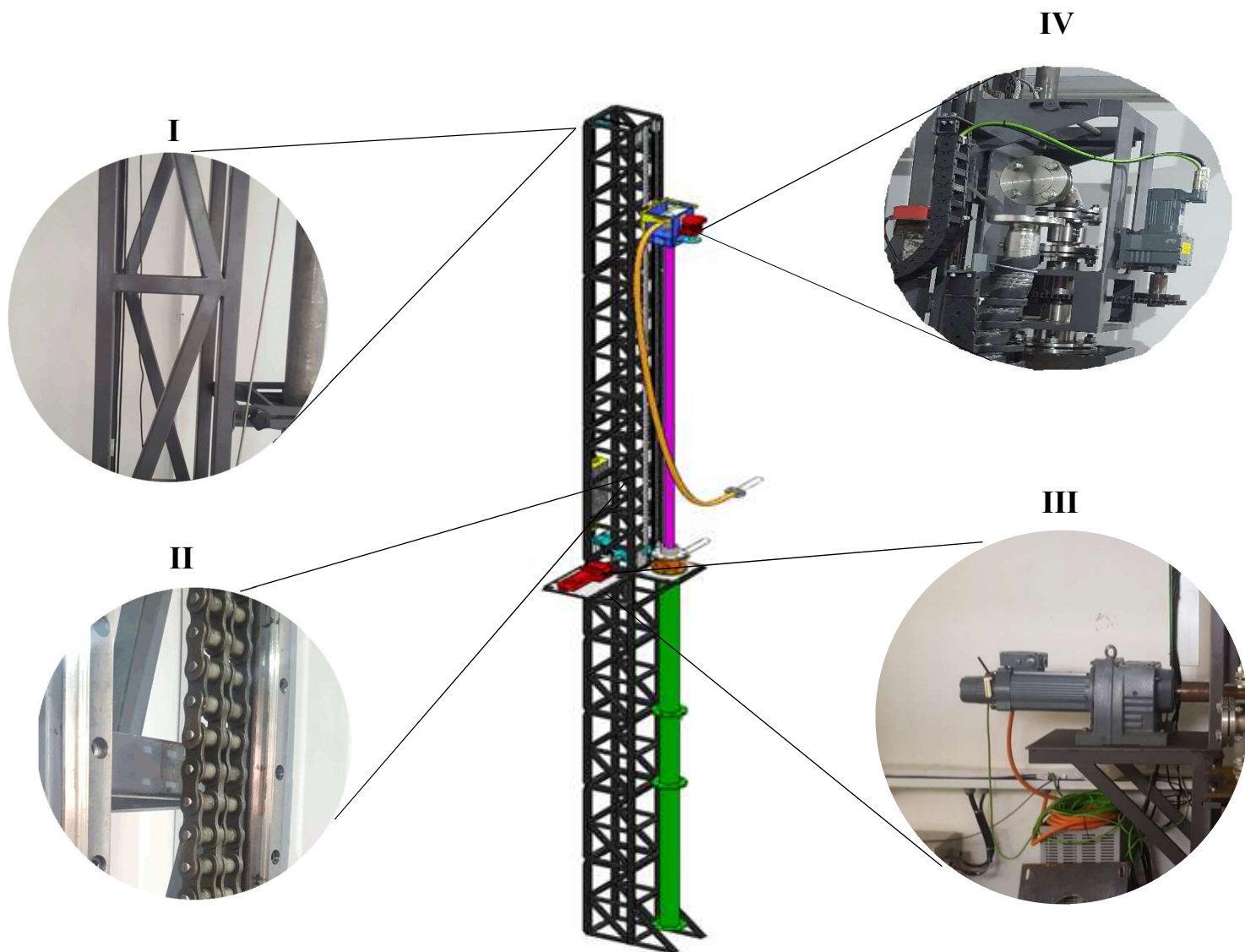


Figura 3.2 – Estrutura de suporte da unidade experimental  
(I),(II),(III) e (IV).

### 3.2.2 Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico é o responsável pelo armazenamento e transporte do fluido de trabalho, sendo composto por uma bomba helicoidal, doze válvulas do tipo esfera com atuadores pneumáticos, uma válvula manual, tubos de seção transversal circular e quatro reservatórios com agitadores mecânicos. Conforme já foi apresentado na Figura 3.1.

A bomba é do tipo helicoidal fabricada pela empresa Netzsch, do modelo Nemo BY de dois estágios, ideal para trabalho com fluidos de alta viscosidade e alto teor de sólidos, e pressão máxima de trabalho de 12 bar. O corpo da bomba é fabricado em aço AISI 304. A bomba, sendo helicoidal, desloca fluido a fluxo contínuo, evitando assim pulsações de pressão.



A tubulação encarregada do transporte do fluido possui diâmetro interno médio de 50,80 mm, feita em aço inoxidável AISI 304, com 6,8 m de comprimento. Este comprimento é correspondente à distância entre a saída da bomba e a entrada da coluna. O volume de fluido que pode ser armazenado nesta tubulação corresponde a 17,2 l.

Os reservatórios de fluidos, fabricados pela empresa Union Equipamentos, possuem raio de 920 mm e altura de 490 mm, com capacidade de 500 l, ver Figura 3.3. As paredes são feitas de chapas maciças de polipropileno, material termoplástico anticorrosivo, utilizado para processos industriais de agitação de misturas. O reservatório também possui um motor de 0,75 hp acoplado na parte superior, que tem a função de acionar uma haste que agita o fluido armazenado.



Figura 3.3 – Reservatórios de fluidos da unidade experimental instalados nas dependências na UTFPR

As válvulas eletropneumáticas instaladas no aparato experimental (V1 a V12) são do tipo esfera, de corpo de aço inoxidável AISI 304, com pressão e temperatura máxima de trabalho de 250 bar e 80°C, respectivamente. Estas válvulas são abertas e fechadas por um atuador pneumático de solenoide, que é acionado por sinais elétricos enviados por computador. Assim, a automatização do processo de abertura e fechamento das válvulas facilita a operação da unidade e, conseqüentemente, favorece a repetitividade dos ensaios experimentais. A válvula V2 é mostrada como exemplo na Figura 3.4; as válvulas V1 até V12 são idênticas em seu

funcionamento e operação. As válvulas V5, V6, V7 e V8 permitem a alimentação da bomba e as válvulas V1, V2, V3 e V4 permitem o retorno do fluido de trabalho para os respectivos tanques de armazenamento. As válvulas V9 e V10 possibilitam o escoamento do fluido de trabalho para o interior do poço através do tubo que representa a coluna de perfuração e retorno pelo espaço anular. Por outro lado, as válvulas V11 e V12 permitem, alternativamente, a circulação reversa, que consiste em injetar o fluido de trabalho pelo espaço anular e fazê-lo retornar ao tanque pelo interior do tubo que representa a coluna.

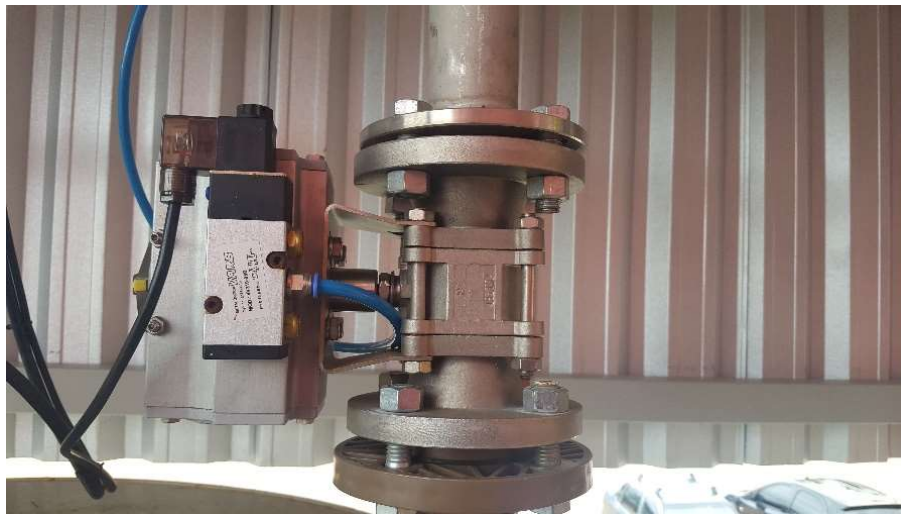


Figura 3.4 – Exemplo de válvula eletropneumática (na imagem: V2).

### 3.2.3 Sistema de medição e controle

O sistema de aquisição de dados, fabricado pela National Instruments, é composto pelas placas NI 9265, NI9426, NI9203, NI9213, NI9226 e NI9476, instaladas dentro do chassi cDAQ 9174. A função deste sistema é coletar os sinais digitais e enviá-los a um computador, utilizando um cabo Ethernet. Todos os dados recebidos pelo computador são monitorados utilizando o software LabView, versão 2012, desenvolvido também pela empresa National Instruments.

Os transdutores de pressão, fabricados pela empresa ZÜRICH – do modelo FLUSH.34, foram instalados nas tomadas de pressão P1 a P5, na tubulação correspondente ao poço (ver Figura 3.1). A medição de pressão é enviada para a placa de aquisição de dados na forma de um sinal analógico de corrente de 4 a 20 mA e a precisão do sinal do transdutor de pressão é de 0,1% da faixa total de medição. A frequência de medição dos transdutores de pressão é de 1 kHz e a faixa de medição dos transdutores da seção de testes varia de: 0 a 10 bar. Os transdutores

de pressão estão conectados à placa de aquisição de dados, posicionada no painel de controle. O transdutor de pressão na tomada de pressão P5 no poço é mostrado na Figura 3.5 como exemplo. Os demais são idênticos. Salienta-se que o material do invólucro do transdutor é aço inoxidável AISI 304, com rosca do tipo BSP de  $\frac{3}{4}$ " para encaixe na tubulação, e a membrana é fabricada em aço inox AISI 316 L.



Figura 3.5 – Transdutor de pressão P3 instalado no poço da unidade experimental.

A termoresistência, instalada no poço com o objetivo de medir a temperatura na região anular, é do tipo PT100 (T1) fabricada pela empresa Ômega, possuindo conexão rosqueada NPT de  $\frac{1}{8}$ " de diâmetro que a torna ideal para aplicações que exigem manuseio frequente. Os limites inferiores e superiores de medição do termopar selecionado são  $-50$  e  $260^{\circ}\text{C}$ , sendo o erro de  $0,70\%$  da faixa de temperaturas e o tempo de resposta é de  $0,3$  segundos. O sinal elétrico deste dispositivo é analógico. O PT100 está ligado à placa de aquisição de dados de temperatura, instalada no painel de controle. A Figura 3.6 mostra a termoresistência PT100 instalada no poço para o monitoramento da temperatura do fluido confinado na região anular.



Figura 3.6 – Termoresistor PT100 instalado no poço.

Os sinais de pressão e temperatura são coletados por placas de aquisição de sinais de corrente elétrica da National Instruments, modelos NI 9213 (entrada analógica para sinal de termopares) e NI 9203 (entrada analógica para sinal dos transdutores de pressão). Uma placa de saída analógica NI 9265 também foi instalada para enviar sinais de corrente aos inversores de frequência do motor da bomba e do motor agitador, de modo a controlar a rotação destes equipamentos. Por fim, foi adquirido um módulo de saída digital NI 9474 que envia sinais digitais para ligar e desligar a bomba e o motor do agitador, além de realizar a abertura e o fechamento das válvulas pneumáticas. O monitoramento da temperatura e controle de vazão e dos equipamentos da unidade é realizado por meio do *software LabVIEW*, da National Instruments instalado em um computador.

### 3.3 Operação da unidade experimental

O funcionamento da unidade experimental é gerenciado através da utilização dos softwares fornecidos pelas empresas *SEW* e *LabVIEW*, o primeiro é responsável pela movimentação axial e rotação da coluna de perfuração, enquanto o outro encarrega-se da aquisição dos dados obtidos durante os experimentos. A operação da unidade experimental é dividida em módulos, na sequência explica-se cada um dos módulos de forma detalhada.

### 1) Módulo de movimentação axial

Este módulo controla os movimentos ascendentes e descendentes da coluna de perfuração dentro do poço. A Figura 3.7 mostra a interface gráfica que permite o controle de diversos parâmetros relacionados à movimentação da coluna, tais como: posicionamento espacial, velocidades e rampas de aceleração e desaceleração.

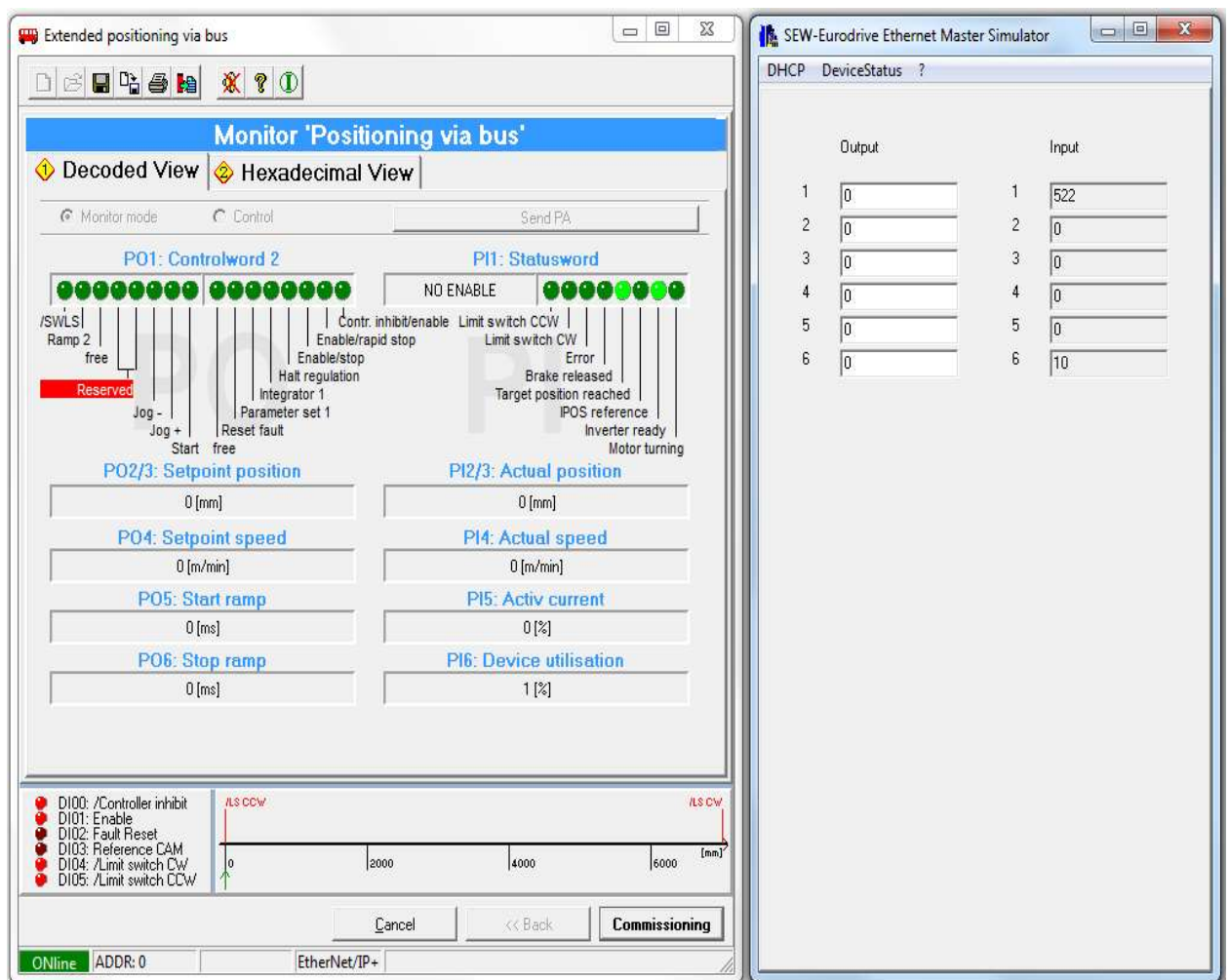


Figura 3.7 – Tela de controle da movimentação da coluna da SEW.



## 2) Modulo de rotação da coluna

Este modulo controla a rotação da coluna, seja no sentido horário ou anti-horário. Funciona por meio de uma interfase similar à interface apresentada no modulo de movimentação axial, permitindo impor rampas de aceleração e desaceleração em função da rotação, porém não é possível realizar o posicionamento espacial da coluna através desta interfase.

## 3) Modulo de aquisição de dados

Este modulo é composto por uma tela de monitoramento e controle. Esta é subdividida em seis abas distintas, cada uma com funcionalidade específica. Quando um experimento está em progresso, a aba de monitoramento, apresentada na Figura 3.8, possibilita executar a gravação de dados de pressão e temperatura, conforme o gráfico que mostra estes elementos.

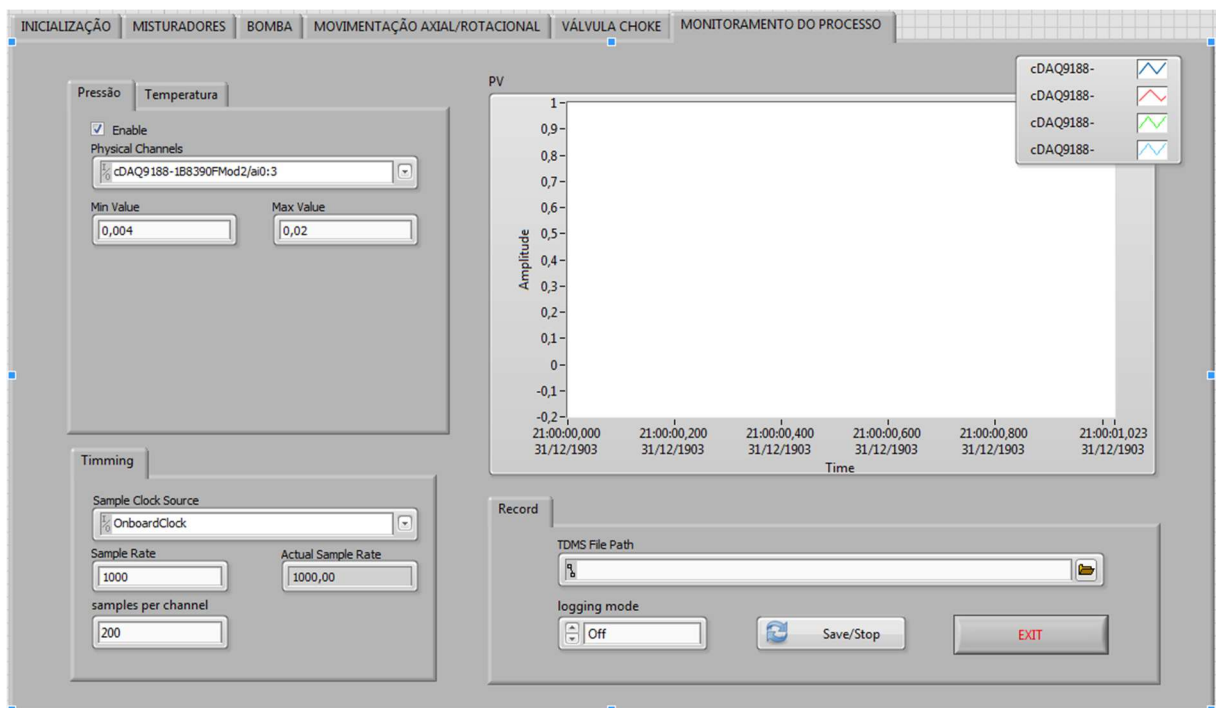


Figura 3.8 – Tela de monitoramento do processo no Labview.

### 3.3.1 Fluido de trabalho

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de fluidos diferentes, uma solução aquosa de glicerina e uma solução aquosa de Carbopol, estes fluidos apresentam comportamento reológicos diferentes e, portanto, cada um deles pode ser classificado como fluido newtoniano e fluido não newtoniano, respectivamente. A escolha destes fluidos busca avaliar a influência das propriedades reológicas no fenômeno que será estudado no decorrer do presente trabalho.

#### a. Solução aquosa de glicerina

A solução aquosa de glicerina utilizada nos ensaios experimentais ao longo do trabalho, consiste em uma solução aquosa de 95% em volume de glicerina bidestilada, cuja elaboração foi realizada pelo fabricante que forneceu o fluido. Pelo fato da amostra ter sido preparada fora do centro de pesquisas, foi necessário realizar ensaios reológicos utilizando o reômetro apresentado no início desta seção para determinar as propriedades reológicas da solução. Através dos ensaios reológicos foi levantada uma curva da variação da velocidade em função da temperatura. Dessa forma é possível determinar a viscosidade da glicerina no intervalo de temperatura contemplado pelos estudos, 20 °C a 25°C. A Figura 3.9 mostra uma curva de viscosidade em função da temperatura, no eixo ordenado deste gráfico encontram-se os valores de viscosidade correspondentes às temperaturas impostas no reômetro durante os ensaios.

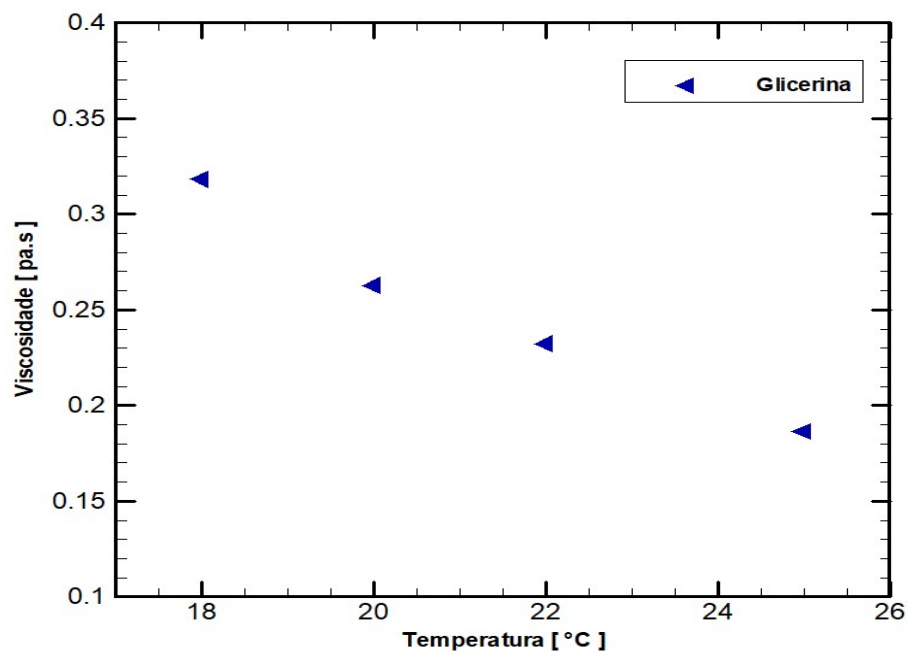


Figura 3.9 – Curvas de viscosidade em função da temperatura para a glicerina.

#### b. Solução aquosa de Carbopol

Optou-se por utilizar gel clínico, que é empregado na realização de ultrassons na área médica. Este fluido é composto de polímero carboxivinílico (ou Carbopol®), imidazolidil, uréia, metil parabeno, 2 amino, 2 metil, 1 propanol e água deionizada. Como o gel clínico possui viscosidade elevada, o que poderia exceder o limite nominal dos transdutores de pressão do aparato experimental, primeiramente foram elaboradas três soluções de 100g com concentrações de 30%, 50% e 70% para que conseguíssemos definir qual seria a melhor opção para a realização dos testes. Na formulação dessas soluções foi acrescentado 5% de biocida, antibacteriano que se destina a uma ampla gama de aplicações nos mercados de campos de petróleo e gás e de tratamento de água.

A composição é estável com referência a aglomeração e cristalização em temperatura ambiente e muito eficaz na conservação da solução. É importante destacar que todo esse processo de formulação do fluido de trabalho não newtoniano já foi realizado em diversos trabalhos do grupo de pesquisa CERNN, por isso, já antecipávamos que a solução de 70% seria a mais ideal. Por conseguinte, o fluido de trabalho elaborado para executar os experimentos é uma solução de 70 % gel clínico e 30 % de água destilada. Como o gel clínico é composto principalmente por Carbopol e água, este fluido será chamado de solução aquosa de carbopol ao longo deste trabalho. O processo de elaboração da solução é detalhado no Apêndice B.

De modo a verificar as medições da unidade experimental durante o escoamento da solução aquosa de carbopol e determinar as propriedades reológicas da solução de carbopol, foi elaborada a curva de escoamento de tensão em função da taxa de deformação com ajuda do reômetro. A Figura 3.10 mostra as curvas de escoamento obtidas com o reômetro a partir de três amostras de uma solução aquosa de Carbopol 70 % a 25,1 °C.



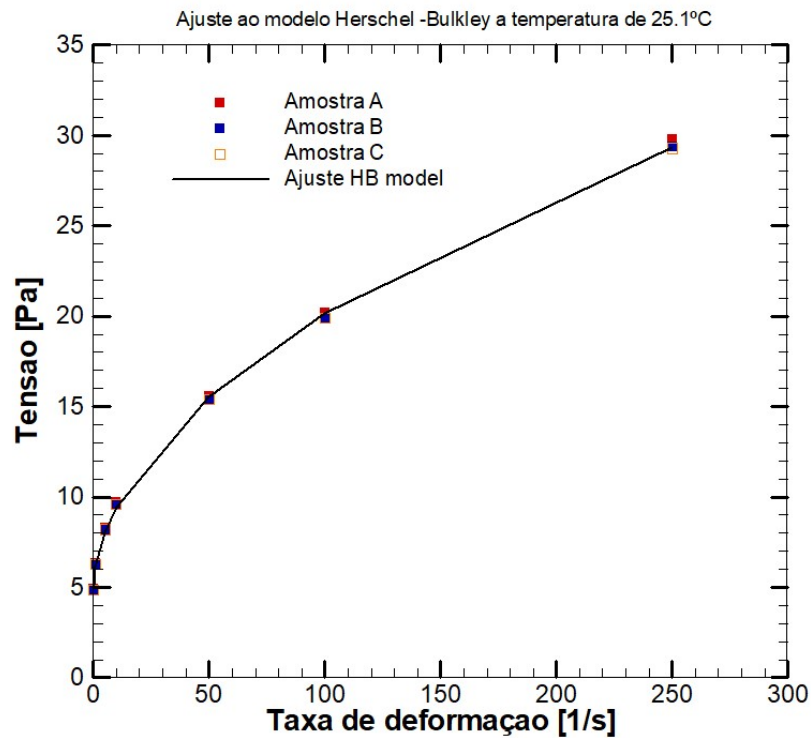


Figura 3.10 – Curvas de escoamento resultantes dos testes realizados com o reômetro para uma solução aquosa de Carbopol.

Os resultados obtidos foram ajustados utilizando a equação de Herschel-Bulkley, através do ajuste foi possível determinar os coeficientes da equação. O valor da tensão limite de escoamento é de 5,25 Pa. Os valores das constantes do ajuste realizado constam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades da solução aquosa de Carbopol utilizada na unidade experimental

FLUIDO	AJUSTE HB	25°C
Solução aquosa de Carbopol 70 %	$\tau_0$	5,25
	K	2,14
	$n$	0,47

### 3.3.2 Seção de testes

Devido à complexidade de realizar os testes iniciais utilizando todos os componentes que compõem a unidade experimental e visando realizar os ensaios de uma maneira mais versátil, a seção de teste foi limitada unicamente a utilização do poço, a coluna e os componentes responsáveis pelo controle da movimentação e aquisição de dados.

A seção de testes é constituída por duas tubulações concêntricas que simulam um arranjo poço-coluna. O tubo externo, construído de aço inox ASI3004, representa o poço e tem um diâmetro externo de 4 polegadas e comprimento de 7 m. Ao longo desta tubulação foram instalados cinco transdutores de pressão distanciados entre si, conforme mostra a Figura 3.11. Este espaçamento entre os transdutores facilita a análise do comportamento da pressão ao longo da seção de interesse.

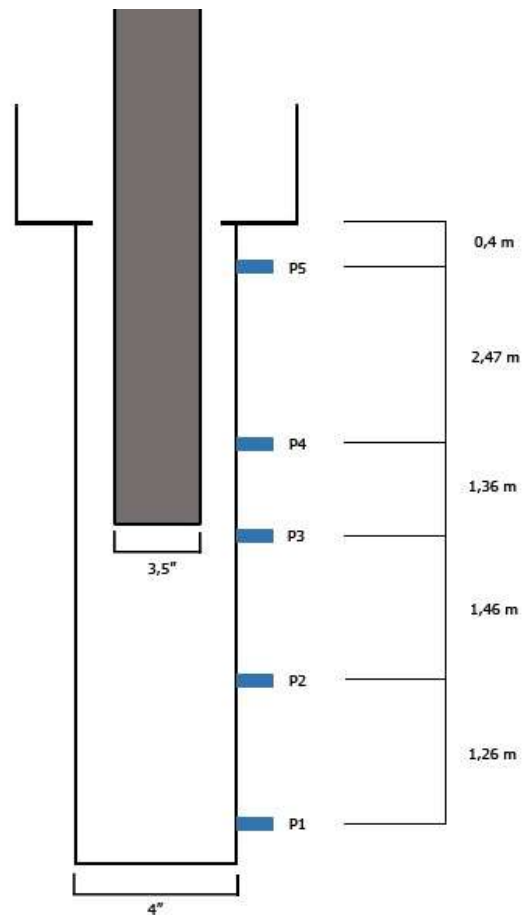


Figura 3.11 – Desenho esquemático da seção de testes.

O tubo interno possui um diâmetro 0,088 m polegadas, 7 m de comprimento e representa a coluna de perfuração. Desta forma, o espaço anular em que se encontra confinado o fluido de trabalho é de aproximadamente 0.0127 m. O tubo interno é oco, portanto permite o escoamento do fluido para dentro deste, para evitar que isso aconteça e considerando que os experimentos propostos neste trabalho serão realizados na configuração de coluna fechada. Foi necessário projetar uma tampa que impedisse que o fluido entrasse dentro da coluna. Esta tampa foi fabricada em nylon e possui uma parte interna com rosca que permite realizar testes na configuração de coluna aberta. A configuração de coluna aberta não será abordada no presente trabalho. A Figura 3.12 mostra a tampa de nylon instalado no fundo da coluna.



Figura 3.12 – Tampa de nylon instalada no fundo da coluna para evitar o influxo do fluido de trabalho.

Quando a coluna se movimenta de maneira descendente, esta desloca um volume de fluido para fora do poço. Para evitar o vazamento desse fluido deslocado foi instalada um caixa de aço com dimensões de 0,295 m de largura, 0,452 m de altura e 0,295 de profundidade. A instalação dessa caixa permite o preenchimento completo do poço, o que garante que o poço esteja preenchido de fluido a todo momento, dessa forma os transdutores sempre estarão registrando valores de pressão. Na Figura 3.13, observa-se uma caixa auxiliar também chamada ao longo deste trabalho como reservatório auxiliar.

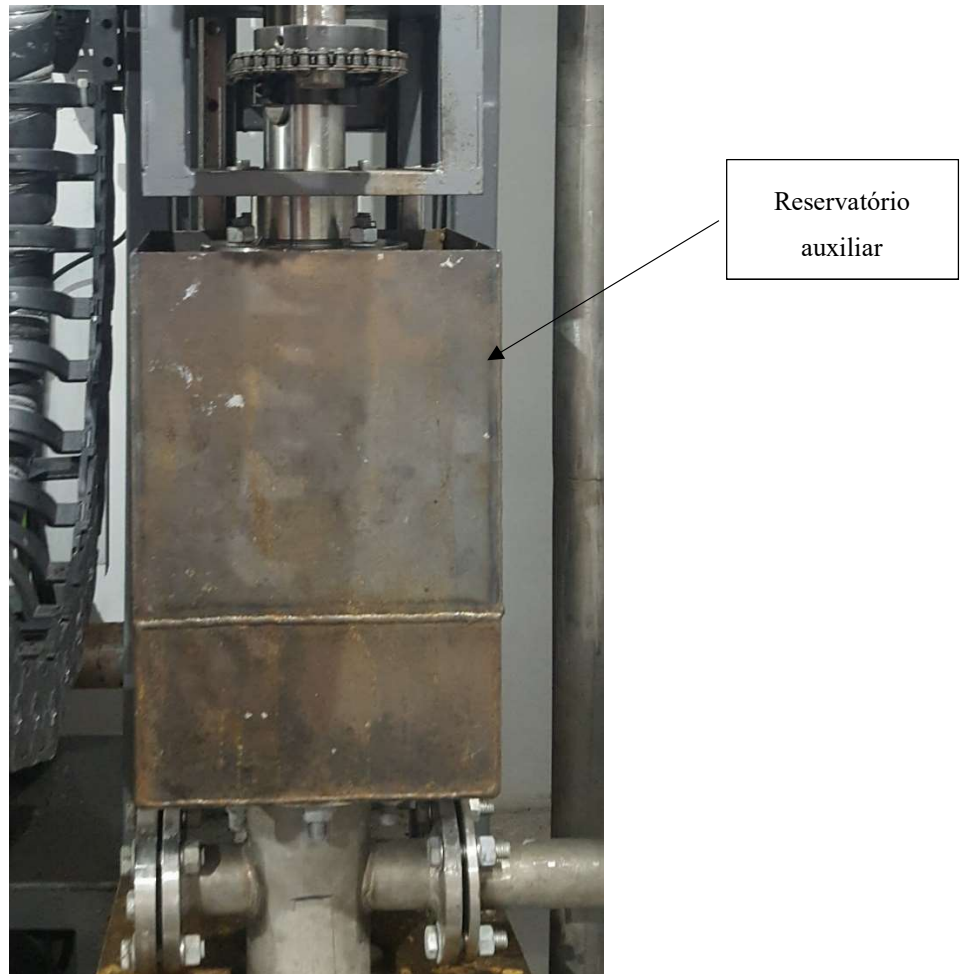


Figura 3.13 – Reservatório auxiliar da seção de testes.

### 3.4 Procedimentos experimentais

Nesta seção são detalhados os procedimentos utilizados nos experimentos com os fluidos de trabalho confinados na região anular, entre as tubulações que simulam o poço e a coluna de perfuração, respectivamente. Foram realizados dois tipos de ensaios. O primeiro consiste apenas na movimentação vertical da coluna. O segundo pode ser dividido em dois tipos de testes diferentes, um deles consiste unicamente na rotação pura da coluna em uma profundidade específica dentro do poço; e no outro a coluna não só rotaciona como também se movimenta na vertical de maneira simultânea. Foram empregadas quatro velocidades de movimentação axial e três de rotação. Os fluidos utilizados nos ensaios são os descritos em detalhe na seção 3.3.1.

### 3.4.1 Condição Inicial

O preenchimento do poço com o fluido de trabalho é a primeira condição que possibilita a execução de qualquer tipo de ensaio que pode ser realizado na unidade experimental. Para preencher o poço deslocou-se a coluna até que essa saísse completamente do interior do poço. Na sequência o poço foi preenchido com o fluido através da caixa aço instalada entre a coluna e o poço (ver Figura 3.13), utilizando uma bomba quando se usava como fluido de trabalho a glicerina. Quando se utilizava como fluido de trabalho a solução aquosa de Carbopol, optou-se por realizar o preenchimento do poço de maneira manual, devido a possibilidade de gerar bolhas e afetar propriedades reológicas do fluido com a utilização da bomba, portanto o fluido foi depositado cuidadosamente dentro da caixa auxiliar e este escoava dentro do poço de maneira controlada.

Após o preenchimento do poço com aproximadamente 47 litros de fluido de trabalho deslocou-se a coluna até a posição inicial ( $P_i$ ), como indica a Figura 3.14. Este deslocamento fez com que o nível de fluido no reservatório auxiliar atingisse um nível de 7 cm. Este nível de fluido deve ser considerado na hora de realizar os cálculos teóricos da pressão hidrostática.

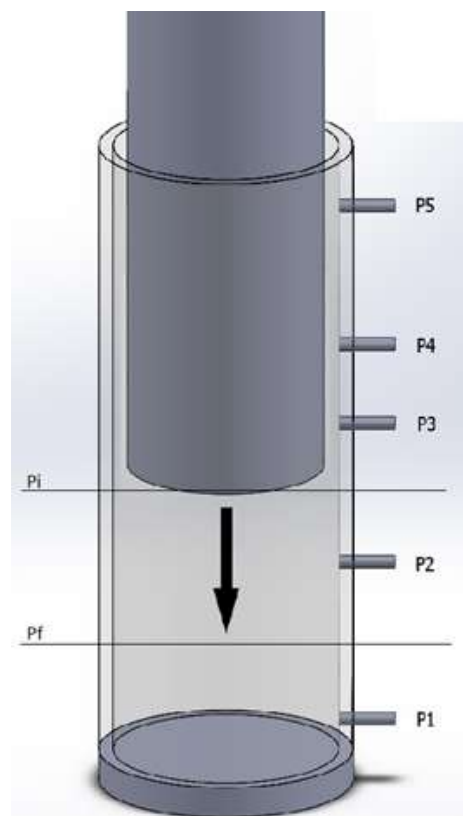


Figura 3.14 – Posição inicial e final da coluna de perfuração durante os testes de movimentação da coluna.

### 3.4.2 Teste de movimentação axial

Os testes de movimentação axial servem de base para testar o funcionamento da unidade experimental. Os resultados desses testes servem como referência para a comparação com resultados experimentais existentes na literatura e modelos teóricos.

A seguir é apresentado o procedimento adotado para a realização dos testes de movimentação axial.

- i. Inicia-se verificando que o poço esteja completamente preenchido e as válvulas que mantêm o fluido de trabalho dentro da seção de testes estejam fechadas.
- ii. Liga-se o quadro de controle que liga, paralelamente, os transdutores de pressão, termoresistência, sistema de movimentação e o sistema de aquisição. Na sequência, verifica-se o correto funcionamento de cada um dos componentes.
- iii. Inicia-se a aquisição de dados durante um período de 30 segundos.
- iv. Fixa-se uma velocidade de subida ou descida da coluna e uma rampa de aceleração e desaceleração no software de controle da movimentação.
- v. A coluna se desloca um metro dentro do poço desde a posição inicial  $P_i$  (4,3 m de profundidade dentro do poço) até a posição final  $P_f$  (5,3 m de profundidade dentro do poço), uma vez que a coluna atinge a posição  $P_i$ , ela para automaticamente. Esta movimentação se repete ao contrário para os testes de subida da coluna.
- vi. Mantém-se a aquisição de dados por mais 40 segundos após a parada da coluna. Nesse período são registrados os valores de pressão e temperatura do fluido confinado dentro da região anular.
- vii. Para a próxima condição operacional, aguarda-se a estabilização do escoamento, por um período de 2 a 5 minutos, dependendo do fluido de trabalho, e repetem-se os procedimentos iii, iv, v e vi.

### 3.4.3 Teste com rotação da coluna

Para a avaliação do efeito da rotação sobre a pressão dentro do poço, duas metodologias experimentais foram adotadas: testes de rotação pura e testes de rotação com movimentação axial da coluna. Em linhas diferentes, o primeiro teste tem como prioridade avaliar o efeito da rotação na pressão do fluido confinado dentro da região anular, enquanto o segundo tem por

objetivo avaliar o efeito da rotação sobre eventuais pressões adicionais que aparecem em fluidos viscoplásticos.

a) Teste de rotação pura

O procedimento adotado para este tipo de testes é o seguinte:

- i. Posiciona-se a coluna na posição (Pi ou Pf).
- ii. Inicia-se a aquisição de dados durante um período de 30 segundos.
- iii. Fixa-se uma velocidade de rotação.
- iv. A coluna rotaciona durante 30 segundos. Durante esse período de tempo são coletados dados de pressão.
- v. Desliga-se manualmente a rotação da coluna e mantém-se a aquisição durante outros 30 segundos.
- vi. Para a próxima condição operacional, aguarda-se a estabilização do escoamento, por um período de 2 minutos, e repetem-se os procedimentos iii,iv,v e vi.

b) Teste com rotação da coluna com deslocamento axial

Este tipo de teste consiste basicamente em uma mistura dos procedimentos apresentados para os testes de movimentação axial e rotação pura da coluna. O procedimento para este tipo de teste é o seguinte:

- i. Realizam-se os procedimentos de i até iv.
- ii. Fixa-se uma velocidade de subida ou descida da coluna e uma rampa de aceleração e desaceleração de 100 ms.
- iii. A coluna começa rotacionar e se desloca de forma axial dentro do poço da posição Pi até a posição Pf ou vice-versa. A rotação da coluna pode ser acionada tanto no início da movimentação axial como na metade do movimento. Uma vez que a coluna atinge sua posição final está para sua movimentação axial, porém a rotação da coluna pode ser desabilitada antes ou depois de atingir esta posição.
- iv. Mantém-se ligado o sistema de aquisição durante um intervalo de tempo de 50 segundos.
- v. Desliga-se de maneira manual tanto a rotação da coluna, como aquisição dos dados.

- vi. Para a próxima condição operacional, aguarda-se a estabilização do escoamento, por um período de 2 minutos, e repetem-se os procedimentos de i até vi.

Todas as rotações foram no sentido horário. O controle e monitoramento de ambas as velocidades de deslocamento axial e rotação foram realizados usando o software desenvolvido pela empresa SEW, como descrito na seção 3.3. As Tabela 3.2 e Tabela 3.3 mostram os experimentos realizados ao longo deste trabalho.

Tabela 3.2 - Matriz de testes para experimentos de subida e descida com coluna fechada e poço preenchido com soluções de glicerina e carbopol.

Variáveis	Tipo de operação		
	Condições	Subida da coluna	Descida da coluna
Velocidade	1 m/min	3 testes	3 testes
	2 m/min	3 testes	3 testes
	3 m/min	3 testes	3 testes
	4 m/min	3 testes	3 testes
	5 m/min	3 testes	3 testes
Número total de testes para cada fluido:		36	

Tabela 3.3 – Matriz de testes para experimentos de subida e descida com rotação, coluna fechada e poço preenchido com soluções de glicerina e carbopol.

Variáveis	Tipo de operação			
	Condições	Subida com rotação da coluna	Descida com rotação da coluna	Rotação da coluna
Velocidade, rotação e posição	4 rpm posição 2500	-	-	3 testes
	12 rpm posição 2500	-	-	3 testes
	33 rpm posição 2500	-	-	3 testes
	1 m/min e 4 rpm	3 testes	3 testes	-
	1 m/min e 12 rpm	3 testes	3 testes	-
	1 m/min e 33 rpm	3 testes	3 testes	-
	2 m/min e 4 rpm	3 testes	3 testes	-
	2 m/min e 12 rpm	3 testes	3 testes	-
	2 m/min e 33 rpm	3 testes	3 testes	-
	4 m/min e 4 rpm	3 testes	3 testes	-
	4 m/min e 12 rpm	3 testes	3 testes	-
	4 m/min e 33 rpm	3 testes	3 testes	-
	Número total de testes para cada fluido:		63	



### 3.5 Síntese do Capítulo 3

Neste capítulo foi apresentada uma revisão dos principais componentes da unidade experimental utilizada na execução dos testes de subida e descida da coluna de perfuração. As funções foram separadas em sistemas para melhor organizar o detalhamento dos componentes. Também foi feito um desenho esquemático da unidade experimental, mostrando os sistemas apresentados. O princípio básico de funcionamento do aparato experimental foi detalhado.

Por fim, os procedimentos experimentais para os principais testes com solução de glicerina e solução de Carbopol foram apresentados. No total, foram planejados 120 testes de movimentação e rotação da coluna. Os experimentos realizados têm os seguintes objetivos específicos:

- I. Verificar se a unidade experimental é capaz de medir pressões no regime permanente, comparando estes resultados com os modelos teóricos disponíveis na literatura.
- II. Confirmar a existência de diferenças no comportamento de pressões registradas na glicerina e uma solução aquosa de Carbopol.
- III. Verificar a existência de uma pressão residual após a parada da movimentação da coluna e o efeito da rotação da coluna sobre esta pressão.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados com a unidade experimental. As principais seções são divididas de acordo com o fluido de trabalho utilizado: na Seção 4.1 são apresentados os resultados com solução aquosa de glicerina e na Seção 4.2 os realizados com solução aquosa de Carbopol. Em cada seção são contemplados os resultados experimentais considerados mais importantes e também as comparações entre os resultados teóricos e experimentais.

### 4.1 Experimentos com solução aquosa de glicerina

Nesta seção são mostrados os resultados para os testes de subida, descida e rotação da coluna sem deslocamento axial, seguindo os procedimentos experimentais apresentados na seção 3.4. As propriedades da glicerina no transcurso dos testes foram apresentadas na subseção 3.2.2, referente às propriedades dos fluidos de trabalho.

#### 4.1.1 Verificação das pressões absolutas durante a movimentação da coluna utilizando glicerina como fluido de trabalho

A medida que a coluna se movimenta ocorre uma variação de pressão ao longo do poço. Inicialmente o fluido acelera e a pressão aumenta com o tempo por um breve intervalo. Então, o escoamento no espaço anular atinge a condição de regime permanente e a variação de pressão torna-se constante. A Figura 4.1 apresenta o efeito da pressão nos transdutores P1, P2, P3, P4 e P5 em função do tempo, quando a coluna é movimentada descendentemente com velocidade de 2 m/min e uma rampa de aceleração imposta pelo servomotor de 100 ms. Para facilitar a análise dos fenômenos registrados durante o experimento, a Figura 4.1 foi dividida em cinco fases. Para os ensaios realizados neste trabalho a incerteza média de medição é de  $\pm 0.015$ . Este valor considera a incerteza do instrumento de medição. No Apêndice B são apresentados os resultados obtidos nos testes e o cálculo das incertezas.

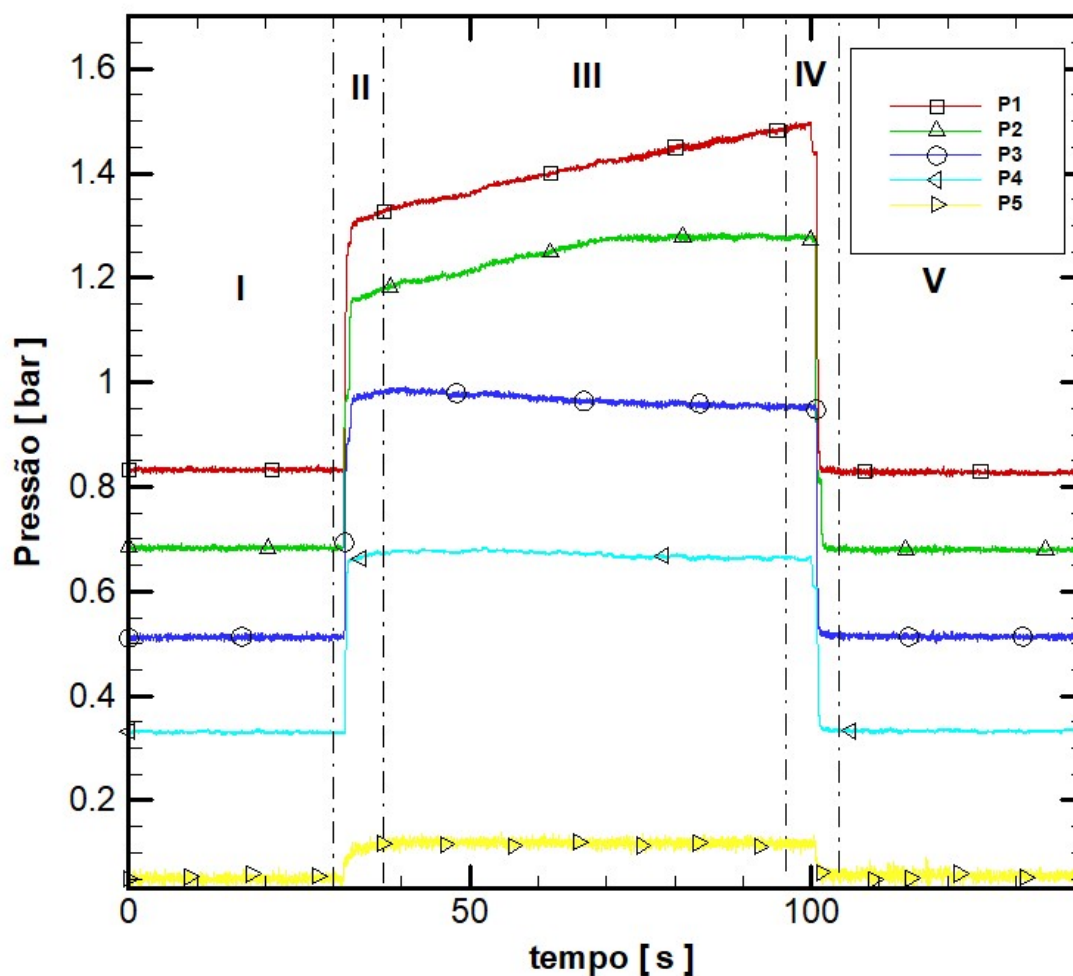


Figura 4.1 – Pressões medidas pelo sensor P1, P2 ,P3 , P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de descida da coluna de 2 m/min para a glicerina.

Fase I: Os transdutores de pressão registram a pressão hidrostática correspondente a cada posição. Considerando uma massa específica da glicerina de  $1235 \text{ kg/m}^3$  e o valor da gravidade de  $9,8 \text{ m/s}^2$ . A Tabela 4.1 apresenta a altura e as pressões hidrostáticas teórica e medida para cada transdutor. Observou-se que a diferença para todos os casos ficou inferior a 10 %, ou seja, verificou-se boa concordância.

Tabela 4.1 - Pressão hidrostática teórica e medida

Transdutor	Altura (m)	Pressão hidrostática teórica (bar)	Pressão hidrostática medida (bar)	Diferença Percentual %
P1	6,95	0,84	0,83	1,19
P2	5,69	0,69	0,68	1,44
P3	4,23	0,51	0,51	0
P4	2,87	0,35	0,33	5,71
P5	0,5	0,04	0,04	0

Fase II: esta fase representa os instantes iniciais do regime transiente. No instante de tempo 30s, iniciou-se a movimentação da coluna. A medida que a coluna desceu dentro do poço e deslocou fluido pelo espaço anular, ocorreu um aumento de pressão quase imediato. Durante esta fase aconteceram picos e flutuações de pressão. A análise do efeito transiente não é objeto deste trabalho, portanto será analisado somente em trabalhos futuros.

Fase III: nesta fase as pressões P3, P4 e P5 tenderam a estabilizar rapidamente, enquanto as pressões P1 e P2 continuaram a subir. Por volta de 70 s a pressão P2 também se estabilizou. Vale salientar que a coluna se encontrava numa profundidade de 4,3 m, nesta profundidade a coluna ficava posicionada acima transdutores P1 e P2 quando começava a se movimentar. Por volta dos 70 s a coluna atingiu a posição de P2, mas nunca chegou na posição de P1 que se encontrava no fundo do poço. Desta forma, observou-se que o aumento das pressões P1 e P2 nesta fase se deve à compressão do fluido dentro do poço, e não ao escoamento pelo espaço anular que ocorre nos demais transdutores durante toda a fase III.

Fase IV: durante esta fase a coluna desacelerou com uma rampa de desaceleração de 100 ms ocasionando pequenas flutuações nas pressões. Estas flutuações são resultantes da natureza transiente do fenômeno e podem ser observadas na figura. Esta fase da mesma forma que a Fase II não se insere no escopo do presente trabalho.

Fase V: período em que cessou a movimentação da coluna. Durante esta etapa a coluna se encontrava totalmente parada e o sistema de aquisição de dados realizou a coleta por aproximadamente 30 segundos. Apesar de ter valores muito próximos à pressão hidrostática da fase V é diferente da registrada durante a fase I. Isto aconteceu devido a um incremento de nível muito pequeno que aumentou levemente a pressão hidrostática em aproximadamente 0,003 bar.

Por outro lado, durante a retirada da coluna, observou-se um comportamento totalmente oposto ao apresentado anteriormente durante a descida da coluna. A Figura 4.2 também foi dividida em cinco fases para explicar de forma detalhada o que aconteceu ao longo do teste.

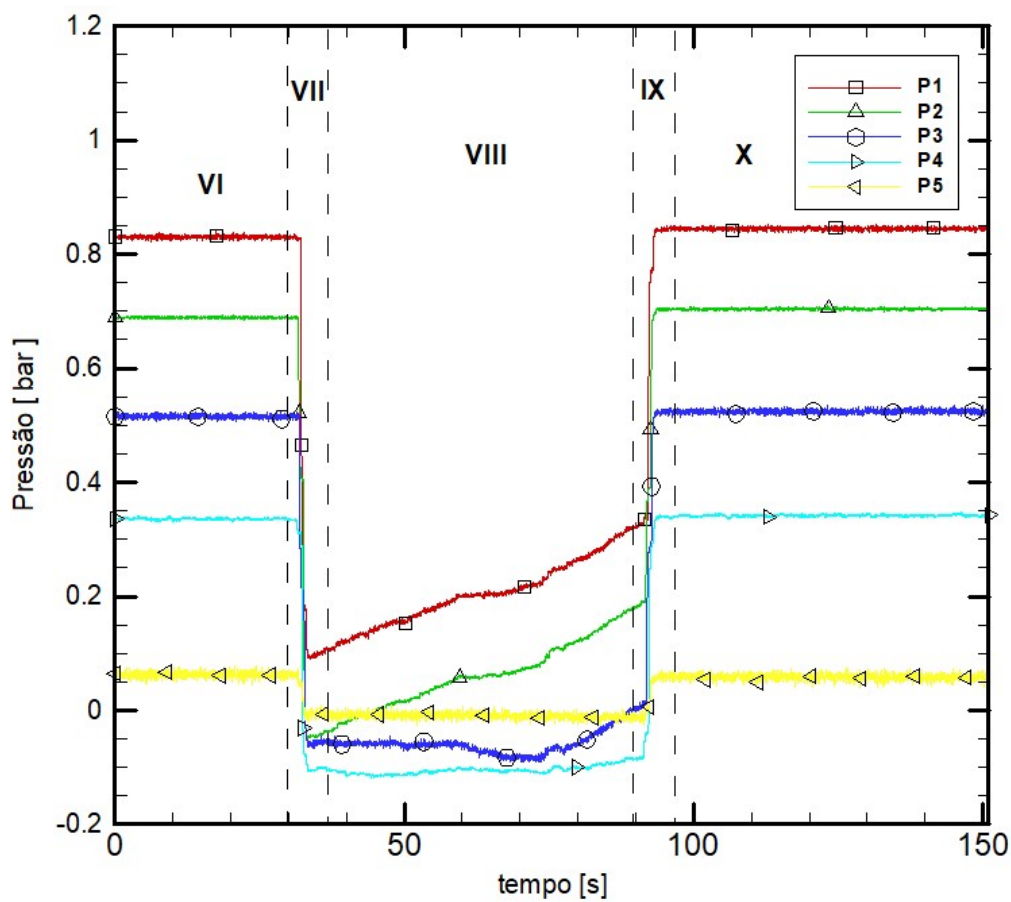


Figura 4.2 – Pressões medidas pelos sensores P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de retirada da coluna de 2 m/min para a glicerina.

Fase VI: a condição inicial desta fase é a mesma da fase (v) apresentada anteriormente, isto aconteceu porque a unidade experimental consta de um tanque auxiliar que afoga o poço e mantém o nível de fluido constante. Durante esta fase a coluna se encontrava totalmente parada e o sistema de aquisição coletava os valores de pressão hidrostática correspondente a cada transdutor de pressão.

Fase VII: mostra a diminuição da pressão causada pela mudança de condição de contorno, isso gera um transiente. Essa diminuição ocorreu num intervalo de aproximadamente 1 s.

Fase VIII: o escoamento tenta atingir o regime permanente nos transdutores P3, P4 e P5, porém uma aparente formação de vapor do fluido quando a pressão absoluta cai abaixo da pressão de vapor. Este fenômeno pode ocasionar pequenas variações na massa específica que consequentemente, altera os valores de pressão coletadas. A alta taxa de aquisição dos transdutores nos permite observar esse efeito. Por outro lado, o transdutor P1 está localizado no fundo do poço, afastado da coluna ao longo do teste, enquanto o transdutor P2 sente a presença da coluna por intervalo de tempo muito curto que não permitiu que a pressão se estabilizasse.

Fase IX: nesta etapa a coluna começou a desacelerar com uma rampa de 100 ms, uma vez que a movimentação da coluna cessou e a pressão começou a aumentar em razão do fluido ter mais espaço para se deslocar. Ele está sendo descomprimido.

Fase X: durante esta fase a coluna se encontrava completamente parada e o sistema de aquisição de dados continuou coletando dados por aproximadamente 50 s. Nesta fase apresentou-se um comportamento atípico. Depois de finalizar a retirada da coluna houve um pequeno aumento da pressão hidrostática. A possível causa deste aumento é a descida de uma quantidade de fluido que tinha se infiltrado na coluna através da tampa que fecha a tubulação da coluna.

#### 4.1.2 Diferença de pressão em regime permanente durante a descida da coluna utilizando glicerina como fluido de trabalho.

Além da verificação das pressões absolutas medidas pela unidade experimental durante a movimentação da coluna, foi realizado uma análise das diferenças de pressão entre os transdutores P4 – P5. Os resultados obtidos nesta seção permitiram comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos e, dessa forma, validar os resultados fornecidos pela unidade experimental. A Figura 4.3 mostra a variação da diferença de pressão em função do tempo para os transdutores P4 – P5. Na figura observou-se que durante os primeiros 30 s a coluna se encontrava parada, portanto os valores de pressão corresponderam à diferença de pressão para cada um dos transdutores. Depois dos 30 segundos, iniciou-se a descida da coluna e houve um aumento de pressão até o escoamento entrar em regime permanente, no momento que a movimentação da coluna parou, a diferença de pressão entre os transdutores retornou ao seu valor inicial.

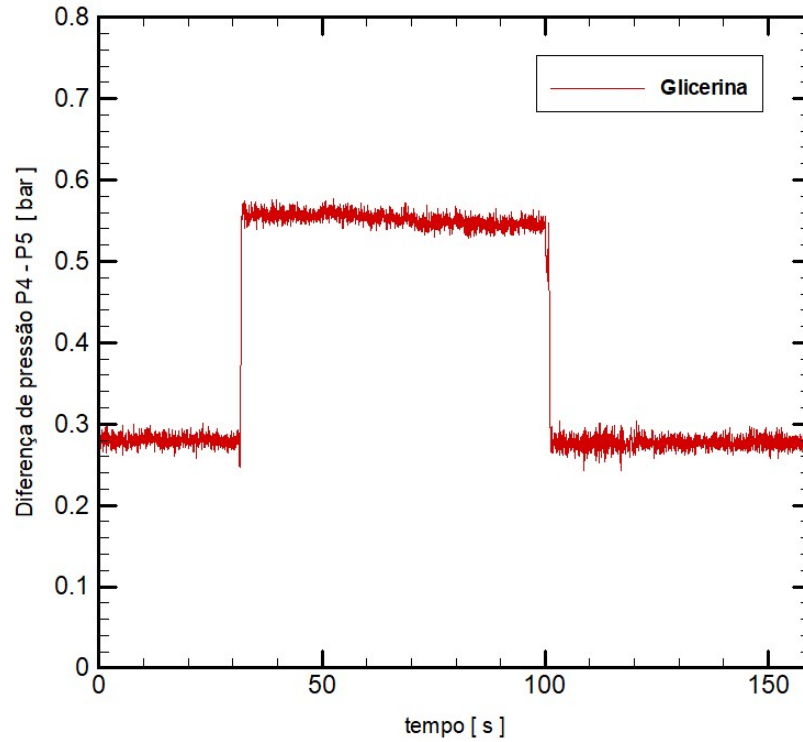


Figura 4.3 – Diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 em função do tempo durante a descida da coluna com uma velocidade de 2 m/min para a glicerina.

Os resultados experimentais obtidos nesta seção são verificados através de um modelo teórico que permitiu calcular a variação da pressão ao longo da região anular do poço. O primeiro passo é calcular a velocidade média do fluido que escoava através da região anular, essa velocidade pode ser calculada utilizando a equação 4.1.

$$\bar{V} = \frac{A_{coluna}}{A_{anular}} V_p \quad (4.1)$$

Sendo  $\bar{V}$  a velocidade média do fluido,  $A_{coluna}$  representa área da coluna,  $A_{anular}$  seria a área da região anular e  $V_p$  é a velocidade da coluna. Todas estas variáveis conhecidas do problema. Uma vez calculada a velocidade média, se determina qual seria a velocidade efetiva do fluido que escoava pelo anular durante a descida da coluna. O cálculo da velocidade efetiva é efetuado com a equação 4.2

$$V_{ef} = \bar{V} + F_{ve} V_p \quad (4.2)$$

Sendo  $V_{ef}$  a velocidade efetiva do fluido que escoava pela região anular e  $F_{ve}$  (ver equação 4.3) representa o fator de forma que depende da relação de diâmetros entre o poço e a coluna que compõem a região anular.

$$F_{ve} = - \left( \frac{1}{2 \ln(\varepsilon)} + \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \right) \quad (4.3)$$

Onde  $F_{ve}$  é o fator de forma e  $\varepsilon$  relação de diâmetros entre o poço e a coluna. Uma vez calculado o fator de forma, é possível calcular a velocidade efetiva e, conseqüentemente, o número de Reynold efetivo (ver equação 4.4) é dizer o Reynold da porção de fluido que escoo pela região anular.

$$Re_{ef} = \frac{\rho V_{ef} D_h}{\mu} \quad (4.4)$$

Sendo  $Re_{ef}$  o número de Reynolds efetivo,  $\rho$  massa específica do fluido de trabalho,  $D_h$  diâmetro da região anular e  $\mu$  viscosidade do fluido na temperatura de trabalho. Através do cálculo do número de Reynolds efetivo para as condições de operação do presente trabalho, é possível dizer que este varia entre 7,68 até 19, 20. Lembrando que a condição de escoamento laminar é de  $Re \leq 2300$ , é possível afirmar que o escoamento é laminar ao longo dos testes realizados com a glicerina. Conhecendo o regime do escoamento calculamos o fator de atrito que, para escoamento laminar, está definido pela equação 4.5.

$$f = \frac{24}{Re_{ef}} \quad (4.5)$$

Onde  $f$  é o fator de atrito e  $Re_{ef}$  o número de Reynolds efetivo. Depois de obter os valores destas variáveis, por fim, é possível calcular a queda de pressão ao longo do poço através da equação:

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{2 \rho f}{D_h} V_{ef}^2 \quad (4.6)$$

Sendo de  $\frac{\Delta P}{\Delta z}$  a variação da pressão ao longo do poço. A equação 4.6 representa unicamente a variação da pressão causada pela movimentação. Este valor somado com a pressão hidrostática se traduz na variação total da pressão. A Tabela 4.2 apresenta os valores de diferença de pressão obtidos de maneira experimental como de forma teórica utilizando as equações mencionadas anteriormente.



Tabela 4.2 – Comparação entre a diferença de pressão medida e teórica durante a descida da coluna com uma velocidade de 2 m/min para a glicerina.

Transdutores de pressão	Diferença de pressão medida	Diferença de pressão teórica	Diferença percentual
P4-P5 [bar]	0,25	0,24	4%
P3-P5 [bar]	0,38	0,36	5,2%

Para verificar a repetibilidade da unidade experimental foram plotadas as diferenças de pressão registradas pelos transdutores P4 e P5 para três testes com velocidade de descida da coluna de 3 m/min. Nota-se na Figura 4.4 uma boa concordância entre os valores obtidos durante os três ensaios. Além disso, o resultado experimental apresentou uma boa concordância com o resultado numérico que mostrou um aumento de pressão devido à movimentação de aproximadamente 0,35 bar que, somado com a pressão hidrostática, dá uma variação de pressão teórica total de 0,66 bar comparado com a variação total medida de 0,65 bar, aproximadamente.

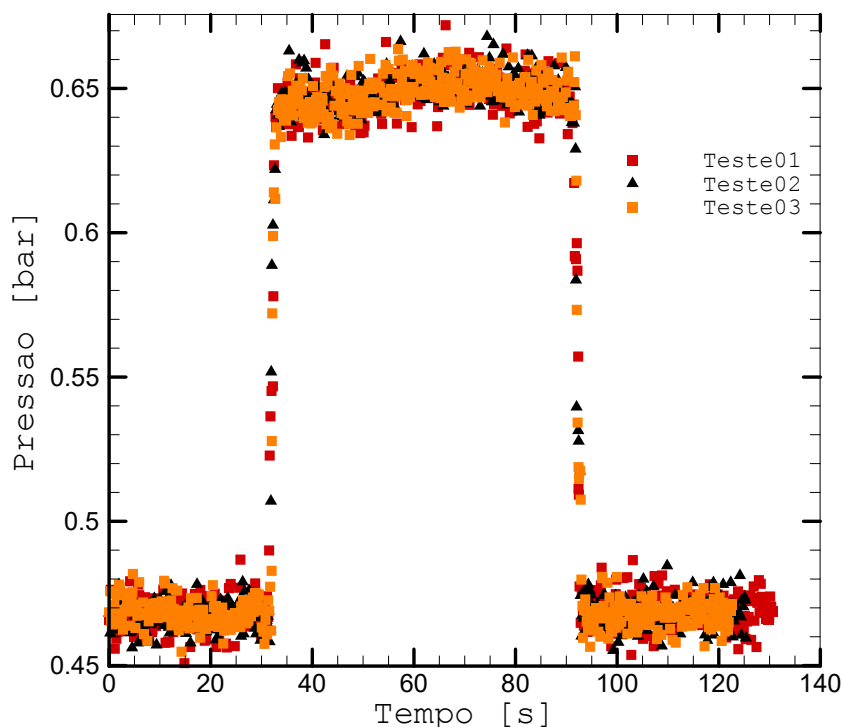


Figura 4.4 – Diferença entre as pressões P4 e P5 em função do tempo, para três testes velocidade de descida da coluna de 3 m/min para a glicerina.

### 4.1.3 Influência da velocidade na variação da pressão durante a descida da coluna

Segundo Wagner et al (1993) a velocidade da coluna é proporcional à pressão durante a descida. Para verificar este comportamento foram realizados testes de descida variando a velocidade da coluna de 0.0333 m/s (2 m/min) até 0.0833 m/s (5 m/min). A Figura 4.5 mostra as variações da pressão causadas pela movimentação da coluna entre os transdutores P4 e P5. Na Figura 4.5 observou-se que quanto maior era velocidade da coluna, maior era o gradiente de pressão. Os resultados dos experimentos da diferença de pressão em regime tiveram boa concordância com os resultados obtidos usando a equação 4.6. Estes resultados mostram como a velocidade ocasiona variações da pressão e permitem validar os cálculos de variação da pressão para diferentes velocidades.

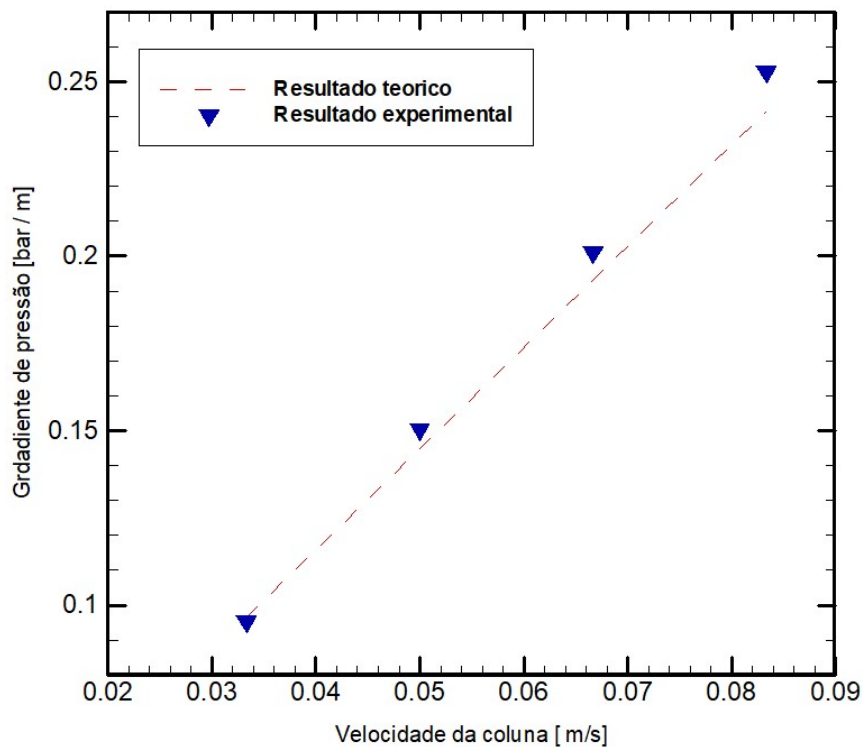


Figura 4.5 – Variação da pressão medidas pelo sensor P3 em função do tempo, para velocidades da coluna de 2,3,4 e 5 m/min para a glicerina.

#### 4.1.4 Variação da pressão durante a rotação da coluna de perfuração

O efeito da rotação é uma das motivações deste trabalho, portanto foram realizados diversos ensaios que avaliam o efeito desta na variação de pressão antes, durante e depois da movimentação da coluna. Inicialmente foram impostas rotações de 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm com a coluna numa profundidade de 5,33 m dentro do poço. Durante os testes realizados percebeu-se que cada vez que uma rotação era imposta apareciam oscilações nas curvas de pressão em função do tempo. A Figura 4.6 apresenta a variação da pressão percebida pelos transdutores P1, P3, P4 e P5 numa profundidade de 5,33 m enquanto a coluna rotacionava nas velocidades previamente mencionadas. Note que, nos primeiros 30 s do teste, a coluna registrava os valores de pressão correspondente a pressão hidrostática de cada transdutor de pressão. Na sequência, no instante de tempo 30 s, começou a rotação da coluna, imediatamente todos os sensores perceberam pequenas oscilações que aumentaram a pressão na ordem de 0,05 bar, estas oscilações se manifestaram em todos os transdutores, independentemente da velocidade de rotação aplicada. Por outro lado, na Figura 4.6 observou-se que, na medida que o número de rotações por minuto aumentava, tornava as frequências das oscilações cada vez maiores.

Além disto, percebe-se na Figura 4.6 que os transdutores P1 e P5 apresentaram muitas oscilações, mas estão longe de ter o formato de uma onda, diferente dos transdutores P3 e P4 que mostraram uma tendência a formar ondas bem definidas. Além disso, durante os ensaios observou-se que as ondas registradas pelo transdutor P3 foram mais estáveis e frequentes, enquanto os transdutores localizados nos extremos na unidade experimental não mediram da mesma forma a influência da rotação.

Segundo Marken et al (1992), a rotação da coluna de perfuração cria forças centrípetas que “lançam” o fluido que se encontra ao redor da coluna em direção à parede do poço. Isso acarreta um “vazio” que pode ser preenchido com o fluido que se encontra mais afastado da coluna dentro do espaço anular. Como resultado desta movimentação, são criados fluxos secundários chamados de vórtices de Taylor. Estes vórtices produzem uma instabilidade nos escoamentos em espaços anulares.

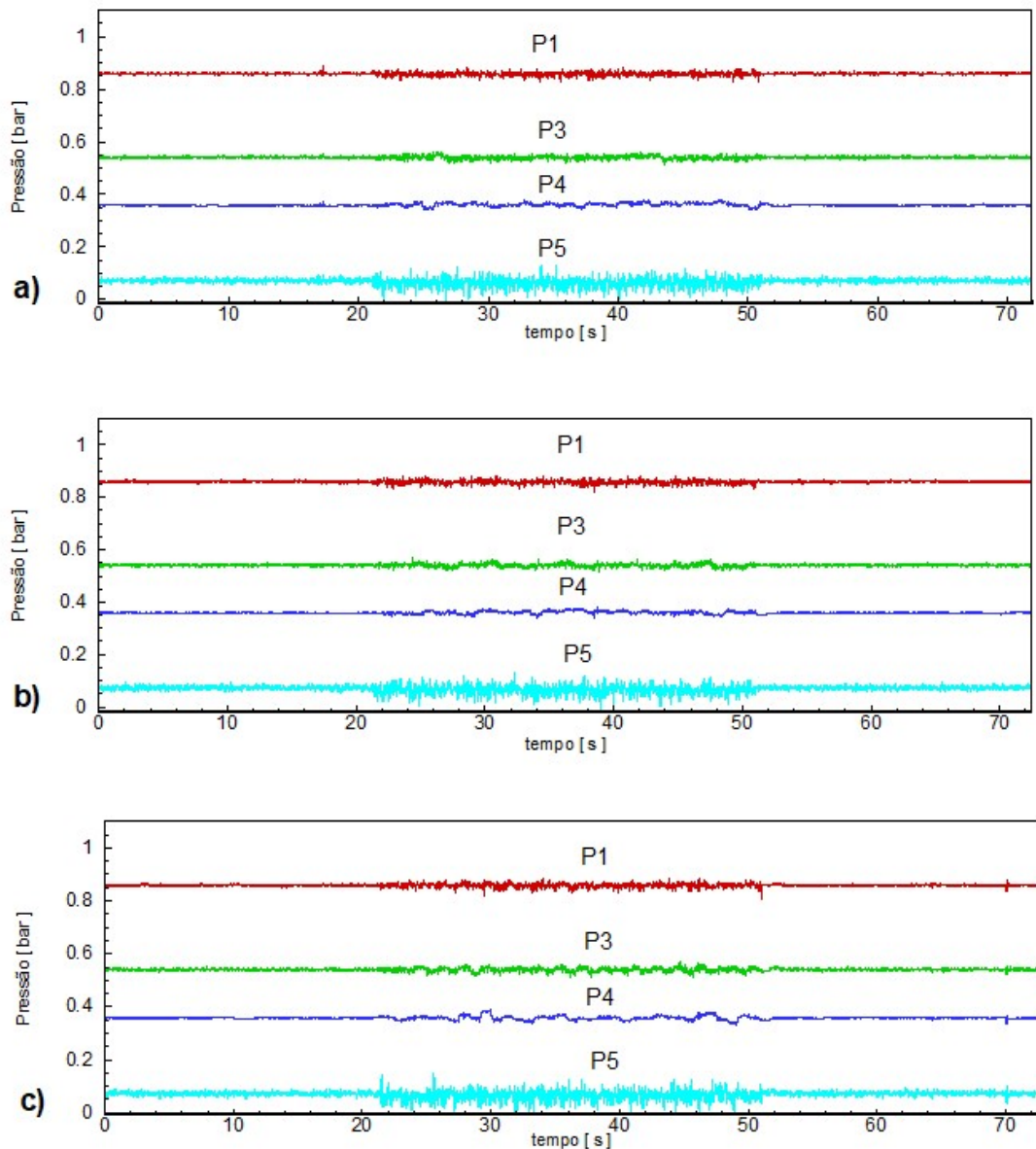


Figura 4.6 – Oscilações das pressões medidas pelos transdutores P1, P3, P4 e P5 em função do tempo, para rotações da coluna de : a) 4 rpm , b) 12 rpm e c) 33 rpm.

Taylor mostrou que se o número de Reynolds exceder um certo valor, surgem vórtices com eixos localizados ao longo de circunferências girando de forma alternada em direções. O escoamento se torna instável se o número de Taylor  $Ta \geq 41,3$ . O número de Taylor pode ser determinado através da equação:

$$Ta = \frac{U_{in} d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{R_i}} \quad (4.2)$$

Onde  $U_{in}$  é a velocidade de rotação do cilindro interno,  $d$  é diâmetro do espaço anular,  $\nu$  é a viscosidade dinâmica do fluido de trabalho e  $R_i$  é o raio do cilindro interno.

O autor Stuart (1990) identificou no seu trabalho sobre escoamento entre dois cilindros concêntricos os seguintes três regimes de estabilidade do escoamento em função do número de Taylor:

$Ta < 41,3$  : escoamento laminar de Couette

$41,3 < Ta < 400$  : escoamento laminar com vórtices de Taylor

$Ta > 400$  : escoamento turbulento

Para as rotações de 4 e 33 rpm, obtém-se os números de Taylor de 24 e 54, respectivamente. Estes resultados indicam um escoamento puramente laminar e um escoamento laminar com vórtice de Taylor, respectivamente.

Por outro lado, os experimentos que apresentavam oscilações mais frequentes foram realizados com velocidades de rotação maiores. Isto sugere que essas oscilações poderiam mostrar um comportamento típico de vórtices conhecidos como *wavy Taylor vortices*. Com o objetivo de verificar a influência da rotação da coluna, foram realizados testes com rotações de 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm com a coluna inserida na profundidade de 5,3 metros, que corresponde a posição final de todos os testes realizados neste trabalho. Este teste consiste em impor rotações na coluna enquanto ela se encontra parada, isto é, sem movimentação axial.

A Figura 4.7 mostra um gráfico das pressões coletadas pelo transdutor P3 em função do tempo para velocidades de rotação da coluna de 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm. Esta estabilidade apresentada na figura pode ser explicada pela posição do transdutor P3, uma vez que ele se localizava no meio do poço, muito próximo à metade da coluna. Os vórtices de Taylor costumam se formar completamente no meio da tubulação que gira. Essa melhor formação do vértice próxima da posição do transdutor de pressão P3 pode ser a explicação para este possuir ondas de pressão mais estáveis. Por outro lado, os transdutores que se encontravam afastados do cilindro não apresentaram formações próximas de ondas.

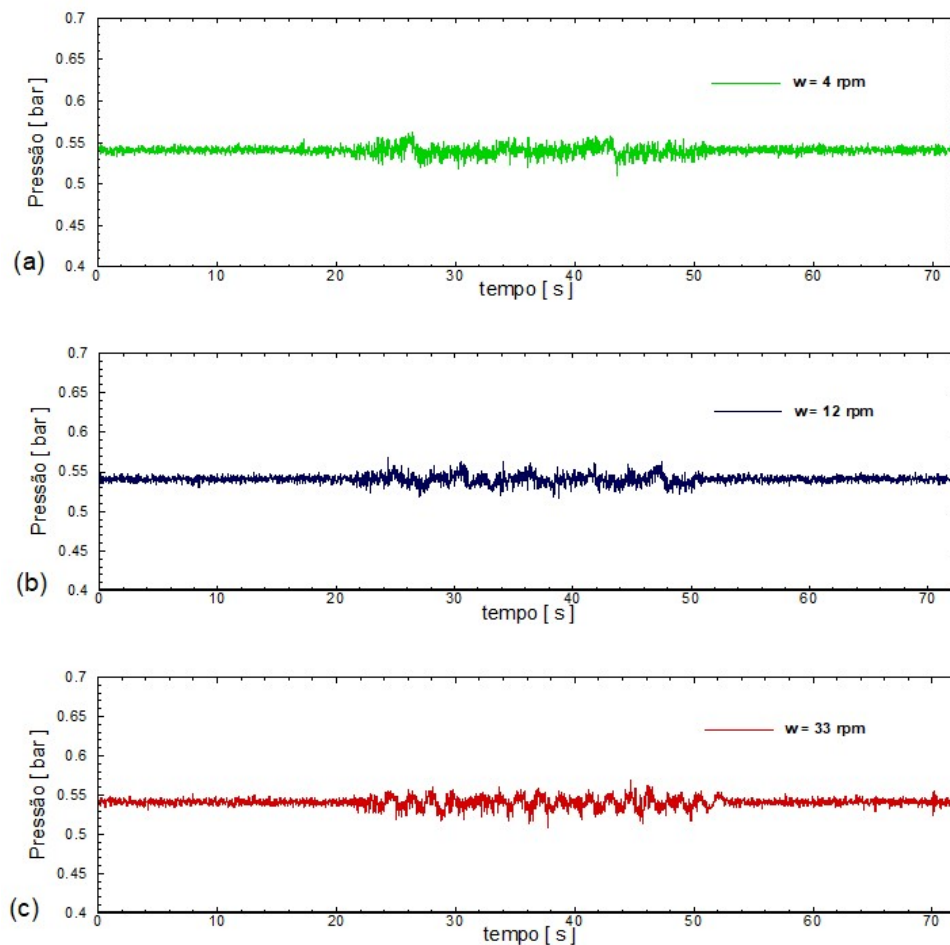


Figura 4.7 – Oscilações das pressões medidas pelo transdutor P3 em função do tempo, para uma rotações da coluna de : a) 4 rpm , b) 12 rpm e c) 33 rpm.

Portanto, após a análise dos testes realizados com rotação da coluna para uma solução aquosa de glicerina, foi possível concluir que a rotação da coluna somente ocasionou flutuações na pressão que não representaram um fator significativo na variação de pressão quando a coluna rotacionava sem deslocamento axial. Tal conclusão fora também observada através dos estudos experimentais, analíticos e numéricos de Ooms e Kampman-Reinharts (1996) que confirmaram a ausência de influência da rotação da coluna na pressão quando utilizado um fluido Newtoniano, igualmente ao experimento realizado para esta dissertação. Deste modo, é possível observar que a rotação da coluna e a utilização de fluidos newtonianos não puderam constatar variações significativas na pressão.

## 4.2 Experimentos com solução aquosa de Carbopol

Nesta seção são mostrados os resultados para os testes de subida, descida e rotação com e sem descolamento axial da coluna. As propriedades da solução aquosa de Carbopol utilizada para a realização dos testes são apresentadas na subseção 3.2.2.

### 4.2.1 Variação da pressão da solução aquosa de Carbopol durante a movimentação da coluna

Foram realizados testes de movimentação da coluna utilizando uma solução aquosa de Carbopol. Assim como nos testes com glicerina, durante a descida da coluna a pressão aumentava até atingir o regime permanente. Em seguida a coluna cessa seu movimento e a pressão reduz até um determinado valor, que difere da sua condição inicial. A Figura 4.8 foi dividida em cinco fases e apresenta os valores de pressão medidos pelos transdutores P1 a P5 durante a descida da coluna com uma velocidade de 1 m/min dentro do poço preenchido com uma solução aquosa de Carbopol.

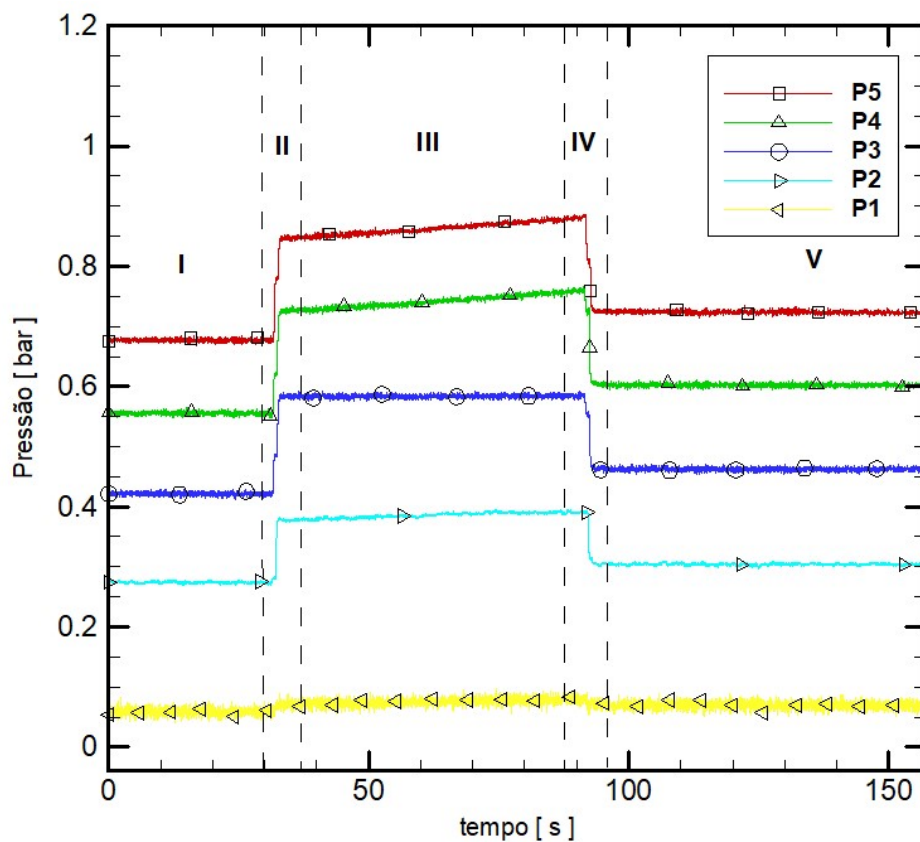


Figura 4.8 – Pressões medidas pelo sensor P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para uma velocidade de descida da coluna de 1 m/min dentro do poço preenchido com uma solução aquosa de carbopol.

As primeiras quatro fases do gráfico apresentam um comportamento bastante similar ao comportamento apresentado pela glicerina, porém, diferente do teste realizado com a glicerina a fase cinco (V) deste ensaio registrou valores de pressão diferentes ao valor inicial obtido durante a fase (I).

A Tabela 4.3 apresenta os valores de pressões registrados pela unidade experimental em todos os transdutores de pressão durante as fases I e V. Notou-se uma diferença considerável entre os valores iniciais e finais da pressão durante o teste.

Tabela 4.3 - Pressões absolutas registradas pelos transdutores durante as fases I e V.

Transdutores de pressão	Fase I: Pressão absoluta [bar]	Fase V: Pressão absoluta[bar]
P1	0,67	0,72
P2	0,55	0,60
P3	0,42	0,50
P4	0,27	0,30
P5	0,04	0,70

Esta diferença pode ser explicada por um resíduo de pressão que não foi capaz de se propagar devido as propriedades reológicas da solução de carbopol que, como foi mencionado na seção 3.3.1, apresentou um comportamento viscoplástico que se caracteriza pela presença de uma tensão limite de escoamento.

Portanto, uma vez que este fluido de trabalho preenche a região anular, para de ser cisalhada pela movimentação axial da coluna e, conseqüentemente, suas partículas se reorganizam dificultando, dessa forma, a propagação da pressão. É importante mencionar que durante este experimento foi incluída a caixa auxiliar entre o poço e a coluna, isto implicou no vazamento de uma porção do fluido que preenchia a região anular para esta caixa. Cabe mencionar que o aumento de nível do fluido foi de apenas 0,07 m. A elevação de nível representou no final do teste um aumento de pressão absoluta de aproximadamente 0,00685 bar, ou seja, este valor não justificou os valores de pressão consideravelmente maiores observados durante os ensaios.

Durante a retirada da coluna observou-se o fenômeno inverso, a pressão registrada pelos transdutores instalados mostrou uma queda e, ao finalizar a movimentação da coluna, a pressão não atingiu o valor inicial da mesma forma que ocorreu durante a descida da coluna. A Figura 4.9 foi dividida por fases e, da mesma forma que se observou no teste de retirada realizado com glicerina, nas primeiras fases quatro fases ocorreu o mesmo fenômeno, salvo pela fase (VI)



deste ensaio que apresentou um valor diferente de pressão absoluta em relação à fase (X). Esta diferença se justificou pela existência da pressão residual que dificultou a propagação da pressão no fluido de trabalho que apresentou uma tensão limite de escoamento. Além disto, observou-se uma melhor estabilidade durante a fase (VIII) do presente teste em relação à fase (VIII) do teste realizado com glicerina. Esta estabilidade que mostrou o Carbopol se deve ao fato da diminuição de pressão não ser tão grande para superar a pressão de vapor do fluido. Portanto, não houve variações de pressões causadas por possível evaporação de fluido, como aconteceu com a glicerina.

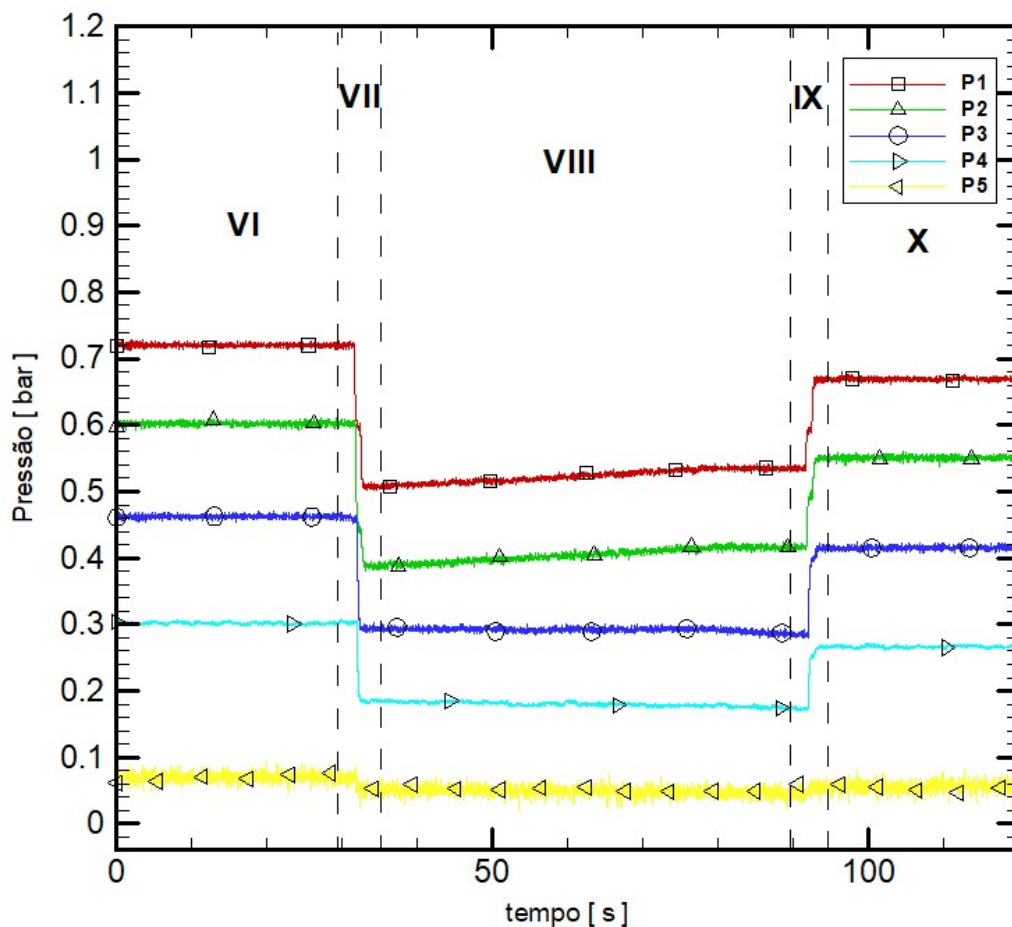


Figura 4.9 – Pressões medidas pelo sensor P1,P2,P3,P4 e P5 em função do tempo, para um velocidade de 1 m/min durante a retirada da coluna de dentro da solução aquosa de carbopol.

Na tentativa de verificar se a pressão residual tende a desaparecer ou estabilizar, foram realizados testes com intervalos de observação maiores. Durante os testes observou-se que a pressão residual não reduziu significativamente durante um pequeno intervalo de aproximadamente 180 segundos. Apesar de não realizar a aquisição de testes com tempos de

observação maiores, no dia seguinte, quando ia ser realizada uma próxima bateria de testes, observou-se que a pressão continuava registrando o mesmo valor de pressão residual registrada no dia anterior. A Figura 4.9 apresenta a pressão absoluta registrada pelo transdutor de pressão P3 na solução aquosa de Carbopol confinada na região anular da seção de testes, antes, durante e depois da descida da coluna. Nesta se observou que pressão coletada depois da parada da coluna diminuiu 0,01 bar, tendendo a estabilizar depois de aproximadamente 180s.

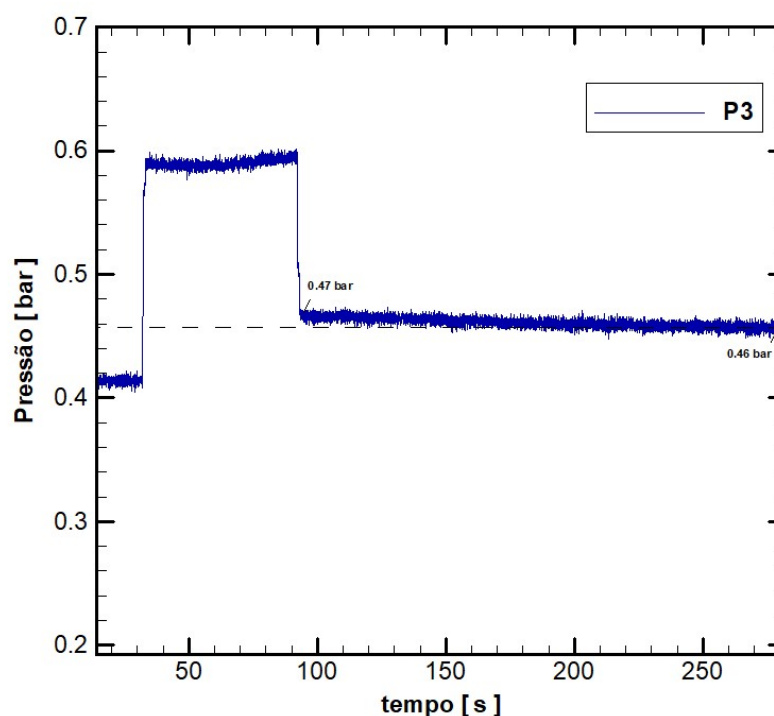


Figura 4.10 – Diminuição da pressão residual em relação ao tempo coletada pelo transdutor de pressão P3 depois de uma descida da coluna com velocidade de 1 m/min para uma solução aquosa de carbopol.

#### 4.2.2 Variação da diferença de pressão da solução aquosa de Carbopol durante a descida da coluna

Durante os ensaios também foi avaliado o efeito da descida da coluna sobre a diferença de pressão entre os transdutores de pressão P4 e P5. Na Figura 4.11 se observa que quando não existe movimentação da coluna a diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 se manteve constante. Uma vez iniciada a movimentação axial da coluna por volta de 30 segundos, a diferença de pressão aumentou, atingindo o regime permanente. A pressão manteve-se estável no valor de 0,3 bar durante um intervalo de aproximadamente 50 segundos. Na sequência, com a coluna parada, a diferença de pressão caiu instantaneamente, porém esta diferença de pressão não retornou ao seu valor inicial da mesma forma que aconteceu com a pressão absoluta dos

testes apresentados na seção anterior. Este comportamento constatou novamente a existência da pressão residual. Para ter uma noção em valores de quanto foi o resíduo de pressão, nota-se que durante os primeiros 30 segundos de teste a diferença de pressão média era de 0,2150 bar e ao finalizá-lo esta diferença de pressão média foi de 0,2345 bar. Isto representou um resíduo de pressão de 0.0195 bar que não foi propagado devido as propriedades viscoelásticas do fluido, especificamente da tensão limite de escoamento.

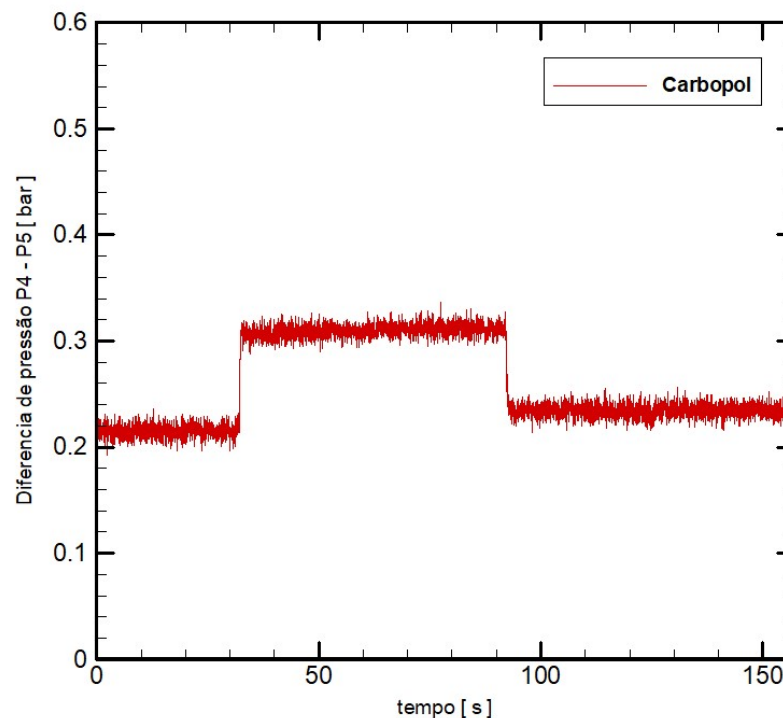


Figura 4.11 – Variação da diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 durante a movimentação da coluna com uma velocidade de 1 m/min dentro de uma solução aquosa de carbopol.

Deste modo verificou-se que os dados obtidos para a diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 apresentados na Figura 4.11 são confiáveis. Na sequência foi plotada a Figura 4.12 que mostra três curvas de diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 durante a descida da coluna com uma velocidade de 1m/min dentro da região anular totalmente preenchida com uma solução aquosa de carbopol sob as mesmas condições. Estes resultados foram obtidos durante três medições de descida da coluna. Pode-se observar na Figura 4.12 que a repetitividade do teste é bastante adequada, pois as curvas apresentaram formas bastantes similares e valores de pressão muito aproximados.

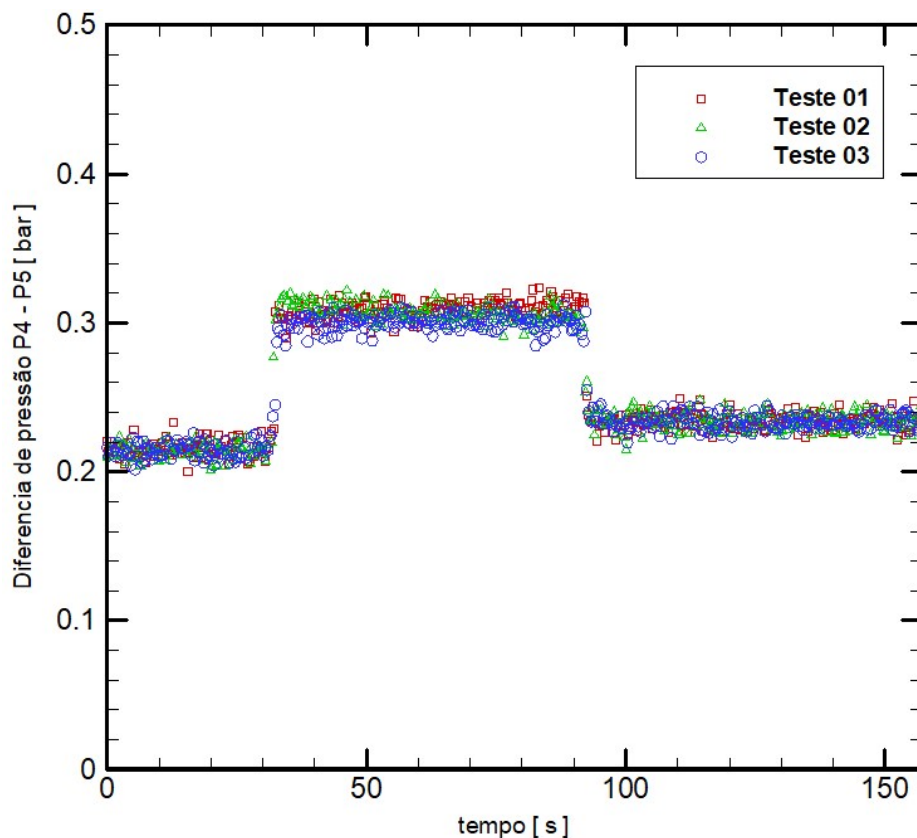


Figura 4.12 – Repetibilidade dos testes de diferença de pressão entre os transdutores P4 e P5 durante a movimentação da coluna com uma velocidade de 1 m/min dentro de uma solução aquosa de carbopol.

### 4.2.3 Influência da rotação na variação de pressão na solução aquosa de Carbopol

A solução aquosa de Carbopol também foi submetida a ensaios considerando a rotação da coluna. Os testes foram realizados da mesma forma, a coluna foi posicionada numa profundidade de 5,3 m e na sequência rotacionada com diferentes velocidades de rotação. A Figura 4.13 apresenta as pressões registradas pelos transdutores de pressão P1, P2, P3, P4 e P5 em função do tempo para velocidades de rotação da coluna de 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm. Cada cor do gráfico representa a medida realizada por um transdutor, as linhas vermelhas representam o transdutor P1, linhas verdes o P2, linhas azuis escuras P3, linhas azuis claras P4 e por último as linhas amarelas representam as pressões medidas pelo transdutor P5. Da mesma forma que na glicerina, a solução aquosa de Carbopol apresentou oscilações que ficavam mais frequentes conforme aumentava a velocidade de rotação aplicada na coluna.

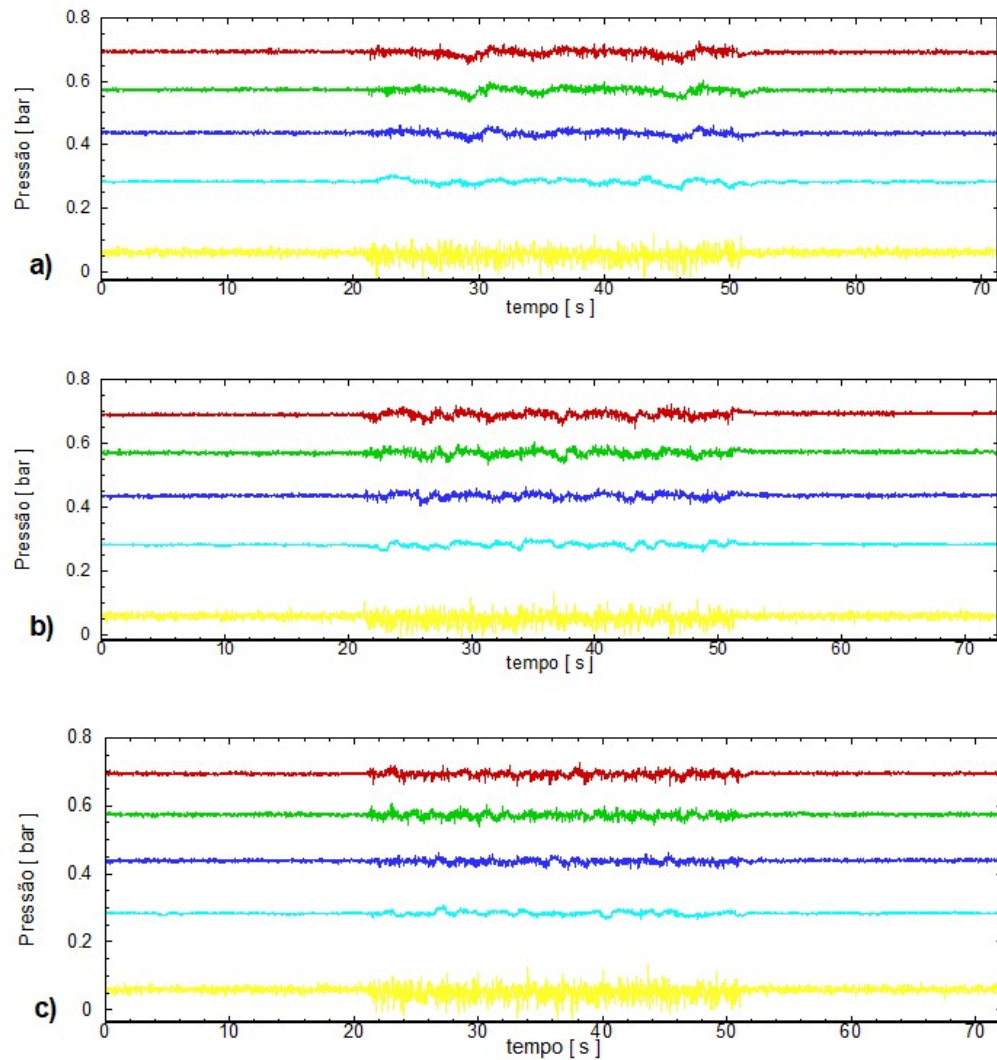


Figura 4.13 – Efeito de três rotações da coluna parada numa profundidade de 5,33 m para rotações da coluna de a) 4 rpm, b) 12 rpm e c) 33 rpm.

Além do efeito da rotação pura da coluna, foi estudado a influência da movimentação axial com rotação da coluna. Como foi visto na seção anterior, ao finalizar os testes com a solução aquosa de Carbopol percebeu-se a existência de uma parcela de pressão a mais do esperado. Durante os testes realizados com rotação da coluna de perfuração, observou-se uma queda da pressão residual resultante da rotação da coluna. A Figura 4.14 apresenta uma comparação entre dois testes realizados durante a descida da coluna com uma velocidade de 1 m/min, estes ensaios se diferenciam pela aplicação da rotação em um deles.

O primeiro teste apresentado no gráfico com linhas tracejadas foi realizado sem rotacionar a coluna e ao seu final apareceu a pressão residual comentada na seção anterior. No mesmo gráfico observou-se os valores de pressão registrado pelo transdutor P3 para o teste com uma velocidade de rotação da coluna de 4 rpm. Este teste começou com a coluna parada e o aparato experimental realizando aquisições durante 30 s. Na sequência a rotação da coluna foi ligada e continuou durante outros 30 s, após este intervalo de tempo começou a movimentação axial da coluna que acabou sua movimentação no instante 150 s. Depois de terminar a movimentação axial da coluna esta continuou girando por mais 30 segundos.

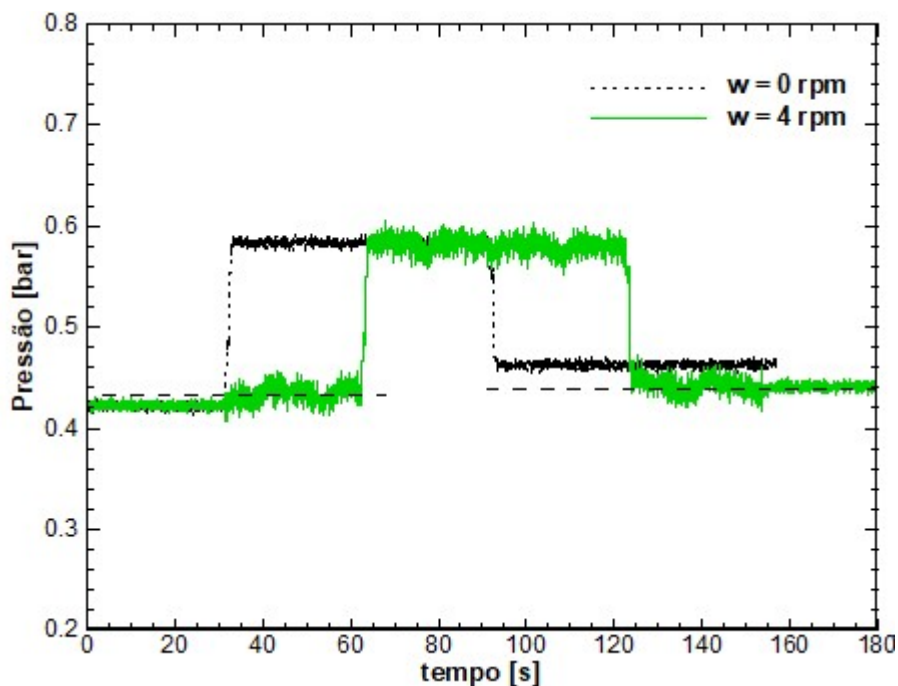


Figura 4.14 – Comparação da pressão residual com rotação e sem rotação da coluna coletas pelo transdutor de pressão P3.

A Figura 4.14 mostra como a pressão fica abaixo da pressão residual apresentada pelo primeiro teste, no qual a coluna não girava. Durante o regime permanente que compreendeu o intervalo entre 60 s e 120 s momento no qual a coluna rotacionava, se observa que atingiu a mesma pressão de regime, mas com algumas oscilações que acabaram dificultando a estabilização da pressão em comparação com a pressão de regime atingida no experimento que não houve rotação da coluna. As linhas tracejadas representam a pressão hidrostática inicial e hidrostática final, esta diferença foi explicada na seção 3.3.2, onde foi explicado a existência da caixa auxiliar que permitiu o escoamento do fluido descolado pela região anular, ocasionando, consequentemente, um pequeno aumento de nível. Estas linhas tracejadas serão utilizadas em

todos os gráficos apresentados de aqui em diante para diferenciar o efeito da pressão residual do efeito do aumento do nível.

O resultado anterior mostra que impor uma rotação colabora para o relaxamento da pressão residual. Este comportamento da pressão pode ser explicado através do comportamento reológico do fluido de trabalho utilizado. De acordo com Skalle (2010), a rotação da coluna dentro de escoamento laminar cria mais um gradiente de velocidade adicional. O fluido de trabalho é viscoplástico e pseudoplástico, isto significa que a viscosidade decai com a taxa de cisalhamento. A rotação da coluna neste caso ocasiona um aumento na taxa de cisalhamento, quanto maior a rotação, maior a região anular que sofre alteração da taxa de cisalhamento. Isso faz com que o plug (região com taxa nula, pois a tensão é menor que a tensão limite de escoamento) formado diminua. Assim, a diferença de pressão manométrica entre os transdutores tende a zero, esta tendência representa uma melhor transmissão da pressão. Ou seja, a pressão residual tende a ser eliminada. Caso a pressão residual seja totalmente eliminada, teríamos apenas a pressão hidrostática.

Na sequência foram realizados testes variando a velocidade de rotação em 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm. Na Figura 4.15 observa-se que a medida que a velocidade de rotação aumentou houve um alívio da pressão residual e uma tendência da mesma a estabilizar no valor da pressão hidrostática representada pela linha tracejada. A Figura 4.15 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para teste de descida da coluna sem rotação e com três velocidades de rotação diferentes. Percebe-se na Figura 4.15 que durante a rotação máxima de 33 rpm, a pressão de regime foi menor em relação as pressões de regimes atingidas durante as rotações de 4 rpm e 12 rpm. Esta diminuição pode ser explicada através dos vórtices de Taylor de maior magnitude que geram zonas de baixa pressão que acabam diminuindo a pressão de regime, lembrando que, como foi mencionado anteriormente, para nossa rotação de 33 rpm o escoamento do fluido de trabalho ainda é laminar, mas apresenta vórtices de Taylor de maior magnitude.



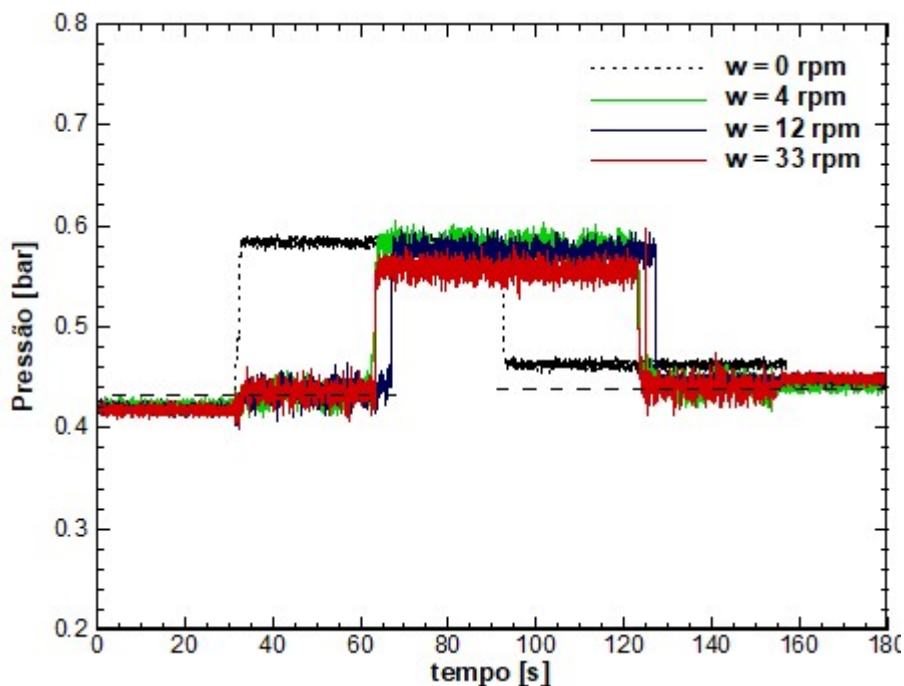


Figura 4.15 – Variação da pressão durante a descida da coluna sem rotação e com rotação de 4 rpm, 12 rpm e 33 rpm no transdutor de pressão P3 para uma solução aquosa de carboxopol.

Por meio deste gráfico foi possível reafirmar a influência da rotação no alívio da pressão residual. A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre os valores de pressão absoluta iniciais e finais coletados pela unidade experimental para os experimentos realizados sem rotação e considerando diferentes rotações desta.

Tabela 4.4 - Comparação entre as pressões iniciais e finais para testes com e sem rotação da coluna.

Rotação [rpm]	0	4	12	33
Pressão inicial (P3) [bar]	0,4218	0,4228	0,4188	0,4162
Pressão final (P3) [bar]	0,4654	0,4404	0,4499	0,4499

Como nova tentativa de constatar esse efeito da rotação, foi realizado um teste no qual a coluna rotacionava no início da movimentação axial e a rotação cessava no meio da descida da coluna. A Figura 4.16 apresenta uma comparação entre as curvas de pressão em função do tempo para os testes com velocidades de rotação da coluna de 4 rpm e 33 rpm em relação a um teste sem rotação. Apesar do fluido ser cisalhado pela rotação da coluna durante a primeira metade do experimento, o final do teste mostrou que quando a coluna não rotacionou no final



do movimento, não houve relaxamento da pressão residual registrada pelo transdutor P3. Uma possível explicação é que quando não existe rotação da coluna, o fluido não sofre uma tensão de cisalhamento extra, além daquele entregue pela movimentação axial. A falta dessa tensão extra gerada pela rotação fornece o tempo suficiente para que as partículas do fluido se reorganizem e recuperem sua condição inicial dificultando, dessa forma, a transmissão da pressão. Percebe-se na Figura 4.16 que no momento que a rotação da coluna foi desligada a pressão de regime registrada durante a velocidade de rotação de 33 rpm se igualou à pressão de regime tanto do teste com rotação de 4 rpm, quanto do teste sem rotação. Este fenômeno indica que a zona de baixa pressão ocasionada pelos vórtices Taylor desapareceu permitindo a recuperação da pressão.

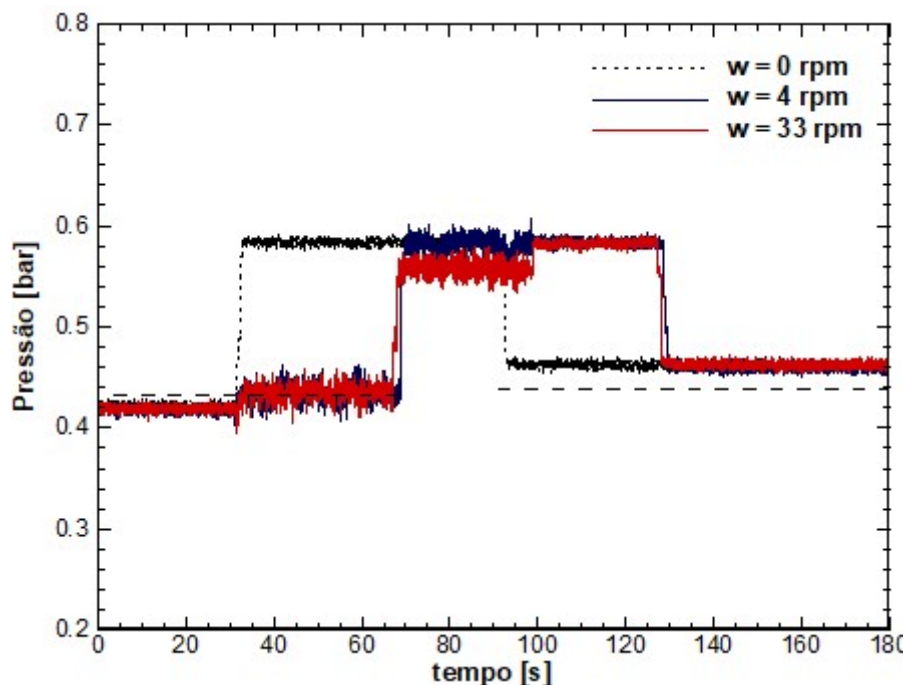


Figura 4.16 – Efeito da rotação intermediária da coluna no transdutor de pressão P3.

Para finalizar a análise da influência da rotação sobre a pressão residual, a Figura 4.17 mostra uma comparação entre o teste realizado com rotações da coluna de 4 rpm e 33 rpm da coluna ligada na metade do ensaio e o teste realizado sem rotação. Na Figura 4.17 observou-se um comportamento completamente oposto ao apresentado na figura anterior. Neste caso a movimentação axial da coluna finalizou com a rotação da coluna, quando isto acontece a pressão final registrada tende a se estabilizar num valor próximo a pressão hidrostática final. Isto sugere que a rotação da coluna ocasionou um relaxamento na pressão residual permitindo, assim, a transmissão da pressão.

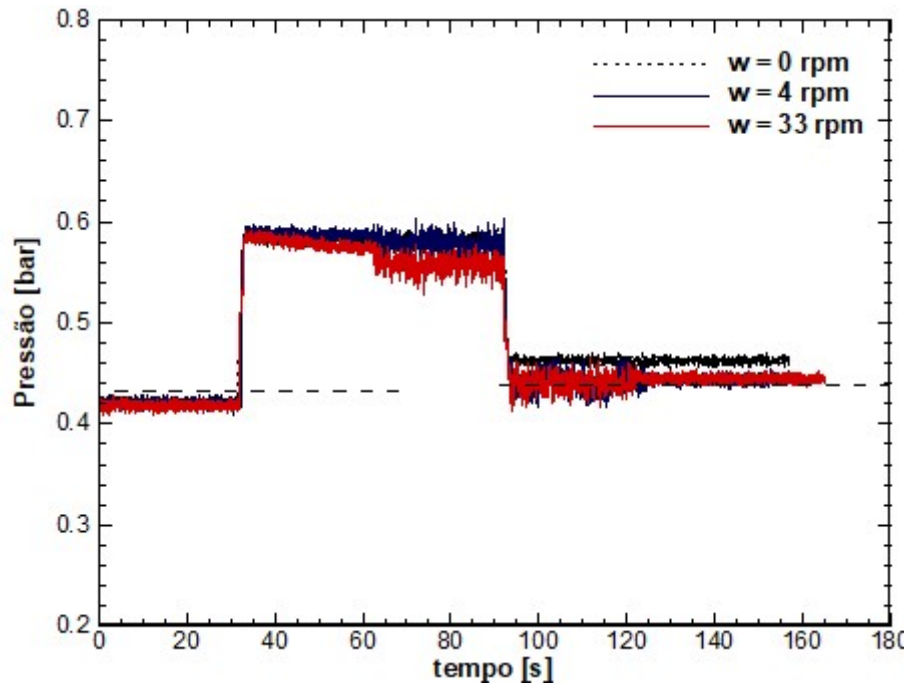


Figura 4.17 – Efeito da rotação intermediária final da coluna no transdutor de pressão P3.

### 4.3 Síntese do Capítulo 4

No Capítulo 4 foram realizados os testes de movimentação da coluna com glicerina e, na sequência, com a solução aquosa de 70 % de volume de carbopol. As seguintes observações podem ser feitas:

- i. O aparato experimental pode ser considerado apto a medir as pressões no regime permanente durante a movimentação da coluna.
- ii. A alta taxa de aquisição dos transdutores de pressão permitiu identificar picos de pressão no regime transitório.
- iii. O sistema de medição se mostrou apto a detectar as rápidas variações de pressão dentro do poço antes, durante e após o início da movimentação da coluna.
- iv. Todos os experimentos realizados com glicerina marcaram a mesma pressão hidrostática inicial no final do teste.
- v. Os ensaios de movimentação da coluna com uma solução aquosa de carbopol apresentaram uma parcela de pressão além da pressão hidrostática, chamada ao longo deste trabalho como pressão residual.

- vi. Experimentos levando em consideração a rotação da coluna na solução aquosa de carbopol mostraram que a rotação é capaz de atenuar a pressão residual que surgia durante os ensaios sem rotação da coluna.
- vii. A rotação da coluna diminuiu a pressão de regime, mas, uma vez cessada a movimentação da coluna, voltou a ser registrada a pressão de regime em função do descolamento axial da coluna.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, com uso de uma unidade experimental, foi avaliada a variação da pressão resultante da movimentação axial da coluna de perfuração. A planta é composta por duas tubulações de diferentes diâmetros instaladas concêntricamente, de forma que a coluna de perfuração e o poço sejam representados, respectivamente, pelas tubulações interna e externa. A seção de testes compreende o espaço anular formado entre a parede externa da coluna de perfuração e a parede do poço. Para a realização dos testes esta região é preenchida com os fluidos de trabalho cuja resposta, em termos de pressão, à movimentação da coluna de perfuração, é avaliada através de transdutores instalados ao longo da extensão axial da seção de testes. Procedimentos experimentais foram realizados com fluidos newtonianos e viscoplásticos de forma que o controle e monitoramento da pressão durante os testes de subida e descida da coluna fossem executados.

Os resultados aqui apresentados se diferenciam dos encontrados nos principais trabalhos tomados por referência, Crespo (2013) e Wolski (2014), por levarem em consideração os efeitos causados pela movimentação rotacional da coluna de perfuração sobre o fluido localizado no espaço anular. Além disso, a unidade experimental permite a movimentação da coluna de perfuração em uma ampla gama de velocidades e, graças aos vários transdutores de pressão instalados, uma análise mais ampla da resposta transiente de pressão resultantes das movimentações axiais e rotacionais da coluna.

A validação da unidade experimental foi realizada através de testes de movimentação axial da coluna de perfuração e utilização de uma solução aquosa de glicerina. Os resultados são comparados aos de um modelo teórico simples para o escoamento de fluido newtoniano em uma tubulação (tubo de seção circular ou anular constante). A comparação deixa evidente que os valores teóricos são muito próximos aos obtidos experimentalmente quando os testes se encontram na região de regime permanente. Como é esperado para testes com fluido newtoniano, com o fim da movimentação a pressão retorna ao mesmo patamar inicial, de forma que nenhuma pressão residual é observada.

Testes com a presença de movimentação rotacional também foram realizados. Como resultados observou-se a geração de apenas oscilações de pressão que aumentam em frequência com o aumento da velocidade angular imposta à coluna. Observou-se, entretanto, através de

testes que contemplam somente a movimentação rotacional, que a magnitude destas oscilações de pressão é desprezível e encontra-se na faixa de erro dos transdutores instalados.

Na última etapa do trabalho, uma solução aquosa de Carbopol foi elaborada e utilizada como fluido de teste na unidade experimental, de modo a avaliar a variação da pressão durante a movimentação e rotação da coluna de perfuração com um fluido não-newtoniano. Durante os testes de inserção da coluna de perfuração os resultados obtidos se apresentaram como esperado. Observa-se que a pressão ao longo do espaço anular aumenta conforme a coluna se desloca até atingir o regime permanente. No entanto, quando cessa a movimentação da coluna de perfuração, observa-se que a pressão diminui imediatamente, mas não para o valor inicial. Este comportamento evidencia a existência de uma “pressão residual” que surge devido à natureza viscoplástica da solução aquosa de carbopol. Esta característica reológica sugere a existência da tensão limite de escoamento que dificulta a propagação da onda de pressão.

Na tentativa de eliminar essa “pressão residual” presente ao final de todos os testes, foram realizados testes com a movimentação rotacional da coluna de perfuração. Dos resultados notou-se que os valores de pressão observados ao fim do deslocamento axial foram menores para os testes com rotação que nos experimentos realizados sem rotacionar a coluna. Com isso conclui-se que a rotação da coluna ocasiona um relaxamento na pressão residual.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros com a unidade experimental, sugere-se:

- (a) Realização de testes considerando a excentricidade e utilizando tubulações de diâmetros diferentes, de modo que seja possível analisar a influência da geometria na variação da pressão durante a movimentação da coluna.
- (b) Emprego de fluidos de perfuração nos testes experimentais, de modo a estudar o efeito da “pressão residual” durante a movimentação da coluna.
- (c) Instalação de um controle de aquecimento e resfriamento de uma seção do poço, de modo que a distribuição de temperaturas ao longo deste seja uniforme durante os testes.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. T. G. M. C. Sub e Sobrepressões Geradas Pelo Movimento Axial Transitório de Colunas de Perfuração. Projeto Final. Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR, Brasil, 2009
- ANNIS, M. (1967). High-Temperature Flow Properties of Water-Base Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Technology*, 19.
- BING, Z.; KAIJI, Z. Dynamic Model Predicts Well Bore Surge and Swab Pressures. *Oil & Gas Journal*, v. 94, n. 53, p. 74-77, dez. 1996.
- BING, Z.; KAIJI, Z.; QIJI, Y. Equations Help Calculate Surge and Swab Pressures in Inclined Wells. *Oil & Gas Journal*, v. 93, n. 38, p. 74-77, set. 1995
- BIRD, R. B., ARMSTRONG, R. C., & HASSAGER, O. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids* (2 ed., Vol. 1). New York: Wiley.
- BURKHARDT, J. A. Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement. *SPE Drilling Engineering*, v. 13, 1961
- CANNON, G.E., 1934. Changes in Hydrostatic Pressure Due to Withdrawing Drillpipe from the Hole. American Petroleum Institute, *Drilling and Production Practice*, pp: 42-47
- CARDWELL, W. T. 1953. Pressure Changes in Drilling Wells Caused by Pipe Movement, *API Drilling and Production Practices*, pp 97-112.
- CHUKWU, G. A. and Blick, E. F. 1989. Couette Flow of Non-Newtonian Power-Law Fluids, *Applied Simulation & Modeling*, Acta Press, Anaheim, California (13-15 November).
- CLARK, R. K. and Fontenot, J. E. 1974. Field Measurements of the Effects of Drillstring Velocity, Pump Speed, and Lost Circulation Material on Downhole Pressures, Paper SPE-4970, presented at the 49th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, Texas (6-9 October).
- CLARK, E. H. 1955. Bottom-Hole Pressure Surges while Running Pipes, *Petroleum Engineer International*, pp 68-96.
- CORRÊA, Stefano Gomes Instabilidade Mecânica de Formações Calcareníticas em Poços de Petróleo/ Stefano Gomes Corrêa - Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro

- Universitário do Norte / Laureate International Universities. Curso de Tecnologia em Petróleo e Gás, 2011.
- CRESPO, F; AHMED, R 2013. A simplified surge and swab pressure model for yield power law fluids, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G.R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. 5.ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 1988.
- DIAS, J. L ; QUAGLINO, M A. *A questão do petróleo no Brasil: uma história da Petrobras*. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1993.
- FEDEVJCYK, J.V. *Inclusão das variações de seção de um poço/coluna de perfuração na modelagem do problema transitório de surge & swab*. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento Acadêmico de Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2010.
- FONTENOT, J. E.; Clark, R. K. An Improved Method for Calculating Swab and Surge Pressures and Circulating Pressures in a Drilling Well. *SPE Drilling Engineering*, v. 14, n. 5, 1974
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001. 504 p
- ERGE, O., Ozbayoglu, M.E., Miska, S.Z., Yu, M., Takach, N., Saasen, A., and May, R., 2014, "The Effects of Drillstring Eccentricity, Rotation and Buckling Configurations on Annular Frictional Pressure Losses While Circulating Yield Power Law Fluids," *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Fort Worth, TX, SPE Paper No. 167950.
- ESCUDIER, M. P., Gouldson, I. W.; Oliveira, P. J. and Pinho, F. T., 2000, Effects of Inner Cylinder Rotation on Laminar Flow of a Newtonian Fluid through an Eccentric Annulus, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, pp. 92-103
- KIMURA, H. F. *Modelagem Transitória do Escoamento de Fluido Newtoniano Gerado Pela Movimentação Axial de Colunas de Perfuração de Poços de Petróleo*. Projeto Final. Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR, Brasil, 2008.
- LAL, M. Surge and Swab Modeling for Dynamic Pressures and Safe Trip Velocities. In: *IADC/SPE Drilling Conference*, 1983, New Orleans. p. 427-433.

- Lin, S. H., and Hsu, C. C. 1980. Generalized Couette Flow of a Non-Newtonian Fluid in Annuli, *Industrial & Chemical Engineering Fundamentals*, Vol. 19, No. 4, pp 421-424.
- LUBINSKI, A.; HSU, F. H.; NOLTE, K. G. Transient Pressures Due to Pipe Movement in an Oil Well. *Revue de L'Institute Français du Pétrole*, p. 307-347. 1977.
- MARKEN, C.D., He, X. and Saasen, A. 1992. The Influence of Drilling Conditions on Annular Pressure Losses. Paper SPE 24598 presented at the Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Washington, DC, 4 - 7 October.
- MELROSE, J.C., Savins, J.G., Foster, W.R. et al. 1958. A Practical Utilization of the Theory of Bingham Plastic Flow in Stationary Pipes and Annuli. *Trans AIME* 213: 316-324.
- MING TANG, Ramadan Ahmed, Ruchir Srivastav and Shiming He, Simplified surge pressure model for yield power law fluid in eccentric annuli, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, 2016 (346)
- MITCHELL, R. F. Dynamic Surge/Swab Predictions. *SPE Drilling Engineering*, v. 6, n.4, p. 325-333, set. 1988.
- MACOSKO, C. W. (1994). *Rheology - Principles, Measurements and Applications*. New York: John Wiley & Sons.
- MORAIS, José Mauro.(2013). *Petróleo em águas profundas : uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore / José Mauro de Moraes. – Brasília : Ipea : Petrobras, 2013. 424 p. : il., gráfs., mapas, tabs*
- OLIVEIRA, G.M Modelagem da Propagação de Pressão no Reinício do Escoamento de Fluidos de Perfuração Não Gelificados, 2011. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UTFPR.
- OOMS, G. and Kampman-Reinhartz, B.E., 1996, Influence of drill pipe rotation and eccentricity on pressure drop over borehole during drilling, *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, Vol.15, No.5, pp.695-711.
- ORMSBY, G. S. 1954. Calculation and Control of Mud Pressures in Drilling and Completion Operations, *API Drilling and Production Practices*, pp 44-55.
- PETROBRAS. (2015). *Tecnologias pioneiras do pré-sal*. Retrieved Janeiro 16, 2017, from <http://presal.hotsitespetrobras.com.br/tecnologias-pioneiras/#1>



- (1963). *Physical Properties of Glycerine and its Solutions*. New York: Glycerine Producers' Association.
- RUDOLF, R., and Suryanarayana, P. 1997. Kicks Caused by Tripping-In the Hole on Deep, High Temperature Wells, Paper SPE-38055, presented at the 1997 83. Asia Pacific Oil and Gas Conference, Conference, Kuala Lumpur, Malaysia (14-16 April).
- SAMPAIO JR., J. H. B. Aplicativo para Estimativa de Surge e Swab para Cenários UDW/formações frágeis, Relatório Técnico - CT TEP 0022/2002, CENPES/PETROBRAS, Tecnologia de Engenharia de Poço, Rio de Janeiro, 2002.
- SCHRAMM, G. Reologia e Reometria - Fundamentos Teóricos e Práticos. São Paulo Artliber., 2006.240. c
- SHIMING HE, Ming Tang, Wei Wang and Jiyou Xiong, Numerical model for predicting the surge and swab pressures for yield-power-law fluids in an eccentric annulus, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. 26, (28)
- TANNER, R. I. Engineering Rheology 2.ed. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- VUOLO, J. H. ., " Fundamentos da Teoria de Erros". Editora Edgard Blucher, 2ed.1996.
- WAGNER, R. R., Halal, A. S., and Goodman, M. A. 1993. Surge Field Tests Highlight Dynamic Fluid Response, Paper SPE-25771, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Amsterdam (23-25 February).
- WOLSKI, A.; Junqueira, S.L.M.; Negrão, C.O.R. A steady-state approach for evaluation of surge and swab pressures in flows with free surface boundary conditions, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 122, pp. 208-214, 2014.
- WHITE, F. M. (2009). *Fluid Mechanics* (7 ed.). New York: McGraw-Hill.
- WHITE, Z., Zamora, M., and Svodoba, C. 1997. Downhole Measurements of Synthetic-Based Drilling Fluid in an Offshore Well Quantify Dynamic Pressure and Temperature Distributions, SPE Drilling and Completion, pp 149-157 (September).
- WYLIE, E. B., & STREETER, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. New Jersey: Prentice Hall.
- YANG L.; Chukwu, G. A. Couette flow of non-newtonian power-law fluids in narrow eccentric annuli. Industrial Engineering and Chemical Research, v. 34, p. 936-942, 1995

## APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

A seguir é detalhada a etapa de verificação da unidade experimental. O principal objetivo é verificar a repetibilidade e funcionamento da unidade experimental no que diz respeito às medições de pressão, de temperaturas e do fluido de testes.

O procedimento de verificação consiste de análise das incertezas da unidade experimental e cálculo das principais variáveis que representam o fenômeno. Nesta etapa é brevemente explicado o procedimento de cálculo das incertezas de medição para fluidos newtonianos. Em seguida, são calculadas as incertezas de medição das principais variáveis de teste.

### A.1 Cálculo das incertezas de medição

A incerteza pode ser definida como um indicativo de quanto um valor pode diferir do valor verdadeiro mensurado. Se uma grandeza é determinada a partir de medição, o resultado é sempre uma aproximação do valor real. Existem dois tipos de erros, sistemáticos e relativos. Os erros sistemáticos podem acontecer devido à calibração do instrumento, causando repetidas medições incorretas das mesmas quantidades em cada tentativa, podendo ser eliminado através de uma correta calibração do instrumento. O erro aleatório é diferente para cada leitura, portanto, não pode ser eliminado. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Considerando que todos os instrumentos utilizados nesta unidade experimental foram corretamente calibrados eliminando dessa forma os erros sistemáticos. A análise de incerteza do presente trabalho tem como objetivo estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

#### A.1.1 Propagação de incertezas

Para calcular a propagação de incertezas para as variáveis de interesse, inicialmente é necessário definir quais são as incertezas de cada um dos instrumentos de medição utilizados. As incertezas dos instrumentos usados no circuito experimental são consideradas iguais à

precisão dada conforme catálogo do fabricante e fichas técnicas de calibração. Esses valores são apresentados na Tabela 5.

Nos casos específicos em que não se tem maiores informações sobre a incerteza de uma medida, acostuma-se utilizar a incerteza padrão, esta representa a metade da menor escala de divisão do instrumento usado para medir alguma grandeza Vuolo (1996). Por tanto, a incerteza do diâmetro interno da tubulação (D) é calculada como a metade da menor escala do instrumento usado em sua medição, 0,05 mm para o paquímetro.

A incerteza de medição (u) é calculada através da multiplicação da somatória de todos os desvios padrões pelo coeficiente de Student. A incerteza de medição calculada considerando a incerteza do instrumento de medição é de 1,50%.

Tabela 5. Incertezas relativas dos instrumentos utilizados

Medida	Incerteza relativa
Diâmetro dos tubos da seção de teste (D)	$\pm 0,035$
Termoresistência Pt-100 (T)	$\pm 0,06$
Transdutor de pressão (P)	$\pm 0,1$

Tabela 6. Efeito da movimentação da coluna na pressão dentro do poço

<b>Estimativa média aritmética pressão no regime permanente durante a descida da coluna utilizando glicerina</b>				
Transdutor	P2	P3	P4	P5
Desvio padrão	0,005773	0,005774	0	0,005774
Média aritmética	1,33	1,15	0,83	0,13
Tamanho da amostra	3	3	3	3
Nível de confiança	95%	95%	95%	95%

Tabela 7. Efeito da movimentação da coluna na pressão dentro do poço

<b>Estimativa média aritmética pressão no regime permanente durante a subida da coluna utilizando glicerina</b>				
Transdutor	P2	P3	P4	P5
Desvio padrão	0,005773	0,005774	0,005774	0
Média aritmética	-0,01	-0,04	-0,10	0
Tamanho da amostra	3	3	3	3
Nível de confiança	95%	95%	95%	95%

Tabela 8. Efeito da movimentação da coluna na pressão dentro do poço

Estimativa para a média aritmética da pressão no regime permanente solução aquosa de Carbopol				
Transdutor	P2	P3	P4	P5
Desvio padrão	0,0020	0,0015	0,0043	0,0006
Média aritmética	0,7303	0,5855	0,3782	0,0719
Tamanho da amostra	3	3	3	3
Nível de confiança	95%	95%	95%	95%

## A.2 Cálculo das pressões hidrostáticas e de regime permanente para a glicerina

A primeira medida a ser verificada é a pressão hidrostática registrada pelos transdutores de pressão instalados ao longo da unidade experimental. Para realizar esta verificação basta calcular as pressões registradas em cada transdutor através da equação:

$$P_h = \rho gh \quad (\text{A.1})$$

Onde  $P_h$  é a pressão hidrostática,  $\rho$  é a densidade do fluido de trabalho,  $g$  é a gravidade, e  $h$  é altura de coluna de fluido.

Considerando que a densidade da glicerina é de aproximadamente 1235 kg/m<sup>3</sup> e o valor da gravidade de 9,8 m/s<sup>2</sup>, foram realizados os cálculos da pressão hidrostática para cada um dos transdutores de pressão.

Uma vez verificada a pressão hidrostática, procedemos o cálculo da variação de pressão gerada pela movimentação da coluna no regime permanente. Essa variação de pressão na região anular da seção de teste foi calculada a partir da seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{2\rho f}{D_h} V_{ef}^2 \quad (\text{A.2})$$

Onde  $\frac{\Delta P}{\Delta z}$  é a variação de pressão ao longo do poço,  $f$  seria o fator de fricção,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $D_h$  é o diâmetro da região anular e  $V_{ef}^2$  representa o valor da velocidade

---

efetiva, significa dizer que a velocidade real do fluido que escoar pela região anular. Utilizando esta equação obtemos os seguintes valores de diferença de pressão no regime permanente para comprovar numericamente os resultados obtidos de maneira experimental.

# APÊNDICE B – ELABORAÇÃO DO FLUIDO DE TRABALHO

## B.1 Solução aquosa de Carbopol®

Uma vez definido o fluido de trabalho, foram elaborados três lotes de 20l de solução de 70 % de gel clínico e 30% de água destilada para uso no aparato experimental. Depois de preparar os lotes estes foram esvaziados num tanque de 100 litros, na sequência a solução aquosa de carbopol foi agitada por aproximadamente 20 minutos antes de ser transportado para a unidade experimental. Após o preenchimento do poço com o fluido, uma solução de biocida foi adicionada para evitar a proliferação de microorganismos no fluido de trabalho. O fluido foi misturado dentro do poço subindo e descendo a coluna inúmeras vezes e rotacionando está durante aproximadamente uma hora. Na sequência foram realizados os primeiros testes de monitoramento da pressão.

Utilizando o reômetro HAAKE MARS III, ver Figura A1, foi levantada as curvas de escoamento nas temperaturas de 15, 18, 22, 25 e 30 °C da amostra de gel clínico 100% que foi elaborada no dia 22/11/2017. Posteriormente, utilizando o mesmo reômetro, foi então levantada as curvas de escoamento nas temperaturas de 20 e 25 °C para as soluções citadas.



Figura A.1 – Reômetro utilizados na medição das propriedades reológicas dos fluidos de trabalho

Os testes reométricos foram realizados impondo diferentes patamares de taxa de cisalhamento no fluido. De modo a evitar deslizamento nas paredes durante os testes, a geometria de placas paralelas ranhuradas com 40 mm de diâmetro foram utilizadas. O teste de patamar de taxas é iniciado pela introdução da amostra entre as duas placas paralelas para que seja feita a estabilização das temperaturas. Em seguida, o fluido é cisalhado pela placa superior a uma taxa de deformação constante durante um certo intervalo de tempo até o regime permanente seja atingido. Durante o cisalhamento são medidos os valores de taxa de deformação e torque. Por fim, repete-se o teste para os outros valores de taxa de cisalhamento planejados.

Com os valores de taxa de cisalhamento e torque, calcula-se o valor da tensão de cisalhamento para cada valor de taxa. Os resultados dos testes de patamar de taxa de deformação para o gel condutor puro (100%) do teste são mostrados na sequência.

Tabela 9. Patamares de taxa de deformação e tensão de cisalhamento aparente média calculados pelo reômetro, utilizando gel condutor puro (100%) 15 °C

Taxa de Deformação ( $s^{-1}$ )	Tensão de Cisalhamento (Pa)
250,0	377,38
100,0	286,92
50,0	238,07
10,0	168,13
5,0	149,52
1,0	120,63
0,1	96,96

Tabela 10. Patamares de taxa de deformação e tensão de cisalhamento aparente média calculados pelo reômetro, utilizando gel condutor puro (100%) 18 °C

Taxa de Deformação ( $s^{-1}$ )	Tensão de Cisalhamento (Pa)
250,0	373,95
100,0	285,25
50,0	237,73
10,0	169,73
5,0	151,64
1,0	124,71
0,1	102,30

Tabela 11. Patamares de taxa de deformação e tensão de cisalhamento aparente média calculados pelo reômetro, utilizando gel condutor puro (100%) 22 °C

Taxa de Deformação (s <sup>-1</sup> )	Tensão de Cisalhamento (Pa)
250,0	360,43
100,0	276,17
50,0	230,69
10,0	165,56
5,0	148,25
1,0	122,42
0,1	100,29

Tabela 12. Patamares de taxa de deformação e tensão de cisalhamento aparente média calculados pelo reômetro, utilizando gel condutor puro (100%) 25 °C

Taxa de Deformação (s <sup>-1</sup> )	Tensão de Cisalhamento (Pa)
250,0	360,40
100,0	276,83
50,0	231,81
10,0	167,15
5,0	149,94
1,0	124,39
0,1	101,86

Tabela 13. Patamares de taxa de deformação e tensão de cisalhamento aparente média calculados pelo reômetro, utilizando gel condutor puro (100%) 30 °C

Taxa de Deformação (s <sup>-1</sup> )	Tensão de Cisalhamento (Pa)
250,0	338,82
100,0	261,55
50,0	219,57
10,0	158,91
5,0	142,77
1,0	118,10
0,1	94,38



O *software* do reômetro calcula a tensão de cisalhamento pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{2M}{\pi R_{pp}^3} \quad (\text{B.2})$$

onde  $M$  é o torque medido pelo reômetro, e  $R_{pp}$  é o raio das placas paralelas. Esta relação assume que o torque independe da taxa de cisalhamento, como acontece para fluidos newtonianos. Entretanto, isto não é válido para fluidos não-newtonianos, e a tensão de cisalhamento calculada pela Equação (B.2) é chamada de tensão de cisalhamento aparente, cujo valor é utilizado pelo *software* do reômetro para calcular a viscosidade aparente do fluido. Logo, para que a curva de escoamento do fluido possa ser obtida, a tensão aparente deve ser corrigida pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_{pp}^3} \left[ 3 + \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}} \right] \quad (\text{B.3})$$

Com estes resultados, foi possível caracterizar a solução aquosa de Carbopol como um fluido viscoplástico que se comportava como um fluido de Herschel-Bulkley.