

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

RODRIGO SEIJI MITISHITA

**PROJETO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE
PRESSÕES E VAZÕES NO REINÍCIO DE ESCOAMENTO DE
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

RODRIGO SEIJI MITISHITA

**PROJETO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE
PRESSÕES E VAZÕES NO REINÍCIO DE ESCOAMENTO DE
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão,
PhD.

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia de Projeto de Pesquisa “PROJETO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE PRESSÕES E VAZÕES NO REINÍCIO DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO”, realizada pelo aluno Rodrigo Seiji Mitishita, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, PhD.

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Admilson Teixeira Franco, Dr.

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. Eduardo Matos Germer, Dr.

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 04 de Março de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por toda a felicidade que me proporcionam no dia-a-dia e também pelo incentivo à minha formação, e à minha namorada Paula Silva por todo o seu amor e companheirismo.

Ao meu orientador, prof. Cezar Negrão, pela orientação, sugestões e ensinamentos, e pelo incentivo a fazer um bom trabalho. Agradeço também à Nezia de Rosso pela orientação e auxílio em todas as etapas do projeto.

Aos meus amigos Diogo, Aninha, Binho, Martinez, Rubens, e outros, pelos momentos de diversão durante este último ano de graduação.

Aos professores do LACIT e do DAMEC, pelos valiosos conhecimentos de engenharia ao longo do curso.

Ao Eduardo Drosczaka pelo constante auxílio na construção do aparato experimental com seus conhecimentos práticos.

E, finalmente, à Petrobras e FUNTEF-PR, pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

RESUMO

MITISHITA, Rodrigo Seiji. Projeto de Aparato Experimental para a Avaliação de Pressões e Vazões no Reinício do Escoamento de Fluidos de Perfuração. 2015. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A gelificação de fluidos de perfuração é uma característica desejável quando há paradas no processo de perfuração, porque o fluido gelificado evita a precipitação de cascalhos provenientes da perfuração da rocha. No entanto, quando se deseja reiniciar o escoamento do fluido, a pressão da bomba deve ser mais alta que as pressões usuais de operação, para que ocorra a quebra do gel. A etapa de reinício de escoamento gera, portanto, um pico na pressão do fluido, mas há a possibilidade de que estas elevadas pressões necessárias para o reinício do escoamento podem danificar a estrutura do poço. Além disso, como a janela de pressões de operação seguras no fundo do poço é muito estreita, o problema dos picos de pressão se intensifica em grandes profundidades. Neste trabalho é projetado e construído um aparato experimental para avaliar as pressões e vazões no reinício do escoamento de fluidos de perfuração, e com isso, medir e avaliar a intensidade dos picos de pressão. A revisão bibliográfica do presente trabalho foca nos principais trabalhos sobre simulações numéricas de reinício de escoamento de fluidos tixotrópicos. A base do projeto do presente trabalho foi a bancada experimental de Leôncio (2011). Após a revisão, foi proposta uma metodologia para a elaboração do projeto da bancada experimental, com os principais requisitos e restrições do projeto. A etapa seguinte apresentada é a seleção de componentes e construção do aparato. Por fim, os procedimentos de testes e calibração da bancada, procedimento experimental para ensaios futuros e conclusões são detalhados, e recomendações para trabalhos futuros são propostas.

Palavras-chave: Aparato experimental, reinício de escoamento, picos de pressão, gelificação.

ABSTRACT

MITISHITA, Rodrigo Seiji. Project of an Experimental Apparatus for the Evaluation of Pressures and Flow Rates at Drilling Fluid Flow Restart. Final Paper (Mechanical Engineering) – Academic Department of Mechanics, Federal Technological University of Parana. Curitiba, 2015.

The gelation of drilling fluids is a desirable phenomenon in the drilling process, because the gellified fluid prevents the deposition of cuttings from the well structure. However, when the drilling fluid flow is restarted, the pump pressure must be higher than the usual operation pressures so that the gel breaking can occur. Therefore, the flow restart generates a fluid pressure peak, but there is a possibility that these high pressures are higher than the formation fracture pressure, resulting in structural damage on the borehole walls. Moreover, the safe operating pressure window at the bottom of the well is very narrow, intensifying the problem in great oceanic depths. In this work, an experimental apparatus for the evaluation of pressures and flow rates at drilling flow start-up is designed and built. The device will be used to evaluate the pressure peaks at the drilling fluid flow restart. The revision of previous research focuses on the main published works about thixotropic fluids. The basis for the present work is the experimental test bench built by Leôncio (2011). After the revision, a design methodology for the experimental apparatus was proposed, along with the main project goals and restrictions. In the next stage, the equipment selection and the construction details of the apparatus are presented. Finally, calibration procedures, experimental procedure for future tests and conclusions are detailed, and recommendations for future research are proposed.

Keywords: experimental apparatus, flow restart, pressure peaks, gelation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação esquemática de uma sonda de perfuração.....	8
Figura 2. Faixa de pressões seguras em um poço de petróleo	9
Figura 3. Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, para as quatro principais modelos de fluidos newtonianos generalizados	13
Figura 4. Bancada experimental para avaliações de picos de pressão em fluidos de perfuração	21
Figura 5. Pressão em função do tempo: repetibilidade dos ensaios de picos de pressão	25
Figura 6. Pressão em função do tempo: efeito da temperatura	26
Figura 7. Projeto conceitual do aparato experimental.....	35
Figura 8. Circuito hidráulico da bancada esquematizado	37
Figura 9. Tubulação helicoidal para experimentos.....	40
Figura 10. Bomba Netzsch Nemo BY de dois estágios	42
Figura 11. Reservatório de fluido de perfuração e motor agitador	45
Figura 12. Projeto conceitual da câmara de isolamento e estrutura de suporte da bancada	46
Figura 13. Estrutura da câmara de isolamento	47
Figura 14. Estrutura da porta da câmara e cantoneiras de aço	48
Figura 15. Estrutura de tubos quadrados em construção	48
Figura 16. Esquema do sistema de refrigeração	49
Figura 17. Balanço de energia na câmara de isolamento.....	51
Figura 18. Capacidade de refrigeração em função do tempo de resfriamento da câmara	53
Figura 19. Evaporador Thermokey DFTC54RDE	54
Figura 20. Estrutura das resistências de aquecimento do tipo mola.....	55
Figura 21. Unidade condensadora do sistema de refrigeração da bancada.....	56

Figura 22. Transdutor de Pressão WIKA P-30/P-31	59
Figura 23. Transdutor de Pressão WIKA S-10.....	59
Figura 24. Adaptador para encaixe de transdutor de pressão	60
Figura 25. Sistema de aquisição de dados	62
Figura 26. Chassi NI cDAQ-9174.....	63
Figura 27. Exemplo de módulo (placa) NI CompactDAQ.....	64
Figura 28. Acessórios para sistemas NI CompactDAQ	64
Figura 29. Chassi e as quatro placas NI CompactDAQ de aquisição de dados	66
Figura 30. Válvulas eletropneumáticas usadas na bancada.....	67
Figura 31. Medições de pressão nos testes de funcionamento da bomba	70
Figura 32. Aparato experimental.....	71
Figura 33. Cronograma do projeto (Tcc1 e Tcc2)	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese do Projeto.....	72
Tabela 2. Riscos do projeto	85
Tabela 3. Orçamento aproximado da bancada experimental	85
Tabela 4. Preços dos componentes listados no Capítulo 5	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Tema	7
1.2	Descrição do Problema	9
1.3	Objetivos.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	Conceitos fundamentais	11
2.1.1	Fluidos não newtonianos	11
2.1.2	Tixotropia	13
2.1.3	Escoamento compressível	14
2.2	Estudos sobre reinício de escoamento de óleos gelificados	15
2.3	Estudos sobre reinício de escoamento de fluidos de perfuração	17
2.4	Síntese do capítulo.....	19
3	DETALHAMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL DE LEÔNIO (2011)	20
3.1	Descrição da bancada.....	20
3.2	Descrição do procedimento experimental	22
3.3	Análise dos ensaios realizados com a bancada	23
3.4	Síntese do capítulo e justificativa do projeto.....	27
4	CONCEPÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	29
4.1	Requisitos de projeto	29
4.2	Restrições do aparato experimental	31
4.3	Fluido de trabalho para testes iniciais	33
4.4	Concepção inicial	34
4.5	Síntese do capítulo.....	37
5	ESPECIFICAÇÃO DE COMPONENTES E CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	38
5.1	Tubulação Helicoidal	38
5.2	Bomba helicoidal	40
5.2.1	Considerações iniciais e seleção da bomba	40
5.2.2	Operação e manutenção da bomba.....	43
5.3	Reservatório de fluido.....	43
5.4	Câmara de isolamento	45

5.5	Sistema de refrigeração	49
5.6	Transdutores de pressão.....	57
5.6.1	Seleção dos transdutores	57
5.6.2	Adaptação para encaixe dos transdutores na serpentina de testes...59	
5.7	Sistema de aquisição de dados.....	61
5.7.1	Seleção dos componentes.....	63
5.8	Válvulas pneumáticas para bloqueio de fluxo.....	66
5.9	Termopares	68
5.10	Síntese do capítulo e testes de funcionamento da bancada	68
6	PROCEDIMENTOS DE FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL E TESTES INICIAIS	74
6.1	Funcionamento do sistema hidráulico	74
6.2	Medição da vazão da bomba.....	74
6.3	Verificação da medição de pressões do primeiro e último transdutor	75
6.4	Passo a passo do procedimento experimental	76
6.5	Erros experimentais associados ao aparato experimental	77
6.6	Experimentos futuros.....	78
7	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE A – RISCOS E ORÇAMENTOS.....	85
	APÊNDICE B – CRONOGRAMA	87
	APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULOS	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Atualmente, o petróleo é a fonte de energia mais utilizada pelo homem. Ao longo dos anos a prospecção tem aumentado significativamente devido à crescente demanda causada pelo crescimento econômico e industrial do país. Logo, mais investimentos foram destinados à exploração de novas reservas e à pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias destinadas à indústria petrolífera. Isso levou a descoberta de maiores reservas de petróleo no fundo dos oceanos. A necessidade de se perfurar poços em águas cada vez mais profundas, principalmente na camada pré-sal, onde a produção de petróleo acontece a 7000 metros de profundidade, é uma das principais dificuldades da indústria por causa dos grandes investimentos necessários em estrutura, tecnologia e treinamento de pessoal (Morais, 2013).

O processo de perfuração de poços é feito por uma sonda rotativa. Nela, está instalada uma coluna de perfuração, que possui uma broca em sua extremidade. Essa broca realiza forças de rotação e uma força vertical para baixo na rocha, perfurando-a. A coluna de perfuração é composta pela união de vários tubos de paredes espessas chamados de comandos. Durante a perfuração da rocha, os cascalhos são removidos pelo fluido de perfuração ou lama, que também lubrifica a broca e mantém a estabilidade da parede do poço (Thomas, 2004). A Figura 1 mostra um esquema do processo de perfuração. O fluido de perfuração é succionado pela bomba (2) do tanque (1) e bombeado para a coluna de perfuração, entrando pela extremidade superior. Em seguida, o fluido escoar dentro da coluna até a broca (3). O fluido retorna à superfície pelo espaço anular formado pela coluna e poço (4), arrastando os cascalhos, e pela linha de retorno (5). Por fim, os cascalhos são separados do fluido em uma peneira (6). Os cascalhos separados são descartados no recipiente (7) e o fluido de perfuração é reaproveitado, reiniciando o ciclo.

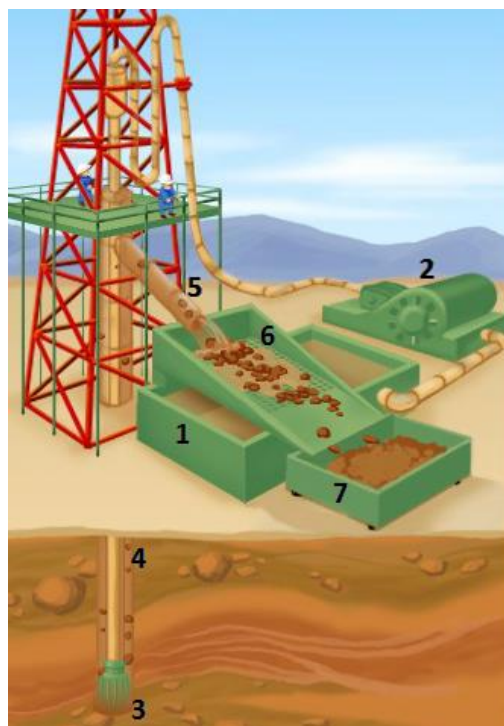


Figura 1. Representação esquemática de uma sonda de perfuração

Adaptado de Schlumberger (2010)

Eventualmente, há a necessidade de que a circulação de fluido seja interrompida para manutenção ou parada emergencial. Nessas situações o fluido de perfuração deve manter os cascalhos de rocha em suspensão para evitar a precipitação, o que pode ocasionar a obstrução da broca. A suspensão dos cascalhos pelo fluido de perfuração durante a parada é devido à gelificação, que é a formação de gel na ausência de tensões de cisalhamento (Oliveira, 2007). Os fluidos de perfuração também são viscoplásticos. Segundo Chhabra (2008), fluidos viscoplásticos são os que apresentam uma tensão limite de escoamento. Fluidos de perfuração também possuem alta viscosidade quando submetidos a baixas taxas de deformação, e baixa viscosidade em altas taxas de deformação. Além disso, a viscosidade do fluido de perfuração aumenta gradativamente com o aumento do tempo de repouso, e sofre a influência das baixas temperaturas do fundo do oceano.

Além de evitar a precipitação de cascalhos da formação rochosa, fluidos de perfuração também são importantes para o controle de pressões do poço. Toda formação rochosa apresenta porosidade, e os fluidos da formação rochosa contidos

nesses poros exercem uma pressão, que é chamada de pressão de poros. Essa pressão deve ser balanceada pela pressão exercida pelo fluido de perfuração (Skalle, 2009). Pressões de fluido muito elevadas podem fraturar a formação rochosa, causando uma contaminação na formação por influxo de fluido de perfuração. A janela segura de operação, mostrada na Figura 2, que é o intervalo entre a pressão dos poros e a pressão de fratura, diminui à medida que a profundidade do poço aumenta. Portanto, é seguro afirmar que o controle das pressões do fluido no reinício do escoamento é essencial para o processo de perfuração de poços de petróleo.

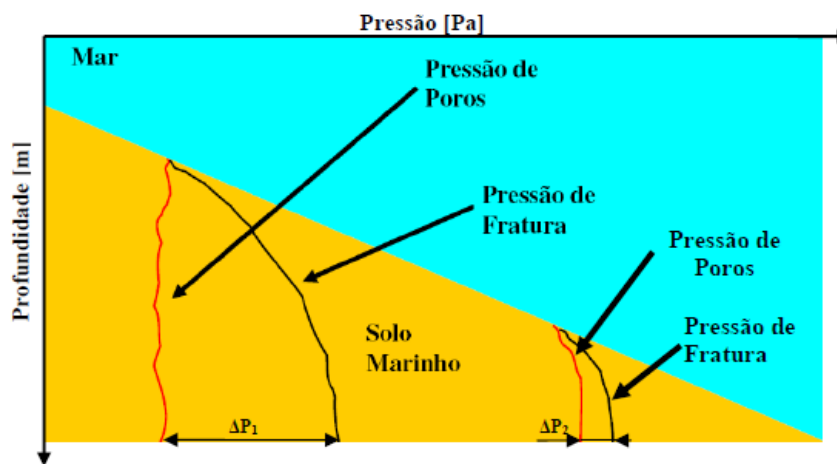


Figura 2. Faixa de pressões seguras em um poço de petróleo

Fonte: Santos (2006)

1.2 Descrição do Problema

Após a parada da perfuração de um poço de petróleo, ocorre a gelificação do fluido de perfuração devido à ausência de cisalhamento. O fluido gelificado mantém em suspensão os cascalhos provenientes da perfuração, de modo a evitar a precipitação para o fundo do poço.

Para que ocorra o reinício do escoamento, deve ser imposta ao fluido uma tensão maior que a tensão gel. Logo, o fluido deve ser bombeado a uma pressão maior que as pressões usuais de operações de perfuração, gerando um pico de pressão. O pico de pressão deve ser controlado, pois ele pode ser maior que a pressão máxima que a formação rochosa suporta, podendo danificar a sua estrutura e causando subsequente perda de fluido para a formação rochosa (Sandvold, 2012).

1.3 Objetivos

No presente trabalho é projetado e construído um aparato experimental capaz de avaliar pressões e vazões em uma longa tubulação. O objetivo deste aparato é simular experimentalmente o reinício do escoamento de fluidos de perfuração gelificados em uma tubulação. O aparato também é capaz de controlar a temperatura do processo, de modo a simular as baixas temperaturas do solo marinho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos fundamentais

A seguir são apresentados alguns conceitos fundamentais da Mecânica dos Fluidos e da Reologia, que são essenciais para a compreensão da teoria necessária para o projeto da bancada.

2.1.1 Fluidos não newtonianos

Para definir o que é um fluido não-newtoniano, primeiramente é necessário definir um fluido newtoniano. Fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento, com uma constante de proporcionalidade denominada viscosidade dinâmica (Chhabra, 2008). O modelo de fluido newtoniano é representado pela Equação 2.1:

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta\mathbf{D} = \eta[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] \quad (2.1)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor de tensões, \mathbf{D} é o tensor da taxa de deformação, η é a viscosidade dinâmica do fluido, e \mathbf{u} é a velocidade (Papanastasiou, 2000).

Fluidos não newtonianos são aqueles que apresentam viscosidade variável, portanto não há uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento (Chhabra, 2008). A modelagem newtoniana pode ser estendida para um fluido de perfuração cuja viscosidade dependa da taxa de cisalhamento. Essa modelagem é denominada newtoniana generalizada, e nesse caso a viscosidade é chamada de viscosidade aparente, depende da taxa de deformação (Oliveira, 2011).

O modelo de fluido newtoniano generalizado engloba diversos comportamentos da viscosidade que podem ser caracterizados pelos seguintes modelos: Modelo da Lei de Potência, usado para fluidos pseudoplásticos e dilatantes e os modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley, usados para fluidos viscoplásticos.

Fluidos pseudoplásticos são aqueles cuja viscosidade diminui à medida que a tensão de cisalhamento aumenta. Entretanto, quando submetidos a altas taxas de cisalhamento, os fluidos pseudoplásticos apresentam comportamento similar ao newtoniano, ou seja, a tensão de cisalhamento varia linearmente com o aumento de taxa.

O comportamento de fluidos pseudoplásticos, modelado pela Lei de Potência, é equacionado da seguinte forma (Chhabra, 2008):

$$\tau_{yx} = m(\dot{\gamma}_{yx})^n \quad (2.2)$$

onde τ_{yx} é a componente tensão de cisalhamento na direção x , perpendicular à direção y , $\dot{\gamma}_{yx}$ é a componente taxa de cisalhamento, na mesma direção da tensão, m é o índice de consistência e n é o índice da Lei de Potência. Nota-se que a Lei da Potência pode representar fluidos newtonianos se $n=1$ e $m=\mu$. Para $n<1$, O fluido é denominado pseudoplástico, e a viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento. Para $n>1$, a viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento, e o fluido é chamado de dilatante (Darley e Gray, 1988).

Fluidos viscoplásticos são caracterizados por possuírem uma tensão limite de escoamento τ_0 , e seu valor deve ser excedido pela tensão de cisalhamento aplicada ao fluido para que haja escoamento. Caso tensões menores que τ_0 sejam aplicadas, o fluido se deformará elasticamente. Quando o fluido é submetido a uma tensão superior a τ_0 , o fluido irá escoar. Nota-se que o modelo não prevê a transição entre o comportamento elástico e viscoso. (Chhabra, 2010). De acordo com Chhabra (2008), fluidos de perfuração são considerados como viscoplásticos.

Fluidos de Bingham possuem uma tensão limite de escoamento τ_0^B . Após ela ser superada pela tensão imposta ao fluido (τ_{yx}), o escoamento se comporta de maneira similar a de um fluido newtoniano, onde a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento. O modelo matemático para um escoamento unidimensional de um fluido de Bingham é escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_0^B + \mu_B(\dot{\gamma}_{yx}) \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0^B| \\ \dot{\gamma}_{yx} &= 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0^B| \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde μ_B é um valor constante denominado viscosidade plástica. O modelo de Herschell-Bulkley é usado para fluidos viscoplásticos que possuem uma variação da tensão não linear, em função da deformação. Após a tensão limite de escoamento ser atingida, a viscosidade diminui à medida que a tensão de cisalhamento aumenta. Portanto, após o fluido começar a escoar, ele apresenta comportamento pseudoplástico. Esse modelo é uma generalização do modelo de Bingham com

comportamento não linear. Para um escoamento unidimensional, pode ser escrito da seguinte maneira (Chhabra, 2008):

$$\tau_{yx} = \tau_0^H + m(\dot{\gamma}_{yx})^n \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0^H| \quad (2.4)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0^H|$$

onde os parâmetros m e n têm significados similares aos da Lei da Potência. A Figura 3 mostra as curvas dos modelos reológicos descritos anteriormente.

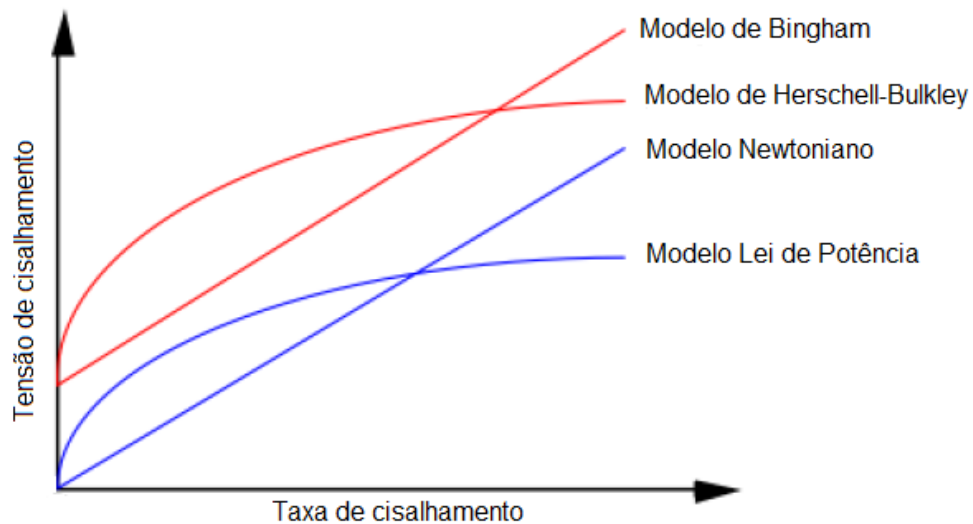


Figura 3. Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, para as quatro principais modelos de fluidos newtonianos generalizados

Adaptado de Sandvold (2012)

2.1.2 Tixotropia

De acordo com Barnes (1997), tixotropia é definida como um gradual decréscimo da viscosidade quando um fluido é submetido a uma tensão de cisalhamento constante, seguido de um aumento gradual quando essa tensão é reduzida.

Segundo Barnes (1997) a maioria das modelagens matemáticas do comportamento de tixotropia definiu o comportamento do material através do parâmetro estrutural λ . O aumento ou decréscimo do parâmetro estrutural é dependente do tempo. Considerando um fluido não newtoniano inelástico, quando $\lambda = 1$ o fluido está com a sua viscosidade máxima η_0 , ou seja, totalmente gelificado.

Quando $\lambda = 0$, o fluido apresenta mínima viscosidade: η_{∞} , ou seja, totalmente desestruturado. Utilizando estes conceitos, uma equação cinética que representa a taxa de variação do parâmetro estrutural em função do tempo pôde ser elaborada:

$$\frac{d\lambda}{dt} = g(\dot{\gamma}, \lambda) = a(1 - \lambda)^b - c\lambda\dot{\gamma}^d \quad (2.5)$$

onde a, b, c e d são constantes para o sistema estudado (Barnes, 1997). Nota-se que a taxa de variação do parâmetro estrutural na Equação 2.5 depende de dois termos. O primeiro representa a estruturação do material e o segundo representa a taxa de quebra. Analisando essa equação, se o termo $g(\dot{\gamma}, \lambda)$ é negativo, significa que a estrutura está se desfazendo, e sua viscosidade está diminuindo para um patamar de equilíbrio. Se $g(\dot{\gamma}, \lambda)$ é positivo, o fluido está se estruturando (gelificando).

2.1.3 Escoamento compressível

A compressibilidade tem um importante papel no reinício do escoamento de fluidos tixotrópicos. A compressibilidade de um fluido pode ser definida pela variação da massa específica ou volume de um fluido com a pressão e temperatura (Anderson, 1990). Logo, a definição da compressibilidade isotérmica de um fluido é dada por (Anderson, 1990):

$$\alpha = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (2.6)$$

onde v é o volume específico, ρ é a massa específica do fluido, p é a pressão e T é a temperatura. Anderson (1990) também define a compressibilidade em função da velocidade de propagação da onda de pressão c na :

$$\alpha = \frac{1}{\rho c^2} \quad (2.7)$$

A velocidade de propagação da onda de pressão c , por outro lado, pode ser definida por:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} \quad (2.8)$$

Mas a derivada parcial $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$ pode ser escrita por:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T \quad (2.9)$$

onde c_p é o calor específico do fluido a pressão constante, e c_v é o calor específico do fluido a volume constante.

Mas, no caso de líquidos, $c_p = c_v$. Logo:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{\rho c^2} \quad (2.10)$$

2.2 Estudos sobre reinício de escoamento de óleos gelificados

A seguir são apresentados trabalhos que discutem o reinício de escoamento de óleos gelificados após uma parada na produção.

Sestak *et al.* (1987), Cawkwell e Charles (1987), Chang *et al.* (1999) e Davidson *et al.* (2004) realizaram simulações numéricas nas quais um fluido não gelificado desloca um outro ao longo de uma tubulação. O estudo de Sestak *et al.* (1987) foi baseado no modelo de Houska (1981) para tixotropia, que é uma generalização do modelo de Herschell-Bulkley:

$$\tau = \tau_{y0} + \tau_{y1}\lambda + (k + \lambda\Delta k)\dot{\gamma}^n \quad (2.11)$$

onde τ_{y0} é a parte constante da tensão limite de escoamento, τ_{y1} é a parte tixotrópica da tensão limite de escoamento, k é a consistência do gel, Δk é a parte tixotrópica da consistência do gel e n é o índice lei de potência. Os autores consideram τ_{y0} , τ_{y1} , k , Δk e n como parâmetros dependentes apenas da temperatura, por motivos de simplificação. Nesse trabalho, foi analisada a sensibilidade dos valores de vazão de óleo e tempo de deslocamento do óleo na tubulação em relação à viscosidade do fluido newtoniano que empurra o gel, e ao valor da tensão limite de escoamento, dado por $\tau_{y0} + \tau_{y1}$.

Cawkwell e Charles (1987) estudaram o escoamento de um fluido tixotrópico e um reopético (viscosidade diminui com o tempo se o fluido está em repouso, e aumenta com o tempo se é aplicada uma tensão de cisalhamento) ao longo de uma tubulação. Os autores consideraram os efeitos da inércia e da compressibilidade, e afirmam que um gradiente de pressão insuficiente para reiniciar o escoamento de um fluido incompressível seria capaz de reiniciar a circulação de um fluido compressível,

pois a compressibilidade do fluido possibilita a formação de maiores tensões de cisalhamento no gel. Os tempos calculados para que o fluido percorra a tubulação são significativamente menores que os calculados por Sestak *et al.* (1987), que não consideravam a compressibilidade.

O tempo necessário para deslocar o fluido gelificado por todo o comprimento da tubulação também foi calculado pelo modelo de Chang *et al.* (1999). Os autores analisaram o reinício do escoamento de um petróleo tixotrópico homogêneo incompressível usando um modelo de três tensões de escoamento para o fluido – tensão limite elástica, estática e dinâmica. Com isso, os autores mostraram que existem três possibilidades no reinício de escoamento do fluido: reinício sem atraso, reinício com atraso, e ausência de escoamento. Entretanto, as características reológicas do fluido – que dependem do tempo, do cisalhamento, e da história de cisalhamento e de mudanças térmicas – são essenciais para a precisão do modelo.

Uma extensão do modelo de Chang *et al.* (1999) foi proposto por Davidson *et al.* (2004), levando em conta a compressibilidade do fluido e a variação longitudinal de suas propriedades. Esse modelo possibilitou a identificação da passagem do regime laminar para o turbulento em relação ao tempo de escoamento, e bons resultados para as vazões e tempos de escoamento pela tubulação completa, quando comparado ao modelo de Chang *et al.* (1999).

Vinay *et al.* (2006) publicaram um trabalho sobre um modelo matemático bidimensional em que o petróleo se comporta como um fluido de Bingham. Nesse estudo, os autores concluíram que a compressão de alguns fluidos resulta em quedas bruscas de pressão no início do escoamento. O movimento do fluido por conta da queda de pressão inicial faz com que ocorram altas taxas de cisalhamento, diminuindo a tensão de quebra de gel. Logo, os autores concluíram que o fluido pode escoar quando a tensão imposta é menor que a tensão de quebra de gel, mas apenas se os efeitos tixotrópicos forem fortes o suficiente. Essa conclusão é similar à obtida por Cawkwell e Charles (1987) com seu modelo 1D.

Uma desvantagem do modelo 2D proposto por Vinay *et al.* (2006) era o grande esforço computacional. Por causa disso, Vinay *et al.* (2007) apresentaram um modelo unidimensional, que mostrou bons resultados quando comparado ao modelo 2D, e com esforço computacional significativamente menor. No entanto, os efeitos da

tixotropia não foram considerados nesse artigo por questões de simplificação do modelo. Os autores também apresentaram duas explicações possíveis para a relação entre compressibilidade e rapidez de reinício de escoamento mencionada no trabalho de Cawkwell e Charles (1987). Ambas as explicações possíveis estão relacionadas ao fato que um fluido menos compressível possui uma maior viscosidade.

Visando uma melhoria no modelo 1D proposto por Vinay *et al.* (2007), com um pequeno incremento no tempo computacional necessário, Wachs *et al.* (2009) propuseram um modelo 1.5D, considerado pelos autores como uma união dos modelos 2D e 1D de Vinay *et al.* (2007) de simulação de reinício de escoamento de óleos parafínicos. Os efeitos da tixotropia foram considerados no equacionamento, com resultados bastante interessantes. Os autores apresentaram os efeitos da compressibilidade e da tixotropia no reinício do escoamento através de figuras que mostraram o decréscimo do parâmetro estrutural λ ao longo da tubulação.

Oliveira *et al.* (2010) publicaram um modelo 1D de simulação de reinício de escoamento compressível e transitório de um fluido de Bingham, com base nas equações de conservação da massa e de quantidade de movimento, considerando os efeitos viscosos, mas desconsiderando a quebra de gel. Os resultados dos gradientes de pressões e das velocidades se aproximaram dos resultados de Vinay *et al.* (2007). De acordo com o trabalho, números de Reynolds menores resultam em maior dissipação da onda de pressão. O efeito da razão de aspecto D_h/L também foi avaliado, onde D_h é o diâmetro hidráulico da tubulação, e L é o comprimento da tubulação. Quanto maior a razão de aspecto da tubulação, maiores foram os picos de pressão e menor a dissipação da onda.

2.3 Estudos sobre reinício de escoamento de fluidos de perfuração

A seguir são citados estudos importantes para o entendimento do reinício da circulação de fluidos de perfuração. Esses artigos apresentam conclusões interessantes sobre os picos de pressão, e que são relevantes para o presente trabalho. Ambos os estudos teóricos e experimentais são evidenciados.

O estudo de Bjørkevoll *et al.* (2003) tem como objetivo o cálculo dos pulsos de pressão com um modelo numérico de escoamento em um tubo anular concêntrico, baseado no modelo de Herschell-Bulkley. Um dos parâmetros de entrada do modelo

é a tensão de quebra de gel, cujo valor foi obtido através de ensaios reológicos em laboratório. De acordo com o artigo, a tensão de quebra de gel é uma variável dependente do logaritmo do tempo de gelificação.

Oliveira *et al.* (2007) propôs uma modelagem de reinício da circulação de fluidos de perfuração gelificados em colunas de perfuração de poços de petróleo, baseada no estudo de Chang *et al.* (1999). O escoamento foi considerado como unidimensional, incompressível, e em regime permanente. O modelo de Bingham foi utilizado, considerando que a tensão limite de escoamento varia com o tempo. As simulações, que contemplam um tubo cilíndrico acoplado a outro tubo anular, geraram resultados satisfatórios quando comparados ao modelo de Chang *et al.* (1998), com respeito à vazão, tensão na parede e posição da interface entre fluido de entrada e fluido gelificado ao longo do tempo.

Um modelo mais avançado em relação ao modelo de Oliveira *et al.* (2007) foi publicado por Rocha *et al.* (2008), que considera o regime transitório e a compressibilidade do fluido nas simulações. Na validação do modelo, parâmetros do estudo de Vinay *et al.* (2007) foram usados, mostrando boa concordância de resultados. É interessante notar os efeitos da compressibilidade do fluido nos picos de pressão gerados: a frequência das oscilações de pressão é maior para um fluido de baixa compressibilidade, e os picos de pressão são significativamente maiores, o que está de acordo com as citações anteriores do trabalho.

No trabalho de Negrão *et al.* (2011) os autores consideraram os efeitos da elasticidade do fluido de perfuração no modelo matemático para a tixotropia, no caso do reinício do escoamento. O modelo foi então comparado com os modelos newtoniano, Fluido de Bingham e Fluido Tixotrópico. Foi constatado que o efeito da elasticidade é pequeno no reinício do escoamento, mas para baixas taxas de cisalhamento o efeito da elasticidade é significativo.

Leôncio (2011) projetou uma bancada para avaliar experimentalmente as pressões no reinício do escoamento de fluidos de perfuração. A bancada consistia de uma longa tubulação helicoidal posicionada dentro de uma câmara com controle de temperatura. Nessa tubulação estavam instalados transdutores de pressão, que realizavam as medidas simultaneamente ao reinício. O escoamento de fluido era iniciado por uma bomba alternativa triplex. Leôncio obteve bons resultados com a

bancada, quando comparados com modelos matemáticos sobre reinício de escoamento. O aparato experimental projetado no presente trabalho é baseado na bancada de Leôncio (2011), com algumas melhorias significativas que estão detalhadas nos capítulos seguintes. A bancada de Leôncio (2011) é descrita em maiores detalhes no Capítulo 3, para que as diferenças entre ela e o aparato experimental projetado no presente trabalho estejam claras.

2.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos que são essenciais para o entendimento do trabalho, seguidos de estudos publicados sobre o escoamento de fluidos tixotrópicos em tubulações. Nos estudos teóricos, vários modelos foram propostos para o reinício de escoamento. É importante notar que em um grande número desses trabalhos, vários fatores foram evidenciados como importantes no processo do reinício de escoamento, como a compressibilidade do fluido, tempo de repouso do fluido, efeitos tixotrópicos, entre outros. Logo, esses fatores têm influência direta sobre a magnitude dos picos de pressão e a transmissão das ondas de pressão no fluido.

De acordo com a revisão bibliográfica do presente trabalho, existem poucos estudos experimentais sobre reinício de escoamento de fluidos de perfuração - a maioria dos artigos apresentados no presente capítulo é sobre modelagens numéricas. Então, há uma oportunidade de publicação de artigos científicos que tratam de estudos experimentais sobre o reinício de escoamento de fluidos de perfuração. O trabalho de Leôncio é bem elaborado no que diz respeito à avaliação das pressões e vazões no reinício de escoamento de fluidos, e será usado como base para a bancada proposta no presente trabalho.

3 DETALHAMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL DE LEÔNCIO (2011)

O presente trabalho será baseado na bancada experimental para a avaliação dos picos de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração, projetada por Leôncio (2011). A bancada foi construída nas dependências do Laboratório de Ciências Térmicas na UTFPR. O projeto da bancada de Leôncio (2011) foi baseado na abordagem dos ensaios de retomada de circulação em uma tubulação de formato helicoidal de Gandelman *et al.* (2006).

3.1 Descrição da bancada

A bancada, esquematizada na Figura 4, consistia de uma tubulação de formato helicoidal posicionada verticalmente dentro de uma câmara isolada termicamente com controle de temperatura. A câmara era climatizada por um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor de um único estágio, de modo a simular adequadamente as condições de temperatura do solo marinho, que são próximas de 4 ou 5°C. Também havia resistências elétricas instaladas na bancada, que eram usadas para aquecer a câmara caso fosse necessário. As paredes da câmara foram construídas usando placas do material isolante poliestireno expandido (isopor), revestidas por chapas de aço para proporcionar maior resistência mecânica. O evaporador do sistema de refrigeração foi posicionado dentro de uma antecâmara no interior da câmara. Por causa do posicionamento do evaporador, havia a necessidade de um ventilador para insuflar o ar refrigerado da antecâmara para o local onde estava posicionada a tubulação helicoidal. O ventilador de insuflamento de ar era o único instalado na bancada, ou seja, não havia outros ventiladores de circulação de ar dentro da câmara de isolamento. Além disso, o evaporador não possuía um sistema de dreno de condensados, o que causava acúmulo de água no interior da câmara. Dessa forma, ocorreu a corrosão de componentes da bancada, devido à umidade excessiva no interior da câmara de isolamento.

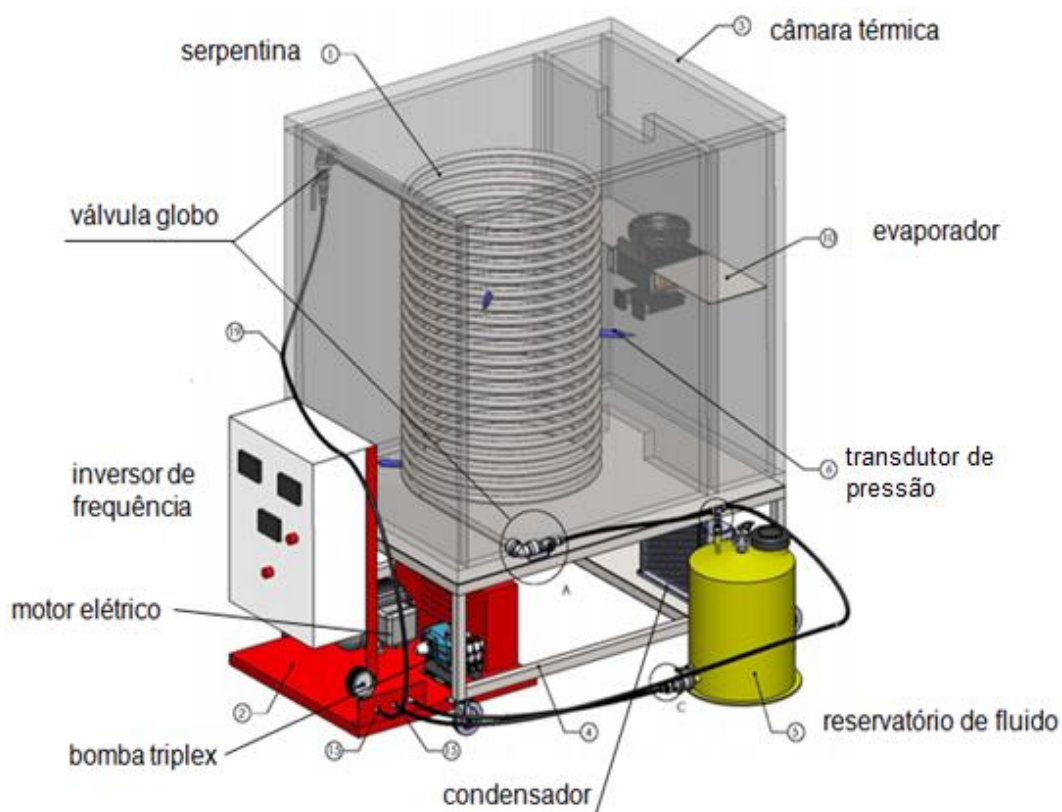


Figura 4. Bancada experimental para avaliações de picos de pressão em fluidos de perfuração

Fonte: Leôncio (2011)

O controle da temperatura da bancada era feito com 8 termopares instalados na tubulação helicoidal e dois termopares na antecâmara. O tempo para a câmara de isolamento atingir 5°C foi medido, baseado na leitura dos termopares. Verificou-se que a temperatura medida pelos 8 termopares se estabilizava em 5°C após 5600 segundos (1h30min aproximadamente). O valor da temperatura inicial da câmara não estava listado nos dados desse teste. Logo, o tempo de resfriamento e de estabilização da temperatura na câmara de isolamento era relativamente alto. A principal causa desse longo tempo de estabilização de temperatura era a baixa capacidade do sistema de refrigeração. Além disso, a ausência de ventiladores de circulação fazia com que a temperatura da bancada não fosse homogênea em todos os termopares.

Foi especificado um longo comprimento para a tubulação helicoidal (50 m) para representar da melhor maneira possível a grande extensão dos poços de petróleo. Portanto, o formato helicoidal foi adotado para que a tubulação fosse longa sem ocupar um grande espaço físico. Na tubulação estavam instalados quatro transdutores de pressão, cujo objetivo era medir a pressão do fluido de perfuração ao longo do comprimento do tubo.

A câmara de isolamento e a serpentina eram sustentadas por uma estrutura de tubos quadrados de aço. Estavam instalados nessa estrutura o compressor e o condensador do sistema de refrigeração da câmara - ambos posicionados abaixo da câmara de isolamento. Fora da bancada, havia uma bomba alternativa de três pistões (bomba triplex) que bombeava fluido de perfuração para a tubulação helicoidal. A principal desvantagem da bomba era a geração de pulsações que causavam oscilações na pressão em função do tempo. Para contornar essa limitação foi adquirido um amortecedor de pulsações, mas mesmo com esse componente, as pulsações da bomba ainda prejudicavam os resultados dos ensaios (maiores detalhes na seção 2.3.3). A vazão dessa bomba era controlada por um inversor de frequências.

Duas válvulas de bloqueio, manuais do tipo globo, foram instaladas na entrada e na saída da tubulação, ambas posicionadas externamente à câmara de resfriamento. Também havia, na parte externa da bancada, um circuito de drenagem da bomba controlado por uma válvula de segurança, caso as pressões do sistema fossem muito elevadas.

O fluido de perfuração era armazenado em reservatório cilíndrico. Como já foi explicado nas seções anteriores, o fluido de perfuração gelifica quando está em repouso. De modo a evitar isso um motor agitador foi acoplado no topo do reservatório. A tubulação que conectava o reservatório à bomba também se encontrava na parte externa da bancada.

3.2 Descrição do procedimento experimental

De acordo com Leôncio (2011), inicialmente o fluido de perfuração era deixado em repouso no interior da tubulação helicoidal por um intervalo de tempo, para que ocorresse a gelificação. A temperatura da câmara, e conseqüentemente a temperatura da serpentina, eram devidamente controladas. Em seguida, a bomba

succionava o fluido do reservatório e o bombeava até a entrada da serpentina por uma tubulação, passando por uma válvula de bloqueio de fluxo e um manômetro. Um detalhe importante é que as válvulas da bancada eram operadas manualmente. A operação manual das válvulas causava problemas de repetibilidade nos experimentos. O fluido bombeado era o responsável por provocar a quebra do gel no interior da tubulação helicoidal. As pressões do fluido no interior dessa tubulação eram medidas por quatro transdutores de pressão durante um determinado intervalo de tempo. O fluido, por fim, passava por uma válvula de controle de fluxo e retornava ao reservatório.

Uma limitação da bancada é o fato de que apenas a tubulação helicoidal estava dentro da câmara térmica, enquanto que o restante da tubulação do sistema hidráulico estava instalado fora da câmara. Portanto, os testes eram feitos com o fluido de perfuração a diferentes temperaturas: o fluido pressurizado pela bomba estava na temperatura do ambiente externo, enquanto o fluido gelificado na serpentina dentro da câmara estava a uma temperatura de aproximadamente 4°C.

3.3 Análise dos ensaios realizados com a bancada

Poucos ensaios foram executados com a bancada porque ela permaneceu operacional por um curto período de tempo, devido à falha da bomba. Além disso, há poucas informações documentadas sobre os ensaios realizados. Entretanto, após discussões com o pessoal que trabalhou e operou a bancada, foi possível retirar algumas informações importantes dos resultados gerados. Os experimentos foram realizados com o fluido de perfuração BR-MUL 117. Os principais experimentos tiveram o objetivo de verificar a repetibilidade dos ensaios e a influência da temperatura no reinício do escoamento.

A Figura 5 mostra a pressão (bar) em função do tempo (segundos) medida por um mesmo transdutor, mas em cinco ensaios de reinício de escoamento diferentes. O procedimento experimental para estes ensaios foi descrito na seção anterior. Após a pressurização do fluido do reservatório na tubulação de saída da bomba, a válvula de bloqueio de fluxo era aberta no tempo de 59 segundos. O “P1” indicado no gráfico representa a medição do primeiro transdutor, próximo à entrada da serpentina. É possível notar que os cinco experimentos foram feitos em quatro dias diferentes. Em

todos os ensaios, a temperatura da câmara era de 5°C, o tempo de repouso do fluido de perfuração na serpentina foi de 2 horas, e a vazão de reinício foi de 3 L/min.

Foi constatado que a bancada não possui boa repetibilidade por conta de alguns fatores. Primeiramente, o controle da homogeneidade e das propriedades dos fluidos de perfuração durante os ensaios era difícil de ser realizado. Também, há uma diferença no valor dos picos de pressão resultantes dos ensaios de retomada de escoamento e os máximos das curvas de pressão em função do tempo ocorrem em instantes de tempo diferentes para cada ensaio. Adicionalmente, devido ao procedimento de abertura de válvulas ser manual, elas nunca eram abertas da mesma maneira. Por fim, a bomba alternativa escolhida por Leôncio (2011) gerava pulsações, que causavam as oscilações nas curvas de pressão em função do tempo, conforme mostra a Figura 5. Essas oscilações não permitem que a leitura dos valores exatos dos picos de pressão seja feita. A amplitude máxima das oscilações se aproxima de 0,4 bar, o que remete a aproximadamente 10% do valor máximo medido de pressão (4 bar).

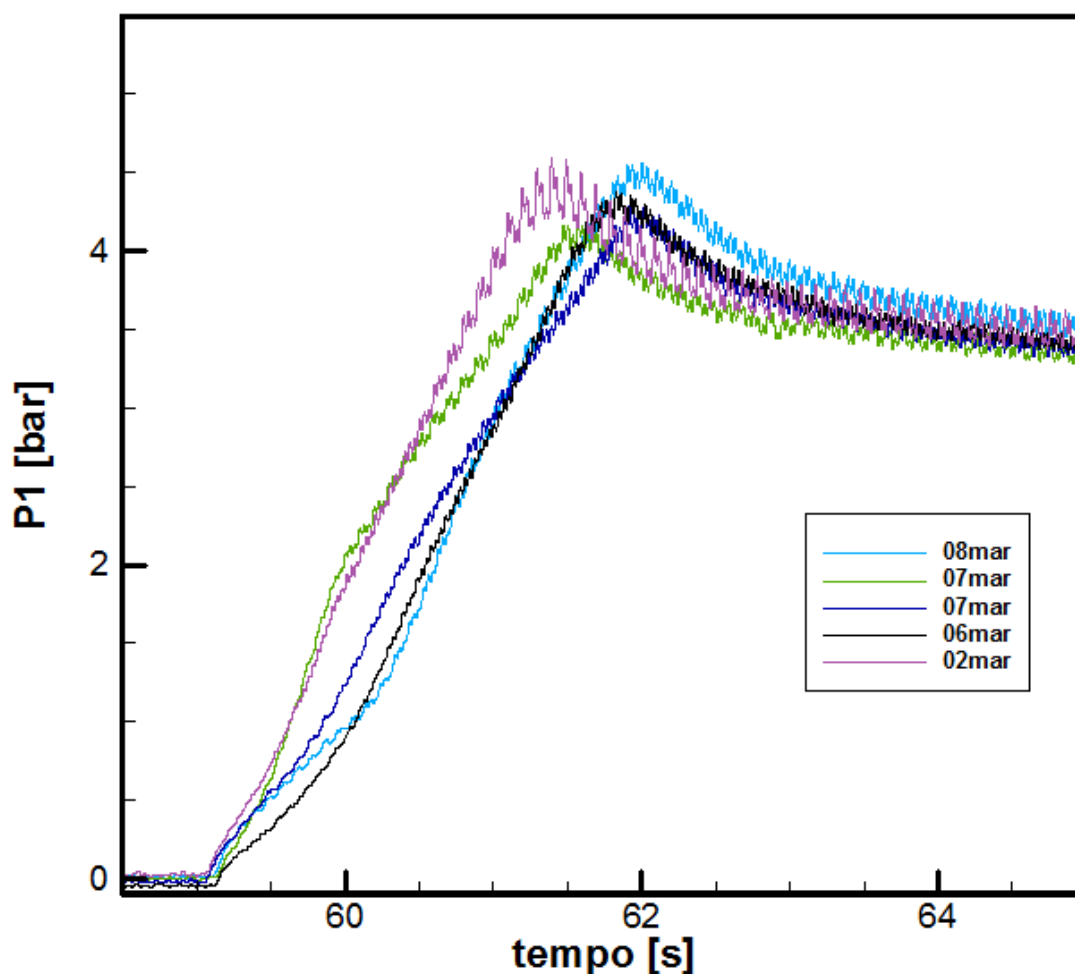


Figura 5. Pressão em função do tempo: repetibilidade dos ensaios de picos de pressão

Fonte: Leôncio (2014)

A Figura 6 mostra a pressão (bar) em função do tempo (segundos) obtida a partir de quatro ensaios de reinício de escoamento de fluido de perfuração. As leituras de pressão também são do transdutor de pressão “P1”. Os procedimentos experimentais para cada ensaio são os mesmos dos ensaios descritos na seção 3.2. Após a pressurização do fluido, a válvula de bloqueio de fluxo na entrada da serpentina foi aberta no tempo de 59 segundos. A principal diferença é que nesse caso, foram feitos dois ensaios de reinício de escoamento com a câmara a uma temperatura de 5°C, e dois ensaios com a câmara a uma temperatura de 15°C. Os ensaios foram realizados

em dias diferentes. O tempo de repouso do fluido foi de 2 horas, e a vazão de reinício foi de 3 L/min.

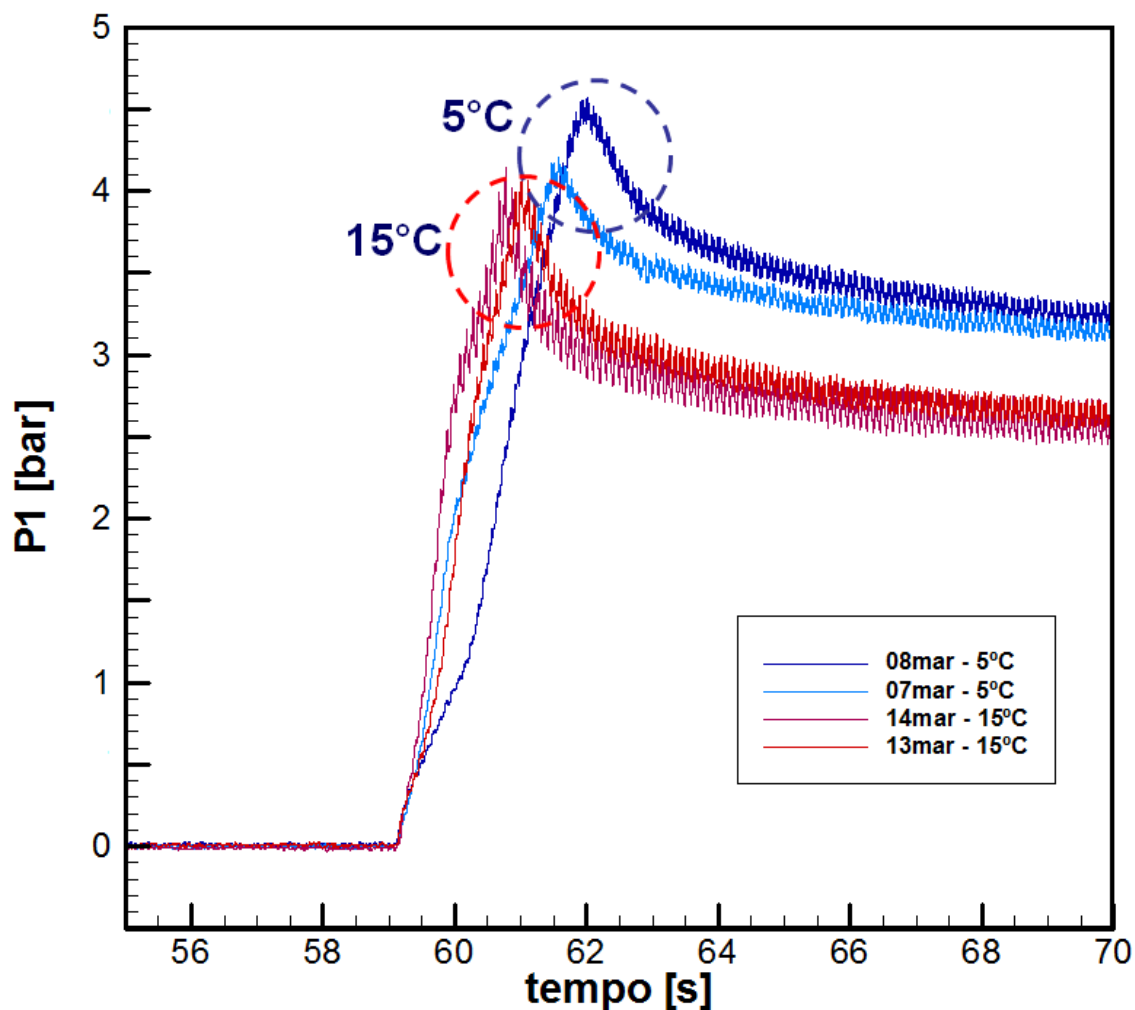


Figura 6. Pressão em função do tempo: efeito da temperatura

Fonte: Adaptado de Leôncio (2014)

De acordo com a literatura, a viscosidade de fluidos de perfuração, e consequentemente o valor dos picos de pressão no reinício de escoamento, aumentam com o decréscimo da temperatura. Entretanto nota-se que, de acordo com o gráfico da Figura 6, o efeito da temperatura no valor do pico de pressão do ensaio do dia 07 de Março não foi o que era esperado. O pico de pressão da curva gerada pelo ensaio do dia 07 de Março, com a temperatura da câmara igual a 5°C, apresenta valor aproximadamente igual aos valores dos picos de pressão das curvas

dos dois ensaios realizados com a temperatura da câmara de 15°C. Além disso, as oscilações das curvas, provocadas pelas pulsações da bomba, dificultaram a leitura dos valores de pressão.

3.4 Síntese do capítulo e justificativa do projeto

Apesar de ter obtido resultados interessantes sobre o reinício de escoamento de fluidos de perfuração, a bancada de Leôncio (2011) possuía algumas limitações. As principais limitações estão resumidas a seguir:

- A bomba alternativa gerava pulsos de pressão, causando oscilações nas curvas de picos de pressão;
- A capacidade do sistema de refrigeração não era suficiente para refrigerar rapidamente a câmara de isolamento;
- As válvulas eram de operação manual, dificultando a operação da bancada;
- Não havia um sistema de dreno de condensados dentro da câmara de isolamento, causando acúmulo de umidade e corrosão da estrutura da bancada;
- Tubulações do sistema hidráulico da bancada estavam em temperatura diferente da tubulação helicoidal;
- Ausência de ventiladores de circulação de ar causava a não-homogeneidade das temperaturas no interior da câmara de isolamento;

Tendo em vista as limitações citadas acima, o novo aparato experimental será projetado de modo a incorporar soluções para os problemas descritos. As melhorias iniciais planejadas para a bancada do presente trabalho, que serão detalhadas nas próximas seções, são as seguintes:

- A instalação de uma bomba helicoidal para a eliminação das pulsações e conseqüentemente uma maior precisão de medições de pressão;
- O dimensionamento e instalação de um sistema de refrigeração de maior capacidade;
- Instalação de válvulas eletropneumáticas, de modo a eliminar a operação manual e melhorar a repetibilidade dos ensaios;

- Instalação de todo o sistema hidráulico da bancada dentro da câmara térmica, com o objetivo de melhorar o controle de temperaturas;

- Instalação de ventiladores de circulação de ar e de um sistema de dreno de condensados no interior da câmara de isolamento;

O próximo capítulo mostra os principais requisitos e restrições do projeto, e a concepção inicial do aparato experimental.

4 CONCEPÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

A principal característica do aparato é a possibilidade de simulação e análise experimental do reinício do escoamento de fluidos de perfuração gelificados em uma tubulação longa a uma temperatura controlada. Testes experimentais de reinício de escoamento de fluidos de perfuração, de acordo com a revisão bibliográfica do presente trabalho, foram abordados no trabalho de Leôncio (2011). Logo, o aparato experimental foi projetado de maneira similar à bancada anterior. As variáveis relevantes para o processo também foram estabelecidas com base na revisão bibliográfica:

- Tempo de repouso do fluido de perfuração.
- Taxa de cisalhamento no reinício de escoamento.
- Temperatura de repouso do fluido.

- De acordo com Rønningsen (1992), a taxa de resfriamento também tem influência na quebra de gel de fluidos tixotrópicos. Então, a taxa de resfriamento da câmara de resfriamento também é considerada como uma variável importante.

4.1 Requisitos de projeto

O projeto foi iniciado com o detalhamento dos requisitos de projeto necessários para a construção, funcionamento e operação corretos do aparato experimental. Os requisitos de projeto foram baseados nas variáveis de importância para o reinício de escoamento obtidas na Revisão Bibliográfica do presente trabalho e no projeto da bancada experimental de Leôncio (2011). Os principais requisitos estão a seguir:

1: O fluido de perfuração escoar por tubulações com centenas de metros de comprimento em operações de perfuração de poços de petróleo. Portanto, a tubulação do aparato experimental deve ser longa o suficiente de modo a simular o reinício de escoamento de fluidos de perfuração em condições semelhantes às de perfuração de poços de petróleo. Além disso, o comprimento da tubulação deve ser suficiente para verificar os efeitos da compressibilidade do fluido no reinício do escoamento.

2: A temperatura no fundo dos oceanos é muito baixa, se aproximando dos 4°C. De acordo com a Revisão Bibliográfica, a temperatura e a taxa de resfriamento são

variáveis que influenciam a gelificação de fluidos de perfuração. Logo, é necessário controlar a temperatura do fluido no interior da tubulação, de modo que a gelificação e o reinício do escoamento aconteçam a uma temperatura similar à do solo oceânico. Também é importante que a gelificação do fluido possa ocorrer a uma taxa de resfriamento controlada, e que a tubulação esteja isolada termicamente, para que o controle de temperatura seja preciso o suficiente para a realização dos ensaios. Por fim, são necessários termopares para a medição precisa de temperatura na tubulação helicoidal, que é a região onde as medidas de pressão serão tomadas.

3: Uma bomba capaz de trabalhar com fluidos de perfuração é essencial para o projeto. Como foi mencionado na seção 3.4, a bomba não deve gerar pulsos de pressão ao bombear o fluido, portanto uma bomba helicoidal é recomendada. Um reservatório capaz de armazenar fluido de perfuração, mantendo-o em constante movimento para evitar a gelificação, também é necessário. Outro componente essencial da parte hidráulica do aparato experimental são as válvulas eletropneumáticas, cuja operação deve ser automatizada. Por fim as tubulações que conectam os equipamentos do sistema hidráulico devem ser de material resistente às elevadas pressões de trabalho.

4: Um sistema de aquisição de dados é essencial para que as pressões no reinício do escoamento possam ser medidas. O sistema de aquisição de dados consiste de transdutores de pressão com alta taxa de aquisição, e de um sistema de coleta e armazenagem de dados, para a posterior interpretação dos resultados.

5: A câmara de isolamento deve ter dimensões suficientes para comportar a bomba, a tubulação helicoidal, o evaporador do sistema de refrigeração e o reservatório de fluido de perfuração.

6: Para resolver o problema do longo tempo de estabilização das temperaturas no interior da câmara de isolamento, um sistema de refrigeração de alta capacidade deve ser projetado. Foi estipulado que, para que a câmara seja refrigerada de 32°C para 4°C, um tempo de resfriamento de aproximadamente uma hora é suficiente para que as temperaturas se estabilizem, de maneira que os ensaios experimentais não sejam demasiadamente longos. Para que a estrutura interna do aparato experimental não sofra corrosão, o sistema de refrigeração deve possuir um sistema de dreno de

condensados. Por fim, ventiladores de circulação de ar devem ser instalados na câmara térmica com o objetivo de homogeneizar a temperatura interna. Após a análise dos parâmetros importantes e dos requisitos de projeto, foi definido que o procedimento experimental deve ser similar ao desenvolvido por Leôncio (2011) no que diz respeito ao reinício de escoamento de fluidos de perfuração. Esta decisão se justifica pelo fato de que Leôncio (2011) obteve resultados satisfatórios com a sua bancada, e também pelas similaridades do presente projeto com a bancada anterior.

4.2 Restrições do aparato experimental

Todo projeto experimental possui restrições, e estas devem ser listadas antecipadamente à compra de materiais e construção. Uma das restrições mais evidentes no projeto da bancada é o espaço físico limitado do laboratório. Logo, as dimensões da câmara não podem ser excessivamente grandes. Por fim, a estrutura da bancada deve resistir ao elevado peso dos componentes e do volume de fluido de perfuração armazenado para os experimentos.

O comprimento da tubulação é outro fator limitante. Uma tubulação longa é de fato mais adequada para os experimentos por razões mencionadas na seção anterior. Entretanto, ela não pode ser longa demais, principalmente por causa do tamanho limitado da câmara de isolamento. O formato helicoidal da tubulação atende aos requisitos de tamanho pois torna a tubulação mais compacta, o que facilita o seu posicionamento na bancada.

Os transdutores de pressão devem possuir uma faixa de medição de pressões próxima às pressões do fluido nos experimentos, para que os resultados sejam mais precisos. Uma maneira fácil de se prever o intervalo de pressões adequado para os transdutores é pelo conhecimento da pressão máxima que a bomba é capaz de exercer sobre o fluido. Além disso, o material dos transdutores e dos outros componentes que entram em contato com o fluido de perfuração deve ser resistente à corrosão, de modo a diminuir os custos de manutenção da bancada e consequentemente aumentar a sua durabilidade.

Por fim, é importante notar a restrição mais importante do projeto: o custo do aparato experimental. Todos os equipamentos devem ser cuidadosamente orçados para que não existam problemas financeiros no decorrer da construção do aparato.

Por motivos de organização, a Tabela 1 mostra uma síntese dos principais requisitos e restrições do projeto do presente trabalho.

Tabela 1. Requisitos e restrições de projeto

Sistema	Requisitos	Restrições
Hidráulico	Bomba de fluxo contínuo capaz de bombear fluidos de perfuração gelificados.	Não pode haver pulsações no bombeamento do fluido.
	Tubulação longa o suficiente de modo a simular o reinício de escoamento de fluidos de perfuração de maneira semelhante às condições de campo.	O tamanho da tubulação é limitado pelo tamanho da bancada
	Acionamento de válvulas pneumáticas de bloqueio de fluxo pelo software <i>LabVIEW</i> .	Material em contato com o fluido de perfuração deve ser resistente à corrosão
Refrigeração	Sistema de refrigeração deve resfriar a câmara da temperatura ambiente até 4°C em menos de 1h.	Evaporador deve caber dentro da câmara de isolamento
	Deve haver uma circulação de ar adequada na câmara para possibilitar a homogeneização de temperaturas.	x
	Um sistema de coleta e remoção de condensados deve ser instalado para evitar a corrosão de componentes.	x
Elétrico e de Aquisição de Sinais	Transdutores de pressão para a medição de pressões de fluido na tubulação helicoidal, e termopares para a medição de temperaturas na câmara.	Transdutores de pressão não devem possuir uma faixa muito grande de medição muito além da pressão máxima da bomba. Material dos transdutores e dos outros componentes que entram em contato com o fluido de perfuração deve ser resistente à corrosão
Isolamento e Estrutural	A câmara de isolamento deve ser capaz de isolar termicamente os componentes dentro dela. A estrutura de tubos de aço deve sustentar o peso de todos os componentes da bancada.	A câmara de isolamento e a estrutura da bancada devem ser grandes e resistentes o suficiente para comportar a bomba, o reservatório de fluido, a serpentina e o evaporador.

A câmara de isolamento deve ter dimensões suficientes para comportar a bomba, a tubulação helicoidal, o evaporador do sistema de refrigeração e o reservatório de fluido de perfuração. As dimensões da câmara devem ser compatíveis com as dimensões do laboratório.

Fonte: Autoria própria

4.3 Fluido de trabalho para testes iniciais

Após definir os principais requisitos de projeto e as restrições, foi definido o principal fluido de trabalho para os testes iniciais de funcionamento da bancada. Fluidos de perfuração são compostos sintéticos com mistura de sólidos, líquidos, produtos químicos e até mesmo gases (Thomas, 2001). O comportamento de fluidos de perfuração é muito complexo, o que dificulta a realização de ensaios experimentais.

O comportamento dos fluidos de perfuração é dependente da pressão, taxa de cisalhamento e temperatura, e pequenas variações podem influenciar nas propriedades do fluido (Darley e Grey, 1988). Além disso, o histórico de cisalhamento também faz com que as propriedades reológicas do fluido sofram mudanças (Tehrani, 2008). O histórico de temperaturas também tem grande influência no comportamento reológico de fluidos de perfuração, como foi demonstrado em experimentos realizados por Annis (1967).

Fluidos de perfuração também são tixotrópicos, ou seja, sua viscosidade diminui com o passar do tempo, enquanto o fluido é submetido a uma tensão de cisalhamento constante, até atingir um valor de equilíbrio. Na ausência de tensões de cisalhamento, a viscosidade do fluido aumenta com o passar do tempo até o equilíbrio. Assim, quando há a interrupção de circulação do fluido na perfuração de um poço de petróleo, a viscosidade do fluido de perfuração aumenta com o tempo de parada, até o ponto em que o fluido está estruturado (gelificado). Logo, as propriedades do fluido dependem o tempo de repouso do fluido de perfuração em situações de parada de escoamento.

Outra dificuldade existente é que o fluido utilizado nos experimentos realizados por Leôncio (2011), o BRMUL-117, foi doado pela Petrobras, uma vez que o laboratório não possui condições de produzi-lo.

O aparato experimental é projetado para a realização de experimentos com fluidos de perfuração, principalmente o BRMUL-117, mas devido aos fatores discutidos no parágrafo anterior, inicialmente planeja-se usar uma solução de Carbopol 940 em água, com concentração de 0,1%. A solução de Carbopol é um fluido viscoplástico, mas não é tixotrópico. Portanto este fluido possui um comportamento reológico mais simples do que o BRMUL-117. Além disso, a solução de Carbopol 940 foi manufaturada com sucesso para uso em outros experimentos no CERNN. O processo de preparação da solução de Carbopol 940 no CERNN é detalhado no relatório de Quadros (2014).

4.4 Conceção inicial

Com os requisitos de projeto, restrições, e fluido de trabalho definidos, o conceito inicial do aparato experimental pode ser apresentado. O desenho, feito no programa *SolidWorks*, mostra o leiaute preliminar da câmara de térmica com os principais equipamentos instalados. A bancada proposta no presente trabalho consiste de uma tubulação de formato helicoidal posicionada horizontalmente em uma câmara térmica composta de paredes de poliestireno expandido revestidas por chapas de aço. Tubos industriais conectam a bomba, a serpentina e o reservatório. A câmara terá duas portas: uma para manutenção geral dos equipamentos no seu interior, e outra para realização de serviços mais simples, como inspeção dos componentes. A Figura 7 mostra o projeto conceitual da bancada.

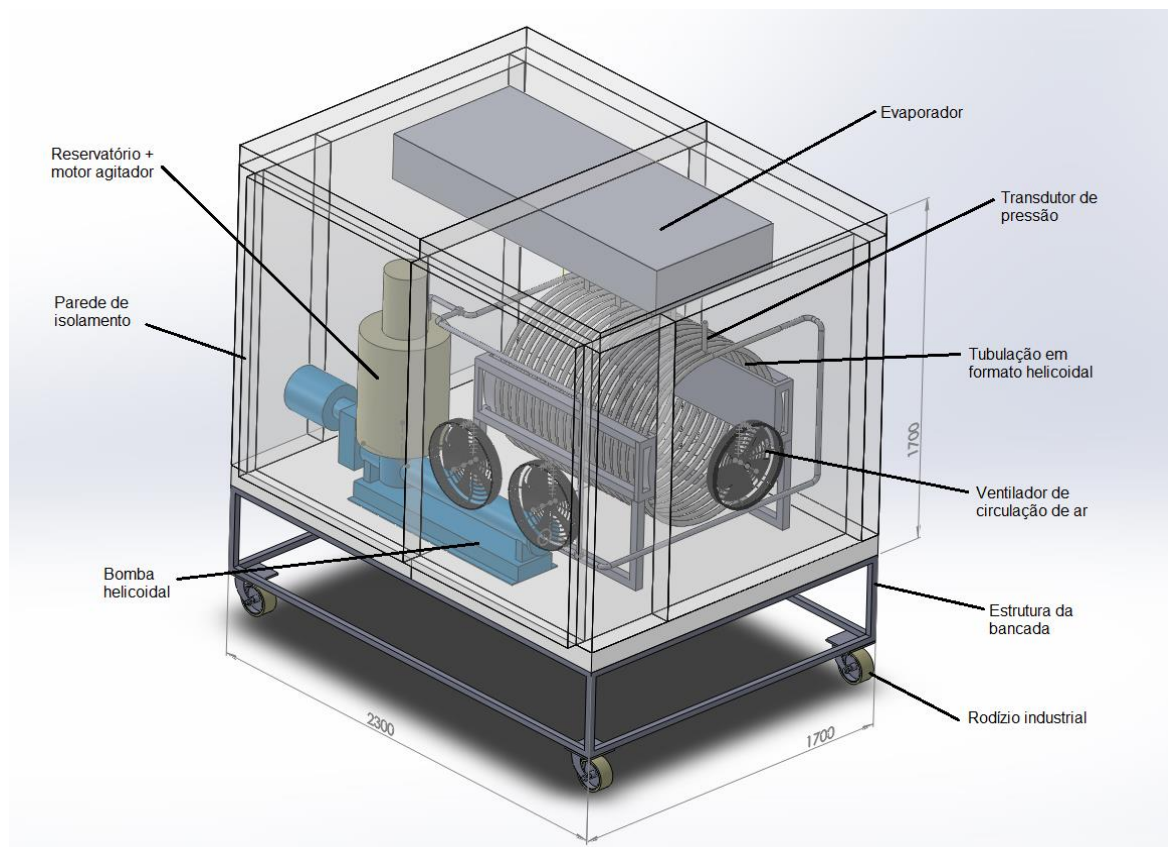


Figura 7. Projeto conceitual do aparato experimental

Fonte: Autoria própria

A tubulação helicoidal será posicionada horizontalmente no piso da câmara de isolamento, para que os transdutores operem na posição vertical (“em pé”). O benefício de tal posicionamento dos transdutores é detalhado na seção 5.6, na seção dos transdutores de pressão. O posicionamento horizontal da serpentina também libera espaço próximo à entrada de ar do evaporador, melhorando assim a circulação de ar na câmara.

Na Figura 7, observa-se que todo o sistema hidráulico é instalado dentro da câmara de isolamento. Assim, todo o procedimento experimental pode ser realizado a uma temperatura constante de aproximadamente 4°C. A influência da temperatura durante todo o procedimento experimental, desde o bombeamento e circulação do fluido até a etapa de repouso e gelificação, pode ser estudada. Além disso, é possível manter constante a temperatura de todo o sistema hidráulico, resultando no melhor controle dos ensaios experimentais. Com o objetivo de utilizar menos tubos

conectores, o reservatório de fluido é conectado diretamente à abertura de sucção da bomba.

O sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor utilizado é de um único estágio. O evaporador desse sistema está posicionado no teto da bancada, de modo a insuflar ar refrigerado diretamente para o sistema hidráulico. O compressor e o condensador são posicionados na parte externa do laboratório. Os painéis que contêm o sistema de controle e os inversores de frequência também são fixados em uma das paredes da bancada

A Figura 8 mostra um esquema do circuito principal da bancada, em verde, e também o circuito de recirculação, em vermelho. A recirculação é útil quando se deseja recircular fluido pela tubulação, enquanto ocorre a gelificação na serpentina com a entrada e saída fechadas. As principais válvulas de bloqueio de fluxo empregadas no circuito principal da bancada experimental são posicionadas na entrada e saída de tubulação helicoidal. Adicionalmente uma válvula de bloqueio de fluxo é usada na tubulação de recirculação. As válvulas são eletropneumáticas, ou seja, válvulas pneumáticas de acionamento eletrônico pelo sistema de controle da bancada. Após feito o projeto conceitual do aparato experimental, pode ser realizada a especificação dos principais equipamentos do aparato experimental.

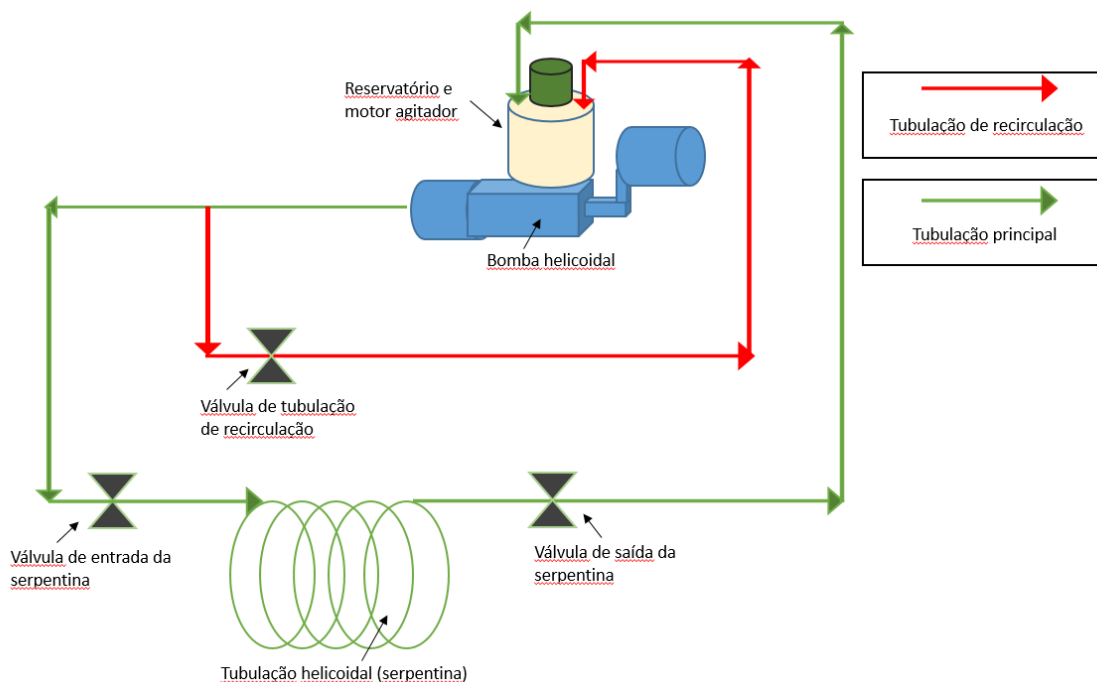


Figura 8. Circuito hidráulico da bancada esquematizado

Fonte: Autoria própria

4.5 Síntese do capítulo

O presente capítulo apresenta os principais requisitos de projeto necessários para o projeto do aparato experimental. As restrições inerentes ao projeto também foram evidenciadas. Com estas informações, o aparato experimental pôde ser concebido. A etapa seguinte foi a seleção dos principais equipamentos, que é mostrada no Capítulo 5. As restrições e requisitos de projeto também foram essenciais para a etapa de seleção de componentes, pois os principais equipamentos foram selecionados de forma a atender aos requisitos e restrições propostas.

5 ESPECIFICAÇÃO DE COMPONENTES E CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Após a concepção inicial do aparato experimental, os principais componentes do aparato experimental foram selecionados. A seguir estão listados, para cada componente, os critérios de seleção, cálculos necessários para o projeto e principais características.

5.1 Tubulação Helicoidal

A tubulação helicoidal projetada por Leôncio (2011) é a seção de testes da bancada, onde ocorre a gelificação do fluido de perfuração em repouso. Para que a bancada simule uma situação de reinício de escoamento semelhante às condições de perfuração nos mares, a tubulação deve ser longa. O longo comprimento da tubulação também permite que os efeitos da compressibilidade do fluido sejam avaliados. Além disso, o material da tubulação deve ser apropriado para experimentos com fluidos de perfuração, que possuem pH alcalino ou neutro.

Na etapa inicial de dimensionamento da tubulação da bancada anterior, um diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ " foi arbitrado por Leôncio (2011), com base em experimentos anteriores no laboratório. Segundo Telles (2001), a espessura da parede de uma tubulação depende da pressão de trabalho e da tensão de escoamento do material do tubo. As espessuras são padronizadas em séries em função dos parâmetros, chamadas de *Schedule Number* (Sch). O cálculo do *Schedule Number* está representado pela equação:

$$\text{Sch} = 1000 \frac{P}{S} \quad (5.1)$$

onde P é a pressão interna de trabalho e S é a tensão limite de escoamento do material da tubulação.

O material escolhido foi o aço inoxidável AISI 304 devido à sua resistência a oxidação. A tensão limite de escoamento do aço AISI 304 é 2050 bar. A pressão de trabalho foi calculada a partir de um balanço de forças no interior da tubulação. No uso da Equação 5.2, por motivos de simplificação, o formato helicoidal da tubulação foi desconsiderado.

$$\Delta P = \frac{4T_y L}{D} \quad (5.2)$$

onde L é o comprimento da tubulação, T_y é a tensão na parede da tubulação e D é o diâmetro. Vale notar que o diferencial de pressão ΔP da equação anterior equivale à pressão interna de trabalho P. A tensão limite de escoamento crítica do BRMUL-117 foi considerada por Leôncio (2011) como 850 Pa, e a pressão máxima de fluido foi calculada, utilizando a equação anterior, em 81,7 bar. Assim, a tubulação foi dimensionada a partir de um *Schedule Number* adequado para a pressão interna de fluido de 81,7 bar. O comprimento da tubulação de 50 m foi arbitrado por Leôncio (2011). Para se obter um espaçamento equivalente entre as espiras, um ângulo de 2° foi usado ao longo de toda a tubulação. Com um ângulo pequeno como o que foi usado, a tubulação foi construída com uma altura total de 1,152 m. A tubulação em formato helicoidal é mostrada na Figura 9.

Para o projeto do presente trabalho, foi decidido reaproveitar a tubulação helicoidal da bancada de Leôncio (2011). A serpentina foi projetada para resistir pressões de até 180 bar, que são muito maiores do que as pressões usuais dos experimentos que foram feitos com a bancada antiga. O tamanho da tubulação também atende aos requisitos de projeto e as restrições listadas no capítulo anterior. O material da tubulação, o aço inoxidável AISI 304, é ideal para experimentos em ambientes úmidos como uma câmara de isolamento resfriada e é resistente ao efeito abrasivo do BRMUL-117. A altura e o diâmetro da serpentina possuem dimensões adequadas para o tamanho da câmara de isolamento proposta. Para que a tubulação helicoidal pudesse ser posicionada na horizontal dentro da câmara de isolamento, foi fabricada na UTFPR uma estrutura de aço projetada para a serpentina utilizada. A serpentina é presa à estrutura por várias abraçadeiras de aço inox.



Figura 9. Tubulação helicoidal para experimentos

Fonte: Autoria própria

5.2 Bomba helicoidal

5.2.1 Considerações iniciais e seleção da bomba

Foi constatado anteriormente que a bomba selecionada por Leôncio (2011) para os experimentos de reinício de escoamento não era a ideal para os ensaios por conta das oscilações nas medições de pressão. Além disso, a bomba falhou após algum tempo de uso, e o uso da bancada foi descontinuado. Portanto, havia a necessidade de se escolher uma nova bomba para o aparato experimental do presente projeto.

Para que a nova bomba de fluido de perfuração fosse selecionada, foi necessário o conhecimento das dimensões da tubulação de escoamento do fluido. Além disso, é necessário que a pressão da bomba seja suficientemente grande para quebrar o gel do fluido de perfuração em repouso e reiniciar o escoamento. Essa situação de reinício de escoamento é a mais crítica pois, de acordo com a revisão bibliográfica, exige que a bomba exerça pressões mais elevadas em relação as pressões usuais de perfuração no fluido. Outros parâmetros foram retirados dos resultados dos

experimentos realizados com a bancada de Leôncio (2011), como a vazão (3 L/min) e picos de pressão (em média 5 bar).

Foi estipulado que a pressão máxima de operação da bomba deveria ser de 10 bar, por razões de segurança e também caso seja necessária a troca de fluido de teste. Os experimentos, realizados com o fluido BRMUL-117, são mostrados na Figura 5 e Figura 6. Além disso, temperaturas comuns no processo de perfuração podem chegar a até 4°C. Logo, de modo a simular tal condição, a bomba deverá ser capaz de bombear o fluido a 4°C. O limite máximo de operação da bomba foi estipulado em 50°C, de acordo com Leôncio (2011). O fluido BRMUL-117 é abrasivo, com um percentual de sólidos de aproximadamente 24%. Por fim, a bomba da bancada anterior falhou por conta do desgaste causado pelo fluido. Para prevenir falhas futuras, a bomba deve ser capaz de trabalhar com fluidos abrasivos.

É necessário, também, conhecer a tensão limite de escoamento (tensão de quebra de gel) para o fluido de testes iniciais. Com a pressão de quebra do gel obtida dos experimentos de Leôncio (2011) de aproximadamente 5 bar, é possível calcular a tensão na parede da tubulação necessária para o reinício do escoamento.

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{L} \left(\frac{R}{2} \right) \quad (5.3)$$

onde L é o comprimento da tubulação de 50 m, e R é o raio interno da tubulação, de 10,465 mm. A tensão de quebra de gel para as condições dos experimentos anteriores é, portanto, 52,33 Pa. Logo, o carbopol para testes iniciais, deve ser formulado para que possua uma tensão de quebra de gel próxima de 52 Pa.

Assim, foi selecionada uma bomba adequada para trabalho nas condições iniciais citadas. Como uma forma de melhorar a precisão das leituras, foi proposta a instalação de uma bomba helicoidal na nova bancada experimental. Bombas helicoidais são bombas de cavidade progressiva, onde a rotação de um rotor helicoidal empurra o fluido por várias cavidades, proporcionando um fluxo contínuo de fluido.

A bomba helicoidal, portanto, foi selecionada para atender os seguintes requisitos:

- Pressão média de pico: 10 bar, sendo a pressão mínima de pico $P_{\min} = 4$ bar, e a pressão máxima de pico (pressão máxima de operação da bomba) $P_{\max} = 16$ bar;
- Comprimento da tubulação: 50 metros;
- Diâmetro nominal da tubulação: $\frac{3}{4}$ ”;
- Vazão de fluido: 3 L/min; esta baixa vazão pode ser atingida controlando a rotação do motor utilizando um inversor de frequência
- Range de temperaturas entre 4°C e 50°C;
- Capacidade de trabalho com fluidos abrasivos e com alto teor de sólidos;

Com base nos requisitos mostrados anteriormente, a bomba helicoidal Netzsch Nemo BY de 2 estágios (Figura 10), com um motorreductor SEW NS 47, de 2,2 kW de potência, foi selecionada. A bomba possui pressão máxima de até 12 bar, o que a torna adequada para os experimentos de reinício de escoamento, com base nos dados iniciais. De acordo com a empresa, a bomba também é ideal para o trabalho com fluidos de perfuração, e também com fluidos de alto teor de sólidos. A faixa de temperaturas de trabalho é de -20°C a 180°C e o material da bomba é o aço inox AISI 304. Além disso, é possível instalar no motor um inversor de frequência de modo a controlar a rotação do rotor e, conseqüentemente, a vazão da bomba. Conclui-se assim que a bomba atende a todos os requisitos apresentados.



Figura 10. Bomba Netzsch Nemo BY de dois estágios

Fonte: Autoria própria

5.2.2 Operação e manutenção da bomba

Existem algumas precauções que devem ser tomadas ao operar a bomba helicoidal. A bomba nunca deve ser operada a seco, pois tal ação pode destruir o estator em um curto intervalo de tempo. Por causa disso, a bomba deve ser preenchida com o fluido a bombear, com o objetivo de lubrificar o estator. Pressões excessivas no interior da bomba podem causar deformação e danos aos componentes internos. Portanto, recomenda-se que a bomba não trabalhe contra uma válvula fechada. O programa de controle da bancada deve ter uma função de segurança para a rápida abertura de válvulas caso as pressões aumentem demais. Se o produto bombeado é capaz de endurecer, recomenda-se, após o desligamento da bomba, passar água por seu interior (Netzsch do Brasil, 2005).

O procedimento de manutenção geral da bomba é, regularmente, passar água por seu interior, de modo a limpá-la. Recomenda-se estabelecer períodos regulares de limpeza, dependendo do fluido que é bombeado e do tempo de uso (Netzsch do Brasil, 2005). No caso do bombeamento do BRMUL-117, a limpeza é muito importante, uma vez que o bombeamento frequente do fluido (que possui alto percentual de sólidos) foi a causa da falha da bomba antiga. Caso seja necessário, pode-se desmontar a bomba para realizar uma limpeza mais completa.

5.3 Reservatório de fluido

O reservatório de fluido de perfuração deve ser adequado para armazenar o BRMUL-117, fluido alcalino com alto percentual de sólidos. Além disso, o fluido de perfuração deve ser mantido sob mistura para evitar a gelificação. O volume de armazenagem do reservatório também é uma variável importante, uma vez que toda a serpentina deve ser preenchida por fluido de perfuração, e mais fluido do reservatório deve ser usado no reinício do escoamento, após a gelificação do fluido da serpentina. O volume da serpentina pode ser calculado por:

$$V = \pi r^2 L \quad (5.4)$$

onde r é o raio interno da tubulação, de 10,465 mm, e L é o comprimento, de 50 m. O volume calculado com estes dados é de 17,2 L. Assim, a quantidade de fluido restante no reservatório deve ser suficiente para ser bombeada e quebrar o gel formado na serpentina.

O tanque cilíndrico Quimplast para Preparação e Mistura da empresa Grabe, que foi selecionado por Leôncio (2011) para sua bancada, atende os requisitos apresentados acima. O tamanho de 50L, com raio de 410 mm e altura de 570 mm, que são dimensões adequadas para a instalação dentro da câmara de resfriamento da bancada. Além disso, o volume de fluido restante após o preenchimento da serpentina, 32,8 l, é equivalente a 1,9 vezes o volume total da serpentina. O volume do reservatório é, portanto, adequado para os experimentos de reinício de escoamento. O tanque é fabricado com chapas maciças de termoplásticos anticorrosivos, e são projetados para processos de agitação mecânica de misturas industriais como caldas minerais e salmouras. O fundo do reservatório é levemente cônico, possibilitando a drenagem total do fluido armazenado. O reservatório possui ainda uma tampa basculante para a realização de inspeções. A Figura 11 mostra o reservatório instalado no aparato experimental.

Como foi mostrado na Revisão Bibliográfica, fluidos de perfuração gelificam na ausência de tensões de cisalhamento. É indesejado que o fluido armazenado no reservatório gelifique, pois será bombeado para a tubulação helicoidal durante os experimentos. Portanto, um motor de 1 hp foi acoplado no topo do reservatório, que tem o objetivo de prevenir a gelificação do fluido, mantendo-o constantemente em movimento. A rotação do motor, e conseqüentemente a taxa de cisalhamento do fluido, é controlada por um inversor de frequência.



Figura 11. Reservatório de fluido de perfuração e motor agitador

Fonte: Autoria própria

5.4 Câmara de isolamento

A câmara térmica, mostrada na Figura 12 e Figura 13, deve isolar o ambiente interno da bancada, de modo que a temperatura de testes permaneça constante. O material escolhido foi o poliestireno expandido, por conta de seu baixo custo e boa capacidade de isolamento. Entretanto, esse material possui baixa resistência mecânica. Para resolver esse problema, os fabricantes vendem as placas desse material revestidas por chapas de aço. Nota-se que, na Figura 12 a estrutura é mostrada com rodízios industriais em sua base. Entretanto, foi decidido usar quatro amortecedores de vibração (Vibra-Stop), por resistirem a maiores cargas estáticas que os rodízios, e também para evitar que a bancada fosse deslocada acidentalmente. De modo a providenciar isolamento térmico adequado, as placas que serão usadas na câmara térmica terão espessura de 100 mm. Os valores da capacidade térmica e massa específica do isopor são (Incropera *et al*, 2008): $k = 0,04 \text{ W/mK}$; $\rho = 16 \text{ kg/m}^3$.

A área de transferência de calor foi calculada a partir do desenho do projeto conceitual da câmara: 1500 mm de altura, 1500 mm de largura e 2100 mm de comprimento, desconsiderando a largura de 100 mm das paredes. Isso resulta em uma área total de transferência de calor de aproximadamente 15 m². Essas dimensões elevadas são necessárias porque a bomba, o reservatório, a serpentina e o evaporador necessitam de espaço para a instalação na câmara de isolamento. Um benefício extra do tamanho da câmara é a melhor circulação de ar no interior da câmara. Para facilitar o processo de montagem, as placas foram compradas nas medidas especificadas pelo projeto conceitual. A câmara montada é mostrada na Figura 13. Para proporcionar maior resistência à câmara, foram usadas cantoneiras de aço de espessura de 1/8", e 8 chapas em formato de triângulo retângulo. As chapas foram instaladas nos cantos das aberturas das portas, parafusadas nas cantoneiras, como mostrado na Figura 14, aumentando significativamente a resistência mecânica da câmara.

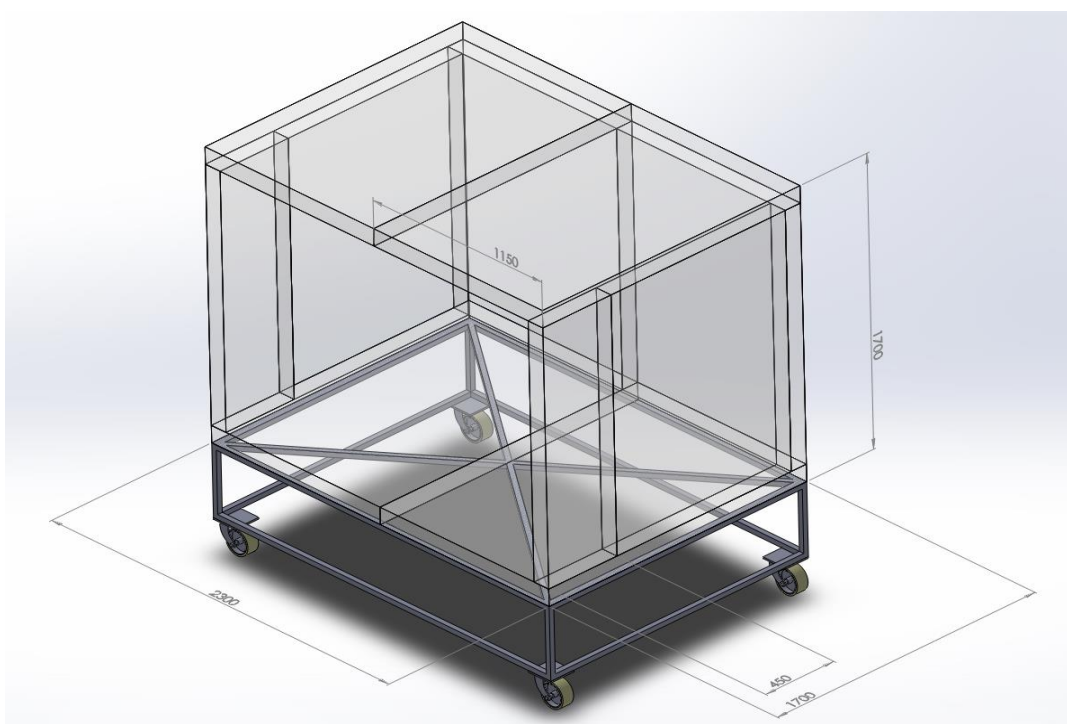


Figura 12. Projeto conceitual da câmara de isolamento e estrutura de suporte da bancada

Fonte: Autoria própria



Figura 13. Estrutura da câmara de isolamento

Fonte: Autoria própria

A bancada possui duas portas. Uma delas é fixada à bancada por um mecanismo de bagageiro de ônibus, mostrada na Figura 14. Essa porta é usada para serviços gerais como pequenas inspeções de componentes. Para serviços de manutenção mais complexos, que exijam que uma pessoa entre dentro da câmara, ou que seja necessário a retirada de componentes, há a porta secundária de manutenção, que é parafusada à estrutura metálica da câmara. Assim, a adição das duas portas faz com que a manutenção da bancada seja facilitada. O peso da câmara de isolamento e de todos os seus componentes é sustentado por uma estrutura de tubos de aço de 50 mm, com 2 mm de espessura, mostrada na Figura 15.



Figura 14. Estrutura da porta da câmara e cantoneiras de aço

Fonte: Autoria própria



Figura 15. Estrutura de tubos quadrados em construção

Fonte: Autoria própria

5.5 Sistema de refrigeração

O objetivo do sistema de refrigeração é diminuir a temperatura da câmara até um valor desejado e mantê-la constante. Conforme foi discutido anteriormente, deseja-se que o sistema de refrigeração diminua a temperatura da câmara da temperatura inicial de 30°C para 4°C em um tempo inferior a uma hora. Para atingir esse objetivo um sistema de refrigeração de um único estágio será usado. A Figura 16 mostra um esquema simplificado desse ciclo.

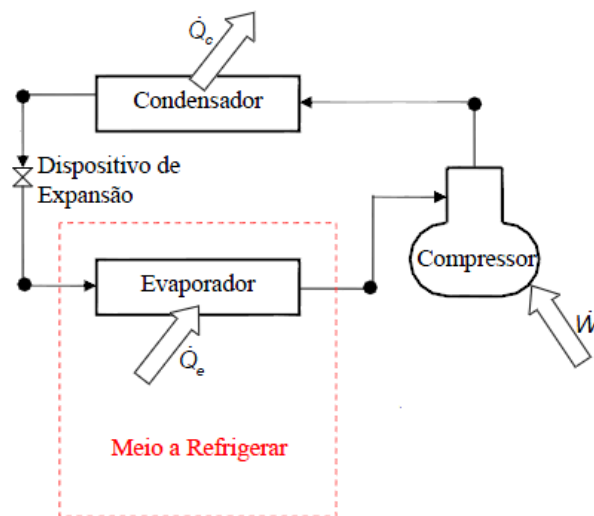


Figura 16. Esquema do sistema de refrigeração

Fonte: Autoria própria

Segundo Stoecker e Jones (1985), a carga térmica \dot{Q}_t , que é a quantidade de calor que deve ser retirada do sistema por unidade de tempo, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_t = UA\Delta T \quad (5.5)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área de transferência de calor, e ΔT é a diferença de temperaturas do ambiente externo e do interior da câmara, $T_\infty - T$.

O valor de U é, segundo Incropera *et al.* (2008), dado por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}} \quad (5.6)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, k é a condutividade térmica do poliestireno expandido e L é a espessura da parede. As propriedades são consideradas constantes. Por motivos de simplificação, os valores dos coeficientes de película dos ambientes interno e externo à câmara térmica foram arbitrados: $h_{\text{int}} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $h_{\text{ext}} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Incropera *et al*, 2008). O coeficiente de transferência de calor interno é maior devido à maior circulação de ar no interior da câmara. Assim, utilizando a equação 5.6, o valor de U foi calculado. Portanto, UA pode ser calculado multiplicado o valor de U pela área de transferência de calor calculada na seção anterior.

Para calcular o tempo de resfriamento, a capacidade de refrigeração \dot{Q}_e é mantida constante. A equação que calcula o tempo de resfriamento foi estabelecida por um balanço de energia no interior da câmara:

$$(\sum \rho V c) \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_t + \dot{Q}_{\text{equip}} - \dot{Q}_e \quad (5.7)$$

onde $\sum \rho V c$ é o somatório das capacidades térmicas dos principais componentes: serpentina, reservatório, bomba, motor, fluido de perfuração e paredes; c é o calor específico de cada componente, \dot{Q}_e é a capacidade de refrigeração do sistema, \dot{Q}_{equip} é a geração de calor dos equipamentos instalados dentro da câmara. A geração de calor é contabilizada apenas para o motor da bomba e do agitador; o valor dessa geração de calor foi adquirido dos catálogos dos fabricantes. A capacidade térmica do evaporador não é considerada. O balanço de energia no interior da câmara de isolamento é esquematizado na Figura 17.

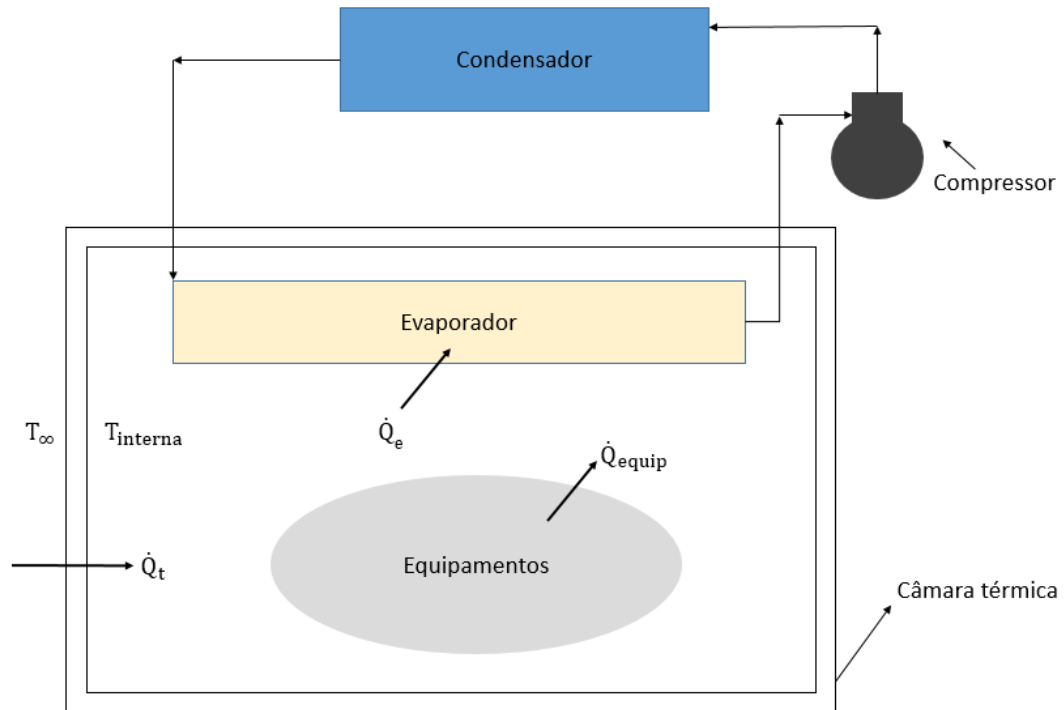


Figura 17. Balanço de energia na câmara de isolamento

Fonte: Autoria própria

No cálculo da capacidade térmica dos componentes, foi utilizada a equação básica da massa específica:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.8)$$

portanto:

$$\sum \rho V c = \sum m c = \sum C \quad (5.9)$$

Desse modo, as capacidades térmicas dos seguintes componentes mais significativos foram calculadas. Esses componentes são os seguintes: bomba, motor, 50 litros de fluido de perfuração (capacidade máxima do reservatório de fluido), reservatório de fluido, serpentina e paredes de isolamento. Assim, a capacidade térmica total do sistema é:

$$\sum \rho V c = C_{bomba} + C_{motor} + C_{fluido} + C_{reserv} + C_{serpentina} + C_{paredes} \quad (5.10)$$

Com o valor de C é possível resolver a equação 5.7 por integração. O intervalo de integração da temperatura inicia na temperatura inicial do ambiente e termina na temperatura final da câmara. Portanto, tem-se:

$$\int_0^t dt = \int_{T_\infty}^T \frac{CdT}{UA(T_\infty - T) + \dot{Q}_{equip} - \dot{Q}_e} \quad (5.11)$$

onde T_∞ é a temperatura do ambiente externo, e T é a temperatura do interior da câmara de isolamento. Resolvendo essa integral, tem-se a equação do tempo de resfriamento da câmara de isolamento.

$$t = \frac{C}{-UA} [\ln(UA(T_\infty - T) + \dot{Q}_{equip} - \dot{Q}_e)]_{T_\infty}^T \quad (5.12)$$

Com a Equação 5.12, foram determinados os tempos para a câmara resfriar de 32°C para 4°C em função dos valores de capacidade de refrigeração. A Figura 18 mostra o gráfico do tempo de resfriamento em horas, em função da capacidade de refrigeração em Watts.

Analisando a Figura 18, observa-se que são necessárias capacidades de refrigeração acima de 6450W, para que os tempos de resfriamento da câmara sejam inferiores a 1 hora. Com uma temperatura de evaporação de -5°C, suficiente para manter a temperatura da câmara em 4°C, e a capacidade de refrigeração, é possível selecionar um compressor apropriado para o sistema de refrigeração. Além disso, foi decidido que o fluido R-22 seria utilizado, pois a capacidade de refrigeração de sistemas que utilizam este gás é maior. O laboratório também possui R-22 disponível para uso.

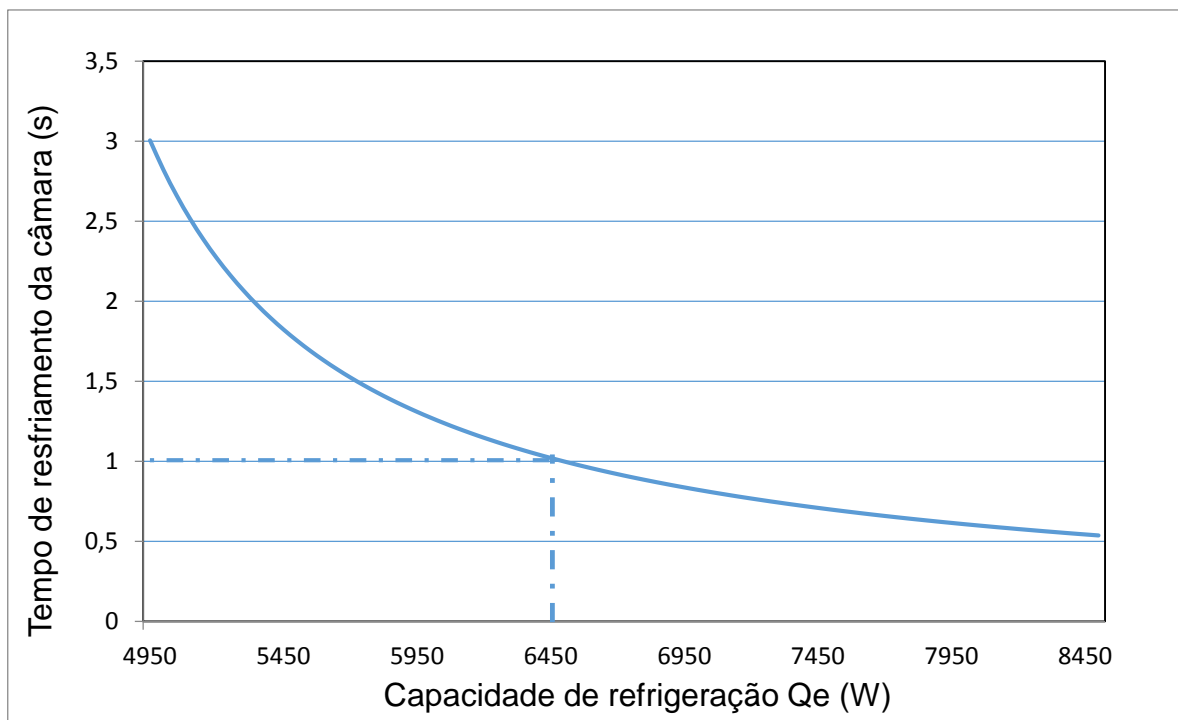


Figura 18. Capacidade de refrigeração em função do tempo de resfriamento da câmara

Fonte: Autoria própria

A empresa Danfoss disponibiliza o compressor e o condensador em um único equipamento, chamado de unidade condensadora. Esta unidade se mostrou favorável à aplicação no aparato experimental projetado devido à facilidade de instalação. Assim, a unidade condensadora HCM 40 da Danfoss, que utiliza o compressor MT40, foi selecionada. A capacidade de refrigeração especificada pelo catálogo desse equipamento é de aproximadamente 8200W, considerando uma temperatura de evaporação de -5°C e temperatura ambiente de 32°C . Adicionalmente, esse produto funciona com o fluido de refrigeração R-22. A velocidade do motor do compressor é controlada por um inversor de frequência, de modo que a capacidade de refrigeração, e conseqüentemente a taxa de resfriamento possa ser controlada. Portanto, a unidade condensadora atende a todos os requisitos propostos.

O evaporador DFTC54RDE, mostrado na Figura 19, da empresa Thermokey, foi selecionado por sua capacidade de refrigeração de 7700W a uma temperatura de evaporação de -5°C , que é próxima à da requerida pela unidade condensadora. As dimensões do equipamento, adquiridas do catálogo do fabricante, são adequadas

para a instalação na bancada. Por fim, esse evaporador também funciona com o fluido de refrigeração R-22. Portanto os requisitos de projeto são atendidos pelo evaporador selecionado.



Figura 19. Evaporador Thermokey DFTC54RDE

Fonte: Autoria própria

A válvula de expansão selecionada foi recomendada pelo fabricante do evaporador. A válvula que foi recomendada é a Danfoss TX2. A válvula TX2 realiza equalização interna de pressão, portanto é ideal para sistemas com baixo torque de partida.

No sistema de controle térmico necessita também de resistências de aquecimento, para manter a temperatura da câmara térmica constante. Não é recomendado que a câmara de isolamento possua um sistema de controle on-off similar ao de uma geladeira devido às oscilações indesejadas de temperatura do ciclo. Então, a potência das resistências deve vencer a potência do sistema de refrigeração para que a câmara possa ser aquecida. Foi decidido que as resistências mais adequadas para a instalação na câmara são as de mola, por causa do seu rápido tempo de aquecimento, baixo custo e facilidade de instalação. Portanto, foram adquiridas 12 resistências tipo mola de 1kW, gerando potência suficiente para aquecer

a câmara de isolamento. A estrutura que sustenta as resistências, manufaturada no CERNN, é mostrada na Figura 20.



Figura 20. Estrutura das resistências de aquecimento do tipo mola

Fonte: Autoria própria

Foi decidido que a unidade condensadora seja instalada fora do laboratório por motivos de conforto térmico e sonoro, e também por melhores condições para a troca de calor do condensador para o ambiente. Para tanto, foi construída uma estrutura metálica própria para suportar a unidade condensadora. Dessa maneira, a manutenção da unidade condensadora é facilitada devido ao maior espaço livre disponível. A unidade condensadora instalada é mostrada na Figura 21.

Sobre a manutenção do compressor, um fator importante é a limpeza do condensador. Uma boa limpeza é essencial para que a troca de calor com o ambiente seja eficiente, e o acúmulo excessivo de sujeira pode causar a falha do compressor. De acordo com a Danfoss, a limpeza do condensador deve ser realizada mensalmente, e a verificação da limpeza da unidade condensadora deve ser realizada regularmente. Outras tarefas de manutenção mensais incluem a inspeção geral da unidade, medição das temperaturas e pressões de alta e baixa, inspeção da

instalação elétrica e regulação dos relés térmicos. A troca de óleo do compressor deve ser feita anualmente.



Figura 21. Unidade condensadora do sistema de refrigeração da bancada

Fonte: Autoria própria

A falta de ventiladores no interior da câmara de resfriamento da bancada de Leôncio (2011) significava que havia diferenças de temperaturas em regiões diferentes da câmara. Para resolver esse problema a nova bancada necessita, também, de um conjunto de ventiladores no interior da câmara de resfriamento, de modo a promover uma circulação de ar adequada e conseqüentemente uma maior homogeneidade de temperaturas em seu interior. Com base no tamanho da câmara de isolamento, quatro ventiladores somados aos cinco presentes no evaporador atendem as necessidades de circulação de ar. Os ventiladores selecionados são de 350 mm de diâmetro, que fornecem potência de 200W. Estes serão posicionados nos quatro cantos da câmara para uma circulação de ar mais uniforme pela câmara.

5.6 Transdutores de pressão

5.6.1 Seleção dos transdutores

Os transdutores de pressão realizam as medições da pressão do fluido de perfuração durante o reinício do escoamento, e são instalados na tubulação em loop. Leôncio (2011) instalou transdutores HBM P3 Top Class para operação em até 200 bar em sua bancada. No entanto, foi constatado pelos resultados experimentais com a bancada antiga que os picos de pressão atingiam pressões próximas de 5 bar. Logo, não há necessidade de transdutores de pressão de grande faixa de medição. A partir dessa constatação, foram comprados novos transdutores de pressão para a nova bancada. A precisão dos novos transdutores foi o critério mais importante. Logo o limite de erro de 0,1% da faixa de pressão estipulado por Leôncio (2011) foi mantido. Também é importante que os erros de medição por variações de temperatura sejam pequenos. Por fim, constatou-se que o sensor do transdutor de pressão deve ser protegido por um diafragma, para que a leitura de pressão não seja afetada pelo fluido gelificado. Os transdutores estão instalados na posição vertical, com o diafragma na extremidade de baixo do transdutor, para que não ocorra a decantação de sólidos do fluido de perfuração no diafragma do transdutor.

A empresa WIKA do Brasil foi escolhida para fornecer o transdutor de pressão. Foi recomendado o modelo P-31, mostrado na Figura 22, que mede pressões relativas. Esse transdutor possui precisão de 0,05% sem erros adicionais no intervalo de temperatura entre 10°C e 60°C. Na faixa entre -20°C e 10°C o erro associado é de 0,1%. O material do equipamento é aço inoxidável AISI 316Ti. Também foi necessário encomendar um adaptador 1/2" BSP para cada transdutor, de modo que sejam instalados na tubulação de 3/4" da serpentina. O adaptador que foi enviado pela WIKA constitui de um cilindro de 50 mm de aço inox, com uma rosca interna de 1/2". Para encaixar esta adaptação na serpentina, foram fabricadas peças no laboratório de usinagem na UTFPR. As peças serão apresentadas com maiores detalhes na seção seguinte. Além disso, o transdutor possui um diafragma do tipo flush, ideal para a prevenção de entupimentos. O sensor dos transdutores é do tipo piezoelétrico. Quando uma pressão é aplicada a um cristal de quartzo, uma carga elétrica é produzida devido à deformação elástica. Essa carga é proporcional à pressão

aplicada, e dura apenas alguns segundos; por causa disso, ele não é ideal para a medição de pressões estáticas (Omega, 2014). Entretanto, transdutores de sensor piezoelétrico são ideais para mensurações dinâmicas, como é o caso dos picos de pressão no reinício de escoamento. O sinal de saída do transdutor é analógico, de 4 a 20 mA.

Foram solicitados quatro transdutores P-31: um deles com um range de 0 a 16 bar, dois com um range de 0 a 10 bar, e um deles com range de 0 a 6 bar. O transdutor de 16 bar será instalado logo após a bomba, porque o seu limite maior o torna ideal para medir os valores de pressão iniciais mais altos. Como a pressão máxima da bomba selecionada é de 12 bar, o primeiro transdutor possui uma faixa adequada de medição. Os transdutores de 10 bar serão instalados nas seções intermediárias da tubulação, logo após o primeiro transdutor. O transdutor de 6 bar será posicionado perto do final da tubulação, onde a magnitude das pressões é menor, devido a dissipação das ondas de pressão. O transdutor de pressão P-31 é mostrado na Figura 22.

Como os transdutores medem pressões relativas, há também a necessidade de medição da pressão atmosférica absoluta. Para isso, um transdutor de pressão absoluta relativamente simples foi recomendado pela WIKA – o modelo S-10, mostrado na Figura 23. Este transdutor foi instalado dentro de uma caixa de comando, do lado de fora da bancada, para que as medições sejam realizadas a temperatura ambiente. O intervalo de pressão do transdutor S-10 é de 0 a 1 bar. O material desse transdutor é o mesmo aço inoxidável do transdutor P-31. De acordo com o fabricante, não é necessária a manutenção preventiva do produto, e reparos devem ser feitos apenas pelo fabricante. A limpeza dos transdutores não deve ser feita com objetos rígidos ou pontiagudos, para não danificar o diafragma.

quatro adaptadores, um para cada transdutor de pressão da tubulação. Os adaptadores são descritos a seguir.

A adaptação principal é um cilindro de bronze para encaixe direto na tubulação. O cilindro de bronze possui uma cavidade para um anel de vedação em uma superfície, para encaixe na adaptação fabricada pela WIKA descrita anteriormente; na outra superfície o cilindro possui uma cavidade côncava de raio 3/4", para que seja encaixado com precisão na serpentina. Estas duas adaptações cilíndricas são fixadas na serpentina por um par de flanges, presos por quatro barras roscadas. Os flanges foram fabricados em aço carbono com o objetivo de diminuir os custos. Os flanges de aço foram pintados para prevenir a oxidação. Por fim, a tubulação helicoidal foi furada em quatro pontos de tomada de pressão distanciados igualmente, para que as quatro adaptações pudessem ser instaladas. A Figura 24 mostra um dos quatro adaptadores fabricados.



Figura 24. Adaptador para encaixe de transdutor de pressão

Fonte: Autoria própria

5.7 Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados é o processo de medição de um fenômeno físico ou elétrico com o auxílio de um computador (National Instruments, 2014). O sistema de aquisição de dados da bancada é composto por placas de aquisição de dados, um computador, termopares para controle de temperatura da câmara de isolamento, transdutores de pressão que serão usados para medir a pressão do fluido na tubulação, e um *software* apropriado para a coleta dos dados de temperatura e pressão. Um sistema de aquisição de dados consiste basicamente de sensores, um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) com conversor analógico-digital (ADC) e um computador com *softwares* apropriados. Um sensor é um dispositivo que converte uma propriedade física em um sinal elétrico mensurável. A saída elétrica pode ser de corrente, tensão, ou outro sinal elétrico que varie com o tempo (National Instruments, 2014)

O dispositivo de aquisição de dados converte os sinais analógicos dos sensores em sinais digitais, de modo que possam ser interpretados pelo computador. O dispositivo DAQ possui três circuitos eletrônicos principais: condicionamento de sinais, o ADC e o barramento do computador. Sinais dos sensores podem ser ruidosos ou inadequados para a conversão para sinais digitais. Logo, há o circuito condicionador de sinais cuja função é adequar o sinal para a entrada no ADC. Dentre os métodos de condicionamento de sinal estão a amplificação, a atenuação e filtragem, por exemplo.

Após o condicionamento, o sinal analógico pode ser convertido em sinal digital pelo ADC, para que possa ser manipulado pelo computador. O ADC é um circuito elétrico que fornece a representação digital de um sinal analógico em um instante de tempo, por meio de coleta de amostras periódicas em uma taxa pré-definida (National Instruments, 2014). Essas amostras de sinal digital são transferidas para o computador através de um barramento. O barramento é, portanto, a interface de comunicação entre o dispositivo DAQ e o computador. Barramentos comuns em produtos eletrônicos atuais incluem o USB, o *PCI-Express*, *Wi-fi* padrão e o cabo *Ethernet* (cabo de rede).

Um computador controla o dispositivo DAQ com um *software* apropriado para o processamento, visualização e armazenagem dos dados das medições dos sensores.

Como a bancada será usada em um laboratório, o computador mais apropriado é um *desktop*, pelo seu maior poder de processamento e facilidade de manutenção. Há, também, a necessidade de um *driver*, que é um programa que realiza a comunicação entre o DAQ e o computador. A Figura 25 mostra um fluxograma do sistema de aquisição de dados (NI).



Figura 25. Sistema de aquisição de dados

Fonte: National Instruments (2014)

O tipo de sistema escolhido para instalação na bancada foi o NI Compact DAQ. Um sistema Compact DAQ é composto de um chassi, de módulos de entrada e saída, e de um computador controlador conectado ao chassi por USB, cabo *Ethernet* ou *Wi-fi* padrão. No caso da bancada, o computador é ligado ao sistema de aquisição de dados por um cabo USB da National Instruments. Um chassi pode executar várias operações de entrada e saída de dados simultaneamente. Os módulos são projetados para um tipo de medição (elétrica, tensão, entre outros). Em um módulo estão inclusos os sistemas de condicionamento de sinais, de conversão de sinais e de barramento, em um único aparelho (National Instruments, 2014). Sistemas do tipo NI Compact DAQ possuem a vantagem de ser modulares. É possível instalar vários módulos de medição, como temperatura e pressão, de maneira integrada em um mesmo aparelho. Por causa disso, a programação é facilitada, pois o mesmo *driver* é usado em todas as medições, e essa solução também necessita de menor espaço físico. O material utilizado na construção dos equipamentos NI Compact DAQ é alumínio fundido A380, provendo alta resistência a choques, o que é ideal para uso em laboratório (National Instruments, 2014).

5.7.1 Seleção dos componentes

O software de controle escolhido foi o *LabVIEW*, feito pela National Instruments. O *LabVIEW* é uma plataforma de programação gráfica ideal para sistemas de medição de pequeno e grande porte, permitindo o controle de vários instrumentos laboratoriais e a visualização e armazenagem de dados medidos. Portanto, toda a bancada será controlada pelo *LabVIEW*, que possibilita envio de sinais de saída para os inversores de frequência, para os termostatos do evaporador, e para as válvulas do sistema hidráulico.

O chassi a ser utilizado é o modelo NI cDAQ-9174 Compact DAQ (4-slot USB), mostrado na Figura 26. A conexão ao computador é feita por USB, e sua alimentação é padrão de 120V. Há também 4 slots que permitem a instalação de quatro placas do tipo NI Compact DAQ da National Instruments.



Figura 26. Chassi NI cDAQ-9174

Fonte: Autoria própria

O módulo de entrada selecionado foi o modelo NI 9203 (Figura 27), necessário para a coleta do sinal de corrente dos transdutores de pressão. O equipamento possui

oito entradas analógicas. As faixas de entrada programáveis são de ± 20 mA, ou de 0 a 20 mA, e a resolução é de 16 bits. O módulo também possui aterramento de isolamento de até 250 Vrms. A taxa de amostragem da placa NI 9203 é de até 200 kS/s (*samples per second* – amostras por segundo). A Figura 28 mostra os itens necessários para sistemas NI CompactDAQ. Para as quatro placas CompactDAQ mostradas a seguir, são necessários o terminal de conexão usado para organizar os cabos, o chassi, o controlador (computador) e o *software* (*LabVIEW*).



Figura 27. Exemplo de módulo (placa) NI CompactDAQ

Fonte: National Instruments (2014)



Figura 28. Acessórios para sistemas NI CompactDAQ

Fonte: National Instruments (2014)

O módulo de saída escolhido foi o modelo NI 9265, que será usado para o envio de sinal analógico para os inversores de frequência do compressor, motor agitador e da bomba, através do controle pelo *LabVIEW*. A placa possui 4 canais de saída

analógica com resolução de 16 bits e intervalo de corrente de saída de 0 a 20 mA. Ambas as placas de aquisição de sinais apresentadas são compatíveis com sistemas NI Compact DAQ. É necessário o terminal de conexão, que já havia sido adquirido para a bancada anterior, o chassi, o controlador (computador) e o software (*LabVIEW*).

O sistema de aquisição de sinais necessita de uma fonte de alimentação apropriada. Para tanto, escolheu-se a fonte da National Instruments NI PS-15. De acordo com o fabricante, a eficiência dessa fonte chega a até 90%. A fonte possui uma seleção automática de voltagens de entrada (115 Vca/ 230 Vca), e proporciona uma voltagem de saída de 24 Vcc, corrente de saída de 5 A e potência de saída de 120 W. Além disso, é recomendado pela National Instruments o uso do aliviador de tensões NI 9927 para o módulo de entrada selecionado, de modo a proteger o operador de sinais de alta tensão. Portanto, esse componente também foi adquirido.

O módulo de entrada analógica para aquisição de termopares é o modelo NI 9213 que havia sido previamente usado na bancada de Leôncio (2011). O modelo é um módulo de entrada específico para termopares, com 16 entradas analógicas, e taxa de amostragem de 75 S/s. A faixa de temperaturas de operação é de -40 a 70°C.

O módulo de saída digital NI 9474, que também havia sido adquirido para a bancada de Leôncio (2011), é usado no controle das válvulas de solenóide e dos inversores de frequência. O módulo de saída possui 8 canais, e cada canal possui saída de 5 a 30. Os 8 canais são suficientes para envio de sinal digital para os três inversores de frequência (compressor, motor da bomba e motor agitador), e também para as três válvulas do sistema hidráulico (bloqueio de fluxo da bomba para o reservatório, bloqueio de fluxo no final da tubulação helicoidal, e bloqueio de fluxo da bomba para a tubulação helicoidal) resultando no total de 6 canais utilizados, dos 8 canais disponíveis. A faixa de temperaturas de operação é de -40 a 70°C. A Figura 29 mostra todas as placas de aquisição que serão usadas na bancada montadas no chassi.



Figura 29. Chassi e as quatro placas NI CompactDAQ de aquisição de dados

Fonte: Autoria própria

5.8 Válvulas pneumáticas para bloqueio de fluxo

Segundo Reis (2002) válvulas são comumente classificadas segundo seu emprego, sendo divididas em válvulas de bloqueio, de retenção, de regulação de fluxo e de controle de pressão. Na bancada serão instaladas válvulas solenoide com atuador pneumático, com o objetivo de controlar o fluxo de fluido de teste. Em uma válvula solenoide, quando uma corrente elétrica passa pelo fio da bobina, uma força é gerada em seu centro, fazendo com que a válvula sob pressão seja aberta ou fechada. O sistema de controle do LabVIEW envia sinais digitais para as válvulas, através do módulo de saída digital mencionado anteriormente. Desse modo, a operação das válvulas pode ser automatizada. Com a automatização do conjunto de válvulas, espera-se que ocorra uma melhoria na repetibilidade dos ensaios experimentais da bancada, comparando com os resultados dos experimentos de Leôncio (2011).

São usadas três válvulas eletropneumáticas. A cada válvula eletropneumática é constituída por uma válvula esfera de aço inox com diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ ", uma válvula solenoide e um atuador pneumático de alumínio anodizado. O fluido entra em contato somente com as válvulas esfera, que são ligadas à tubulação da bancada experimental. A abertura e fechamento da válvula esfera é feita pelo atuador pneumático, que por sua vez é acionado pela válvula solenoide. O controle da válvula solenoide é feito pelo controle elétrico da bancada, ligado ao *LabVIEW*. As válvulas de entrada e saída da tubulação helicoidal são mostradas na Figura 30.

O critério de seleção das válvulas foi a pressão de trabalho e o diâmetro da tubulação. A pressão de trabalho das válvulas é de 2 a 10 bar, o que é um range adequado para as pressões de trabalho dos experimentos, de acordo com o que foi discutido na revisão bibliográfica. Uma válvula é posicionada logo na entrada da tubulação helicoidal. A segunda válvula está instalada na saída da mesma tubulação, enquanto que a última válvula está instalada na tubulação de alívio de pressão da bomba, que é ligada ao reservatório. A Figura 8, mostrada na seção 4.4, Figura 30 representa a configuração de válvulas usada na bancada.



Figura 30. Válvulas eletropneumáticas usadas na bancada

Fonte: Autoria própria

5.9 Termopares

Termopares são sensores usados para medir temperaturas, que são constituídos de dois metais distintos, unidos pelas extremidades. Cada valor de temperatura resulta em um valor de tensão específico (Omega, 2014b). De acordo com Omega (2014b), existem quatro critérios para a seleção de um termopar:

- Intervalo de temperatura
- Resistência química do termopar ou material da bainha
- Resistência à abrasão e vibração
- Requisitos para instalação

O intervalo de temperatura especificado para as leituras de temperatura na bancada é de -10 a 60°C. Logo, deve-se escolher um termopar adequado para esse intervalo. Os termopares também devem ser fixados à tubulação helicoidal para que a leitura de temperatura do fluido possa ser feita. Por causa disso um termopar com revestimento autoadesivo deve ser selecionado. Não há vibração na superfície em contato com o termopar, e não há material corrosivo ou abrasivo em contato com o sensor. Por fim, o tempo de resposta do termopar deve ser adequado para o cálculo da taxa de resfriamento da temperatura inicial até a temperatura desejada.

Com base nos requisitos citados, foi escolhido o modelo SA1-T-120, da empresa Omega. Termopares de tipo T são adequados para câmaras refrigeradas devido ao seu grande intervalo de temperaturas. O intervalo de medição do termopar selecionado é de -250 a 300°C, o limite padrão de erro é de 0,75% da faixa de temperaturas e o tempo de resposta é de 0,3 segundos. O sinal elétrico de saída dos termopares é analógico.

5.10 Síntese do capítulo e testes de funcionamento da bancada

O Capítulo 5 apresenta a seleção dos principais componentes do aparato experimental projetado. Após a aquisição dos componentes, a construção do aparato experimental foi iniciada. Entretanto, o processo de compra de materiais na universidade é extremamente burocrático, e resultou em vários atrasos na compra de componentes. Além disso, a aquisição dos bens após a compra também causou

atrasos no processo, pois para retirar os produtos de fornecedores afastados da universidade é preciso reservar um veículo oficial com um dia útil de antecedência.

Como o CERNN não possui instalações próprias para a fabricação de componentes, como por exemplo um laboratório de usinagem, as instalações da própria UTFPR foram utilizadas. Os responsáveis pelos laboratórios de soldagem e usinagem não estavam presentes durante alguns dias, o que causou atrasos na manufatura de alguns componentes. Entretanto, a bancada pôde ser completada, e testes de funcionamento dos componentes foram realizados.

A bomba foi ligada e água foi bombeada pela tubulação helicoidal. Enquanto a água era bombeada, o sistema de aquisição de dados foi ligado de modo a medir as pressões e a temperatura ambiente. A tubulação helicoidal reaproveitada da bancada de Leôncio (2011) estava preenchida por fluido de perfuração dos ensaios anteriores que precisava ser retirado. Para que o fluido de perfuração fosse expulso da tubulação, o reservatório foi preenchido com água, que foi bombeada para a tubulação helicoidal. O bombeamento permitiu que o fluido de perfuração gelificado fosse empurrado pela água, para fora da tubulação helicoidal. As pressões no processo de limpeza da tubulação foram medidas. As medições de pressão são mostradas na Figura 31. Nota-se que, como o fluido de perfuração estava gelificado, ocorreu um pico de pressão inicial para que o escoamento fosse iniciado. A magnitude do maior pico de pressão, na região da tubulação onde havia uma maior quantidade de fluido gelificado, está de acordo com os resultados dos ensaios experimentais realizados com a bancada de Leôncio (2011), com medida próxima de 4 bar. Durante os testes de escoamento, o motor agitador foi ligado e o seu funcionamento foi verificado. A abertura e fechamento das válvulas eletropneumáticas também foi testada com sucesso.

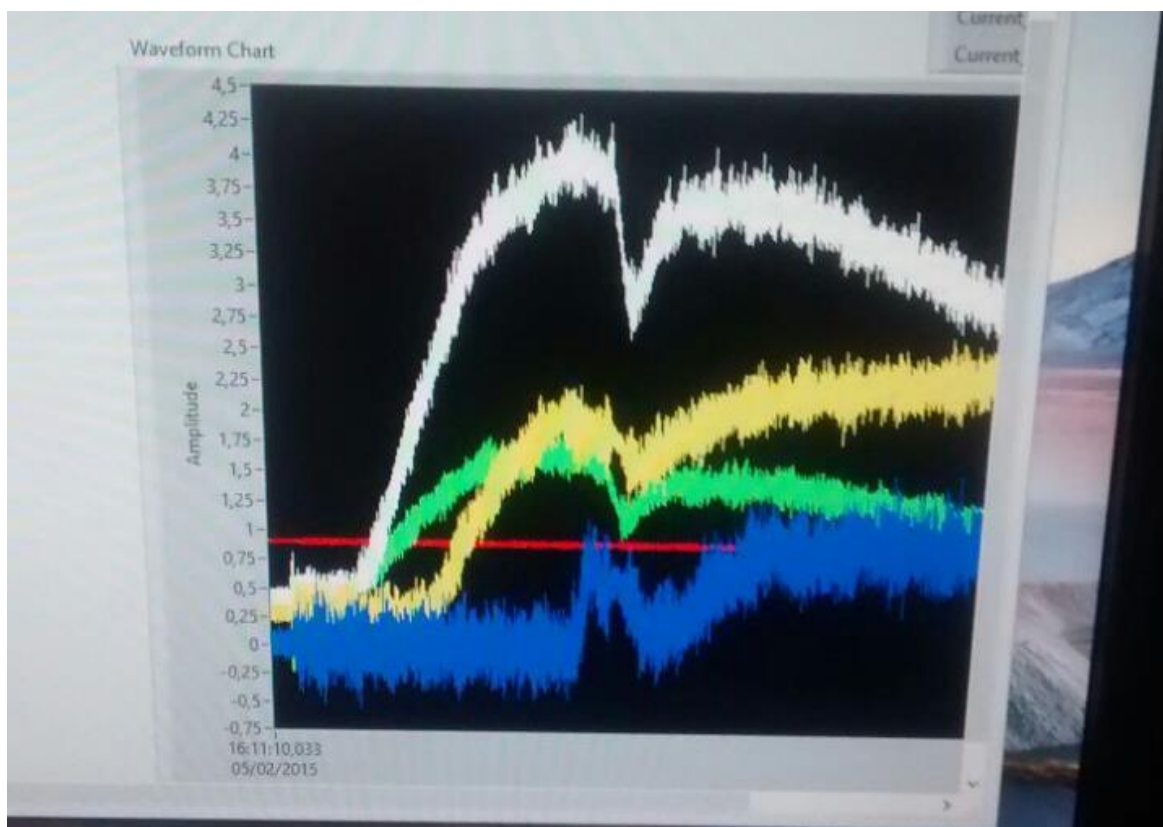


Figura 31. Medições de pressão nos testes de funcionamento da bomba

Fonte: Autoria Própria

Foram realizados testes para o sistema de refrigeração, com a câmara inicialmente a temperatura ambiente. A temperatura final de escolha foi de 0°C. Esta temperatura foi selecionada no programa, e foi medido o tempo médio para que a câmara térmica fosse resfriada da temperatura ambiente para 0°C, incluindo o tempo de estabilização para todos os termopares a esta temperatura. A medição da temperatura pelos termopares, que indicavam temperaturas próximas à 0°C, foi considerada adequada. É importante notar que o termopar marcando 1,5°C foi posicionado dentro do reservatório de fluido, então naturalmente a sua temperatura é maior que a dos demais termopares, que foram instalados na parede exterior da tubulação helicoidal. Após o resfriamento, o funcionamento das resistências de aquecimento foi testado. A temperatura final foi selecionada para 30°C, e o tempo para aquecer a câmara térmica de uma temperatura inicial de 0°C até a estabilização na temperatura final em 30°C foi medido. O tempo de resfriamento da câmara foi de aproximadamente 40 minutos, enquanto que o aquecimento foi de 45 minutos. Este

tempo menor de resfriamento é devido ao fato que a câmara estava em uma temperatura ambiente inicial de aproximadamente 25°C. Foi constatado, portanto, que as resistências de aquecimento e o sistema de refrigeração funcionam corretamente.

Como a construção da bancada está completa, os experimentos iniciais foram planejados. O planejamento está detalhado no Capítulo 6. A Figura 32 mostra o aparato experimental construído. Para que a parte interior do aparato pudesse ser mostrada, as portas foram temporariamente retiradas da estrutura. Na Tabela 1 é mostrada a síntese de projeto do aparato experimental. Os principais equipamentos selecionados estão presentes na tabela.



Figura 32. Aparato experimental

Fonte: Autoria própria

Tabela 1. Síntese do Projeto

SISTEMA	EQUIPAMENTO	NOME	DESCRIÇÃO
Sistema Hidráulico	Bomba	Netzsch Nemo BY	Bomba helicoidal capaz de bombear fluidos de perfuração. Pressão máxima de 12 bar.
	Tubulações	Tubulação Helicoidal	Tubulação de aço inox onde ocorrem as medições de pressão do reinício do escoamento de fluidos de perfuração.
		Tubos de CPVC Industrial	Tubulação de CPVC capaz de resistir até 5 MPa de pressão a temperatura ambiente.
	Válvulas Eletropneumáticas	x	Válvulas esfera de inox, com atuador pneumático acionado por solenoide
	Reservatório	Reservatório Grabe 50L	Reservatório de armazenagem de fluido de perfuração. Feito com chapas de termoplásticos anticorrosivos, garantindo boa resistência contra os efeitos abrasivos do fluido de perfuração. Possui um motor agitador para manter o fluido de perfuração em movimento.
Sistema de Refrigeração e Aquecimento	Unidade Condensadora	Unidade Danfoss HCM 40	Equipamento com condensador e compressor, de modo a facilitar a instalação. Compressor de alta capacidade (8100 W a -5°C)
	Evaporador	Thermokey DFTC54RDE	Evaporador de alta capacidade (7700 W a -5°C) com degelo elétrico.
	Resistências Elétricas	Resistências tipo mola	12 Resistências de baixa inércia térmica, de 1 kW cada.
Sistema Elétrico	Painel Elétrico	x	Painel com o circuito elétrico que controla toda a bancada.

	Transdutores de Pressão	Transdutores WIKA com membrana	Quatro transdutores de pressão relativa com membrana, com corpo de aço inox. Transdutor 1: 0 a 16 bar; transdutores 2 e 3: 0 a 10 bar; transdutor 4: 0 a 6 bar. Há também um transdutor para a medição de pressão atmosférica.
	Sistema de Aquisição de Dados	Entrada Analógica NI 9203	Entrada analógica para sinal dos transdutores de pressão.
		Saída Analógica NI 9265	Saída analógica para o controle da bomba, rotação do compressor do sistema de refrigeração, rotação do motor agitador e potência das resistências.
		Entrada Analógica NI 9213	Entrada analógica para sinal dos termopares.
		Saída Digital NI 9474	Saída digital para o acionamento dos inversores de frequência e válvulas.
Sistema Estrutural	Placas de Poliestireno Expandido	x	Placas que garantem a resistência mecânica e isolamento térmico da câmara térmica.
	Estrutura de Aço	x	Sustentam toda a estrutura da câmara térmica e equipamentos nela contidos.

Fonte: Autoria Própria

6 PROCEDIMENTOS DE FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL E TESTES INICIAIS

Após concluir a construção do aparato experimental, deve-se primeiramente verificar o funcionamento de todos os equipamentos. A operação das válvulas de bloqueio de fluxo deve ser verificada e é necessário inspecionar o funcionamento da bomba, do motor do reservatório de fluido, das resistências de aquecimento, dos ventiladores de circulação de ar e da bomba de dreno de condensados. Em seguida, as portas frontal e traseira (porta de manutenção) devem ser fechadas e travadas para melhor vedação, e o sistema de refrigeração deve ser acionado. Observado o decréscimo de temperaturas esperado, os testes iniciais podem ser realizados.

6.1 Funcionamento do sistema hidráulico

O primeiro teste que deve ser realizado é de funcionamento do sistema hidráulico. O fluido de trabalho dos testes de funcionamento dos componentes será a água. Somente após confirmado o funcionamento de todos os sistemas do aparato experimental é que a solução de Carbopol será manufaturada e usada. O esquema do circuito hidráulico mostrado na Figura 8, na seção 4.4, serve como guia para todos os procedimentos descritos a seguir.

Inicialmente deve-se encher o reservatório de fluido com água a temperatura ambiente. Em seguida, a tampa do reservatório é fechada, as válvulas de entrada e saída da serpentina são abertas e a válvula do circuito de recirculação é fechada. O próximo passo é selecionar uma rotação desejada para a bomba. A bomba então começa a bombear água pelo circuito da serpentina. Enquanto o fluido é circulado, deve-se inspecionar a tubulação para que possíveis vazamentos possam ser identificados. Após a circulação durante um intervalo de tempo desejado, o funcionamento da bomba deve ser interrompido. O mesmo procedimento deve ser feito na tubulação de recirculação, com as válvulas de entrada e saída da serpentina fechadas e a válvula de recirculação aberta.

6.2 Medição da vazão da bomba

Um teste que deve ser realizado é a medição da vazão da bomba, de modo a garantir a não oscilação das vazões durante os experimentos futuros. O primeiro passo do experimento envolve, novamente, a introdução de água no reservatório de

fluido. Após esta etapa, seleciona-se uma rotação desejada para a bomba, no controlador do inversor de frequência. O fluido bombeado deve ser coletado em uma proveta graduada no caso de baixas vazões, ou em um balde graduado, no caso de vazões maiores, até um determinado volume de escolha. Simultaneamente à coleta de fluido, o tempo de preenchimento do volume estabelecido da proveta ou do balde deve ser medido com o auxílio de um cronômetro. É importante notar que a bomba não deve estar conectada ao circuito hidráulico da bancada neste caso, para que a coleta de água pode ser feita. Desta maneira, a vazão em função de uma determinada rotação pode ser calculada. A vazão medida deve ser comparada com a vazão imposta na bomba. A comparação pode ser feita com a curva de vazão da bomba após a compra de um medidor de vazões. Por fim, desvio percentual entre as vazões medida e imposta pode ser apresentado, e dessa maneira, a repetibilidade da operação da bomba pode ser verificada.

6.3 Verificação da medição de pressões do primeiro e último transdutor

Após verificados os erros de desvio de vazão, testes com vazão constante devem ser realizados para verificar a perda de carga na tubulação em regime permanente. A etapa inicial do procedimento é introduzir um volume desejado de água ao reservatório. Em seguida, deve selecionar uma vazão conhecida (por exemplo, uma vazão medida com o experimento anterior) para a bomba, para que esta bombeie a água pela tubulação. As válvulas da entrada e saída da serpentina devem permanecer abertas, enquanto que a válvula do circuito de recirculação deve permanecer fechada. A água deve circular pela tubulação, e após atingido o regime permanente, são anotadas as medidas de pressão do primeiro e do último transdutor. A diferença entre as duas medições corresponde à perda de carga da tubulação helicoidal. É recomendado pela literatura que, para uma mesma vazão, os testes sejam repetidos por no mínimo três vezes. Em seguida, outra vazão da bomba deve ser selecionada, e o teste deve ser repetido. A perda de carga na tubulação helicoidal pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{128.Q.\mu.L}{D^4.\pi} \quad (6.1)$$

onde D é o diâmetro interno da tubulação, Q é a vazão volumétrica, μ é a viscosidade dinâmica e L é o comprimento da tubulação. Por fim, calcula-se o desvio percentual entre a perda de carga medida e a calculada.

6.4 Passo a passo do procedimento experimental

Feitas as verificações iniciais do aparato experimental, é possível a realização de testes preliminares. Como foi mencionado anteriormente, durante os testes iniciais o fluido usado será uma solução de Carbopol 940. Após a preparação do Carbopol, com base no relatório de Quadros (2014), o reservatório deve ser preenchido integralmente (50 L), com a solução a 30°C – esta temperatura pode ser atingida aquecendo a câmara térmica até 30°C utilizando as resistências de aquecimento. Em seguida, seleciona-se uma rotação constante para o motor do reservatório, que deve misturar a solução de Carbopol 940 durante 30 minutos a 30°C. Transcorridos os 30 minutos, a rotação da bomba deve ser selecionada pelo controlador do inversor de frequência. Após o início do bombeamento do Carbopol, o sistema de refrigeração deve ser ligado para que a temperatura da câmara seja diminuída para 4°C. Em seguida, é feito o resfriamento do fluido, que pode ocorrer com cisalhamento ou sem cisalhamento.

No caso do resfriamento com cisalhamento, o fluido deve ser circulado pela tubulação principal enquanto resfriado (em verde na Figura 8). Portanto as válvulas de entrada e saída da serpentina devem estar abertas. Após a estabilização da temperatura do fluido em 4°C, a circulação é interrompida, as válvulas da tubulação helicoidal são fechadas e o fluido é mantido em repouso no interior da tubulação helicoidal por 2 horas. No caso do resfriamento sem cisalhamento, o procedimento é o mesmo do resfriamento com cisalhamento, com a exceção de que o fluido deve estar em repouso na tubulação helicoidal durante todo o resfriamento.

Decorrido o tempo de repouso, as válvulas de entrada e saída da tubulação helicoidal são abertas, o Carbopol é succionado do reservatório e bombeado pela tubulação principal. Por conta do bombeamento, o escoamento do fluido gelificado é reiniciado. Simultaneamente ao reinício do escoamento, as pressões do escoamento são medidas e armazenadas pelo *LabVIEW*.

6.5 Erros experimentais associados ao aparato experimental

Como qualquer equipamento para testes experimentais, os ensaios realizados com a bancada são passíveis de erros. A seguir são listados os mais significantes. Note que não estão inclusos erros experimentais decorrentes de quebras de peças ou equipamentos; nestes casos é considerado que a bancada experimental está funcionando adequadamente:

- Erros de medição de pressão devido ao ruído elétrico: ruído elétrico pode afetar as medições de pressão, por conta da sensibilidade dos transdutores. O ruído elétrico será diminuído com a adição de um *nobreak* senoidal para o condicionamento do sinal da linha. Ruído elétrico pode também ser uma consequência dos inversores de frequência, mas o problema pode ser resolvido com um tratamento de sinal após as medições.

- Diferença na medição de temperaturas após o tempo de estabilização após aquecimento ou resfriamento da câmara térmica: erro que pode acontecer devido, principalmente, à má ventilação da câmara. As medições podem ser melhoradas variando o *leiaute* dos ventiladores de circulação de ar no interior da câmara, ou adquirindo um maior número de ventiladores. O controle das taxas de resfriamento ou aquecimento também pode ajudar.

- Erros experimentais na medição das pressões devido às imperfeições na tubulação helicoidal: existe uma possibilidade de tais erros ocorrerem pois a tubulação possui rebarbas nos pontos onde foi soldada.

- Erros associados aos equipamentos: todas as medições não são perfeitas, e os próprios equipamentos de medição possuem uma faixa percentual de erro especificada pelos fabricantes.

- Erros associados ao código do *LabVIEW*: em programação, muitas vezes ocorrem imprevistos indesejados causadas por erros no programa. Neste caso deve-se revisar o programa para a causa do erro. Obviamente, é recomendado que o programa esteja bem organizado para facilitar a identificação do erro.

6.6 Experimentos futuros

Após o procedimento experimental estar bem definido, testes podem ser feitos nas mesmas condições para que a repetibilidade dos experimentos possa ser comprovada. Após atingir a repetibilidade, uma série de experimentos pode ser realizada. Uma lista preliminar de experimentos futuros é apresentada a seguir. Foi planejado que estes experimentos sejam realizados inicialmente com a solução de Carbopol e futuramente com fluidos de perfuração, especificamente o BRMUL-117.

1: Ensaios de reinício de escoamento a vazão constante, com o objetivo de estudar os picos de pressão;

2: Ensaios de transmissão de ondas de pressão. Estes ensaios podem ser realizados com a válvula de saída da tubulação fechada. Desse modo, a bomba pressuriza o fluido da tubulação helicoidal, e a transmissão de pressão pode ser estudada;

3: Influência da temperatura final de resfriamento na magnitude dos picos de pressão. Foi mencionado nas seções anteriores que a temperatura do fluido influencia na tensão limite de escoamento. Logo, a intensidade dos picos de pressão no reinício de escoamento será influenciada pela temperatura final de resfriamento do fluido;

4: Influência da taxa de cisalhamento durante o resfriamento do fluido. Quando o fluido é resfriado com cisalhamento (circulando pela tubulação), a influência de diferentes taxas de cisalhamento pode ser estudada;

5: Influência da taxa de resfriamento no reinício do escoamento. A taxa de resfriamento pode ser controlada através da variação da rotação do compressor, utilizando o inversor de frequências. Assim, análise da influência da taxa de resfriamento na magnitude dos picos de pressão é possibilitada;

6: Influência da vazão da bomba no reinício do escoamento. A vazão da bomba também pode ser controlada utilizando o inversor de frequências. Isso possibilita que a influência da vazão da bomba nos picos de pressão do reinício do escoamento seja estudada.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi projetado e construído um aparato experimental para avaliar o reinício do escoamento de fluidos de perfuração gelificados. Inicialmente, as variáveis de influência nos picos de pressão decorrentes do reinício do escoamento de fluidos de perfuração foram evidenciadas. Em seguida, as informações relevantes sobre o projeto, na forma de uma Revisão Bibliográfica, foram adquiridas.

Feita a revisão, o projeto conceitual foi iniciado, com base no projeto de Leôncio (2011) realizado anteriormente no laboratório. Nesta etapa, foi feita a especificação dos componentes necessários para a operação do aparato experimental, com base nos requisitos de projeto adquiridos da Revisão Bibliográfica. Muitos dos componentes foram escolhidos para que as limitações da bancada anterior pudessem ser contornadas. Após a especificação dos principais componentes, os fornecedores foram contatados. Dificuldades inerentes a este processo incluem a falta de produtos em estoque nos fornecedores, e a burocracia relacionada ao cadastro da instituição para que fossem feitas as compras.

Após as especificações, as compras dos principais componentes foram feitas. A etapa de compras demandou muito tempo pois alguns prazos de entrega eram demasiadamente longos. Além disso, o processo de compra com recursos financeiros da instituição é extremamente burocrático, o que gerou atrasos na aquisição de diversos equipamentos, como por exemplo, o evaporador do sistema de refrigeração e as chapas de poliestireno expandido usadas na estrutura da câmara térmica. Entretanto, foi feito o possível para agilizar o processo de compra de equipamentos, e todos os principais componentes da bancada foram comprados.

Após a especificação e compra dos principais equipamentos, a construção da bancada foi iniciada. Durante a etapa de construção várias adaptações foram feitas no projeto inicial para manter a funcionalidade da bancada. Mesmo com diversos atrasos devido a problemas de mão-de-obra, prazo de entrega de produtos e complexidade da montagem, a maior parte do aparato experimental pôde ser construída. A funcionalidade de todos os componentes montados foi garantida.

Por fim, foi definido um procedimento experimental para os experimentos. Variáveis de influência nas propriedades reológicas de fluidos de perfuração podem

ser controladas durante os testes experimentais, como vazão da bomba, taxa de resfriamento, tempo e temperatura de repouso do fluido. Também foram propostos testes experimentais futuros de reinício de escoamento. Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização dos testes iniciais propostos neste trabalho, e o detalhamento de uma metodologia para os experimentos futuros apresentados no Capítulo 6.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D. **Modern Compressible Flow: With Historical Perspective**. 2ª ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1990.

ANNIS, M. **High-Temperature Flow Properties of Water-Base Drilling Fluids**. Journal of Petroleum Technology, v. 19, n. 8, 1967.

BARNES, H. A. **Thixotropy - a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 70, n. 1–2, pp. 1-33, 1997.

BJØRKEVOLL, K. S.; ROMMETVEIT, R.; AAS, B.; GJERALDSTVEIT H.; MERLO, A. **Transient Gel Breaking Model for Critical Wells Applications with Field Data Verification**. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, SPE/IADC 79843, 2003.

CAWKWELL, M.; CHARLES, M. **An Improved Model for Start-up of Pipelines containing Gelled Crude Oil**. Journal of Pipelines, v.7, pp. 41-52, 1987.

CHANG, C.; RØNNINGSEN, H. P.; NGUYEN, Q. D. **Isothermal Start-up of Pipeline Transporting Waxy Crude Oil**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 87, pp. 127-154, 1999.

CHHABRA, R. P. **Non-Newtonian Fluids: An Intro**. Disponível em: <<http://www.physics.iitm.ac.in/~compflu/Lect-notes/chhabra.pdf>>. Acesso em: 16 Mai 2014.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**. Second edition, Butterworth-Heinemann, 2008.

DAVIDSON, M. R.; NGUYEN, Q. D.; CHANG, C.; RØNNINGSEN, H. P. **A Model for Restart of a Pipeline with Compressible Gelled Waxy Crude Oil**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 123, pp. 269–280, 2004.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. Fifth edition. Gulf Professional Publishing, 1988.

GANDELMAN, R. A.; COSTA, F. G.; MARTINS, A. L.; GUILHERME, H. C. M. **Estudo sobre gelificação em fluidos de perfuração**. I ENCONTRO NACIONAL DE HIDRÁULICA DE POÇOS, 2006.

HOUSKA, M. **Engineering Aspects of the Rheology of Thixotropic Liquids**. Tese de PhD, Czech Technical University of Prague-CVUT, Prague, 1981.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LEÔNCIO, M. A. **Projeto e Construção de Bancada Experimental para Avaliação da Retomada do Escoamento de Fluido de Perfuração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) de Engenharia Industrial Mecânica, UTFPR, 2011.

LEÔNCIO, M. A. *Publicação on-line [mensagem pessoal]*. Mensagem recebida por rodrigo_seiji@hotmail.com em 16 Abril 2014.

MORAIS, J. M. **Petróleo em Águas Profundas**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2013.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: <<http://brasil.ni.com/>>. Acesso em: 26 Set 2014.

NEGRÃO, C. O. R.; FRANCO, A. T.; ROCHA, L. L. V. **A Weakly Compressible Flow Model for the Restart of Thixotropic Drilling Fluids**. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 166, pp. 1369-1381, 2011.

NETZSCH DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.netzsch.com.br/>>. Acesso em: 26 Jun 2014.

NETZSCH DO BRASIL. **Manual de Operação - Bomba Nemo**. 2005.

OLIVEIRA, G. M.; ROCHA, L. L. V.; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. O. R.; MARTINS, A. L. **Reinício da Circulação de Fluidos de Perfuração Gelificados**. 4º PDPETRO, 2007.

OLIVEIRA, G. M.; ROCHA, L. L. V.; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. O. R. **Numerical Simulation of the Start Up of Bingham Fluid Flows in Pipelines**. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, v. 165, pp. 1114-1128, 2010.

OLIVEIRA, G. M. **Modelagem da Propagação de Pressão no Reinício do Escoamento de Fluidos de Perfuração Não Gelificados**. Monografia do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, UTFPR, 2011.

OLIVEIRA, G. M., NEGRÃO, C. O. R., FRANCO, A. T. **Pressure Transmission in Bingham Fluids compressed within a closed pipe**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2012.

OMEGA (a). **Pressure Transducers**. Disponível em: <<http://www.omega.com/prodinfo/pressuretransducers.html>>. Acessado em: 26 Jun 2014.

OMEGA (b). **Introdução aos termopares**. Disponível em: <<http://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>>. Acesso em: 03 Dez 2014.

PAPANASTASIOU, T.C., GEORGIU, G.C., ALEXANDROU, A.N. – **Viscous Fluid Flow**. CRC Press, 2000.

QUADROS, P. M. S. **Escoamento de Bolhas em Tubo Vertical Preenchido com Carbopol**. Relatório Técnico, 2014.

REIS, C. V. **Equipamentos estáticos**. Curitiba: Repar/ UnicenP, 200, pp 52.

RØNNINGSEN, H. P. **Rheological Behaviour of Gelled, Waxy North Sea crude oils**. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 7, pp. 177-213, 1992.

ROCHA, L. L. V.; OLIVEIRA, G. M.; NEGRÃO, C. O. R.; FRANCO, A. T. **Modeling the Start-Up Flow of Well Drilling Fluids**. 12th Brazillian Congress of Thermal Engineering and Sciences, 2008.

SANDVOLD, I. **Gel Evolution in Oil Based Drilling Fluids**. Master's thesis of the course TPG 4910 Petroleum Engineering – Drilling Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2012.

SANTOS, O. L. A. **Segurança de Poço em Lâminas de Água Ultra-Profundas**. I Encontro Nacional de Hidráulica de Poços. Agosto de 2006.

SCHLUMBERGER, 2010. Disponível em: <<http://www.planetseed.com/home>>. Acesso em: 28 Mai 2014.

SESTAK, J.; CHARLES, M. E.; CAWKWELL, M. G. **Start-up of Gelled Crude Oil Pipelines**. Journal of Pipelines, v. 6, pp. 15-24, 1987.

SKALLE, P. **Pressure Control in Oil Well Drilling**. Pål Skalle & Ventus Publishing ApS, 2009.

SOUZA MENDES, P. R.; DUTRA, E. S. S. A. **Viscosity Function for Viscoplastic Liquids**. Annual transactions of the Nordic Rheology Society, v. 12, pp. 183-188, 2004.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Makron, 1985.

TEHRANI, A. **Thixotropy in Water-Based Drilling Fluids**. Annual transactions of the Nordic Rheology Society, v. 16, 2008.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

VINAY, G.; WACHS, A.; AGASSANT, J. F. **Numerical Simulation of Weakly Compressible Bingham Flows: The Restart of Pipeline Flows of Waxy Crude Oils**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 136, pp. 93-105, 2006.

VINAY, G.; WACHS, A.; FRIGAARD, I. **Start-up Transients and Efficient Computation of Isothermal Waxy Crude Oil Flows**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 143, pp. 141-156, 2007.

WACHS, A.; VINAY, G.; FRIGAARD, I. **A 1.5D Numerical Model for the Start up of Weakly Compressible Flow of a Viscoplastic and Thixotropic Fluid in Pipelines**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 159, pp. 81-94, 2009.

WIKA DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.wika.com.br/>>. Acessado em: 26 Jun 2014.

APÊNDICE A – RISCOS E ORÇAMENTOS

Tabela 2. Riscos do projeto

Risco	Gravidade (G)	Probabilidade de ocorrência (O)	Índice de risco (IR = G x O)	Medida de contingência (para G ou O maior ou igual a 5 e para G x O maior ou igual a 30)
Escassez de teoria para desenvolvimento da bancada	3	1	4	Desnecessária.
Abandono de projeto pelo aluno por falta de tempo	10	1	10	O aluno deverá dedicar mais tempo livre ao projeto, incluindo finais de semana.
Prazos não cumpridos	8	1	8	O aluno deverá dedicar mais tempo livre ao projeto, incluindo finais de semana.
Falta de capital por parte da Petrobras	9	1	9	Desnecessária
Bancada não funciona de maneira desejada	5	2	10	O aluno deverá trabalhar com a equipe do projeto de modo a resolver o problema.
Demora no processo de compra de componentes	3	6	18	Deve-se pressionar o fornecedor e trabalhar para agilizar o processo.

Fonte: Autoria própria

Os valores de custos da Tabela 3 foram estimados com base nos produtos comprados e orçados até o momento do término do presente trabalho. Os custos do projeto foram financiados pela Petrobras.

Tabela 3. Orçamento aproximado da bancada experimental

Item	Custo estimado (R\$)
Sistema de refrigeração	R\$ 6000,00
Sistema hidráulico	R\$ 8.300,00
Sistema elétrico	R\$ 25.283,52
Sistema de isolamento e estrutural	R\$ 8.132,01
Total	R\$ 47.715,53

Fonte: Autoria própria

Os valores dos custos dos equipamentos listados no Capítulo 5 do presente trabalho estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4. Preços dos componentes listados no Capítulo 5

Item	Unidade	Custo Unitário	Quantidade	Custo total
Bomba Netzsch Nemo BY	-	R\$ 7559,00	1	R\$ 7559,00
Painel EPS 1700 x 1140 x100mm	pç	R\$ 222,54	4	R\$ 890,16
Painel EPS 1500 x 1140 x 100mm	pç	R\$ 196,37	7	R\$ 1.374,59
Mecanismo de bagageiro de ônibus Incavel	-	R\$ 1150,00	1	R\$ 1180,00
Unidade condensadora Danfoss HCM40 3F 220V	-	R\$ 2.500,00	1	R\$ 2.500,00
Evaporador Thermokey DFTC54RDE	-	R\$ 2.700,00	1	R\$ 2.700,00
Válvula de expansão Danfoss TX2	-	R\$ 99,00	1	R\$ 99,00
Transdutor P-31: 0 a 16 bar	pç	R\$ 2.120,00	1	R\$ 2.120,00
Transdutor P-31: 0 a 10 bar	pç	R\$ 2.120,00	2	R\$ 4.240,00
Transdutor P-31: 0 a 6 bar	pç	R\$ 2.120,00	1	R\$ 2.120,00
Transdutor S-10: 0 a 10 bar ABS	pç	R\$ 850,00	1	R\$ 850,00
Conector NI 9927, aliviador de tensão e proteção ao operador p/ terminal de parafusos com 10 posições	pç	R\$ 145,02	1	R\$ 145,02
Módulo de entrada analógica NI 9203	pç	R\$ 2.261,31	1	R\$ 2.261,31
Fonte de alimentação ps15 24VDC, 5A, 100-120/220-240	pç	R\$ 947,22	1	R\$ 947,22
Módulo de saída analógica NI 9265	pç	R\$ 1600,93	1	R\$ 1600,93
Pacote de 5 termopares Omega SA1-T-120	-	R\$ 485,00	2	R\$ 970,00
Total	-	-	-	R\$ 31.557,23

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – CRONOGRAMA

Atividades – Tcc1 e 2	Quinzenas - (Ano)																							
	Ab 1	Ab 2	Ma1	Ma2	Jn 1	Jn 2	Jl1	Jl2	Ag 1	Ag 2	St 1	St 2	O u1	O u2	No 1	No 2	De 1	De 2	Jn 1	Jn 2	Fe 1	Fe 2		
Definição do Tema e Professor Orientador																								
Termo de Abertura																								
Pesquisa Revisão Bibl.																								
Reuniões iniciais com Professor Orientador																								
Definição da Metodologia																								
Escrita Inicial da Proposta de Projeto de Pesquisa																								
Entrega da Proposta de Projeto de Pesquisa																								
Apresentação da Proposta de Projeto de Pesquisa																								
Correção da Proposta de Projeto de Pesquisa																								
Entrega da versão final da Proposta de Projeto de Pesquisa																								
Reuniões com Professor Orientador																								
Orçamento e Especificação de Componentes para Bancada																								
Compra de materiais																								
Construção da Bancada Experimental																								
Testes Iniciais																								
Execução dos Experimentos																								
Escrita da monografia (Projeto de Pesquisa)																								
Entrega da monografia																								
Apresentação do Projeto de Pesquisa																								
Entrega da versão final monografia																								

Figura 33. Cronograma do projeto (Tcc1 e Tcc2)

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULOS

Seção 5.1

A pressão máxima de fluido é calculada por:

$$\Delta P = \frac{4T_y L}{D} = \frac{4 \cdot 850 \cdot 50}{2 \cdot 10,465 \cdot 10^{-3}} = 81,2 \text{ bar} \quad (\text{A.1})$$

onde L é o comprimento da tubulação, T_y é a tensão na parede da tubulação e D é o diâmetro.

Seção 5.2

A tensão de quebra de gel utilizando as medições de pressão de Leôncio pode ser calculada por:

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{L} \left(\frac{R}{2} \right) = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 10,465 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 2} = 52,3 \text{ bar} \quad (\text{A.2})$$

onde ΔP é o diferencial de pressão na tubulação helicoidal e R é o raio interno.

Seção 5.3

O volume de fluido que preenche a tubulação helicoidal por completo pode ser calculado por:

$$V = \pi R^2 L = \pi \cdot (10,465 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50 = 0,0172 \text{ m}^3 = 17,2 \text{ L} \quad (\text{A.3})$$

onde R é o raio interno da tubulação helicoidal.

Seção 5.5

Calcula-se o coeficiente global de transferência de calor por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{ext}}}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,1}{0,04} + \frac{1}{100}} = 0,383 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (\text{A.4})$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, k é a condutividade térmica do poliestireno expandido e L é a espessura da parede.

O valor de UA é calculado por:

$$UA = 0,383 \cdot 15 = 5,745 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (\text{A.5})$$

Conhecido o valor de UA, pode ser iniciado o cálculo do tempo de resfriamento. Para o regime transitório, o resfriamento é calculado por:

$$(\sum \rho V c) \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_t + \dot{Q}_{equip} - \dot{Q}_e \quad (A.6)$$

onde $\sum \rho V c$ é o somatório das capacidades térmicas dos principais componentes: serpentina, reservatório, bomba, motor, fluido de perfuração e paredes; c é o calor específico de cada componente, \dot{Q}_e é a capacidade de refrigeração do sistema, \dot{Q}_{equip} é a geração de calor dos equipamentos instalados dentro da câmara. \dot{Q}_{equip} é calculado por:

$$\dot{Q}_{equip} = \dot{Q}_{bomba} + \dot{Q}_{agitador} + \dot{Q}_{ventiladores} = 2200 + 1100 + 800 = 4100 \text{ W} \quad (A.7)$$

O termo $\sum \rho V c$ é calculado por:

$$\sum \rho V c = \sum m c = \sum C \quad (A.8)$$

$$\sum \rho V c = C_{bomba} + C_{motor} + C_{fluido} + C_{reserv} + C_{serpentina} + C_{paredes} \quad (A.9)$$

$$\sum \rho V c = 52947 + 4340 + 209300 + 40765,49 + 16,44 = 307368,93 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (A.10)$$

Após calcular os calores gerados e a capacidade térmica total, a Equação A.6 pode ser resolvida por integração dos instantes de tempo 0 a t , com temperatura inicial $T_\infty = 30$ e $T = 4$:

$$\int_0^t dt = \int_{T_\infty}^T \frac{C dT}{UA(T_\infty - T) + \dot{Q}_{equip} - \dot{Q}_e} \quad (A.11)$$

$$t = \frac{307368,93}{-5,745} \left[\ln(UA(T_\infty - T) + 4100 - \dot{Q}_e) \right]_{30}^4 \quad (A.12)$$

$$t = \frac{307368,93}{-5,745} \ln \left[\frac{(UA(30-4) + 4100 - \dot{Q}_e)}{(UA(30-30) + 4100 - \dot{Q}_e)} \right] \quad (A.13)$$

Utilizando a equação A13, é possível plotar o gráfico dos tempos de resfriamento, em segundos em função da capacidade de refrigeração \dot{Q}_e , em Watts.