

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

THIAGO FILIPE HEIDGGER FERRARI

**PROJETO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA AVALIAR
O REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE ÓLEOS PARAFÍNICOS
GELIFICADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

THIAGO FILIPE HEIDGGER FERRARI

**PROJETO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA AVALIAR
O REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE ÓLEOS PARAFÍNICOS
GELIFICADOS**

Proposta de 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

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "PROJETO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA AVALIAR O REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE ÓLEOS PARAFÍNICOS GELIFICADOS", realizado pelo aluno THIAGO FILIPE HEIDGGER FERRARI, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia 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, Msc
Damec, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 10 de Janeiro de 2014

RESUMO

FERRARI, Thiago Filipe Heidgger. Projeto de uma bancada experimental para avaliar o reinício do escoamento de óleos parafínicos gelificados. 2014. 70 f. Trabalho de conclusão de curso II – Curso de Graduação em Engenharia Industrial Mecânica. Curitiba, 2014.

O transporte do petróleo é uma dentre as várias etapas que compõe o processo de produção de petróleo offshore. Durante o transporte, feito por oleodutos, o bombeamento do óleo é interrompido com frequência. Na retomada do escoamento, picos de pressão elevados podem ser gerados. Os picos são indesejados, uma vez que podem atingir a pressão limite da tubulação de transporte. Este trabalho possibilita a análise experimental do reinício do escoamento de óleos parafínicos através do projeto e construção de uma bancada de testes no Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR. O propósito principal da bancada é avaliar com qual intensidade a mudança de parâmetros físicos da bancada afetam os picos de pressão. Para tanto é previsto alteração das vazões de óleo, das taxas de resfriamento e das temperaturas iniciais de resfriamento. A bancada deverá operar em temperaturas entre 4 e 60 °C. As etapas de projeto e construção, assim como a realização de testes de calibração e validação da bancada (utilizando glicerina bi destilada), são descritas neste trabalho.

Palavras-chave: Picos de pressão; transporte de petróleo, oleodutos; reinício do escoamento; gelificação de óleos parafínicos; bancada experimental.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Esquema do transporte do petróleo extraído	13
Figura 1.2 - Petróleo parafínico gelificado a 4°C.	14
Figura 1.3 - Gráfico da pressão pelo tempo durante a retomada do escoamento	15
Figura 3.1 - Fluxograma do funcionamento.....	21
Figura 4.1 - Desenho de fabricação do reservatório térmico.....	28
Figura 4.2 - Reservatório térmico sobre trilho	29
Figura 4.3 - Bomba Teledyne Isco modelo 500 D	39
Figura 4.4 - Desenho de fabricação da tubulação em formato de espiral	42
Figura 4.5 - Válvula Swagelok modelo SS-83KS8	43
Figura 4.6 - Fluxograma da circulação do óleo	44
Figura 4.7 - Desenho montagem da câmara de isolamento.....	45
Figura 4.8 - Ciclo de refrigeração da câmara	46
Figura 4.9 - Evaporador modelo DFTC54R.....	50
Figura 4.10 - Compressor série SB	52
Figura 4.11 - Resistência elétrica	54
Figura 4.12 - Funcionamento de um transdutor de pressão por deformação.....	55
Figura 4.13 - Transdutor de pressão modelo P3 TOP CLASS	58
Figura 4.14 - Termopar tipo T.....	58
Figura 4.15 - Janela de monitoramento do LabVIEW da bancada	60
Figura 4.16 - Sistema de aquisição de dados, chassis e módulo.....	61
Figura 4.17 - Esquema do processamento de dados.....	62
Figura 4.18 - Circuito hidráulico da bancada	66
Figura 4.19 - Foto frontal da bancada pronta	67
Figura 4.20 - Foto posterior da bancada pronta	67

Figura 5.1 - Comparação entre a curva levantada na bancada experimental e a curva da glicerina 100%.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros analisados nos diferentes trabalhos	19
Tabela 3.1 - Descrição dos requisitos e restrições de cada componente	25
Tabela 3.2 - Principais componentes da bancada.....	26
Tabela 4.1 - Variação dos valores de vazão para diferentes valores de diâmetros e de taxas de cisalhamento.....	32
Tabela 4.2 - Comparativo das condições de operações	34
Tabela 4.3 - Perda de carga aproximada para os dois diâmetros	35
Tabela 4.4 - Valores totais das perdas de carga	36
Tabela 4.5 - Limites de operação de bombas rotativas e alternativas.....	37
Tabela 4.6 - Dados funcionais e construtivos das bombas seringa Teledyne Isco ...	38
Tabela 4.7 - Quantidade de calor para cada equipamento	49
Tabela 4.8 - Capacidades térmicas para diferentes taxas de resfriamento.....	49
Tabela 4.9 - Lista dos evaporadores pesquisados.....	51
Tabela 4.10 - Lista componentes sistema de aquisição de dados	61
Tabela 4.11 - Massa em kg de cada componente.....	63
Tabela 5.1 - Levantamento do erro percentual na medição de vazão.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Caracterização do Problema	14
1.2	Justificativa do Projeto	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Conteúdo do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Síntese do Capítulo	19
3	CONCEPÇÃO PRELIMINAR DA BANCADA	20
3.1	Requisitos da bancada	21
3.2	Restrições da bancada	23
3.3	Concepção preliminar	24
4	PROJETO DA BANCADA	27
4.1	Reservatório térmico	27
4.2	Sistema de circulação	30
4.2.1	Bomba	30
4.2.2	Tubulação	39
4.2.3	Válvulas de controle de fluxo	42
4.3	Sistema de controle da temperatura	44
4.3.1	Câmara térmica	44
4.3.2	Sistema de refrigeração	46
4.3.3	Sistema de aquecimento	53
4.3.4	Sistema de circulação de ar	54
4.4	Sistema de aquisição de dados	54
4.4.1	Transdutores de pressão	54
4.4.2	Termopares	58
4.4.3	Controle e aquisição de dados	58
4.4.4	Sistema de medição	62
4.5	Estrutura da bancada	63
4.6	Apresentação da bancada	63
4.6.1	Circuito hidráulico	64
4.6.2	Sistema de controle de temperatura	65
4.6.3	Sistema de aquisição de dados	65
5	calibração e validação da bancada	68
6	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – ORÇAMENTOS E RISCOS DO PROJETO	77
	APÊNDICE B – CRONOGRAMA DO PROJETO	79
	ANEXO A – VALORES DAS VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA DOS ACESSÓRIOS DA BANCADA	80
	ANEXO B – RELATÓRIO DOS TESTES FEITOS COM A GLICERINA	81

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é a principal fonte de energia utilizada pelo homem. Ao longo dos anos, sua produção e consumo aumentaram em grande escala. Além de seu emprego como combustível, o petróleo também é a matéria-prima para inúmeras aplicações da indústria petroquímica.

A atividade de transporte do petróleo bruto extraído é apenas uma das muitas etapas necessárias para que o petróleo chegue até uma refinaria. Segundo Thomas (2004), o transporte inicia-se logo após o petróleo deixar o reservatório a caminho da plataforma de exploração. Muitas vezes este transporte é feito por oleodutos submarinos, que são tubulações longas, com grandes diâmetros e que se encontram no leito mar. Pelo fato dos oleodutos estarem junto ao leito do mar sua temperatura mínima pode chegar a 4°C (Marchesini et al., 2012). A Figura 1.1 apresenta um esquema simplificado do transporte do petróleo por um oleoduto da plataforma até a costa marítima. O petróleo que se encontra na temperatura de 60°C é bombeado para o fundo do mar, a uma temperatura de 4 °C, e depois segue pelo oleoduto no leito do mar até a costa.

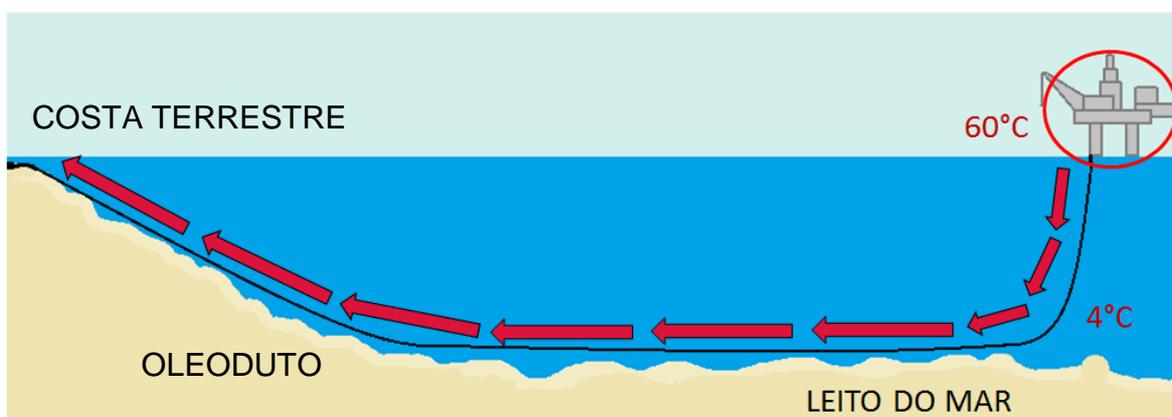


Figura 1.1 - Esquema do transporte do petróleo extraído

O petróleo é bombeado pelos oleodutos por bombas que fornecem grandes vazões e pressões de bombeio (PETROBRAS, 2013). Esse sistema de bombeamento não é capaz de trabalhar ininterruptamente, sendo a manutenção do equipamento um dos principais motivos para a parada do processo.

O óleo de base parafínica quando submetido a baixas temperaturas, e na ausência de tensões de cisalhamento, tende a iniciar a formação de um gel composto de cristais de parafina depositados em uma matriz viscosa (Davidson, 2004). Sendo assim, quando o transporte é interrompido, o óleo parafínico dentro da tubulação do oleoduto gelifica.

A retomada do escoamento do óleo gelificado é um processo complexo, devido à modificação das propriedades reológicas ocasionadas pela alteração de parâmetros físicos durante o processo de gelificação. Alguns estudos reológicos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de analisar a intensidade da influência desses parâmetros físicos sobre as propriedades reológicas. No entanto, o estudo experimental do problema ainda é um tanto incipiente.

1.1 Caracterização do Problema

Enquanto as linhas de transmissão estão operando não existe nenhuma dificuldade ou restrição no bombeamento do óleo. Porém, se o escoamento for interrompido na condição de baixa temperatura, inicia-se a gelificação do óleo devido à precipitação da parafina contida nele, com isso o óleo passa a se comportar como um material viscoelástico (Li et al., 2012), como pode ser visto na Figura 1.2.

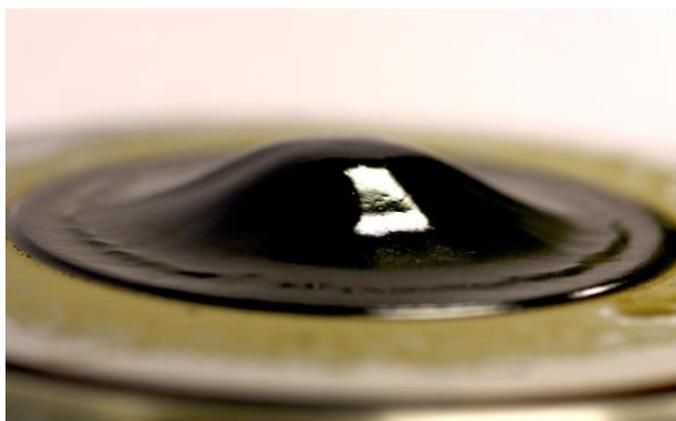


Figura 1.2 - Petróleo parafínico gelificado a 4°C.

Fonte: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011/Resumos/CTC/MEC/MEC-Alexandra%20Araujo%20Alicke%20e%20Bruna%20Costa%20Leop%C3%A9rcio.pdf

Para reestabelecer o escoamento sob estas condições é preciso impor uma pressão suficiente para vencer a tensão gel, que é maior que a pressão usual de trabalho, gerando um eventual pico de pressão (Mendes et al., 2012) como pode ser

visto na Figura 1.3, que apresenta o pico de pressão gerado durante a retomada do escoamento de um óleo gelificado.

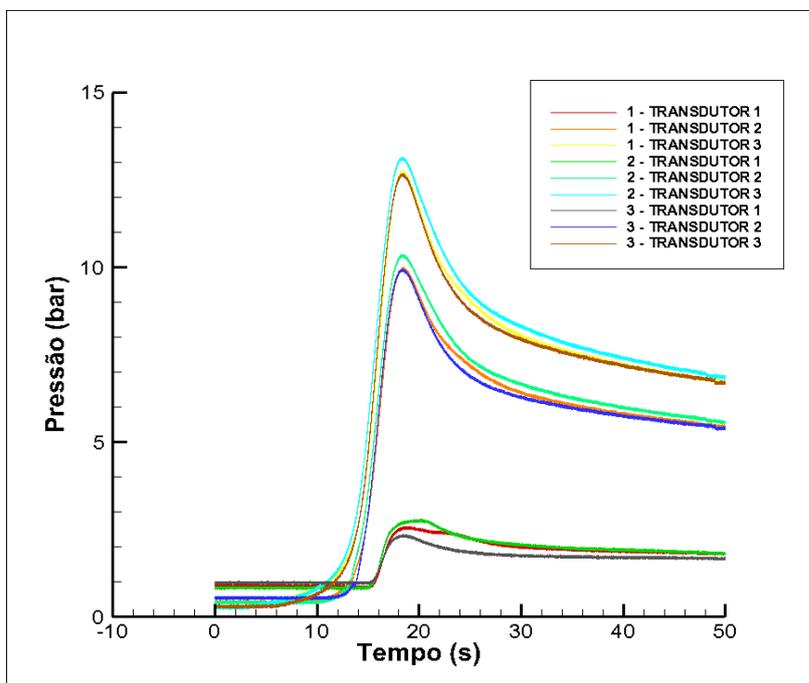


Figura 1.3 - Gráfico da pressão pelo tempo durante a retomada do escoamento

A necessidade de se estudar os picos de pressão surge da possibilidade da pressão no oleoduto atingir valores tão elevados que supere a resistência mecânica da parede da tubulação, levando ao rompimento dessa tubulação, o que colocaria em risco a operação de transporte como um todo. Neste sentido, o conhecimento dos parâmetros, e com que intensidade os parâmetros exercem influência sobre os picos de pressão é fundamental para auxiliar o dimensionamento de oleodutos.

1.2 Justificativa do Projeto

Apesar de existir outras maneiras de transporte do petróleo, como vias marítimas (navios petroleiros), vias terrestres (caminhões e trens tanques) e vias aéreas (aviões cargueiros), o transporte de grandes quantidades do petróleo entre longas distâncias por oleodutos, ainda é considerado o meio que possui melhor custo benefício dentre os outros (PETROBRAS). Isto acontece, pois, o transporte através dos oleodutos garante um grande volume contínuo de petróleo transportado em comparação aos outros meios. Em contrapartida a fabricação e instalação de oleodutos apresenta o maior custo dentro os outros meios de transporte citados anteriormente (THOMAS, 2004).

Portanto, este projeto foi realizado com o intuito de aprimorar o conhecimento no dimensionamento de oleodutos, para a prevenção, ou de uma possível catástrofe ambiental, o causada por um subdimensionamento da tubulação do oleoduto, ou de um superdimensionamento, causado pelo gasto excessivo de material para fabricação do oleoduto.

Este trabalho representa a parceria do Laboratório de Ciências Térmicas, o LACIT, com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, vulgo CENPES. O LACIT ficou responsável pelo projeto, construção e instalação da bancada, e o CENPES contribuiu financiando e definindo informações vitais do projeto.

1.3 Objetivos

Neste trabalho, tem-se como objetivo o projeto e construção de uma bancada experimental que possa reproduzir e mensurar os picos de pressão gerados no reinício do escoamento de óleos parafínicos gelificados. Esta bancada deve permitir a alteração de parâmetros físicos da bancada que exercem influência sobre o comportamento reológico e processo de gelificação do óleo, que conseqüentemente afetam os picos de pressão criados no reinício.

1.4 Conteúdo do trabalho

O conteúdo do trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório. No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica sobre os estudos reológicos de óleos parafínicos. O terceiro capítulo refere-se concepção inicial da bancada. Consiste no desenvolvimento das etapas iniciais definidas de projeto. O quarto capítulo apresenta uma descrição da bancada construída, reiterando as funções dos principais componentes da bancada. O quinto capítulo aborda a calibração e validação da bancada, apresentando os procedimentos feitos para calibração. O sexto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, evidenciando os resultados obtidos e fazendo recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como o objetivo desse trabalho é a construção de uma bancada experimental que possa reproduzir o reinício do escoamento, para avaliar com qual intensidade a alteração de parâmetros físicos da bancada exercem influência nos picos de pressão, a revisão bibliográfica foi elaborada com base nos trabalhos da área de estudo reológicos de óleos parafínicos.

A principal preocupação da revisão foi identificar quais são os parâmetros que exercem influência nas propriedades reológicas e no processo de gelificação, e que conseqüentemente afetam os picos de pressão.

Partindo do princípio da influência dos parâmetros, descobriu-se que os principais estudos reológicos na área de óleos parafínicos buscam compreender a influência dos seguintes parâmetros:

- ✓ Temperatura inicial do resfriamento;
- ✓ Taxa de resfriamento;
- ✓ Taxa de cisalhamento;
- ✓ Tempo de repouso após o resfriamento;

A influência da taxa de resfriamento foi abordada nos trabalhos realizados por Ronningsen (1992), El-Gamal (1998), Kané et al. (2004), Visintin et al. (2005) e Lin et al. (2011), nesses trabalhos os autores relatam que ocorre um aumento significativo da viscosidade e da tensão limite de escoamento com a diminuição da temperatura. Ainda se tratando da taxa de resfriamentos, os mesmos autores observaram que as propriedades reológicas de óleos parafínicos variam com a taxa de resfriamento. Para um resfriamento sem cisalhamento, a tensão limite de escoamento do óleo cresce com a redução da taxa de resfriamento, enquanto que para um resfriamento com cisalhamento, a tensão limite de escoamento diminui com a redução da taxa de resfriamento.

O efeito da taxa de cisalhamento é analisado em diversos trabalhos. Utilizando resultados de ensaios reológicos Singh et al. (1999) e Webber (1999) mostraram que para um aumento da taxa de resfriamento em um ensaio com cisalhamento, a temperatura de gelificação aumenta, bem como a viscosidade ao final do

resfriamento. Similar ao estudo de Singh et al. (1999) e Webber (1999), Lin et al. (2011) notou que a tensão limite de escoamento aumenta com a diminuição do tempo de resfriamento. Nessa mesma linha de pesquisa, Kané et al. (2004), Visintin et al (2008) e Lin et al. (2011) observaram que o processo de cisalhamento durante o resfriamento alterou o desenvolvimento de formação dos aglomerados e as propriedades reológicas do material. A formação dos aglomerados é dificultada com o cisalhamento, contudo, após o cisalhamento ser interrompido, os cristais voltaram a crescer formando pequenos aglomerados. O processo de crescimento pode levar horas, formando uma estrutura complexa de pequenos cristais. Já para baixas taxas de cisalhamento, a estrutura é quebrada em grandes blocos, de modo que a reconstrução ocorre em baixos tempos. Com relação a propriedades reológicas dos óleos parafínicos, El-Gamal (1998) constatou que, quando efeitos de cisalhamento são aplicados ao escoamento não newtoniano, a temperatura do ponto de fluidez é diminuída. Contudo, para a viscosidade há pouca influência abaixo do ponto de fluidez. Finalizando essa linha de estudo, Lin et al. (2011) constataram que para resfriamento com cisalhamento, a tensão limite de escoamento é aumentada com o aumento da taxa de resfriamento, podendo este aumento ser devido a complexidade da estrutura durante a gelificação.

A influência do tempo de repouso da amostra na temperatura final dos testes foi observada por Wardhaugh e Boger (1991), Visintin et al. (2005), Lopes e Coutinho (2007) e Lin et al. (2011). No trabalho de Wardhaugh e Boger constatou-se que um tempo de 65 horas de repouso após um resfriamento dinâmico não afetou a tensão limite de escoamento. Os trabalhos mais recentes de Visintin, Lopes e Coutinho, e Lin apresentaram um aumento da rigidez da estrutura com o aumento do tempo de repouso da amostra.

Outro fator que deve ser destacado devido a sua importância é a temperatura inicial dos testes. Estudos feitos por Ronningsen et al. (1991), Marchesini et al. (2012) e Andrade et al. (2013) apresentam resultados em que observasse uma influência direta da temperatura inicial do teste com a temperatura de cristalização e a viscosidade do material. Em seu trabalho, Andrade et al. (2013) observa que existe uma faixa crítica de temperatura inicial que proporciona os máximos valores de viscosidade e tensão limite de escoamento. Essa tensão limite pode possuir um valor cerca seis vezes maior para diferentes temperaturas iniciais de resfriamento.

2.1 Síntese do Capítulo

No estudo reológico dos óleos parafínicos, pode-se observar que a temperatura inicial dos testes, taxa de resfriamento, de cisalhamento e o tempo de repouso tem grande influência nas propriedades reológicas e mecânicas (e. g. tensão limite de escoamento e viscosidade dinâmica) dos óleos. Os ensaios demonstraram que a viscosidade dinâmica e a tensão limite de escoamento aumentaram com a diminuição da temperatura, com baixas taxas de resfriamento e um tempo de repouso mais elevado. A tabela Tabela 2.1 apresenta um resumo dos trabalhos com os respectivos parâmetros estudados em seus trabalhos.

Tabela 2.1 - Parâmetros analisados nos diferentes trabalhos

AUTORES DOS TRABALHOS	PARÂMETROS			
	Temperatura inicial	Tempo de repouso	Taxa de resfriamento	Taxa de cisalhamento
Wardhaugh e Boger (1991)		x		
Ronningsen (1992)	x		x	
El-Gamal (1998)			x	x
Singh (1999)				x
Kané (2004)			x	x
Visitin (2005)		x	x	x
Lopes e Coutinho (2007)		x		
Lin (2011)		x	x	x
Marchesini (2012)	x			
Andrade (2013)	x			

3 CONCEPÇÃO PRELIMINAR DA BANCADA

A criação da concepção preliminar da bancada exige o conhecimento de dois pontos, sendo o primeiro o objetivo do trabalho, e o segundo a identificação dos parâmetros, que quando modificados, exercem influência nos picos de pressão gerados. O objetivo do trabalho foi apresentado no capítulo introdutório. Os parâmetros de influência foram descritos no capítulo de revisão bibliográfica, sendo listados abaixo:

- ✓ Temperatura inicial do resfriamento;
- ✓ Taxa de resfriamento;
- ✓ Taxa de cisalhamento
- ✓ Tempo de repouso após o resfriamento;

O primeiro ponto de destaque, é que, como o problema descrito trata-se de uma operação que acontece durante o transporte de petróleo em oleodutos, é necessário o desenvolvimento de uma bancada que possibilite simular a situação mais próxima da realizada nessa operação. Com base nessa informação podem-se especificar componentes vitais para realização dos experimentos, o primeiro deles é uma bomba que realize o bombeamento do fluido durante os testes. O segundo componente, é uma tubulação que represente o oleoduto por onde o óleo escoar durante o processo.

O próximo ponto de destaque leva em conta os parâmetros vistos no capítulo anterior. O primeiro parâmetro listado é temperatura inicial do resfriamento. Como visto a alteração da temperatura inicial de resfriamento modifica as propriedades reológicas do óleo, assim um controle dessa temperatura inicial é de grande importância para a bancada.

Como a temperatura inicial de resfriamento, a modificação na taxa de resfriamento também altera as propriedades reológicas, portanto a possibilidade de impor diferentes taxas de resfriamento é muito importante.

A modificação da taxa de cisalhamento também exerce influência nas propriedades reológicas dos óleos, assim o controle na vazão da bancada é vital para o projeto.

Apesar do tempo de repouso não depender de nenhum parâmetro físico para a sua modificação, as propriedades reológicas dos óleos são modificadas para diferentes tempos de repouso, tornando imprescindível o controle sobre o tempo de repouso.

Com a identificação dos fatores que devem ser respeitados para a criação da concepção preliminar da bancada, pode-se então levantar os requisitos necessário para criação da concepção.

3.1 Requisitos da bancada

Como visto no final da secção anterior para obter-se uma análise criteriosa sobre a influência dos parâmetros citados no reinício do escoamento de óleos gelificados, é necessário um controle preciso sobre as seguintes variáveis analisadas nos estudos anteriores:

- ✓ Temperatura que o óleo é submetido antes do resfriamento;
- ✓ Taxa de resfriamento a qual o óleo é submetido durante o resfriamento;
- ✓ Taxa de cisalhamento em que o óleo é submetido durante o resfriamento;
- ✓ Tempo de repouso após o resfriamento do óleo;

Conhecendo os parâmetros de influência, foi elaborado um fluxograma que exemplifica os processos que o óleo deve ser submetido para avaliar a intensidade que os parâmetros afetam na gelificação e propriedades reológicas do óleo, que conseqüentemente alteram os picos de pressão gerados durante o reinício do escoamento, como mostra a Figura 3.1.

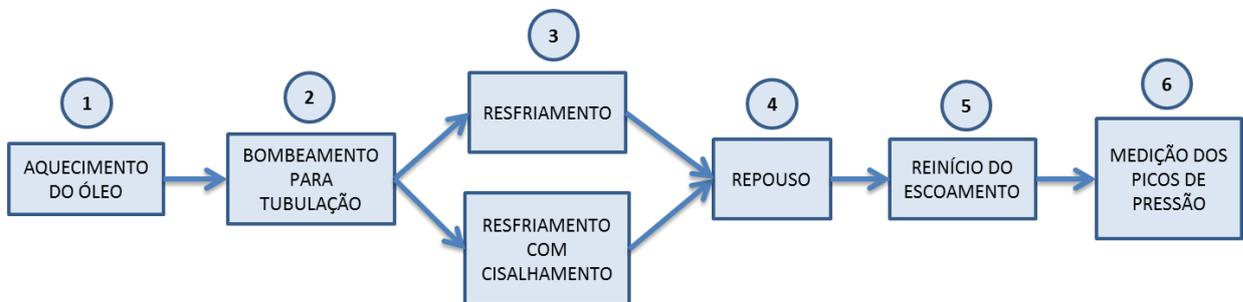


Figura 3.1 - Fluxograma do funcionamento

Os processos representados no fluxograma da Figura 3.1 podem ser descritos da seguinte forma:

1. Aquecimento do óleo à temperatura inicial desejada;
2. Bombeamento do óleo aquecido para a tubulação;
3. Resfriamento do óleo dentro da tubulação e seus componentes. O resfriamento pode ser com o óleo em repouso ou dinâmico (em circulação pela bomba);
4. Repouso do óleo após o resfriamento durante um tempo estipulado;
5. Reinício do escoamento pela ativação da bomba de circulação;
6. Medição dos picos de pressão gerados no reinício do escoamento;

Com a descrição desses processos é possível, então, destacar os principais requisitos para a construção da bancada. O primeiro deles é a necessidade de um reservatório térmico para o aquecimento do óleo; como visto anteriormente em algumas situações o óleo sai da plataforma com uma temperatura aproximada de 60°C, assim é necessário um equipamento que consiga aquecer e manter o óleo nessa temperatura durante o tempo necessário.

Após o aquecimento, é necessário realizar o bombeamento do óleo para a tubulação do ensaio. Nesta etapa é necessário um controle na vazão da bomba, ou seja, da taxa de cisalhamento. Além de controlar precisamente a vazão, a bomba deve possuir capacidade para quebrar o gel formado e assim reiniciar o escoamento, por isso outro requisito seria proporcionar pressões superiores às necessárias para a quebra do gel.

A tubulação da região de testes deve permitir a análise correta dos picos de pressão gerados durante o reinício. Para isso a tubulação deve ser longa o suficiente para tomada de pressão em diferentes pontos. O seu comprimento deve levar em conta a velocidade de propagação das ondas mecânicas geradas no reinício do escoamento, e a compressibilidade do óleo utilizado nos testes. Adiante será descrita detalhadamente a tubulação utilizada na bancada.

Para representar o resfriamento sofrido pelo óleo, que sai da tubulação do reservatório quente, em torno de 60 °C, e vai para a tubulação que se encontra no leito do mar numa região fria, cerca de 4 °C, é necessário um ambiente climatizado

em que seja possível realizar o controle da queda da temperatura, ou seja, da taxa de resfriamento. Para tanto, é previsto uma câmara isolada com sistema de controle de temperatura composto por um sistema de refrigeração e outro de aquecimento.

O último requisito a ser listado é a necessidade de um sistema de aquisição de dados. Esse sistema é responsável pela coleta e armazenagem dos dados, para uma futura interpretação dos resultados obtidos nos testes. Neste caso é previsto utilizar transdutores de pressão para medir a pressão durante o escoamento e no seu reinício, e termopares para o conhecimento da temperatura durante os ensaios. Os termopares também são utilizados para realização do controle no resfriamento da câmara.

Após o levantamento dos requisitos básicos de funcionalidade da bancada foi levantado às restrições que a bancada possui.

3.2 Restrições da bancada

Como todo projeto a bancada também possui as suas restrições. Dentre as restrições, pode-se citar o espaço físico a ser ocupado pela bancada. Como a bancada foi construída e instalada nas dependências do Laboratório de Ciências Térmicas, o LACIT, que está localizado na sede central do campus Curitiba da UTFPR, existe uma restrição de espaço. O laboratório de testes do LACIT possui uma área total de oitenta metros quadrados, com um pé direito de quatro metros de altura. Para a instalação da bancada foi destinado um setor do laboratório de testes com uma área de aproximadamente vinte metros quadrados, sendo um retângulo de quatro por cinco metros.

Para estipular o tamanho que a câmara climatizada possui foram levados em conta dois pontos de projeto, o primeiro ponto já foi mencionado, é o espaço físico no laboratório de testes que foi destinado a instalação da bancada. O tamanho máximo que a câmara poderia possuir seria de quatro metros de largura por cinco metros de comprimento por quatro metros de altura. O segundo ponto de projeto é o tamanho mínimo que a bancada deve ter. Para não sofrer influência de perdas de calor por efeito aleta, é previsto que os componentes fiquem alocados dentro da câmara térmica. Com isso, para se estimar o tamanho da câmara térmica, é necessário conhecer a dimensão da bomba, do reservatório térmico, do evaporador e o comprimento da tubulação.

Como mencionado nos requisitos da bancada, a tubulação deve ser longa, portanto seria necessária uma câmara que fosse longa o bastante para alocar a tubulação. Uma solução seria fabricar uma tubulação com várias curvas para reduzir o espaço ocupado, mas como a tubulação não pode ter tubos em 90° na seção de testes, para não influenciar os picos de pressão gerados, foi especificado o formato helicoidal para a tubulação. Este formato de tubulação baseia-se nos trabalhos de Rohan (2006) e Gandelman et al. (2006), possibilitando a realização de experimentos em uma tubulação extensa que ocupa pouco espaço físico.

Outra restrição importante refere-se aos parâmetros de controle dos ensaios da bancada: pressão de bombeamento, vazão de bombeamento e taxa de resfriamento e de aquecimento. Os dois primeiros parâmetros são relevantes a bomba a ser utilizada. A escolha da faixa de pressão e de vazão da bomba é determinada pelo tipo de fluido e das suas propriedades reológicas. As restrições térmicas da bancada vão depender da potência do sistema de resfriamento e de aquecimento do sistema. É importante lembrar que o sistema de resfriamento também influencia no tamanho mínimo que a bancada pode ter, e que quanto maior a potência do sistema de resfriamento maior deve ser o evaporador, e conseqüentemente maior o tamanho da câmara.

3.3 Concepção preliminar

Com base nos dois pontos fundamentais de projeto, citados no início desse capítulo, os requisitos e restrições, mostrados em resumo na Tabela 3.1, é possível então criar a concepção preliminar da bancada. A concepção preliminar é necessária para facilitar a realização do projeto, pois especificando os equipamentos necessários para a construção tem-se uma visão global do projeto, tornando assim, o dimensionamento dos equipamentos uma tarefa mais fácil.

Tabela 3.1 - Descrição dos requisitos e restrições de cada componente

GRUPOS	REQUISITOS	RESTRICÇÕES
Reservatório térmico	Aquecer o óleo até a temperatura desejada	Sem restrição construtiva
Bomba	Possuir controle preciso na vazão, e consequentemente nas taxas de cisalhamento	Utilização de óleo de base parafínica para condições ótimas de operação
	Possuir pressão necessária para realizar a quebra do gel formado	Sem restrição construtiva
Tubulação de testes	Ser longa suficiente para representar uma situação real de transporte	Seu formato deve ser em espiral para não ocupar um espaço muito grande
	Ser longa suficiente para absorver eventuais compressibilidades do fluido no reinício do escoamento	
Câmara	Isolar a tubulação de teste e demais componentes do ambiente	Possuir um tamanho que não supere a área destinada para sua instalação e que seja possível alocar todos os equipamentos necessários internamente
Sistema de controle de temperatura	Realizar o resfriamento dos componentes internos a câmara na taxa desejada	Possuir uma capacidade máxima de resfriamento
Sistema de aquisição de dados	Possuir transdutores de pressão e termopares	Sem restrição construtiva

Portanto para um correto funcionamento e uma futura análise coerente dos dados retirados dos ensaios, a bancada deve conter os seguintes componentes:

- ✓ Reservatório térmico;
- ✓ Bomba;
- ✓ Tubulação de testes;
- ✓ Câmara de isolamento térmico;
- ✓ Sistema de controle de temperatura
- ✓ Sistema de aquisição de dados
- ✓ Estrutura metálica

Com o intuito de facilitar o desenvolvimento do projeto, a bancada foi dividida em grupos. Os componentes que compõe cada grupo e um resumo da principal

função de cada grupo podem ser observados na Tabela 3.2. Uma descrição completa de cada componente e da sua especificação ou dimensionamento será descrito no capítulo seguinte.

Tabela 3.2 - Principais componentes da bancada

GRUPOS	FUNÇÃO	COMPONENTES
Reservatório Térmico	Aquecer o óleo até a temperatura desejada	Reservatório aquecido por resistências
Sistema de Circulação	Proporcionar a circulação do óleo na bancada	Bomba Tubulação Válvulas de controle
Sistema de Controle de Temperatura	Proporcionar o controle da temperatura dos testes	Câmara térmica Sistema de refrigeração Sistema de aquecimento Sistema de circulação de ar
Sistema de Aquisição de Dados	Proporcionar a coleta das informações obtidas durante os testes	Sistema de aquisição de dados Transdutores de pressão Termopares Sistema de medição
Estrutura	Proporcionar sustentação aos componentes da bancada	Estrutura metálica

4 PROJETO DA BANCADA

Nesta parte do trabalho é apresentada a especificação e/ou dimensionamento de cada componente selecionado nos grupos pertencentes a bancada. O escopo desse trabalho é apresentar de maneira detalhada como foram dimensionados e especificados os componentes mecânicos, de controle e aquisição de dados. Apesar de fazer parte da bancada, o projeto elétrico e todos os assuntos pertinentes da parte elétrica da bancada, como ações de contingência e de segurança elétricas, não serão abordado neste trabalho.

4.1 Reservatório térmico

Além de conter a quantidade de óleo necessária o preenchimento total da tubulação e da bomba, outra função do reservatório é o aquecimento do óleo à temperatura de 60 °C. Por se tratar de um fluido inflamável, o aquecimento do óleo deve ser feito de forma indireta. O método mais viável encontrado para essa situação é o banho térmico. Primeiro aquece-se um fluido, e então este fluido aquecido transfere calor para aquecer o recipiente contendo o óleo.

A primeira ideia seria a compra de um banho térmico já existente no mercado, mas como não foi encontrado um sistema que suportasse as pressões que o sistema pode ser submetido (cerca de 240 bar, como será visto mais adiante), foi descartada essa opção. Portanto, optou-se por desenvolver um conjunto que atendesse às seguintes necessidades:

- Seleção de um fluido de aquecimento não inflamável com alta condutividade térmica;
- Seleção de um material resistente à oxidação;
- A estrutura do reservatório deve resistir as pressões que o sistema pode ser submetido, cerca de 240 bar;
- O volume interno deve ser suficiente para armazenar o volume que preenche toda a tubulação e os cilindros de bombeamento, neste caso 12 litros;

Para o desenvolvimento do reservatório, optou-se em contratar uma empresa especializada para desenvolvê-lo e fabricá-lo. Foram contatadas duas empresas

para o desenvolvimento do banho-térmico: a Comberger do Brasil e a Objetiva Projetos Industriais. As duas empresas se mostraram capazes de realizar a fabricação respeitando os requisitos necessários. O fator que definiu a escolha foi o valor cotado por cada empresa. A Comberger orçou um valor de R\$ 7.900,00 para a fabricação e instalação, enquanto que a Objetiva orçou R\$ 10.550,00 para também realizar a fabricação e instalação. A opção foi pelo orçamento de menor valor. A Figura 4.1 apresenta o modelo 3D feito pela empresa.

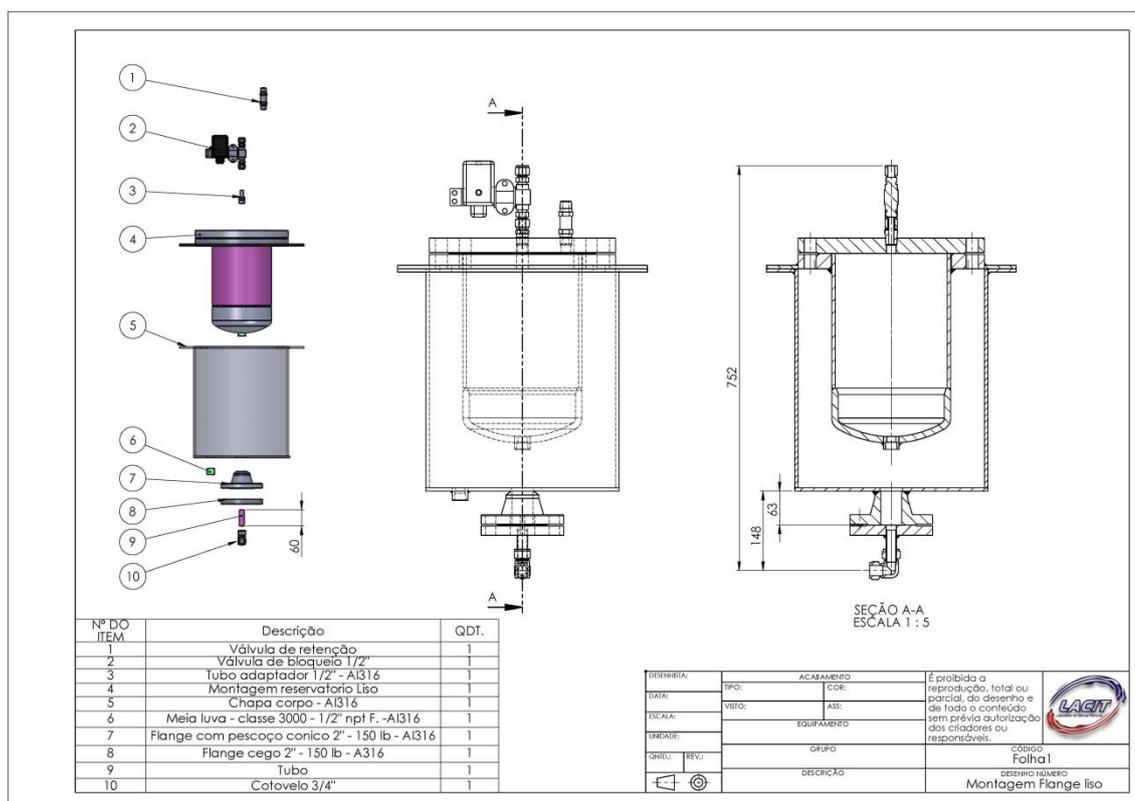


Figura 4.1 - Desenho de fabricação do reservatório térmico

O reservatório é utilizado para armazenar e realizar o aquecimento do óleo. Como visto nos capítulos anteriores quando submetido a baixas temperaturas, o óleo contendo parafina gelifica. Assim ao ser aquecido, os cristais formados são dissolvidos diminuindo a viscosidade do óleo, facilitando a sua fluidez. A fim de garantir uma completa homogeneização do óleo no reservatório foi adicionado um agitador mecânico composto por uma haste e hélice, ambas fabricadas em aço inoxidável, e um motor elétrico de 1,5 CV que rotaciona a 1710 rpm. O controle de rotação do motor elétrico é feito por um inversor de frequência. Para aquecer o

reservatório utiliza-se uma resistência elétrica que fica submersa na água. A potência da resistência é de 3,5 kW.

Para medir a temperatura do óleo no interior do reservatório, são utilizados sensores do tipo PT100 da marca Alutal. Sua faixa de operação é de -15 a 80 °C. Possui cabeçote reduzido e enclausurado para operações em ambientes a baixas temperaturas. Possui poço de proteção para a haste de leitura com conexão roscada de 1/2" NTP.

Devido a utilização de um alto grau de proteção, a massa total do reservatório foi de aproximadamente 90 kg. A fim de facilitar a movimentação do reservatório dentro da câmara foi elaborado um sistema de trilhos. A Figura 4.2 apresenta uma foto do reservatório posicionado nos trilhos com todos componentes. O custo total do reservatório somado ao agitador e ao PT100 foi de R\$ 8.300,00.



Figura 4.2 - Reservatório térmico sobre trilho

4.2 Sistema de circulação

4.2.1 Bomba

Para este projeto foi considerado uma bomba de deslocamento positivo, do tipo alternativa. Bombas desse tipo se caracterizam por elevadas pressões e vazões relativamente pequenas. (BRASIL, 2012)

Para especificar a bomba é necessário o conhecimento de alguns pontos fundamentais de operação. Para este trabalho pode-se destacar dois pontos: o primeiro deles trata da elevada pressão que deve ser fornecida ao fluido que se encontra na tubulação para que ocorra a quebra do gel e o reinício do escoamento. O segundo ponto é a condição de regime permanente, quando a bomba deve fornecer pressão suficiente para vencer a perda de carga na tubulação e manter o escoamento do fluido com uma determinada vazão. A retomada do escoamento é a condição mais crítica, uma vez que a pressão necessária para vencer a tensão do gel pode ser muito elevada, dependendo das características do óleo e das condições de operação.

Para o dimensionamento e seleção da bomba deste projeto devem-se conhecer os seguintes fatores, listados abaixo:

- a) Estimativa da faixa de vazão de operação;
- b) Estimativa do gradiente de pressão da quebra do gel;
- c) Cálculo da perda de carga durante a circulação em regime permanente;

Para se conhecer o primeiro fator listado, é necessário saber os valores de taxa de cisalhamento e do diâmetro da tubulação, em formato helicoidal, utilizada na seção de testes da bancada, como pode ser visto pela Equação 1. Esta equação apresenta a variação da vazão da bomba em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e do diâmetro (D). Como se observa, a influência sobre o termo da vazão é mais significativo para a variação do diâmetro do que para a taxa de cisalhamento, pelo fato do diâmetro estar elevado ao cubo.

$$Q = \frac{\dot{\gamma} D^3 \pi}{32} \quad (1)$$

A primeira intervenção significativa dos engenheiros do CENPES, responsáveis por este projeto, foi na determinação nas taxas de cisalhamento a serem controladas. Segundo os engenheiros as taxas que deveriam ser consideradas são: 5, 10 e 20 s^{-1} . Essas taxas são obtidas durante as operações reais de transporte de petróleo em oleodutos. Conhecendo os valores das diferentes taxas de cisalhamento pode-se, então, estipular medidas de diâmetros diferentes e assim conhecer os valores das respectivas vazões. Foram determinados três diâmetros distintos, sendo a dimensão deles de 5, 10 e 20 mm.

Com os valores das taxas de cisalhamento e dos diâmetros foi realizado o cálculo para a determinação da vazão conforme visto na Equação 1.

A Tabela 4.1 apresenta os valores das vazões obtidas para os diferentes diâmetros e taxas de cisalhamento. Considerando os valores obtidos na Tabela 4.1 pode-se realizar o descarte da utilização do diâmetro de 5 mm, pois esse diâmetro não apresentar nenhum valor de taxa de cisalhamento definidos anteriormente. Observando a Tabela 4.1 verifica-se também que, as vazões para cada taxa de cisalhamento e diâmetro podem ser identificadas. No caso do diâmetro de 10 mm os valores de vazão para as taxas de cisalhamento de 5, 10 e 20 s^{-1} são de 30, 60 e 120 ml/min, respectivamente. No caso do diâmetro de 20 mm os valores de vazão são de 240, 480 e 960 ml/min para as taxas de 5, 10 e 20 s^{-1} . A seleção do diâmetro será feita mais adiante.

Tabela 4.1 - Variação dos valores de vazão para diferentes valores de diâmetros e de taxas de cisalhamento

DIÂMETRO DE 5 mm					DIÂMETRO DE 10 mm					DIÂMETRO DE 20 mm				
VAZÃO [ml/s]	VAZÃO [ml/min]	TAXA CISALHAMENTO [s ⁻¹]	ΔP/L [pa.m]	ΔP [bar]	VAZÃO [ml/s]	VAZÃO [ml/min]	TAXA CISALHAMENTO [s ⁻¹]	ΔP/L [pa.m]	ΔP [bar]	VAZÃO [ml/s]	VAZÃO [ml/min]	TAXA CISALHAMENTO [s ⁻¹]	ΔP/L [pa.m]	ΔP [bar]
0,50	30,00	40,74	54103,24	27,05	0,50	30,00	5,09	3381,45	1,69	0,50	30,00	0,64	211,34	0,11
1,00	60,00	81,49	108206,48	54,10	1,00	60,00	10,19	6762,91	3,38	1,00	60,00	1,27	422,68	0,21
1,50	90,00	122,23	162309,73	81,15	1,50	90,00	15,28	10144,36	5,07	1,50	90,00	1,91	634,02	0,32
2,00	120,00	162,97	216412,97	108,21	2,00	120,00	20,37	13525,81	6,76	2,00	120,00	2,55	845,36	0,42
2,50	150,00	203,72	270516,21	135,26	2,50	150,00	25,46	16907,26	8,45	2,50	150,00	3,18	1056,70	0,53
3,00	180,00	244,46	324619,45	162,31	3,00	180,00	30,56	20288,72	10,14	3,00	180,00	3,82	1268,04	0,63
3,50	210,00	285,21	378722,69	189,36	3,50	210,00	35,65	23670,17	11,84	3,50	210,00	4,46	1479,39	0,74
4,00	240,00	325,95	432825,93	216,41	4,00	240,00	40,74	27051,62	13,53	4,00	240,00	5,09	1690,73	0,85
4,50	270,00	366,69	486929,18	243,46	4,50	270,00	45,84	30433,07	15,22	4,50	270,00	5,73	1902,07	0,95
5,00	300,00	407,44	541032,42	270,52	5,00	300,00	50,93	33814,53	16,91	5,00	300,00	6,37	2113,41	1,06
5,50	330,00	448,18	595135,66	297,57	5,50	330,00	56,02	37195,98	18,60	5,50	330,00	7,00	2324,75	1,16
6,00	360,00	488,92	649238,90	324,62	6,00	360,00	61,12	40577,43	20,29	6,00	360,00	7,64	2536,09	1,27
6,50	390,00	529,67	703342,14	351,67	6,50	390,00	66,21	43958,88	21,98	6,50	390,00	8,28	2747,43	1,37
7,00	420,00	570,41	757445,38	378,72	7,00	420,00	71,30	47340,34	23,67	7,00	420,00	8,91	2958,77	1,48
7,50	450,00	611,15	811548,63	405,77	7,50	450,00	76,39	50721,79	25,36	7,50	450,00	9,55	3170,11	1,59
8,00	480,00	651,90	865651,87	432,83	8,00	480,00	81,49	54103,24	27,05	8,00	480,00	10,19	3381,45	1,69
8,50	510,00	692,64	919755,11	459,88	8,50	510,00	86,58	57484,69	28,74	8,50	510,00	10,82	3592,79	1,80
9,00	540,00	733,39	973858,35	486,93	9,00	540,00	91,67	60866,15	30,43	9,00	540,00	11,46	3804,13	1,90
9,50	570,00	774,13	1027961,59	513,98	9,50	570,00	96,77	64247,60	32,12	9,50	570,00	12,10	4015,47	2,01
10,00	600,00	814,87	1082064,83	541,03	10,00	600,00	101,86	67629,05	33,81	10,00	600,00	12,73	4226,82	2,11
20,00	1200,00	1629,75	2164129,67	1082,06	20,00	1200,00	203,72	135258,10	67,63	20,00	1200,00	25,46	8453,63	4,23
30,00	1800,00	2444,62	3246194,50	1623,10	30,00	1800,00	305,58	202887,16	101,44	30,00	1800,00	38,20	12680,45	6,34
40,00	2400,00	3259,49	4328259,34	2164,13	40,00	2400,00	407,44	270516,21	135,26	40,00	2400,00	50,93	16907,26	8,45

O segundo fator que deve ser conhecido para o dimensionamento da bancada é a pressão necessária para a quebra do gel formado (ΔP_{quebra}). Esta grandeza está diretamente relacionada a tensão de cisalhamento na parede interna da tubulação (τ_R) e ao comprimento da tubulação (L), e é inversamente proporcional ao diâmetro interno da tubulação (D), conforme mostra a Equação 2 (GANDELMAN et al., 2009).

$$\Delta P_{Quebra} = \frac{4 \tau_R L}{1 D} \quad (2)$$

Como a tensão de cisalhamento na parede interna sofre influência da temperatura do teste e de parâmetros como taxa de resfriamento e cisalhamento, seu valor é obtido por métodos empíricos. Para este projeto o valor utilizado da tensão de cisalhamento foi retirado de testes realizados pelo próprio laboratório de reologia do LACIT. O óleo utilizado nos testes realizados pelo LACIT possuía as propriedades reológicas de óleo parafínico, e seu valor tensão limite de escoamento, de 1200 Pa, foi obtido quando este óleo encontrava-se gelificado a 4°C. Conhecendo o valor da tensão de cisalhamento na parede interna, pode-se então determinar o gradiente de pressão necessário para que ocorra a quebra do óleo gelificado durante o reinício do escoamento. Para este cálculo o comprimento utilizado foi o mesmo da seção de testes, por ser o local onde ocorre a quebra do gel e o eventual pico de pressão.

A Tabela 4.2 apresenta os valores do gradiente de pressão obtidos nos cálculos para os diferentes diâmetros. Observa-se que o maior valor do gradiente de pressão (240 bar) é obtido para tubulação com o menor diâmetro, neste caso de 10 mm. Este maior valor do gradiente de pressão pelo menor diâmetro da tubulação é explicado pelo fato do diâmetro e do gradiente de pressão ser grandezas inversamente proporcionais. Este valor representa a pressão necessária que a bomba deve fornecer garantir a quebra do óleo gelificado na tubulação.

Tabela 4.2 - Comparativo das condições de operações

DIAMETRO [mm]	COMPR. [m]	TENSÃO QUEBRA GEL [pa]	ΔP QUEBRA GEL [bar]	VAZÃO [ml/s]	VAZÃO [ml/min]	TAXA CIS. [s^{-1}]	$\Delta P/L$ [pa.m]	ΔP [pa]	ΔP [bar]
10	50	1200	240	0,5	30	5,09	3381,45	169072,63	1,69
				1	60	10,19	6762,91	338145,26	3,38
				2	120	20,37	13525,81	676290,52	6,76
20			120	4	240	5,09	1690,73	84536,32	0,85
				8	480	10,19	3381,45	169072,63	1,69
				20	1200	25,46	8453,63	422681,58	4,23

Rearranjando a equação de vazão em volume como função da queda de pressão foi possível obter o valor da perda de carga na tubulação e devido as diferentes vazões. Este cálculo é possível, pois a vazão é diretamente proporcional a perda de carga, ou seja, quanto maior a vazão do sistema maior será a perda de carga. Além da vazão de trabalho e da pressão necessária para a quebra do gel a Tabela 4.1, apresenta os valores para a perda de carga originada pelo escoamento no interior da tubulação de testes. A perda de carga foi calculada pela Equação 3, em que D é o diâmetro da tubulação, L é o comprimento da tubulação, Q é a vazão e μ é a viscosidade dinâmica do óleo. Para o cálculo foi adotado o valor de 31,12 Pa.s para a viscosidade dinâmica. Como o valor da viscosidade aumenta com a diminuição da temperatura foi escolhido o valor da viscosidade para a menor temperatura que a bancada deve operar, neste caso 4 °C. Este valor de viscosidade foi obtido pelo laboratório de reologia do LACIT, por testes realizados com o mesmo óleo mencionado no cálculo da tensão de cisalhamento na parede da tubulação.

$$\Delta P = \frac{Q128\mu L}{\pi D^4} \quad (3)$$

Além da perda ocorrida no interior da tubulação de teste, devem ser levadas em conta as perdas de carga ocasionadas pelos acessórios utilizados no sistema de circulação. Estimou-se utilizar os seguintes equipamentos:

- Dois tê-padrão com entrada e saídas de 10 milímetros;
- 10 cotovelos com raio longo de 90°;
- 5 cotovelos com raio curto de 45°;
- 3 válvulas globo;

As perdas de carga geradas pelos acessórios listados podem ser calculadas segundo a Equação 4, conforme conhecimento do raio da tubulação (R), do comprimento equivalente (L_E / D) de cada acessório, da vazão (Q) e do fator de atrito (f) correspondente a cada vazão. É necessário também conhecer o peso específico do fluido (ρ) utilizado nos testes. Como é previsto a utilização de diferentes óleos de base parafínicas, foi estipulado que o valor do peso específico seria um valor médio de diferentes amostras de óleos. Segundo Thomas (2004), óleos da classe parafínica apresentam peso específico médio de $\rho=850 \text{ kg/m}^3$.

$$\Delta p = \rho f \left(\frac{L_E}{D} \right) \frac{Q^3}{2\pi^2 R^4} \quad (4)$$

A Tabela 4.3 apresenta o valor da perda de carga total dos acessórios calculado para os diâmetros de 10 e 20 mm, e as respectivas faixas de vazões de cada diâmetro. Os valores da perda de carga correspondente a cada acessório, bem como o comprimento equivalente dos acessórios e fator de atrito de cada faixa de vazão, podem ser conferidos no Anexo A deste trabalho.

Tabela 4.3 - Perda de carga aproximada para os dois diâmetros

DIÂMETRO [mm]	Q [ml/min]	ΔP total[bar]
10	30	1,05
	60	1,86
	120	3,37
20	240	8,28
	480	15,96
	1200	31,32

Um ponto de importante destaque é o fato das Equações 3 e 4 ser válidas para fluidos newtonianos e, considerando que os óleos parafínicos apresentam propriedades de fluido newtoniano a altas temperaturas e passam a apresentar propriedades de um fluido não newtoniano a baixas temperaturas (Aiyejina et al., 2011), as equações serão utilizadas apenas para obter um valor aproximado da perda de carga nos acessórios.

O somatório das perdas de cargas obtidas para os acessórios, com a perda no interior da tubulação em formato de helicoidal para os diâmetros de 10 e 20 mm, e as diferentes faixas de vazão pode ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores totais das perdas de carga

DIÂMETRO [mm]	Q [ml/min]	ΔP Acessórios [bar]	ΔP Tubulação helicoidal [bar]	ΔP Total [bar]
10	30	1,05	1,69	2,74
	60	1,86	3,38	5,24
	120	3,37	6,76	10,13
20	240	8,28	0,85	9,13
	480	15,96	1,69	17,65
	1200	31,32	4,23	35,55

Resumindo, a bomba especificada deverá atender aos seguintes requisitos:

- a) Para tubulação com diâmetro de 10 mm
 - ✓ Vazão de trabalho variando entre 30 e 120 ml/min;
 - ✓ Pressão máxima para a condição de reinício do escoamento 240 bar;
 - ✓ Pressão da condição de operação em regime permanente variando entre 2,74 a 10,13 bar;
- b) Para tubulação com diâmetro de 20 mm
 - ✓ Vazão de trabalho variando entre 240 e 1200 ml/min;
 - ✓ Pressão máxima para a condição de reinício do escoamento 120 bar;
 - ✓ Pressão da condição de operação em regime permanente variando entre 9,13 a 35,55 bar;

Como visto anteriormente a bancada irá operar em várias temperaturas, sendo a menor temperatura em torno de 4°C e a maior em torno de 60°C. Com a variação da temperatura ocorre a variação da viscosidade do óleo, comportando-se como um fluido altamente viscoso para as baixas temperaturas e pouco viscoso para altas temperaturas.

Mattos e Falco (1989) apresentam as características e limites de aplicação de bombas rotativas e alternativas. A Tabela 4.5 mostra um resumo destas informações. Devido aos requisitos necessários (alta pressão e baixas vazões),

verifica-se que há uma maior tendência em se optar por bombas de êmbolo ou bombas de diafragmas para aplicação na bancada.

Tabela 4.5 - Limites de operação de bombas rotativas e alternativas

	Tipo de bomba	Pressão máxima [bar]	Vazão máxima [L/min]
Bombas Rotativas	Bombas de engrenagem	30	3.400
	Bombas de parafusos	205	300
	Bombas de palhetas	175	1.400
Bombas Alternativas	Bombas de êmbolo	515	70
	Bombas de pistão único	55	2.000
	Bombas de diafragma metálico	3.100	40
	Bombas de diafragma de plástico	105	40
	Bombas de diafragma de elastômero	55	40

Após pesquisar fornecedores e fabricantes de bombas de êmbolo ou bombas de diafragma, encontrou-se um fornecedor americano de bombas, a Teledyne Isco. Este fabricante é especializado na fabricação de bombas de êmbolo. As vantagens de utilização desse tipo de bomba são:

- Precisão na medição da vazão;
- Controle preciso da pressão;
- Pequenas vazões de operação;
- Elevadas pressões de bombeio;
- Grande faixa de temperatura de trabalho, de -20 a 200°C;

Existem vários modelos desse tipo de bomba, sendo divididos em dois grupos de bomba: as simples (somente uma torre de bombeamento) e em conjunto (um par ou mais de torres de bombeamento). A continuidade do escoamento é um fator de extrema importância para o presente trabalho. Sendo assim, optou-se pela seleção de uma bomba em conjunto, pela capacidade de se obter uma vazão contínua e constante. O regime de operação de uma bomba de duplo êmbolo é extremamente simples, mas eficaz. No início do bombeamento ambas as bombas devem estar preenchidas com o óleo. Após o primeiro êmbolo iniciar a operação o segundo fica parado, somente quando o primeiro êmbolo esta prestes a esgotar o fluido em seu interior e atingir o fim de curso, a segunda bomba entra em operação. No momento que a segunda bomba começa a realizar o bombeamento, o primeiro êmbolo inicia o

retorno à posição inicial. Durante o retorno ocorre o abastecimento do êmbolo para que se possa iniciar um novo ciclo. A Tabela 4.6 apresenta algumas características construtivas e funcionais das bombas de êmbolo da Teledyne Isco.

Comparando as faixas de vazões obtidas das diferentes taxas de cisalhamento (5, 10 e 20 s⁻¹) e dos diferentes diâmetros (10 e 20 mm), com as vazões detalhadas na Tabela 4.6, foi visto que não existe nenhum modelo dessa bomba que atendesse os requisitos necessários para a utilização de uma tubulação com 20 mm de diâmetro, em contrapartida, constatou-se que o modelo de bomba 500 D, atendia a todos os requisitos para a tubulação com 10 mm de diâmetro. Portanto foi definido que o modelo de bomba 500 D, indicado com um retângulo preto na Tabela 4.6, e o diâmetro de 10 mm seriam os definidos para este projeto. A Figura 4.3 apresenta uma foto do modelo selecionado para a bancada. O valor orçado da bomba foi de em R\$ 117.000,00.

Tabela 4.6 - Dados funcionais e construtivos das bombas seringa Teledyne Isco

	1000D	500D	260D	100DX	100DM	65D
Módulos de Bombas						
Capacidade	1015 ml	507 ml	266 ml	103 ml	103 ml	67 ml
Faixa de fluxo (ml/min)	0.100-408	0.001-204	0.001-107	0.00001-60	0.00001-30	0.00001-25
Precisão do Fluxo	0.5% de Ponto Fixo			0.3% de Ponto Fixo		
Faixa de Pressão (psi)	0-2,000	0-3,750	0-7,500	0-10,000	0-10,000	0-20,000
Precisão de Pressão Básica	0.5% FS					
Diâmetros Básicos de tubos	1/4" NPT	1/8" NPT	1/8" Valco			1/4" F250C
Faixa de Temperatura Básica	5 - 40°C Ambiente					
Fonte	100 Vac, 117 Vac, 234 Vac, 50/60 Hz					
Dimensões	Altura: 103 cm; Largura: 27 cm; Profundidade: 47 cm.				108 cm	
Sistema de Bomba Duplo						
Faixa de Fluxo* (ml/min)	0.1-300	0.001-138	0.001-80	0.00001-45	0.00001-22	N/A
Controlador da Bomba						
Modos Operacionais	Bomba Simples, Fluxo ou Pressão Constante Bomba Dupla, Fluxo ou Pressão Constante Bomba Simples, Fluxo ou Pressão Programável Bomba Dupla, Fluxo ou Pressão Gradiente 3-Bombas, Operação Independente 3-Bombas, Fluxo Contínuo sem Modificador					
Memória	200 passos programáveis					
Interface Externa	Saída RS-232 analógica, fechamento de contato digital para CORRIDA/PARADA,ENCHER/DISPENSAR. Cartão 4-20 mA de saída/entrada e opções de produção de voltagem analógicas estão disponível.					

Fonte: Catálogo de seleção fornecido pela Teledyne Isco

Composto de dois módulos de bombas de êmbolo, o modelo 500 D acompanha um controlador digital e um kit de válvulas a ar (pneumática). A capacidade volumétrica de cada cilindro é de 507 ml totalizando um volume de 1015 ml. A faixa de vazão é de 0,001 a 138 ml/min. A faixa de pressão de operação pode variar de 0 a 258 bar. As tubulações de entrada e saída de fluido dos cilindros possuem diâmetro de 3/8", com roscas para conexão do tipo NPT de 3/8" nas extremidades. A precisão de pressão é de cerca de 0,5 % e a precisão da vazão de 0,5 %. Esta bomba possui faixa de temperatura de trabalho de 0 a 80°C.



Figura 4.3 - Bomba Teledyne Isco modelo 500 D
Fonte: Catálogo Bomba Seringa Teledyne Isco

4.2.2 Tubulação

Com a função de representar os tubos por onde o óleo passa durante seu escoamento, a tubulação em formato de helicoidal é um dos itens mais importantes da bancada. A importância deve-se ao fato da gelificação e as tomadas de pressão ocorrer nesta seção tubulação. Como visto no tópico dos requisitos da bancada o comprimento definido para a tubulação da seção de testes é de 50 metros. Este comprimento foi escolhido para representar de forma semelhante, as condições encontradas em operações reais de transporte de óleo. Outra razão para utilizar uma

tubulação longa, é fato de o óleo parafínico ser compressível, portanto para verificar a intensidade da compressibilidade é necessário um comprimento significativo da tubulação. Outro fator que influenciou na escolha do comprimento é a influência direta que o comprimento exerce sobre a magnitude da tensão gel e, conseqüentemente, na especificação da bomba utilizada.

Para uma correta especificação foi levado em conta:

- O material a ser usado;
- As dimensões dos tubos usados na construção (diâmetro e espessura);
- Características construtivas da tubulação em formato de espiral (diâmetro nominal, número de espiras, passo, altura e comprimento total);
- O método de fabricação da tubulação em formato de espiral (tipo de solda e conformação);

Listados os itens a serem determinados, o primeiro passo para uma especificação correta foi a seleção do material tubulação em formato de espiral. Dois fatores determinaram essa escolha: o ambiente em que a tubulação fica exposta e as pressões de trabalho submetidas. A situação de trabalho exige que a tubulação seja submetida a uma condição muito úmida e fria ou muito seca e quente, sendo propício para a corrosão de um aço comum sem tratamento. Como visto, o reinício do escoamento exigirá da bomba pressões elevadas para a quebra do gel formado. Portanto, o material mais indicado para exercer essas necessidades é o aço inoxidável, devido a alta resistência à tração e pelo fato desse tipo de aço não oxidar com o tempo. Dentre os aços inoxidáveis disponíveis no mercado, o selecionado para a bancada foi o AISI 316, por possuir um preço de mercado um pouco inferior ao AISI 304.

Como mencionado anteriormente um fator determinante no projeto é a tensão de cisalhamento no reinício do escoamento. Sabe-se que o diâmetro interno do tubo exerce influência sobre a tensão de cisalhamento e conseqüentemente na pressão no reinício do escoamento, por isso sua escolha foi de extrema importância. Na parte da especificação da bomba, foi visto que, o diâmetro de 10 mm atende os requisitos necessários para a seleção da bomba. Portanto foi determinado que o

diâmetro utilizado na secção de testes da tubulação em formato helicoidal é de 10 mm. Como esta medida de diâmetro não se trata de um valor padrão, foi necessário encontrar um tubo que apresentasse valores próximos a este diâmetro, sendo o valor mais próximo encontrado no mercado 10,33 milímetros.

O tubo com diâmetro de 10,33 mm é fabricado pela empresa Swagelok. Com o diâmetro interno conhecido, era necessário especificar uma espessura de tubo que conseguisse resistir ao pico de pressão gerado no reinício do escoamento. Consultando os catálogos foi selecionada, a espessura da parede de 0,87 mm, a qual resiste a uma pressão total de 260 bar.

Definidos o material e as dimensões do tubo, parte-se para a especificação da tubulação em formato helicoidal. O diâmetro das espiras foi calculado para que a tubulação em formato helicoidal ficasse com aproximadamente 800 milímetros de altura após conformada. Com isso o diâmetro médio determinado foi de 750 milímetros. Assim, para se alcançar o comprimento total de 50 m (estimado anteriormente), precisa-se de 21,5 espiras. A fim de se obter um espaçamento adequado entre as espiras, utilizou-se uma inclinação constante de 2° ao longo de todo o comprimento da tubulação. Isto acarretou um passo de 35 mm e uma altura total da tubulação em formato helicoidal é de 752,5 mm. Todas estas dimensões podem ser visualizadas na Figura 4.4, construída a partir do software SolidWorks 2012.

Para a fabricação da tubulação em formato helicoidal foram especificados dois importantes critérios: garantia de estanqueidade depois da sua conformação e soldagem, e soldagem dos tubos sem formação de rebarba interna;

A empresa Swagelok se mostrou apta a atender tais requisitos e o valor da tubulação em formato de espiral, incluindo material e mão-de-obra, foi de R\$ 14.959,00.

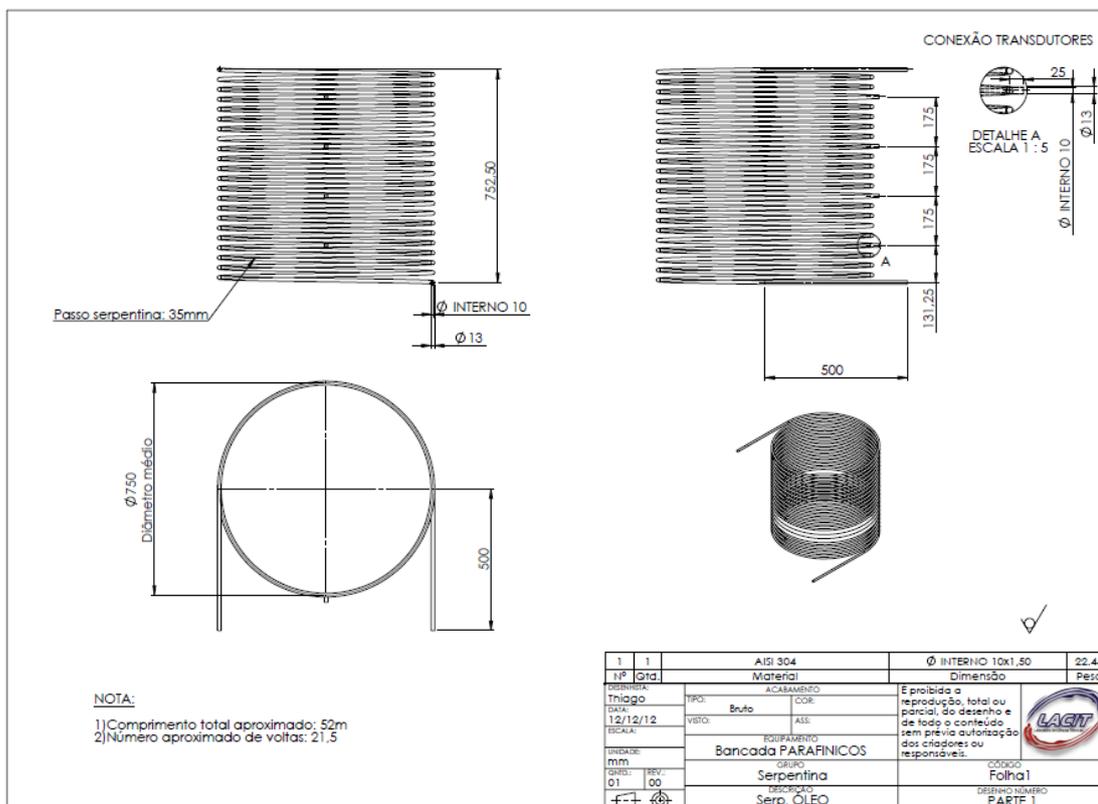


Figura 4.4 - Desenho de fabricação da tubulação em formato de espiral

4.2.3 Válvulas de controle 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. Para o projeto, foram selecionadas válvulas de bloqueio devido a necessidade do completo bloqueio de fluxo em algumas partes da tubulação.

Na construção da bancada foram utilizadas sete válvulas, sendo que quatro delas acompanham o conjunto da bomba, e as três restantes foram adquiridas para o controle de fluxo. Todas as válvulas são de duas vias com acionamento por atuador pneumático de dupla ação, controlados por solenoides.

As válvulas que acompanham a bomba seringa são fabricadas pela mesma empresa que forneceu os tubos para a fabricação da tubulação em formato de espiral, a Swagelok. São válvulas da série 83, indicadas para uso em altas pressões. O corpo das válvulas juntamente com sua esfera de bloqueio é fabricado em aço

inox 316, indicado para uso de fluidos como o petróleo. O modelo da válvula resiste a pressões de até 413 bar. O modelo selecionado pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Válvula Swagelok modelo SS-83KS8
Fonte: Catálogo válvulas de esfera trunnion (2013)

Sabendo que as válvulas do conjunto da bomba satisfazem às necessidades da bancada optou-se por adquirir válvulas iguais para garantia de um correto funcionamento. O valor final das três válvulas foi de R\$ 12.986,00.

O fluxograma da Figura 4.6 apresenta o esquema do escoamento de óleo na bancada. Observa-se 2 tipos de circulação, a primeira indicada em vermelho e a segunda em azul. A circulação em vermelho é utilizada quando o fluido deve sair pelo reservatório passar pela bomba seringa, tubulação em formato de espiral, e retornar ao reservatório. Nesta configuração as válvulas V1 e V3 permanecem abertas enquanto a V2 permanece fechada. Na circulação indicada em azul, o óleo sai do reservatório passa pela bomba, pela tubulação em formato helicoidal, e no momento de retornar ao reservatório são fechadas as válvulas V1 e V3 e aberta a válvula V2, assim o fluido retorna à bomba sem passar pelo reservatório.

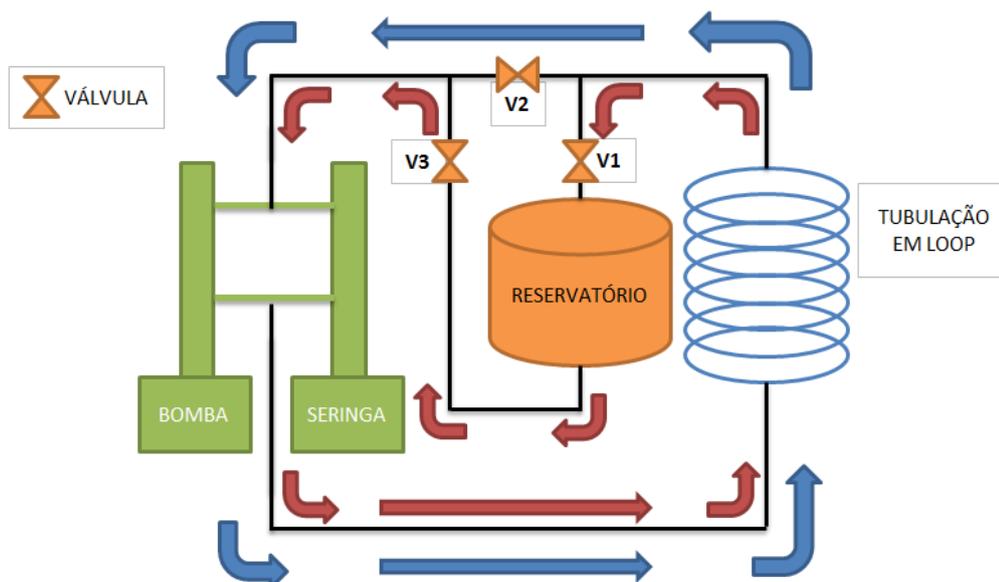


Figura 4.6 - Fluxograma da circulação do óleo

4.3 Sistema de controle da temperatura

O controle da temperatura do óleo é de extrema importância para a realização dos experimentos. Nas operações reais de transporte, o leito do mar normalmente apresenta temperaturas, em torno de 4 °C, e o reservatório de petróleo uma temperatura muito superior em comparação ao leito, cerca de 60 °C. Conforme visto no início deste capítulo, a temperatura influencia significativamente nos picos de pressão, uma vez que o valor da tensão limite de escoamento varia com a temperatura e a taxa de resfriamento imposta ao fluido. Neste projeto, foi feito o controle da taxa de resfriamento e da temperatura da câmara.

Um sistema de refrigeração foi utilizado para resfriar o ambiente e resistências elétricas são usadas para fazer o ajuste até a temperatura desejada. Ainda, a utilização de alguns termopares e de um sistema de aquisição de dados com retroação possibilitará a medição e o controle da temperatura.

4.3.1 Câmara térmica

Como a principal função da câmara é isolar termicamente os componentes do sistema do ambiente externo, optou-se por selecionar um material que desempenhasse essa função adequadamente. Para isso, foram escolhidas placas de poliestireno expandido encapsuladas com placas de aço, conhecidas comercialmente como isopanel. Essas placas são amplamente utilizadas em

câmaras frigoríficas, tornando-se a melhor opção para a finalidade em questão. Além de isolar termicamente, essas placas possuem uma boa resistência mecânica para construção. Com isso não foi necessário à fabricação de uma estrutura para fixar as placas.

Para seleção das placas foi levando em conta dois fatores:

- A espessura do composto (placa de aço + isopor + placa de aço);
- A medida padrão da largura das placas;
- Coeficiente global de transferência de calor;

O dimensionamento da câmara foi baseado nas dimensões dos componentes interno e da medida da largura padrão das placas. Para o cálculo da dimensão da câmara foi feito um estudo com o auxílio do *software* SolidWorks 2012. A Figura 4.7 ilustra a melhor opção encontrada para fabricação e montagem da câmara. O custo total da câmara foi de R\$ 1.304,69.

Como será visto mais adiante para dimensionar o sistema de refrigeração é necessário conhecer a carga térmica da câmara. Para a determinação desse importante parâmetro deve-se conhecer a área total de troca de calor. Nesta configuração a câmara possui uma área total de 12 m² com placas de espessura de 100 milímetros.

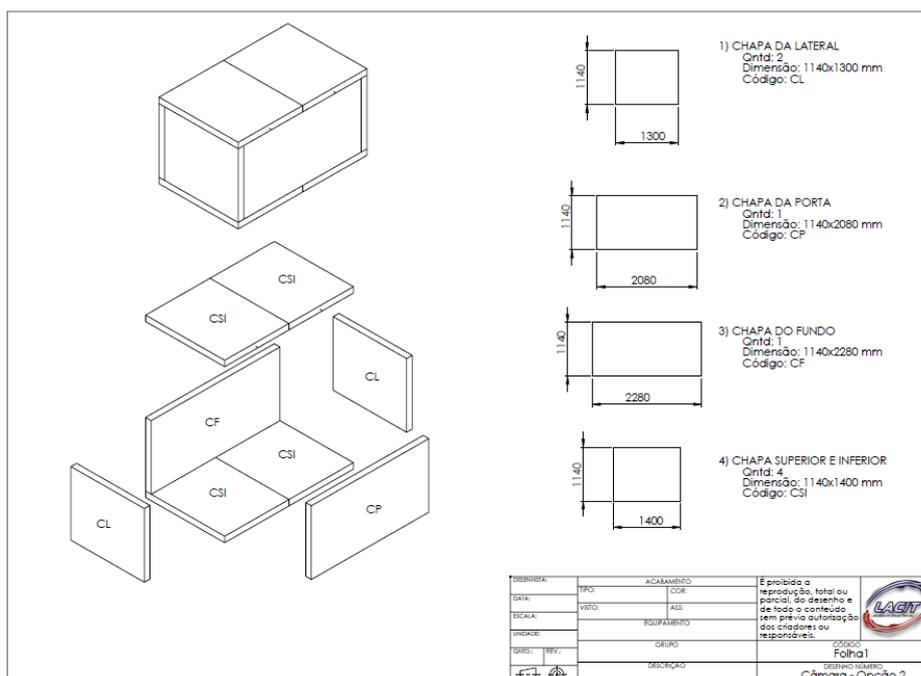


Figura 4.7 - Desenho montagem da câmara de isolamento

4.3.2 Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração tem a função de diminuir a temperatura no interior da câmara para a temperatura desejada. Para tanto, foi utilizado um ciclo de refrigeração de único estágio que atua por compressão mecânica de vapor, mostrado na Figura 4.8. Observa-se neste ciclo que a remoção de calor do interior da câmara é realizada pelo evaporador, enquanto que o compressor fornece a energia ao sistema. (STOECKER e JONES, 1985)

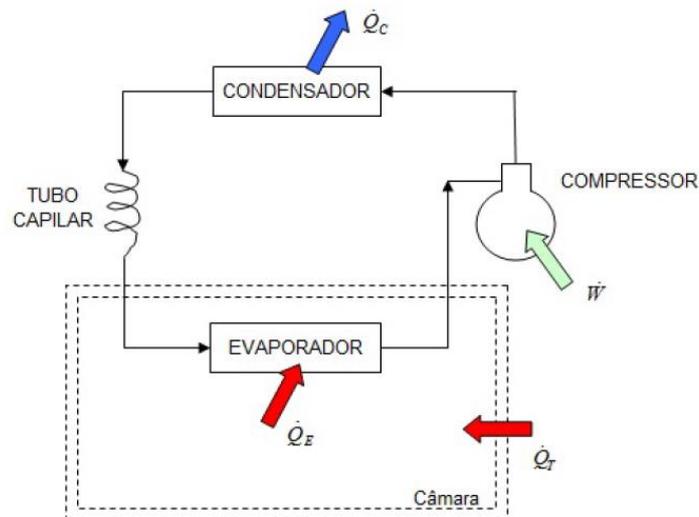


Figura 4.8 - Ciclo de refrigeração da câmara

A maneira mais simples para o cálculo da quantidade de calor que deve ser removida do sistema é considerar que a bancada encontra-se, em equilíbrio na temperatura máxima desejada, neste caso 60 °C, e calcular o quanto de calor deve ser removido para que a bancada permaneça na temperatura final desejada, 4 °C. Apesar de se tratar de um método simplificado, esse método apresenta uma aproximação muito boa da carga térmica total que deve ser removida. Nesse método a carga térmica total representa a soma da quantidade de calor retirada da bancada no resfriamento de 60 a 4°C, mais a carga térmica proveniente do ambiente externo e a taxa de geração de calor que existe no sistema. Esse calor gerado provém dos equipamentos que possuem motorização e/ou resistências elétricas. Na ilustração da Figura 4.8, a carga térmica total é indicada pela sigla \dot{Q}_T .

Como visto \dot{Q}_T é composta pelo somatório de duas cargas térmicas, sendo uma proveniente do ambiente externo (\dot{Q}_o) e outra do da quantidade de calor

gerado (\dot{Q}_G), e da quantidade de calor armazenada no sistema a 60 °C (Q_1). A somas das três parcelas representa a carga térmica total a ser retirada da câmara, como pode ser visto pela Equação 5.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_o + \dot{Q}_G + Q_1 \quad (5)$$

O cálculo do valor da carga térmica externa pode ser obtido pela Equação 6 segundo Stoecker e Jones (1985).

$$\dot{Q}_o = UA\Delta T \quad (6)$$

Nesta equação, A é a área total da câmara (12 m²) e ΔT é a diferença global de temperatura entre o ambiente externo e interno à câmara (na situação crítica, $\Delta T = T_{EXT} - T_{INT} = 35 - 4 = 31^\circ C$). U representa o coeficiente global de transferência de calor, seu valor foi fornecido pelo fabricante dos painéis da câmara térmica, sendo $U=0,3257 \text{ W/m}^2\text{K}$. Assim tem-se $Q_o = 121,3W$.

Além da carga térmica externa do sistema, outra forma de calor que está diretamente envolvida com a o balanço de energia do sistema é o calor gerado internamente a câmara térmica, \dot{Q}_G . Nesta bancada os equipamentos que compõem a carga térmica gerada internamente são a bomba, o motor de agitação do reservatório térmico e os motores dos ventiladores do sistema de circulação de ar. A obtenção dos dados de carga térmica gerada podem ser obtidos tanto pelo catálogo do fabricante dos equipamentos como por tabelas de carga térmicas. No caso da bomba não foi possível achar nenhum dado, portanto foi utilizado a mesma carga térmica de um ventilador do sistema de circulação de ar. Sendo assim em consulta ao catálogo do fabricante do motor de agitação obteve-se um valor de 900 W. Segundo Stoecker e Jones (1985) os valores de carga térmica para equipamentos elétricos podem ser aproximados por tabelas de valores pré-definidos pelos fabricantes. Como será informado mais adiante, o sistema de circulação de ar dispõe de três ventiladores. Utilizando a tabela de carga térmica obteve-se um valor

total de 2800 W (4 vezes 700 W) para os três ventiladores e a bomba. Portanto total de carga térmica gerada, \dot{Q}_G , é de 3700 W.

A última parcela da carga térmica total é representada pela quantidade total de calor armazenada na situação de aquecimento crítica encontrada na bancada, que seria quando o óleo e todos os componentes estáticos (tubulação, reservatório térmico, carcaça da bomba, carcaça do evaporador, ar interno a câmara) encontram-se a 60°C. Este cálculo pode ser realizado, utilizando a quantidade de calor que deve ser retirada do sistema para atingir a temperatura final de 4°C. A quantidade de calor pode ser calculada pela Equação 7. Em que m é a massa em quilogramas do material, c é o seu calor específico em J/kgK e ΔT é a diferença de temperatura em °C, neste caso a diferença entre 4 e 60 °C.

$$Q = mc\Delta T \quad (7)$$

A Tabela 4.7 apresenta uma relação dos equipamentos que foram analisados para o cálculo da quantidade de calor retirada. Junto com o equipamento é possível observar a massa em kg e o calor específico do material com maior quantidade em volume que compõe o equipamento. Esse parâmetro de escolha do calor específico do material que possui maior volume no equipamento representa uma aproximação muito boa do cálculo da quantidade de calor retirada. Realizando os cálculos descobriu-se que a quantidade de calor total a ser retirada seria de aproximadamente 8,8 MJ.

Em posse das três parcelas que compõe a carga térmica total do sistema é possível, então, estimar a taxa de resfriamento do sistema para diferentes taxas. Essa taxa de resfriamento consiste numa rampa de queda de temperatura por um período de tempo determinado, ou seja, representa a energia retirada da câmara por unidade de tempo. A Tabela 4.8 apresenta o total da capacidade de refrigeração que deve ser retirada do sistema para diferentes taxas de resfriamento.

Tabela 4.7 - Quantidade de calor para cada equipamento

Material de maior quantidade	Massa [Kg]	Calor específico [J/Kg.k]	ΔT [K]	Q [J]	
Aço AISI 316	25	500	54	675.000,00	
Óleo	8	0,52		224,64	
Aço AISI 316	12	500		324.000,00	
Aço AISI 316	3,5	500		94.500,00	
Aço carbono	54	550		1.603.800,00	
Aço AISI 316	87	500		2.349.000,00	
Aluminio	30	900		1.458.000,00	
Ar	3,9	1000		210.394,80	
Ferro fundido	21	450		510.300,00	
Aço carbono	2	550		59.400,00	
Aço carbono	50	550		1.485.000,00	
TOTAL				8.769.619,44	

Tabela 4.8 - Capacidades térmicas para diferentes taxas de resfriamento

$\Delta T = 60 - 4 = 56^{\circ}\text{C}$								
TEMPO [min]	112	56	37	28	22	19	16	14
$\Delta T/\Delta t$ [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Qo [W]	121,3							
Qg [W]	3700							
Qi [W]	1305,003	2610,006	3950,279	5220,012	6643,651	7692,649	9135,02	10440,02
Qt [W]	5126,303	6431,306	7771,579	9041,312	10464,95	11513,95	12956,32	14261,32

Como visto na Tabela 4.8 os valores da carga térmica externa e a gerada são valores fixos para todas as taxas de resfriamento. Já o valor da carga térmica referente à quantidade de calor que deve ser retirada da bancada varia de acordo com a taxa de resfriamento determinada. Observa-se, então, que quanto maior for a taxa de resfriamento, menor é o tempo disponível para a retirada da quantidade de calor da câmara, assim para as altas taxas de resfriamento é necessário um sistema de refrigeração de grande capacidades.

Para que ocorra o resfriamento do ambiente, o sistema de refrigeração deve atender ao requisito de carga térmica, ou seja, deve possuir uma capacidade de refrigeração (\dot{Q}_E na Figura 4.8) maior ou igual à carga térmica total. Definido isto, pode-se selecionar um evaporador a ser utilizado no ciclo.

A especificação do evaporador foi baseada nos seguintes pontos:

- Capacidade de refrigeração que contemple a maior quantidade de taxas de resfriamento;
- Dimensão máxima possível para alocação no interior da câmara;

O primeiro passo para a seleção foi identificar vários modelos comerciais de evaporadores que possuíssem dimensões próximas ao espaço útil reservado na câmara. As dimensões desse espaço útil eram comprimento de 1800 mm, 800 mm de largura e 350 mm de altura. Para uma maior eficiência e homogeneidade no resfriamento da câmara, optou-se por fixar o evaporador próximo ao teto. Devido a essa restrição construtiva foram selecionados somente evaporadores que possuíssem dupla saída de ar. A Tabela 4.9 apresenta os modelos de evaporadores identificados.

Observa-se que o modelo DFTC54R da Thermokey é o que possui maior capacidade, 9,3 kW, para o espaço disponível. Dessa maneira o evaporador foi adquirido pelo valor de R\$ 1.800,75. A Figura 4.9 apresenta o modelo selecionado.



Figura 4.9 - Evaporador modelo DFTC54R
Fonte: http://www.thermokey.com.br/bra/prod_dftc.asp

Um dos problemas encontrados na seleção do evaporador foi que para abranger todas as taxas de resfriamento seria necessário um evaporador com tamanhos e capacidades muito grandes, tornando inviável a construção de uma câmara pequena. O modelo selecionado possui capacidade de refrigeração de 9,3 kW. Observando esse dado e comparando com a carga térmica total do sistema, contida na Tabela 4.8, conclui-se que para esse valor só é possível obter taxas de resfriamento de até 2 °C/min.

Tabela 4.9 - Lista dos evaporadores pesquisados.

EVAPORADORES SAÍDA DUPLA					
Empresa	Modelo	Capacidade [Kcal/h]	Capacidade [kW]	Temp. eva. [°C]	Dimensão [mm]
Thermokey	DFTC44R	6028,0	7,0	-5	1380x225x768
Thermokey	DFTC54R	7998,0	9,3	-5	1680x225x768
DeltaFrio	DFC 72.44	7500,0	8,7	-5	1650x220x600
DeltaFrio	DFC 72.54	8230,0	9,6	-5	2010x220x600
Mipal	BV 052	6305,0	7,3	-5	1915x200x685
Mipal	BV 064	7950,0	9,2	-5	2280x200x685
Refrio	RFD 85.7	7500	8,7	-8	2085x227x850
HeatCraft	EDS6238C	8236,0	9,6	-5	1895x261x600
HeatCraft	EDS6295C	10320,0	12,0	-5	2295x261x600

Definido o evaporador, pode-se selecionar um compressor adequado. Para seleção do compressor deve-se utilizar a situação com maior taxa de resfriamento, e conseqüentemente com o maior valor de energia térmica a ser retirado, no caso 9.042 W. Procurando-se por compressores no site da Sanyo, empresa especializada em refrigeração, chegou-se ao modelo C-SB261H6B, ilustrado na Figura 4.10. Abaixo pode-se observar as principais características de funcionamento, retiradas do catálogo geral da Sanyo, considerando-se uma temperatura de evaporação de -10 °C e condensação de 45 °C:

- Capacidade de refrigeração: 11,7 kW
- Potência consumida: 2,6 kW
- Refrigerante utilizado: R134a
- Baixo nível de ruído e vibração;
- Trifásico.
- Preço: R\$ 583,15

Para um maior controle na capacidade de refrigeração foi adicionado um inversor de frequência para controlar as rotações do motor do compressor. O inversor foi adaptado de uma bancada existente no laboratório, o que dificultou a busca de informações técnicas.



C-SB Series

Figura 4.10 - Compressor série SB

Fonte: Sanyo (2013)

A fim de definir o condensador mais adequado para utilização no sistema de refrigeração, deve-se calcular primeiramente a taxa de calor que o mesmo precisa dissipar para o ambiente externo, \dot{Q}_C . Este parâmetro é função predominantemente da capacidade de refrigeração e das temperaturas de evaporação e condensação, podendo ser determinado pelo conhecimento da “relação de rejeição de calor” através da Equação 8: (STOECKER e JONES, 1985)

$$\text{Rejeição} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_E} \quad (8)$$

Segundo Stoeker (1985) para temperaturas de evaporação de -10°C e temperaturas de condensação de 45°C , a relação de rejeição assume valor de 1,45. Substituindo este valor na equação (8), bem como a capacidade de 9000 W do compressor, conclui-se que a taxa de dissipação de calor necessária ao condensador é de 13 kW. O condensador escolhido foi o da empresa Trineva, o modelo possui aletas e carenagem em alumínio. Sua taxa de dissipação de calor é de 15 kW atendendo as necessidades da bancada. O custo para compra do condensador foi de R\$ 1.534,00.

O dispositivo de expansão utilizado no ciclo de refrigeração foi um tubo capilar, que segundo Stoeker et al.,(1985) pode ser definido como um tubo de pequeno

diâmetro e grande comprimento, indicado para sistemas de pequeno porte. Consultando-se fornecedores especializados, verificou-se que o preço para aquisição de um tubo capilar com 3 m de comprimento e 2,3 mm de diâmetro é de R\$ 15,00. A seleção do tubo foi baseado em informações de catálogo do próprio compressor.

4.3.3 Sistema de aquecimento

A função das resistências elétricas é aquecer a câmara quando necessário. O regime de operação é o liga/desliga com a possibilidade da resistência trabalhar em meia potência. Para grandes taxas de aquecimento as resistências são ligadas com sua capacidade total, e ao se aproximar da temperatura desejada funcionam com metade da capacidade. O sistema de controle é retroativo, ou seja, existem um sinal de realimentação que fica fornecendo o valor da temperatura lida a todo instante. Dependendo do valor enviado o sistema pode operar ou não. Este sinal de realimentação melhora o tempo de resposta e aumenta a precisão do controle.

Como não é necessário um controle nas taxas de aquecimento, as resistências foram dimensionadas para realizar o aquecimento da câmara partindo da temperatura de 4°C até a temperatura de 60°C no tempo estimado de 25 minutos. O cálculo de aquecimento é semelhante ao realizado para dimensionar o sistema de refrigeração, a diferença é que para este caso deve-se considerar que a câmara encontra-se a uma temperatura de 4°C e deve ser aquecida para a temperatura de 60°C. Como visto anteriormente, o valor necessário para resfriar a câmara de 60 para 4°C, numa taxa de 2°C/min, seria de aproximadamente 8,5 kW, num tempo total de 28 minutos. Portanto para aquecer a câmara num tempo de 25 min deve-se utilizar uma potência total acima de 8,5 kW. A solução encontrada foi de comprar 3 resistências com potencia nominal de 3,5 kW, resultando numa potência total de 10,5 kW. Com esse valor de potência, conseguiu-se realizar o aquecimento da câmara num tempo de aproximadamente 24,5 minutos.

As resistências escolhidas são aletadas, indicadas para aquecimento de ar em estufas e câmaras. O modelo selecionado foi o modelo ALC-34250 da empresa Anluz. Trata-se de um modelo com corpo em forma de “U” e aletas retangulares, conforme ilustrado na Figura 4.11. É fabricado em aço carbono com terminal do tipo

“rabicho”. Portanto, três resistências foram utilizadas. O custo total das três resistências foi de R\$ 255,00.

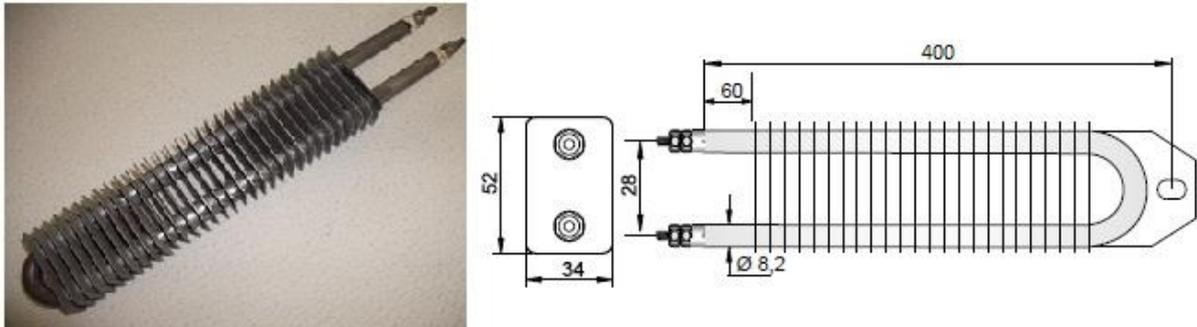


Figura 4.11 - Resistência elétrica
Fonte: Adaptado catálogo Anluz (2012)

4.3.4 Sistema de circulação de ar

Para uma melhor homogeneização da temperatura do ar interno da câmara foi instalado um conjunto de ventiladores. No total foram instalados três ventiladores do tipo axial. Os ventiladores axiais selecionados são da marca Suryha com potência de 250 W e vazão de 3490 m³/h. A seleção dos ventiladores ocorreu de forma empírica, ou seja, foi realizando testes com diversos ventiladores até a obtenção de uma pequena variação temperatura, cerca de 0,3 °C, de diferentes pontos de dentro da câmara. O custo da compra do sistema de circulação foi de R\$ 600,00.

4.4 Sistema de aquisição de dados

Um sistema de aquisição de dados tem como finalidade condicionar um sinal para que ocorra a conversão analógica-digital e o seu processamento, para futura análise em computador. Particularmente para este trabalho, a aquisição de dados refere-se a dois sistemas específicos:

1. Tradução das informações obtidas pelos transdutores de pressão;
2. Aquisição dos valores de temperatura medidos no interior da câmara pelos termopares;

4.4.1 Transdutores de pressão

As tomadas de pressão da bancada foram feitas por transdutores de pressão posicionados tanto na tubulação em formato de espiral como na tubulação de

circulação do óleo. Para esse projeto foi especificado o uso de transdutores de deformação (*strain gauge*). Esse transdutor transforma a pressão em sinal elétrico a partir da deformação ocasionada em um extensômetro, o qual se encontra colado no diafragma do transdutor. Em outras palavras, a pressão aplicada ao transdutor produz uma deflexão em seu diafragma, gerando uma determinada deformação no extensômetro. Por sua vez, a deformação acarreta uma variação de resistência elétrica proporcional à pressão (Omega, 2010).

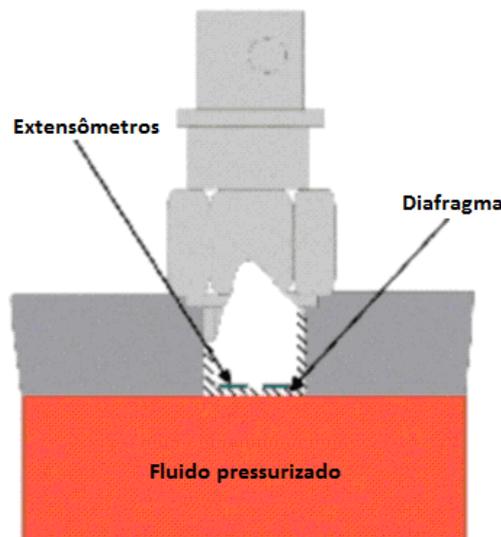


Figura 4.12 - Funcionamento de um transdutor de pressão por deformação
Fonte: Adaptado de National Instruments (2013)

Para que os transdutores possam captar os efeitos transitórios verificados na retomada do escoamento, faz-se necessário a resposta do sinal em um intervalo de tempo pequeno, proporcional ao inverso da velocidade de propagação da onda de pressão. Segundo Anderson (1990), para um escoamento mantido à temperatura constante, a velocidade de propagação da onda de pressão (c) pode ser estimada com base na compressibilidade isotérmica (α) e na massa específica do fluido (ρ), conforme aponta a Equação 9:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\alpha\rho}} \quad (9)$$

Para óleos parafínicos o valor da compressibilidade é de $\alpha \cong 1,67 \cdot 10^{-9} Pa^{-1}$ e sua massa específica $\rho = 850 kg / m^3$, resultando numa velocidade de propagação de 827,7 m/s.

Foram utilizados cinco transdutores de pressão, sendo um colocado próximo à saída da bomba e os outros na tubulação em formato de espiral. O espaço entre o primeiro transdutor (próximo à bomba) e o segundo (localizado na parte inferior da tubulação em formato de espiral) é de aproximadamente 1,8 metros; a distância entre o segundo e o terceiro, o terceiro e o quarto, e o quarto e quinto transdutores é em torno de 12,5 metros. Portanto, para uma velocidade de propagação de 827,7 m/s os valores de tempo para a onda percorrer a distância de 1,8 metros e 12,5 metros, é de 2,1 milissegundos e 15,2 milissegundos, respectivamente.

Segundo Rubio (2000) A frequência de resposta do transdutor de pressão refere-se à quantidade de amostras (valores) de sinal elétrico obtidas em uma unidade de tempo, geralmente dada em Hz. Estima-se que, para se obter uma resposta satisfatória dos efeitos transitórios da retomada do escoamento, sejam necessárias cerca de 100 leituras (ou amostras) durante a propagação da onda de pressão de um transdutor até o subsequente. Dividindo-se o número de leituras pelo tempo de propagação da onda entre dois transdutores, obtém-se frequência de resposta de 47 kHz e de 6,2 kHz respectivamente. Rubio (2000) ainda afirma que este parâmetro está relacionado com a frequência natural do transdutor, que por sua vez deve ser no mínimo cinco vezes superior à máxima frequência de trabalho do instrumento. Desta forma, os transdutores da bancada deverão ter frequência natural mínima de 235 kHz (5×47 kHz). Como o componente de interesse para os picos de pressão é a tubulação em formato de espiral, foi considerado a frequência natural de 31 kHz, que corresponde a $5 \times 6,2$ kHz.

Normalmente estão disponíveis três tipos de saída elétrica para os transdutores: milivolt (mV), tensão amplificada e 4-20 miliampére (mA). A saída em mV é a solução mais econômica e mais suscetível a ruídos elétricos. O sinal de saída do transdutor é diretamente proporcional à pressão aplicada. Esta dependência torna necessária a utilização de fontes de alimentação muito bem reguladas para este tipo de transdutor. Outra característica da saída em mV é a pequena distância entre o transdutor e o sistema de aquisição de dados. Já os

transdutores com saída em tensão amplificada fornecem um sinal com qualidade muito superior à saída em mV, sendo dado em faixas de 0 a 5 V ou 0 a 10 V. A grande vantagem deste tipo de transdutor é o fato da saída não ser uma função direta da excitação (pressão medida). Isto garante uma menor suscetibilidade a ruídos, melhorando sua aplicação em ambientes industriais. O terceiro tipo de transdutor de pressão refere-se à saída dada em valores de corrente elétrica, geralmente na faixa de 4 a 20 mA. Assim como a saída em tensão ampliada, a saída em 4-20 mA também sofre pouca interferência de ruídos para ambientes com pouca interferência, sendo bastante comum sua aplicação quando o sinal deve ser transmitido para longas distâncias (Omega, 2010).

Para a especificação dos transdutores pode-se citar como fatores determinantes: a frequência natural, a faixa de temperatura de operação de 4 a 60 °C, a faixa de precisão e a máxima pressão que o sistema vai ser submetido, neste caso a pressão de reinício de 240 bar.

Numa consulta feita a fabricantes de transdutores constatou-se que o fator limitante para a escolha seria a frequência natural. Depois de consultar várias empresas, encontrou-se um transdutor da marca HBM que correspondia às necessidades definidas. O modelo selecionado dos 5 transdutores foi P3 TOP CLASS com faixas de operação de 0 até 50 Bar (1-P3CP/50BAR), 0 até 100 Bar (1-P3CP/100BAR) e de 0 até 200 Bar (1-P3CP/200BAR). Trata-se de um modelo extremamente preciso (com precisão de 0,15% do final da escala), ideal para análise de variações, oscilações e picos de pressão estáticos e dinâmicos. Possui frequência natural de 38 kHz e um transdutor PT100 integrado para compensação e redução da sensibilidade à temperatura (pode trabalhar entre -10 e 80 °C). É fabricado em aço 53 inoxidável com design monolítico, conectando-se ao processo através de rosca M12 x 1,5. O sinal de saída é de 2 a 10 mV, dependendo da tensão de excitação. O modelo possui cabo blindado para transmissão de dados com quatro metros de comprimento. O uso do cabo blindado auxilia na redução de ruídos.

O valor de cada transdutor foi de R\$ 5.500,00, totalizando um custo total para os cinco transdutores de R\$ 27.500,00. A Figura 4.13 apresenta o modelo selecionado do transdutor de pressão.



Figura 4.13 - Transdutor de pressão modelo P3 TOP CLASS
Fonte: HBM Measurement (2013)

4.4.2 Termopares

Conforme já mencionado, a medição de temperatura é feita por termopares, neste caso 7 termopares do tipo T. A letra que identifica o termopar representa a faixa de temperatura de trabalho indicada para seu uso. Termopares do tipo T possuem faixa de operação entre -66 e 170°C . O tempo de resposta é menor que 0,3 segundos, a conexão é feita por adesivo composto por fibra de vidro e filme de poliamida e o cabo de conexão possui extensão de 3 metros. A alimentação elétrica é de 15V a 75V. A Figura 4.14 apresenta uma foto do termopar escolhido. O custo total para a compra dos termopares foi de R\$ 3.200,00.

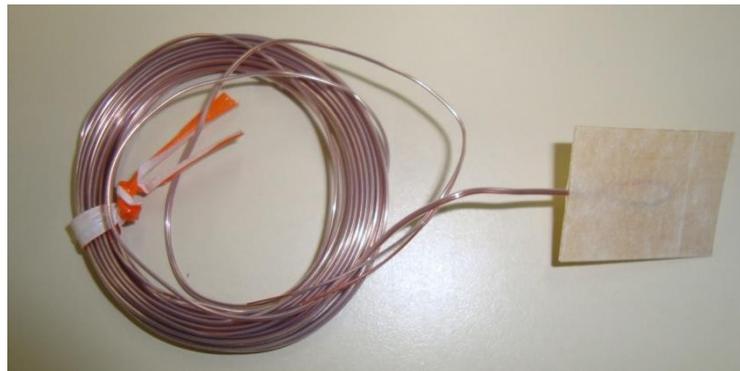


Figura 4.14 - Termopar tipo T

4.4.3 Controle e aquisição de dados

Existem diversas considerações quanto ao condicionamento de sinal. Como os transdutores especificados são baseados em *strain-gauges*, o sinal de saída é de baixa amplitude. Para obter uma instrumentação precisa é importante amplificar o

sinal antes de digitalizá-lo. A amplificação auxilia na redução dos ruídos do sinal medido. Outro fator a ser considerado é que a medição por *strain-gauges* necessita de uma tensão de excitação para responder ao fenômeno físico, a qual é obtida por uma fonte de alimentação de tensão constante. O condicionamento também deve levar em conta o parâmetro conhecido como posição de repouso. Trata-se da verificação do sinal de saída quando não há pressão no transdutor, ou seja, o *strain gauge* deve fornecer tensão nula nessa posição. Isto é conseguido através de um circuito de *offset*. Verifica-se que um condicionamento de sinal criterioso é decisivo para a obtenção de bons resultados na medição (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

O conversor analógico-digital, comumente conhecido como ADC (*Analog/Digital Converter*), é o elemento responsável por traduzir o sinal elétrico da saída do circuito condicionador em uma representação numérica compatível com o processamento digital posterior. A especificação de um ADC adequado para cada situação depende de diversos parâmetros, entre eles: o nível máximo do sinal a ser digitalizado (em unidades de tensão); a resolução, que corresponde a uma indicação da sensibilidade do conversor através do número de divisões em que a faixa de sinal é representada (dada em bits); e a taxa de amostragem máxima, que diz respeito ao número de leituras por unidade de tempo que poderão ser adquiridas (dada em Hz). (BRAGA, 2008)

Após a conversão analógico-digital, a representação numérica deve ser processada para permitir sua análise e armazenamento. O processamento pode ser realizado com um computador externo ao sistema dotado de softwares específicos. Exemplos de softwares utilizados são o LabVIEW da National Instruments (ilustrado na Figura 4.15) e o VEE da Agilent Technologies.

Para aplicação na bancada, procurou-se por empresas que fornecessem soluções integradas para aquisição de dados. A National Instruments mostrou-se apta em oferecer esse tipo de solução através de seu sistema de aquisição de dados chamado NI CompactDAQ. O sistema engloba as funções de condicionamento de sinal e conversão analógico-digital em apenas um dispositivo. Esta característica elimina o tempo e a chance de erros associados à conexão de múltiplos componentes agrupados, além de reduzir o número de equipamentos que podem contribuir com ruídos ou falhas. O NI CompactDAQ baseia-se na

instrumentação modular, o que permite grande flexibilidade para necessidades futuras. Além disso, a conexão com o computador é realizada através de conexão USB, simplificando drasticamente a realização de testes e medições. Outro fator decisivo para a escolha deste equipamento é a compatibilidade com o software LabVIEW. Verificou-se que a universidade já possui licença de uso para este software, eliminando, assim, uma parcela considerável dos custos relacionados com o sistema de aquisição de dados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).



Figura 4.15 - Janela de monitoramento do LabVIEW da bancada

Para esse sistema, a solução mais adequada consiste em um chassis (ou gabinete), sobre o qual são encaixadas seis slots: três para entrada analógica das grandezas medidas (pressão e temperatura), duas para saída digital com função de controle e uma para saída analógica. Trata-se de um sistema bastante compacto e flexível. A configuração selecionada pode ser vista na Figura 4.16.



Figura 4.16 - Sistema de aquisição de dados, chassis e módulo
Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS

A Tabela 4.10 apresenta a descrição e o preço dos equipamentos escolhidos.

Tabela 4.10 - Lista componentes sistema de aquisição de dados

Item	Descrição do Produto	Qtde	Valor Total (R\$)
1	cDAQ-9178, CompactDAQ chassis (8 slot USB)	1	4.122,39
2	NI 9478 16-Ch 0V to 50V, 1.2A per ch, 7 us, Sinking DO Module with Programmable Current Limits	1	2.314,68
3	NI 9949 RJ-50 (female) to Screw Terminal Adaptor (Qty 4)	1	754,10
4	RJ50 Cable for 9944, 9945, and 9949, 2m (qty 4)	1	102,12
5	NI 9213 16-ch TC, 24-bit C Series module	1	3.855,57
6	NI 9932 Strain relief & high voltage conn kit, 10-pos screw terminal plug w/ cable housing for 10-pos. screw terminal	1	107,72
7	NI 9474 8-Channel 24 V, 1 us, High-Speed Sourcing Digital Output Module	1	1.047,27
8	NI 9940 Strain relief & high voltage connector kit for the 36-position weidmuller connector	1	123,27
9	NI 9217 4-Ch 100 Ohm RTD 24-bit, 100S/s/ch, Analog Input Module	1	1.847,74
TOTAL			14.274,85

O item (1) refere-se ao chassis com entrada para oito módulos, conexão com o computador via USB e alimentação padrão de 120 V. O item (2) é a placa para controle da temperatura na câmara, com 16 canais de saída digital com programação para controle dos limites. Os itens (3) e (4) são, respectivamente adaptadores (para redução de ruído) e cabos para ligação com os transdutores. O

item (5) é a placa para aquisição das medições de temperatura, com 16 canais (entradas) e resolução de 24 bits. O item (7) é a placa para controle da temperatura na câmara, com 8 canais de saída digital. Os itens (6) e (8) são acessórios de conexão para as placas (5) e (7), respectivamente. O item (9) é a placa para aquisição dos sinais elétricos gerados pelos quatro transdutores, com taxa de amostragem de 100 kHz para cada canal e resolução de 24 bits.

4.4.4 Sistema de medição

O sistema de medição é responsável pela coleta e processamento dos dados, possibilitando a análise do pico de pressão gerado durante o reinício. É composto pelos transdutores de pressão, pelo sistema de aquisição de dados e por um computador equipado com o programa LabVIEW.

No total foram utilizados cinco transdutores, sendo um conectado na tubulação logo após a saída da bomba e o restante conectado nos pontos de tomada de pressão da tubulação em formato de espiral. A deformação da membrana nos transdutores devido à pressão é transformada em sinal elétrico e transmitida ao sistema de aquisição, que faz o tratamento dos dados e transfere as informações para o computador. No computador os dados são analisados e os resultados podem ser verificados na forma de gráficos.

A Figura 4.17 mostra um esquema representativo do percurso dos dados partindo da medição até a futura análise.



Figura 4.17 - Esquema do processamento de dados

Fonte: Leoncio, M.A., Projeto e construção de bancada experimental para avaliação da retomada do escoamento de fluido de perfuração, 2011

4.5 Estrutura da bancada

A estrutura da bancada foi dimensionada para sustentar a soma das massas de todos componentes e equipamentos. O dimensionamento da estrutura da bancada foi realizado com auxílio do programa *SolidWorks 2012*. No programa a estrutura foi projetada e depois foi feita análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos. De acordo com o programa *SolidWorks*, a estrutura projetada suportaria o peso dos componentes com um fator de segurança 4. A Tabela 4.11 apresenta o valor da massa dos equipamentos utilizados.

Como visto a soma das massas de todos componentes resulta em 381 kg. Com esse valor foi possível dimensionar a estrutura da bancada, sendo fabricada em metalon de aço ASTM A36 com dimensões de 30 x 30 milímetros e espessura de 2,5 milímetros. Para facilitar sua movimentação foram adicionados quatro rodízios, sendo fixados cada um em um canto da estrutura. A capacidade de cada rodízio é de 125 kg, resultando numa capacidade total de 500 kg.

Tabela 4.11 - Massa em kg de cada componente

EQUIPAMENTO	MASSA [kg]
Estrutura	46
Bomba	54
Evaporador	30
Condensador	20
Tubulação em formato de espiral	25
Reservatório térmico	87
Tubulação	12
Fluido	11
Câmara térmica	96
Total	381
Capacidade de carga de cada rodízios	125
Capacidade de carga total dos rodízios	500

4.6 Apresentação da bancada

Cabe ressaltar que o objetivo desta seção do capítulo não é simplesmente repetir o que foi exposto ao longo do trabalho e sim reunir as informações importantes para a compreensão do funcionamento da bancada, destacando as

funções principais de cada equipamento e procurando fornecer uma “noção de conjunto” da bancada.

Após a construção da bancada, pode-se visualizar o conjunto completo com todos os componentes e/ou sistemas que compõem a bancada. A fim de resumir a principal função de cada sistema e listar os componentes que compõe a bancada de forma sucinta, esta secção foi dividida em 3 partes:

1. Circuito hidráulico, composto pelo sistema de circulação e reservatório térmico;
2. Sistema de controle de temperatura;
3. Sistema de aquisição de dados;

4.6.1 Circuito hidráulico

A função do circuito hidráulico é apresentar de forma clara todos os componentes que estão em permanente contato com o óleo, sendo:

- Bomba seringa;
- Tubulação em formato helicoidal;
- Válvulas de controle de fluxo;
- Reservatório térmico;

A função da bomba é realizar o bombeamento do óleo por toda a bancada. A tubulação de teste é responsável por possibilitar a tomada dos picos de pressão gerados no reinício do escoamento. As válvulas de controle realizam a seleção da tubulação em que o óleo escoar. O reservatório permite o aquecimento do óleo até a temperatura inicial de resfriamento desejada.

Para a seleção e/ou fabricação dos mesmos foram considerados os seguintes pontos:

- Pressão gerada pelo reinício do escoamento, até 240 bar;
- Faixa de vazão de operação de 30 até 120 ml/min;
- Tamanho, tipo e material dos tubos e conexões utilizadas;
- Praticidade de montagem e desmontagem;

A Figura 4.18 apresenta todos os elementos que compõe o circuito hidráulico do sistema. Em destaque encontram-se os principais componentes: bomba, tubulação em formato helicoidal e reservatório térmico.

4.6.2 Sistema de controle de temperatura

Com a principal função de proporcionar o controle da taxa de resfriamento da bancada, o sistema de controle também é responsável por controlar a temperatura interna da bancada. A taxa máxima de resfriamento que o sistema consegue atingir é de 2° C/min.

Os seguintes componentes fazem parte do sistema de controle de temperatura: câmara térmica, evaporador, compressor, válvula de expansão, resistências elétricas e ventiladores.

4.6.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é responsável pela coleta e armazenagem das informações obtidas durante os testes. Dentre as informações coletadas, destacam-se os valores obtidos nos transdutores de pressão, devido aos picos de pressão gerados no reinício do escoamento.

Os componentes que fazem parte do sistema de aquisição de dados são os seguintes: transdutores de pressão, termopares, sistema de medição, chassi para alocação das placas de controle, placa de controle de temperatura, placa para aquisição das temperaturas medidas e placa para aquisição dos sinais dos transdutores.

Conforme descrito, esta seção apresentou, de forma resumida, todos os componentes que fazem parte da bancada. Neste sentido, a Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam duas fotografias da bancada construída: uma da parte frontal, mostrando tubulação em formato helicoidal, a câmara de isolamento, a bomba e o reservatório térmico de fluido; e a outra da parte posterior mostrando o sistema de controle, os painéis elétricos e o computador de armazenamento de dados.

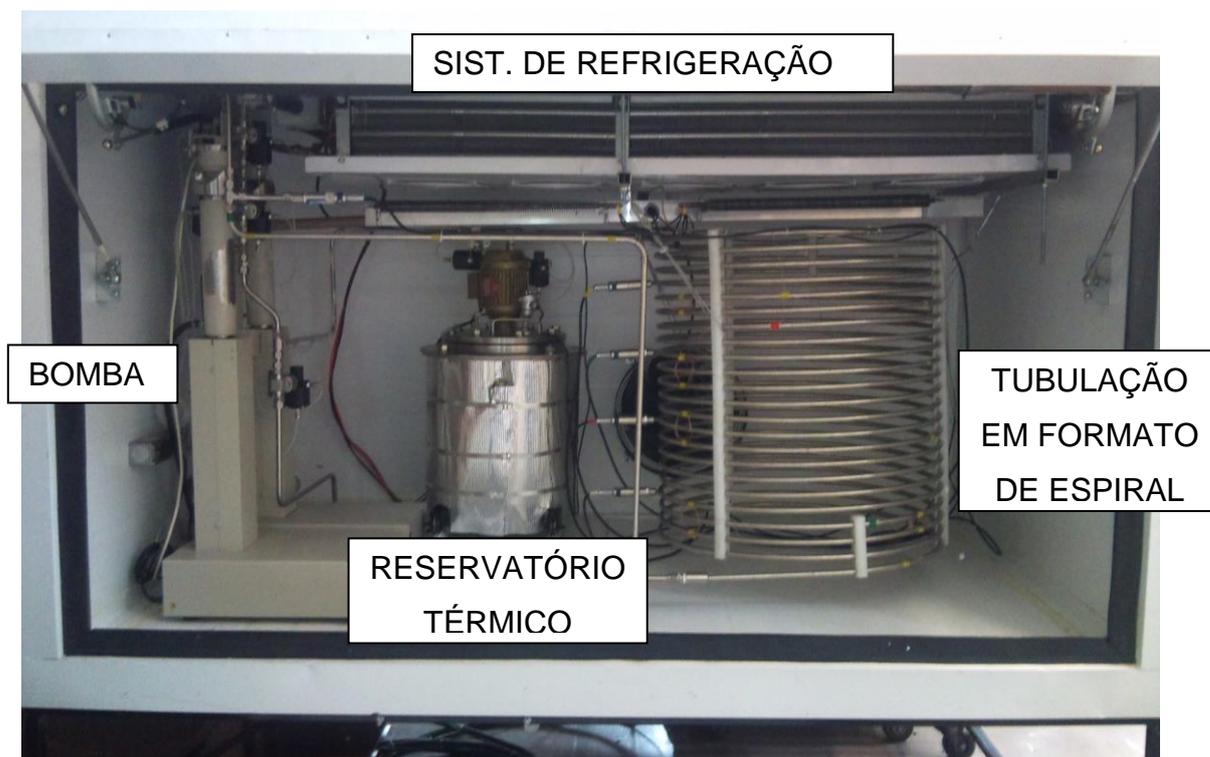


Figura 4.19 - Foto frontal da bancada pronta

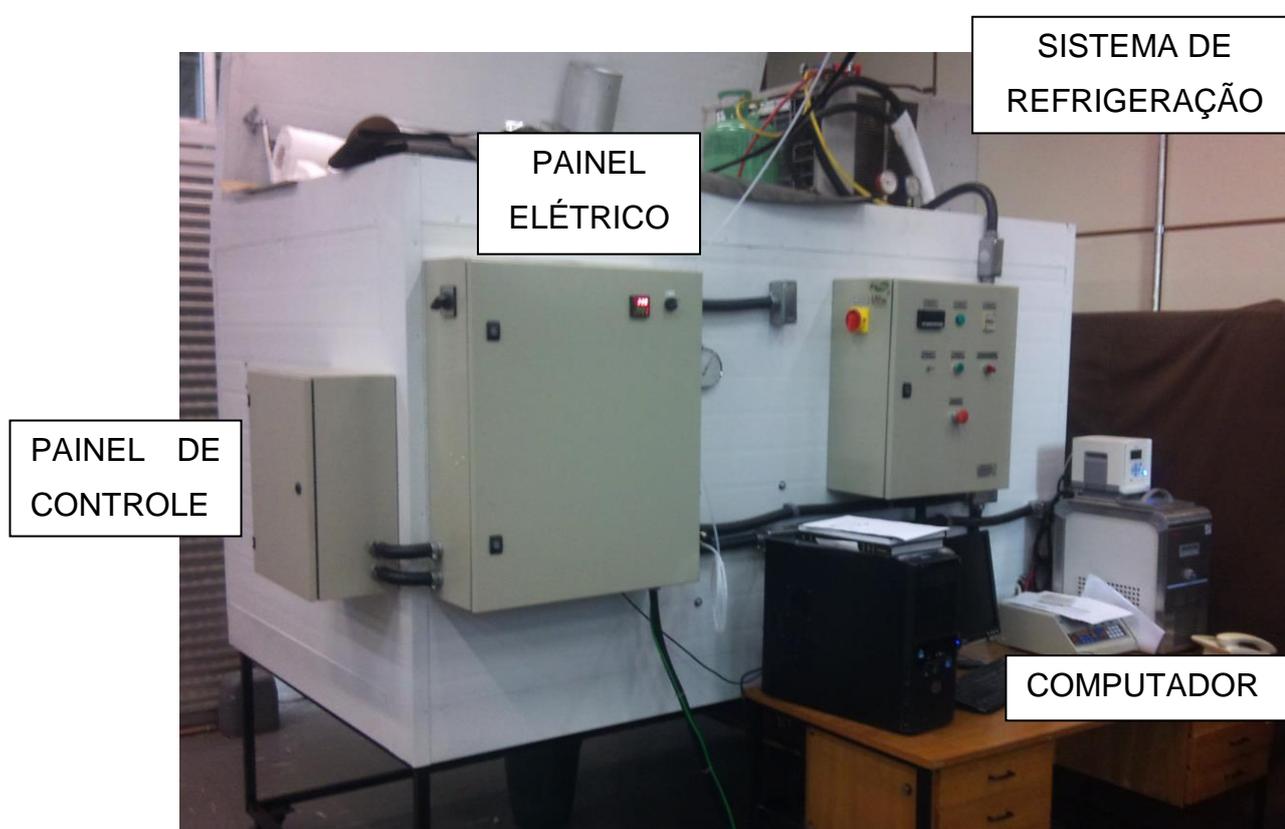


Figura 4.20 - Foto posterior da bancada pronta

5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA BANCADA

A primeira ação tomada na etapa de calibração e validação da bancada, foi obter o certificado de calibração dos instrumentos de medição, transdutores e termopares, junto a um laboratório cadastrado ao IMETRO. Apesar dos instrumentos de medição ser enviados com certificado de calibração, os certificados enviados pelos fabricantes não garantem que os instrumentos estejam calibrados conforme as normas nacionais. Essa nova calibração, garante que os erros obtidos pelos instrumentos de medições sejam os erros aceitáveis pelas normas.

Os transdutores de pressão foram calibrados pelo método de comparação com padrão de referência, nos sentidos de carregamento e descarregamento. Os certificados atendem aos requisitos da CGCRE/INMETRO que, avaliou a competência e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. Os termopares foram calibrados pelo método de comparação. Foram realizadas três medições independentes, sendo que o resultado apresentado é a média aritmética. A incerteza padrão de medição dos transdutores de pressão e dos termopares foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02. Os certificados de calibração podem ser encontrados junto à bancada experimental no laboratório do LACIT.

Juntamente com o envio dos instrumentos de medição foram realizados testes pra aferir a vazão da bomba, realizados no próprio laboratório do LACIT. O fluido utilizado para a calibração foi a glicerina bi destilada, que foi encaminhada ao laboratório de reologia do LACIT para realizar o levantamento dos valores da viscosidade dinâmica da glicerina bi destilada. Essas medidas foram tomadas para conferir confiabilidade às medições efetuadas na bancada. O Anexo B deste trabalho apresenta o relatório enviado pelo LACIT.

O teste para aferição da vazão da bomba foi realizado da seguinte maneira: completava-se o êmbolo com glicerina, então era dado o comando para a bomba trabalhar com vazão constante durante certo período de tempo. A glicerina bombeada era então coletada com uma proveta com capacidade de 500 mililitros e divisão de um mililitro. Quando a bomba parava os volume coletado era comparado com o volume calculado pela vazão definida multiplicado pelo tempo do teste. Para verificar a vazão da bomba foram realizados testes com diferentes vazões, tempos e volume. A Tabela 5.1 mostra resumidamente os erros percentuais. Os erros

encontrados durante os testes de verificação de vazão são menores que 2%. Estes erros são um somatório das parcelas de erros nas escalas do recipiente utilizada, da incerteza do cronômetro utilizado e erros não premeditados como operacionais.

Tabela 5.1 - Levantamento do erro percentual na medição de vazão

Vazão	Temp.	Tempo	Vazão medida	Vazão	erro %
6,45ml/min	25°C	918,0	98,7	100	1,32
64,35ml/min	25°C	93,8	100,6	100	-0,58
125,75ml/min	25°C	47,0	100,9	100	-0,85

Vazão	Temp.	Tempo	Vazão medida	Vazão	erro %
6,45ml/min	25°C	324,0	34,8	35	0,49
64,35ml/min	25°C	94,0	100,8	100	-0,81
125,75ml/min	25°C	46,8	100,4	100	-0,38

Vazão	Temp.	Tempo	Vazão medida	Vazão	erro %
6,45ml/min	25°C	326,0	35,0	35	-0,13
64,35ml/min	25°C	93,0	99,7	100	0,26
125,75ml/min	25°C	45,8	98,4	100	1,63

Para garantir que toda a bancada responde de forma coerente com o projetado, foram realizados testes para levantar a curva da viscosidade da glicerina e comparar com a literatura. A realização deste teste deu-se da seguinte maneira: primeiro a glicerina era circulada por toda a bancada com a temperatura definida até entrar em regime permanente. Com ela próximo de um estado de regime permanente era verificado o valor da perda de carga obtida pela leitura dos transdutores de pressão. Com esse valor da diferença de pressão era calculado a viscosidade da glicerina pela Equação 10. Em que ΔP é o valor da diferença de pressão entre o primeiro e o último transdutor de pressão da tubulação em formato de espiral, D é o diâmetro interno da tubulação, Q é a vazão imposta na bomba e L é a distância entre o primeiro e o último transdutor de pressão. Com a viscosidade dinâmica da glicerina calculada, foi traçado um gráfico em escala logarítmica da viscosidade pela temperatura, como pode ser observado na Figura 5.1.

$$\mu = \frac{\Delta P \pi D^4}{128QL} \quad (10)$$

A Figura 5.1 é uma comparação entre a curva da glicerina 100% encontrada na literatura e a curva levantada na bancada experimental. O gráfico é apresentado em uma escala logarítmica. O gráfico mostrou um distanciamento entre as curvas, contudo uma mesma tendência. Vale lembrar que a glicerina bi destilada contém 99,5% de glicerina, e não 100%, como da literatura.

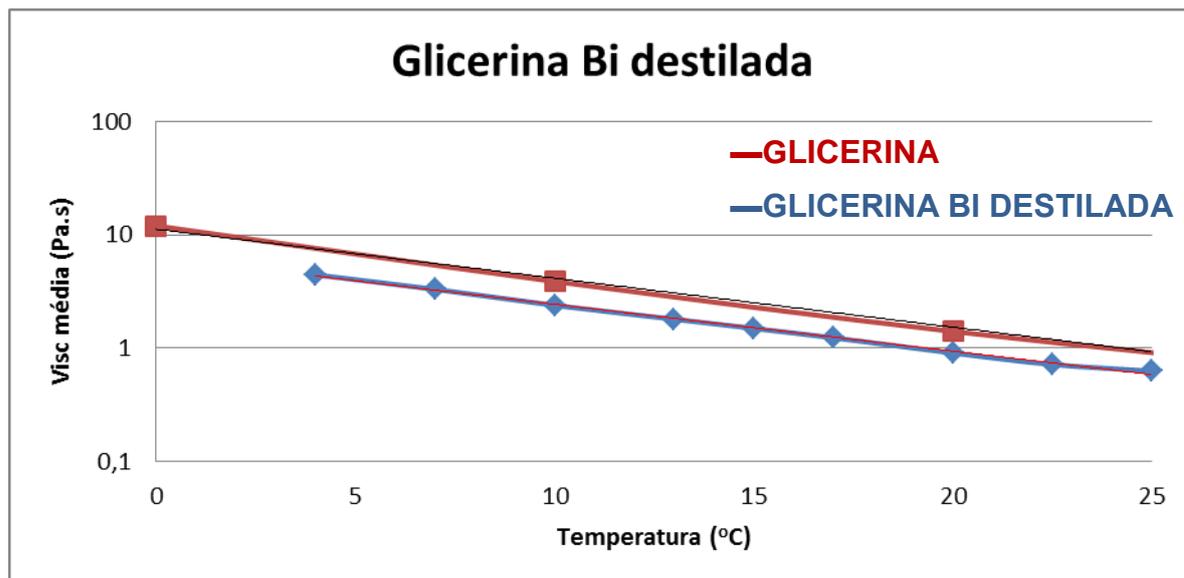


Figura 5.1 - Comparação entre a curva levantada na bancada experimental e a curva da glicerina 100%

Para a validação da funcionalidade da bancada foram realizados os seguintes teste:

- Aquecimento da bancada até a temperatura de 60 °C: teste de aquecimento consiste em aquecer a bancada até a temperatura de 60 °C e manter a bancada nesta temperatura pelo período de uma hora. Este teste foi repetido 3 vezes.
- Aquecimento do reservatório térmico até a temperatura de 60 °C: foi realizado o aquecimento do óleo dentro do reservatório, e mantido a temperatura de 60 °C por cerca de uma hora. Este teste foi repetido 3 vezes.
- Resfriamento da bancada de 60 para 4 °C: o resfriamento da bancada de 60 °C para 4 °C foi realizado para levantar a máxima taxa de

resfriamento que a bancada pode fornecer. O teste era realizado da seguinte maneira, primeiro toda a bancada foi aquecida até a temperatura de 60°C. Essa temperatura era mantida até que todos os componentes atingissem 60 °C. Após a verificação de que todos os componentes encontravam-se a 60 °C, o resfriamento era iniciado até atingir a temperatura de 4 °C. o tempo necessário para resfriar a bancada de 60 para 4 °C era cronometrado. Para descobrir a taxa de resfriamento é só dividir a diferença de temperatura pelo tempo total do resfriamento. Esse procedimento foi repetido 5 vezes, retornando uma taxa máxima de resfriamento média de 2 °C/min.

- Parada e retomada da bomba intermitentemente: durante a circulação do óleo na tubulação, a bomba foi programada para realizar paradas e retomadas no escoamento, durante o período de uma hora. Este teste foi repetido 3 vezes.
- Teste de estanqueidade: para garantir que todo circuito hidráulico não contem vazamentos, todo o sistema foi pressurizado a pressão de 15 bar, e mantido com essa pressão durante 24 horas.

Todos os testes listados foram realizados. Pode-se destacar alguns pontos importantes obtidos durante os testes. O primeiro deles é que a bancada possui capacidade de resfriamento de 2 °C/min, satisfazendo a necessidade de variação da taxa de resfriamento.

A temperatura máxima já atingida foi de 100 °C, mas por motivos de segurança a bancada possui restrição de temperatura máxima de 65 °C. A menor temperatura atingida com a bancada foi de -10 °C.

Considerando os testes realizados e os resultados obtidos a bancada foi aprovada para realizar todos os testes para a qual foi projetada. Como o objetivo deste trabalho é o projeto e construção, não foram realizados testes preliminares com óleos parafínicos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas as atividades desenvolvidas no projeto e construção de uma bancada experimental para o estudo dos picos de pressão formados no reinício do escoamento de óleos gelificados em tubulações.

O projeto da bancada foi inicialmente dividido em quatro fases: levantamento de informações, projeto conceitual, especificação dos componentes e projeto detalhado. Destas fases, nota-se que a especificação dos componentes foi a mais crítica, pois, devido à complexidade e singularidade da bancada, demandou grande tempo e implicou diversos imprevistos.

Um dos problemas encontrados na fase de especificação de componentes foi a dificuldade para encontrar fornecedores adequados para alguns componentes da bancada.

Ademais, a compra dos equipamentos especificados também representou um entrave, devido aos altos prazos requeridos pelos fornecedores e à burocracia necessária para se efetuar as aquisições. Porém, entende-se que estas questões são intrínsecas a este tipo de trabalho e, por isso, dificilmente poderiam ser contornadas.

Definido o projeto e adquiridos os equipamentos necessários, a construção da bancada pôde ser realizada. Nesta etapa, alguns detalhes relativos à montagem precisaram ser improvisados, devido a falta de material para a fabricação. No entanto, este fato não prejudicou as características principais da bancada, bem como a sua funcionalidade.

A realização da calibração foi importante para verificar o funcionamento da bancada e sua adequação aos testes do reinício do escoamento de óleos parafínicos. Verificou-se que o sistema de bombeamento responde corretamente aos comandos operacionais e a bomba possui uma resposta rápida para o reinício do escoamento. Com a determinação da velocidade de propagação da onda de pressão, constatou-se que a frequência de resposta dos transdutores também aparenta ser suficiente para captar as rápidas variações de pressão na tubulação em formato de espiral.

Apesar de testes mais completos não terem sido realizados, pode-se afirmar que o objetivo principal deste trabalho foi atingido, uma vez que a bancada encontra-se construída e apta para ser utilizada em experimentos do reinício do escoamento de óleo parafínicos gelificados.

Para trabalhos futuros, visando ao estudo dos picos de pressão e dimensionamento de tubulações e bombas, recomenda-se a realização de ensaios diversos com a bancada, entre os quais podem ser citados: utilização de óleo de viscosidade e massa específica variadas; a confecção de uma tubulação em formato de espiral com o diâmetro diferente, para a comparação da taxas de cisalhamento para uma vazão constante; fabricação de uma secção da tubulação em acrílico para estudar a influência da deposição de parafina na parede do tubo

Como todo projeto ao finalizar a bancada pode-se listar melhorias a serem feitas para próximos trabalhos: alteração do diâmetros da seção de testes, instalação de um medidor de vazão na saída da bomba,

REFERÊNCIAS

- AIYEJINA, A.; CHAKRABARTI, D. P.; PILGRIM, A.; SASTRY, M.K.S. **Wax formation in oil pipelines: A critical review**. International Journal of Multiphase Flow, 2011. 671–694.
- BRASIL, A. N. **Máquinas Termohidráulicas de Fluxo**. Disponível em: <<http://www.alexbrasil.com.br/mec.html>>. Acesso em: 25 março. 2012.
- CHEREMISINOFF, N. P. **Encyclopedia of Fluid Mechanics - vol. 7. Rheology and Non-Newtonian flows**. Houston, United States: Gulf Publishing Company, 1988. 1185 p.
- DAVIDSON, M. R.; CHANG, C.; RØNNINGSSEN, H. P.; NGUYEN, Q. D. **A Model for Restart of a Pipeline with Compressible Gelled Waxy Crude Oil**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Parkville, Austrália: Elsevier B. V., Vol. 123, pp. 269-280, 2004.
- EL-GAMAL, I.M., GAD, E.A.M., **Low temperature rheological behavior of Umbarka waxy crude and influence of flow improver, Colloids and Surfaces – A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 131, 181-191, 1998.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- HONEY, H. C.; PRETORIUS, W. A. **Laminar Flow Pipe Hydraulics of Pseudoplastic-Thixotropic Sewage Sludges**. Department of Chemical Engineering, University of Pretoria, South Africa, 1999. Disponível em: <http://www.polytechnic.edu.na/academics/schools/engine_infotech/civil/libraries/hydraulics/docus/LamFlow_PipeHydraulics_SewageSludges.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- KANÉ, MOUSSA; DJABOUROV, MADELEINE; VOLLE, JEAN-LUC. **Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions**. Journal of Fuel. Pau Cedex, France. Vol. 83, pp. 1591-1605, 2004.
- LI, C., YANG, Q., LIN, M., **Effects of stress and oscillatory frequency on the structural properties of Daqing gelled crude oil at different temperatures**, Journal of Petroleum Science and Engineering, 65, 167-170, 2009.
- LOPES-DA-SILVA, J.A., COUTINHO, J.A.P., **Analysis of the isothermal structure development in waxy crude oils under quiescent conditions**, Energy & Fuels, 21, 3612-3617, 2007.
- MARCHESINI, F.H., ALICKE, A.A., MENDES, P.R.S., ZIGLIO, C.M., **Rheological characterization of waxy crude oils: sample preparation**, Energy & Fuel, 26, 2566-2577, 2012.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: McKlausen Editora, 1989.

MENDES, P.R.S., SOARES, F.S.M.A., ZIGLIO, C.M., GONÇALVES, M., **Startup flow of gelled crudes in pipelines**, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 179–180, 23–31, 2012.

OLIVEIRA, G. M.; ROCHA, L. L. V.; NEGRÃO, C. O. R.; FRANCO, A. T.; MARTINS, A. L. **Reinício da Circulação de Fluidos de Perfuração Gelificados**. In: 4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo de Gás, 2007, Campinas, Brasil: ABPG, p. 113-1, 2007.

OMEGA. **Pressure Transducers**. Disponível em: <<http://www.omega.com/prodinfo/pressuretransducers.html>>. Acesso em: 03 nov. 2010.

PETROBRAS. **Energia e Tecnologia: Atuação no Pré-sal**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/petroleo/presal/>> Acessado em Fevereiro, 10, 2013.

REIS, C. V. **Equipamentos estáticos**. Curitiba: Repar/UnicenP, 2002. 52 p.

RONNINGSEN, HANS PETTER. **Rheological behaviour of gelled, waxy North Sea crude oils**. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 7, pp. 177-213, 1992.

ROHAN, J. **Evaluation of Oil Base Drilling Fluids for Viscosity and Yield Stress**. 2006. 59 f. Final Report – Prepared for Petrobras/Cenpes US795-0000237, INTERTEK Wesport Technology Center, Houston, 2006.

RUBIO, M. G. **Introdução a instrumentação em engenharia: módulo básico**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2000.

SINGH, P.; FOGLER, H.S.; NAGARAJAN, N. **Juornal of Rheology**. 1999, 43, 6, 1437-1549.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W.; **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo Mcgraw, 1985.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2004.

TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. **Petroleum formation and occurrence**. 2. ed. Rev. e aum. Berlin: Springer-Verlag, 1984. p. 375-423.

VISINTIN, R.F.G., LAPASIN, R., VIGNATI, E., D'ANTONA, P., LOCKHART, T.P., **Rheological behavior and structural interpretation of waxy crude oil gels**, Langmuir, 21, 6240-3249, 2005.

WARDHAUGH, L.T., BOGER, D.V., **Flow characteristics of waxy crude oils: application to pipeline design**, AIChE Journal, 37, 6, 871-885, 1991.

WEBBER, R.M., **Yield properties of wax crystal structures formed in lubricant mineral oils**, Industrial & Engineering Chemistry Research, 40, 195- 203, 2001.

APÊNDICE A – ORÇAMENTOS E RISCOS DO PROJETO

Esta seção apresenta o orçamento e os riscos do projeto que foram definidos na proposta do trabalho e que serviram de base para o seu desenvolvimento.

Orçamento

O financiamento do projeto foi cem por cento custeado pela Petrobras. A Tabela A. 1 apresenta de forma simplificada o valor correspondente a cada conjunto ou equipamento.

Tabela A. 1 - Orçamento do projeto

ORÇAMENTO	
ITEM	CUSTO TOTAL (R\$)
TESTES ÓLEO	788,59
BOMBA	117.000,00
TUBULAÇÃO EM FORMATO DE ESPIRAL	14.959,00
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	5.477,59
MÃO DE OBRA	4.000,00
ESTRUTURA	200,00
TERMOPAR	3.200,00
COMPUTADOR	2.000,00
VENTILADORES	600,00
VÁLVULAS	12.986,45
TRANSDUTORES	27.500,00
SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	14.274,85
RESERVATÓRIO TÉRMICO	8.300,00
TUBULAÇÃO EXTERNA	2.658,50
TOTAL	213.944,98

Riscos

A Tabela A. 2 apresenta alguns dos riscos encontrados durante o desenvolvimento da bancada. Esse tipo de informação atrelado ao índice de risco são de extrema importância para o trabalho, pois evidenciam os itens que devem receber maior atenção. As medidas de contingência para os riscos também são descritas sucintamente.

Tabela A. 2 - Tabela de Riscos

RISCO	GRAVIDADE (G)	OCORRÊNCIA (O)	ÍNDICE DE RISCO (IR = G x O)	MEDIDA DE CONTINGÊNCIA
Faltam informações importantes na literatura	5	2	10	Pesquisa de novos métodos para abordar o problema
Problema formulado não pode ser resolvido	7	1	7	Análise de soluções simplificadas
Dedicação insuficiente ao projeto	7	2	14	Readequação do tempo de dedicação ao projeto
Orientador desiste do projeto	9	1	9	Procura de novo orientador que atue em área correlata
Orientador não orienta	7	1	7	Realização de reuniões para resolver o risco
Conflito entre orientador e aluno	5	1	5	Novas soluções para que os mesmos entrem em consenso
Prazos não cumpridos	6	3	18	Aumento do tempo de dedicação ao projeto
Perda de arquivos eletrônicos	3	2	6	Realização de backups periódicos
Especificações de equipamentos inadequadas	8	4	32	Consulta a diversas literaturas e profissionais da área
Quebra de equipamento	4	2	8	Observação criteriosa das especificações dos fabricantes
Falta de verba	8	2	16	Busca de novas fontes ou parcerias

ANEXO A – VALORES DAS VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA DOS ACESSÓRIOS DA BANCADA

ACESSÓRIO	QNTD.	Le/D	ρ (kg/m ³)	Q [ml/min]	f (Re/64)	DIÂMETRO 10 mm	DIÂMETRO 20 mm
						ΔP [bar]	ΔP [bar]
Tê padrão	2	20	850	30	0,018	0,001	0,001
				60	0,035	0,002	0,001
				120	0,07	0,004	0,002
				240	0,139	0,008	0,004
				480	0,25	0,016	0,008
				1200	0,43	0,032	0,016
Cotovelo raio longo de 90°	10	30	850	30	0,018	0,030	0,015
				60	0,035	0,060	0,030
				120	0,07	0,120	0,060
				240	0,139	0,240	0,120
				480	0,25	0,480	0,240
				1200	0,43	0,960	0,480
Cotovelo raio curto de 45°	5	16	850	30	0,018	0,090	0,045
				60	0,035	0,180	0,090
				120	0,07	0,360	0,180
				240	0,139	0,720	0,360
				480	0,25	1,440	0,720
				1200	0,43	2,880	1,440
Válvula de bloqueio tipo globo	3	340	850	30	0,018	0,100	0,050
				60	0,035	0,120	0,060
				120	0,07	0,120	0,060
				240	0,139	0,120	0,060
				480	0,25	0,120	0,060
				1200	0,43	0,120	0,060

ANEXO B – RELATÓRIO DOS TESTES FEITOS COM A GLICERINA



Avaliação da Viscosidade de Glicerina Bi Destilada

A Figura 1 apresenta a variação da viscosidade em um teste de rampa de taxa de cisalhamento. A taxa de cisalhamento foi variada de 0 a 100 s⁻¹ durante 60 segundos, em seguida reduzida de 100 a 0 s⁻¹ em 60 segundos. A linha contínua é referente ao primeiro teste realizado com a amostra. A linha tracejada é referente ao segundo teste realizado com a mesma amostra. Nota-se que a viscosidade do material depende da taxa de cisalhamento imposta e do histórico de taxa de cisalhamento.

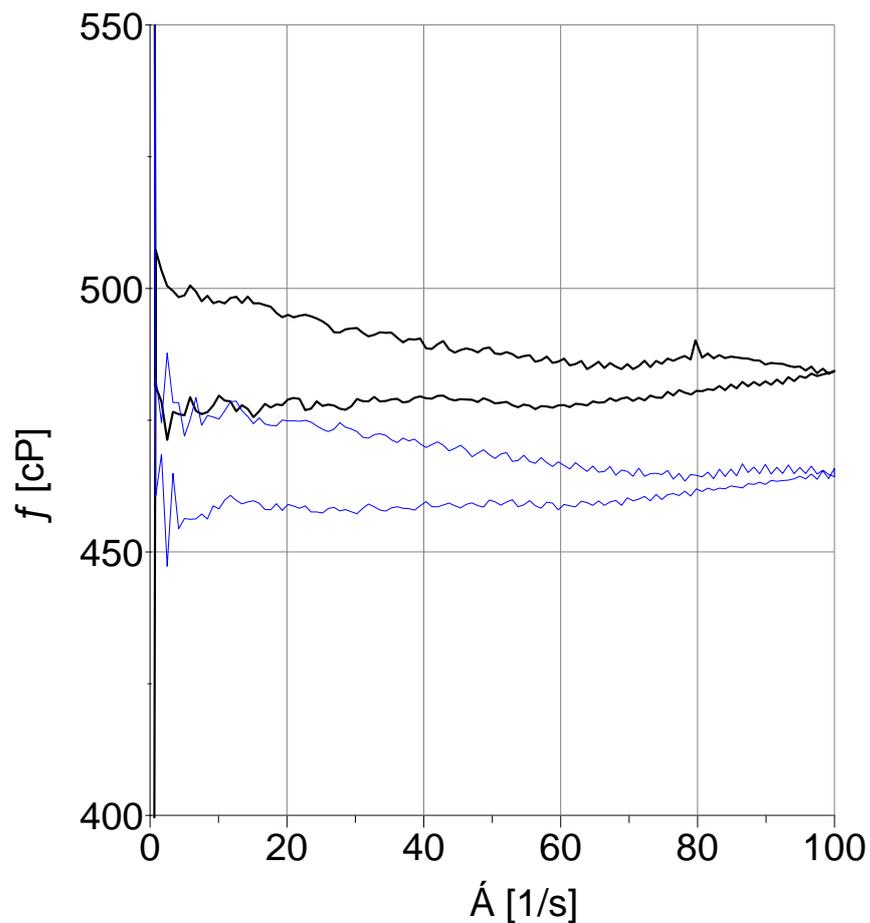


Figura 1 – Viscosidade medida durante uma rampa de taxa de cisalhamento de 0 a 100s⁻¹. Temperatura de 25°C.

Como a amostra apresenta propriedades dependentes do histórico de cisalhamento, o ideal seria determinar um procedimento de preparação de amostra para garantir repetibilidade. Devido ao tempo disponível para realizar os testes, e com o objetivo de determinar a ordem de grandeza da viscosidade nas temperaturas solicitadas, os testes foram realizados sempre com a mesma amostra. Antes do início de cada teste a amostra foi mantida a temperatura do teste por 10 minutos para que o equilíbrio térmico seja atingido.

A Tabela 1 apresenta a variação da viscosidade da Glicerina com a temperatura e com a taxa aplicada. É importante ressaltar que esses são valores médios obtidos à taxa de cisalhamento especificada.

Tabela 1. Viscosidade da Glicerina Bi Destilada

Temperatura [°C]	Taxa de Cisalhamento [s^{-1}]	Viscosidade [cP]
60	1	48
	10	40
	20	38
45	1	83
	10	88
	20	88
35	1	163
	10	165
	20	165
25	1	480
	10	455
	20	448
15	1	1000

	10	990
	20	988
	1	2670
4	10	2600
	20	2500