



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA



ANA GABRIELA BUENO ALVES

PROJETO DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL PARA MONITORAMENTO DA  
SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÕES AQUOSAS SUBMETIDAS A  
GRADIENTES DE TEMPERATURAS

UBERLÂNDIA

2024

ANA GABRIELA BUENO ALVES

PROJETO DE UM SISTEMA EXPERIMENTAL PARA MONITORAMENTO DA  
SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÕES AQUOSAS SUBMETIDAS A  
GRADIENTES DE TEMPERATURAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia  
Química da Universidade Federal de Uberlândia  
como requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

Coorientador: Prof. Dr. João J. Ribeiro Damasceno

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A474 2024	<p>Alves, Ana Gabriela Bueno, 1997- Projeto de um sistema experimental para monitoramento da sedimentação de partículas em suspensões aquosas submetidas a gradientes de temperaturas [recurso eletrônico] / Ana Gabriela Bueno Alves. - 2024.</p> <p>Orientador: Fábio de Oliveira Arouca. Coorientador: João Jorge Ribeiro Damasceno. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.483">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.483</a> Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia química. I. Arouca, Fábio de Oliveira, 1977-, (Orient.). II. Damasceno, João Jorge Ribeiro, -, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.</p> <p>CDU: 66.0</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Mestrado Acadêmico, 6/2024, PPGEQ				
Data:	25 de julho de 2024	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula da Discente:	12222EQU002				
Nome da Discente:	Ana Gabriela Bueno Alves				
Título do Trabalho:	Projeto de um sistema experimental para monitoramento da sedimentação de partículas em suspensões aquosas submetidas a gradientes de temperaturas				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás e modelagem e simulação numérica de escoamentos de fluidos em seções anulares				
ODS-ONU:	ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Doutora: Flávia Marques Fagundes - PPD/FEQUI/UFU e Professores Doutores: Meuris Gurgel Carlos da Silva - FEQ/UNICAMP, Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU, João Jorge Ribeiro Damasceno - PPGEQ/UFU, coorientador, e Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **João Jorge Ribeiro Damasceno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Flávia Marques Fagundes, Usuário Externo**, em 25/07/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Presidente**, em 25/07/2024, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Meuris Gurgel Carlos da Silva, Usuário Externo**, em 25/07/2024, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5552960** e o código CRC **E099B8A7**.

---

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, pela dádiva da vida e por estar presente nela em todos os momentos. Agradeço também aos meus guias e mentores, cujo apoio constante tem sido uma fonte inestimável de orientação e fortalecimento nos dias difíceis.

Aos meus amados pais, Francy e Fernando, agradeço imensamente por acreditarem no meu potencial, por seu apoio inabalável às minhas decisões e por investirem incansavelmente em nossos estudos, meu e de meus irmãos. É graças a vocês que estou alcançando este título, e é a vocês que dedico esta conquista.

Aos meus queridos irmãos, Lucas, Manuela, Brenda e Fernanda, expresso minha gratidão por cada momento compartilhado. Sua presença é a essência da felicidade em minha vida, e nada disso teria significado sem vocês ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos de jornada, em especial ao meu parceiro de bancada, Hélio Jr., cuja orientação, ensinamentos, correções e momentos de diversão foram fundamentais durante minha jornada no laboratório. E também um agradecimento especial a Flávia Fagundes, que esteve sempre presente e disposta a me ajudar e ensinar durante todo esse tempo, muito obrigada.

À Maria Fernanda Lindquist e ao Vito Labruna, meus colaboradores da iniciação científica, expresso minha sincera gratidão pelo auxílio na realização dos experimentos.

Aos funcionários, Rafael Silva, Arciele de Souza e Lidiane Martins, agradeço a simpatia e acolhimento caloroso sempre presentes.

A todos os professores do PPGEQ/UFU, em especial ao Prof. Fábio Arouca e Prof. João Damasceno, expresso minha profunda gratidão por sua paciência, compreensão e companheirismo ao longo de todo este processo. Sou imensamente grata pela oportunidade, confiança e valiosos ensinamentos que compartilharam comigo.

À CAPES, ao CNPQ, à FAPEMIG e à PETROBRAS, manifesto minha gratidão pelo apoio financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Devido à crescente demanda por combustíveis fósseis no Brasil, a alta produtividade das empresas do setor tem sido cada vez mais crucial. A Petrobras, como exemplo destacado, tem encontrado formas de aumentar a eficiência de sua produção e para isso intensificou a exploração em poços ultraprofundos, o que resultou em um aumento substancial em sua produção diária. Entretanto, quando se adentra em regiões tão profundas, é relevante considerar que o processo será exposto a altas temperaturas e pressões. Na etapa de perfuração, um fluido com diferentes funções é utilizado, e este possui características sensíveis a elevadas temperaturas, o que demanda constantes experimentações para desenvolver formulações capazes de resistir a essas condições extremas. Portanto, entender o comportamento desses fluidos quando expostos a temperaturas intensas é de suma importância. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo monitorar o comportamento da concentração volumétrica de sólidos em suspensões aquosas expostas a altas temperaturas e gradientes térmicos, utilizando a técnica de atenuação de raios gama. Para que isso fosse possível, foi necessário construir um equipamento que possibilitasse o monitoramento através da referida técnica e da exposição da área de sedimentação a um gradiente térmico. Por conseguinte, foram feitos testes dinâmicos e estáticos. O teste dinâmico foi proposto para analisar a influência da temperatura no tempo de sedimentação. Assim, foi realizado o monitoramento durante o fenômeno da sedimentação em suspensões aquecidas. O teste de compactação foi proposto para analisar a influência da temperatura na compactação dos sólidos, sendo feito o monitoramento em suspensões aquecidas e após a estabilização do sedimento. O teste com gradiente térmico foi proposto para analisar a influência de um gradiente de temperatura na compactação dos sólidos. Para isso, a área de sedimentação foi exposta a uma parede quente, e os sólidos se compactaram influenciados por um gradiente de temperatura, com o monitoramento feito após a estabilização do sedimento. Em todos os testes, as suspensões utilizadas foram compostas por água e carbonato de cálcio. Os resultados obtidos revelaram que a temperatura exerce influência sobre a velocidade de sedimentação do fluido estudado, pois suspensões mais quentes resultaram em um menor tempo de sedimentação. Além disso, a temperatura influenciou na compactação dos sólidos, tanto quando o fluido é totalmente aquecido quanto quando está sujeito a um gradiente térmico, pois regiões mais quentes resultaram em sedimentos mais expandidos. Diante disso, o estudo possibilitará um avanço no entendimento do comportamento de fluidos com características similares ao fluido de perfuração e uma melhor compreensão do fenômeno da separação sólido-líquido em suspensões aquecidas.

Palavras-chave: Sedimentação sob aquecimento; técnica de atenuação de raios-gama; suspensões aquecidas; gradiente térmico.

## ABSTRACT

Due to Brazil's increasing demand for fossil fuels, the high productivity of companies in this sector has become increasingly crucial. Petrobras, as a prominent example, has found ways to enhance the efficiency of its production and, to this end, has intensified exploration in ultra-deep wells, resulting in a substantial increase in its daily production. However, when drilling in such deep regions, it is important to consider that the process will be exposed to high temperatures and pressures. During the drilling phase, a fluid with various functions is used, and this fluid has characteristics that are sensitive to elevated temperatures, requiring constant experimentation to develop formulations capable of withstanding these extreme conditions. Therefore, understanding the behavior of these fluids when exposed to intense temperatures is of utmost importance. Accordingly, this study used the gamma-ray attenuation technique to monitor the behavior of the volumetric concentration of solids in aqueous suspensions exposed to high temperatures and thermal gradients. To make this possible, it was necessary to construct equipment that would allow monitoring through the mentioned technique and exposure of the sedimentation area to a thermal gradient. Consequently, dynamic and static tests were conducted. The dynamic test was designed to analyze the influence of temperature on sedimentation time. Thus, monitoring was carried out during the sedimentation phenomenon in heated suspensions. The compaction test was proposed to analyze the influence of temperature on the compaction of solids, with monitoring performed on heated suspensions and after sediment stabilization. The thermal gradient test was proposed to analyze the influence of a temperature gradient on the compaction of solids. For this, the sedimentation area was exposed to a hot wall, and the solids compacted under the influence of a temperature gradient, with monitoring done after the sediment stabilization. In all tests, the suspensions were composed of water and calcium carbonate. The results revealed that temperature influences the sedimentation rate of the studied fluid, as hotter suspensions resulted in shorter sedimentation times. Additionally, temperature influenced the compaction of solids, both when the fluid was fully heated and when subjected to a thermal gradient, as hotter regions resulted in more expanded sediments. Therefore, the study will contribute to advancing the understanding of the behavior of fluids with characteristics similar to drilling fluid and provide a better understanding of the solid-liquid separation phenomenon in heated suspensions.

**Keywords:** Sedimentation under heating; gamma-ray attenuation technique; heated suspensions; thermal gradient.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Profundidade dos poços de petróleo ao longo dos anos .....	1
Figura 2.1 – Processo de perfuração de poços de petróleo .....	6
Figura 2.2 – Curva de sedimentação em batelada, mostrando as linhas de equi-concentração conforme modelo de Kynch .....	9
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio .....	21
Figura 3.2 – Posicionamento do reservatório bidimensional em um poço cilíndrico .....	24
Figura 3.3 – Dimensões do reservatório de testes .....	25
Figura 3.4 – Reservatório de testes .....	26
Figura 3.5 – Imagem representativa do agitador axial retangular .....	28
Figura 3.6 – Fluxograma da estrutural experimental .....	29
Figura 3.7 – Leitura com a câmera térmica a 60 e 100 cm .....	33
Figura 3.8 – Interpretação da fotografia obtida pela câmera térmica .....	34
Figura 3.9 – Posição do emissor de raios- $\gamma$ para o teste dinâmico .....	36
Figura 3.10 – Posição do emissor de raios- $\gamma$ para o teste de compactação .....	38
Figura 3.11 – Posição do emissor de raios- $\gamma$ para o teste com gradiente térmico .....	39
Figura 4.1 – Teste com a câmera térmica a 40°C .....	42
Figura 4.2 – Teste com a câmera térmica a 60°C .....	43
Figura 4.3 – Curva de calibração para estimar o $\beta$ do cilindro de testes .....	44
Figura 4.4 – Curva de calibração para estimar o $\beta$ do reservatório bidimensional .....	44
Figura 4.5 – Monitoramento para a análise de hipótese .....	45
Figura 4.6 – Monitoramento térmico do teste dinâmico a temperatura de 40°C .....	47
Figura 4.7 - Monitoramento térmico do teste dinâmico a temperatura de 60°C .....	47
Figura 4.8 – Monitoramento da concentração de sólidos em $Z = 16$ cm .....	48

Figura 4.9 – Monitoramento da concentração de sólidos em $Z = 11$ cm .....	49
Figura 4.10 – Monitoramento da concentração de sólidos em $Z = 6$ cm .....	50
Figura 4.11 – Monitoramento da concentração de sólidos em $Z = 2$ cm .....	51
Figura 4.12 – Monitoramento térmico do teste de compactação a temperatura de $40^{\circ}\text{C}$ .....	53
Figura 4.13 – Monitoramento térmico do teste de compactação a temperatura de $60^{\circ}\text{C}$ .....	53
Figura 4.14 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 2,4$ cm .....	54
Figura 4.15 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 2,4$ cm e $Z = 2$ cm .....	54
Figura 4.16 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 2,4$ cm e $Z = 8$ cm .....	55
Figura 4.17 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 9,1$ cm .....	56
Figura 4.18 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 9,1$ cm e $Z = 2$ cm .....	56
Figura 4.19 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 9,1$ cm e $Z = 8$ cm .....	57
Figura 4.20 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 18,1$ cm .....	58
Figura 4.21 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 18,1$ cm e $Z = 2$ cm .....	58
Figura 4.22 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 18,1$ cm e $Z = 8$ cm .....	59
Figura 4.23 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 27,1$ cm .....	59
Figura 4.24 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 27,1$ cm e $Z = 2$ cm .....	60
Figura 4.25 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 27,1$ cm e $Z = 8$ cm .....	60
Figura 4.26 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 34,9$ cm .....	61
Figura 4.27 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 34,9$ cm e $Z = 2$ cm .....	62
Figura 4.28 – Monitoramento da concentração de sólidos em $X = 34,9$ cm e $Z = 8$ cm .....	62
Figura 4.29 - Monitoramento da temperatura do teste com gradiente térmico .....	64
Figura 4.30 – Comportamento dos sólidos após estabilização do sedimento .....	65
Figura 4.31 – Monitoramento da superfície do sedimento .....	65
Figura 4.32 – Monitoramento mais ao fundo do sedimento .....	66

Figura 4.33 – Gráfico de superfície de contorno .....	67
Figura 4.34 – Gráfico de superfície de contorno nas regiões superiores do sedimento .....	68
Figura 4.35 – Gráfico de superfície de contorno nas regiões inferiores do sedimento .....	68
Figura 4.36 – Monitoramento em $Z = 16$ cm .....	69
Figura 4.37 – Monitoramento em $Z = 2$ cm .....	69
Figura A.1 – Monitoramento do teste dinâmico com desvio padrão em $Z = 16$ cm .....	78
Figura A.2 – Monitoramento do teste dinâmico com desvio padrão em $Z = 11$ cm .....	79
Figura A.3 – Monitoramento do teste dinâmico com desvio padrão em $Z = 6$ cm .....	79
Figura A.4 – Monitoramento do teste dinâmico com desvio padrão em $Z = 2$ cm .....	80
Figura A.5 – Monitoramento da superfície do sedimento .....	80
Figura A.6 – Monitoramento mais ao fundo do sedimento .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Diâmetros característicos do carbonato de cálcio .....	21
Tabela 3.2 – Dados para o cálculo do tempo morto .....	32
Tabela 4.1 – Valores de média e variância para a análise de hipótese .....	46
Tabela 4.2 – Valores de graus de liberdade, $t$ -crítico bicaudal e valor estatístico $t$ para a análise de hipótese .....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Valor exato para o cálculo do erro absoluto [-]

$a$  – Valor aproximado para o cálculo do erro absoluto [-]

$CFD$  – *Computational Fluid Dynamics* [-]

$D_{0,1}$  – Diâmetro volumétrico das partículas correspondentes a 10% da distribuição cumulativa [L]

$D_{0,5}$  – Diâmetro volumétrico das partículas correspondentes a 50% da distribuição cumulativa [L]

$D_{0,9}$  – Diâmetro volumétrico das partículas correspondentes a 90% da distribuição cumulativa [L]

$D_{3,2}$  – Diâmetro médio de Sauter [L]

$E_A$  – Erro absoluto [-]

$E_R$  – Erro relativo [-]

$g$  – Constante gravitacional [ $LT^{-2}$ ]

$GL$  – Graus de liberdade [-]

$HTHP$  – *High temperature high pressure* [-]

$H_0$  – Hipótese nula para o teste de hipótese t de *Student* [-]

$H_1$  – Hipótese alternativa para o teste de hipótese t de *Student* [-]

$I$  – Intensidade do feixe de radiação após a passagem pelo meio físico [ $T^{-1}$ ]

$I_0$  – Intensidade do feixe de radiação antes da passagem pelo meio físico [ $T^{-1}$ ]

$I_A$  – Contagem de pulsos que atravessam a placa de acrílico A [ $T^{-1}$ ]

$I_B$  – Contagem de pulsos que atravessam a placa de acrílico B [ $T^{-1}$ ]

$I_{AB}$  – Contagem de pulsos que atravessam as placas de acrílico A e B juntas [ $T^{-1}$ ]

$I_G$  – Contagem de pulsos com a fonte de radiação selada [ $T^{-1}$ ]

$k$  – Permeabilidade do meio poroso [ $L^2$ ]

$m$  – Tamanho da primeira amostra [-]

$n$  – Tamanho da segunda amostra [-]

$OBM$  – Fluido a base de óleo [-]

$P_S$  – Pressão nos sólidos [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

$q_S$  – Velocidade superficial do sólido [ $LT^{-1}$ ]

$R$  – Contagem corrigida do número de pulsos que passam pelo meio físico [ $T^{-1}$ ]

$R_0$  – Contagem corrigida do número de pulsos que passam pela proveta sem concentração de sólidos [ $T^{-1}$ ]

$R^2$  – Coeficiente de determinação [-]

$S^2_1$  – Variância da primeira amostra [-]

$S^2_2$  – Variância da segunda amostra [-]

$t$  – Tempo [T]

$t'$  – Valor estatístico t para o teste de hipótese t de *Student* [-]

$TARG$  – Técnica de atenuação de raios gama [-]

$V$  – Volume da mistura [ $L^3$ ]

$V_{STH}$  – Velocidade de sedimentação [ $LT^{-1}$ ]

$WBM$  – Fluido a base de água [-]

$X$  – Posição horizontal na estrutura de testes [L]

$\bar{x}$  – Média da amostra [-]

$y$  – Espessura do meio físico [L]

$\bar{y}$  – Média da amostra [-]

$Z$  – Posição vertical na estrutura de testes [L]

$z$  – Posição [L]

$^{241}Am$  – Elemento químico Amerício [-]

$^{137}Cs$  – Elemento químico Césio [-]

$\alpha$  – Nível de significância para o teste de hipótese t de *Student* [-]

$\beta$  – Parâmetro do modelo de Lambert [-]

$\varepsilon_f$  – Porosidade [-]

$\varepsilon_{s0}$  – Concentração inicial de sólidos [-]

$\varepsilon_{su}$  – Concentração final de sólidos [-]

$\varepsilon_s$  – Concentração local de sólidos [-]

$\varepsilon_{sm}$  – Concentração máxima do sedimento [-]

$\rho$  – Densidade [ $ML^{-3}$ ]

$\rho_f$  – Massa específica do líquido [ $ML^{-3}$ ]

$\rho_s$  – Massa específica do sólido [ $ML^{-3}$ ]

$\sigma$  – Coeficiente de atenuação mássico do meio [ $M^{-1}L^{-2}$ ]

$\mu$  – Viscosidade do líquido [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]

$v_k(\varepsilon_s)$  – Velocidade das equi-concentrações [ $LT^{-1}$ ]

$v_s$  – Velocidade intersticial do sólido [ $LT^{-1}$ ]

$v_{s0}$  – Velocidade de sedimentação das partículas na região de concentração constante [ $LT^{-1}$ ]

$\tau$  – Tempo de resolução do sistema de detecção [T]

$\Delta_0$  – Valor baseado na hipótese nula do teste t de *Student* [-]

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>vii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 Processo de perfuração de poços de petróleo	5
2.1.1 Fluidos de perfuração	7
2.2 Sedimentação	7
2.3 Estudos utilizando a técnica de atenuação de raios gama	13
2.4 Sedimentação sob aquecimento	16
2.4.1 Estudos envolvendo a sedimentação sob aquecimento	17
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>22</b>
3.1 Materiais	22
3.1.1 Sólido	22
3.1.2 Unidade experimental	24
3.1.3 Ebulidor	27
3.1.4 Homogeneizador	27
3.1.5 Câmera térmica	28
3.2 Metodologia dos testes experimentais	28
3.2.1 Unidade experimental da aplicação de radioisótopos	29
3.2.1.1 Radioisótopo amerício-241	30
3.2.1.2 Técnica de atenuação de raios- $\gamma$	30
3.2.1.3 Tempo de resolução do sistema	31
3.2.1.4 Curva de calibração para determinação do parâmetro $\beta$	32
3.2.2 Teste com a câmera térmica	33
3.2.3 Teste de hipótese	34
3.2.4 Teste dinâmico	35
3.2.5 Teste de compactação	37
3.2.6 Teste com gradiente térmico	39

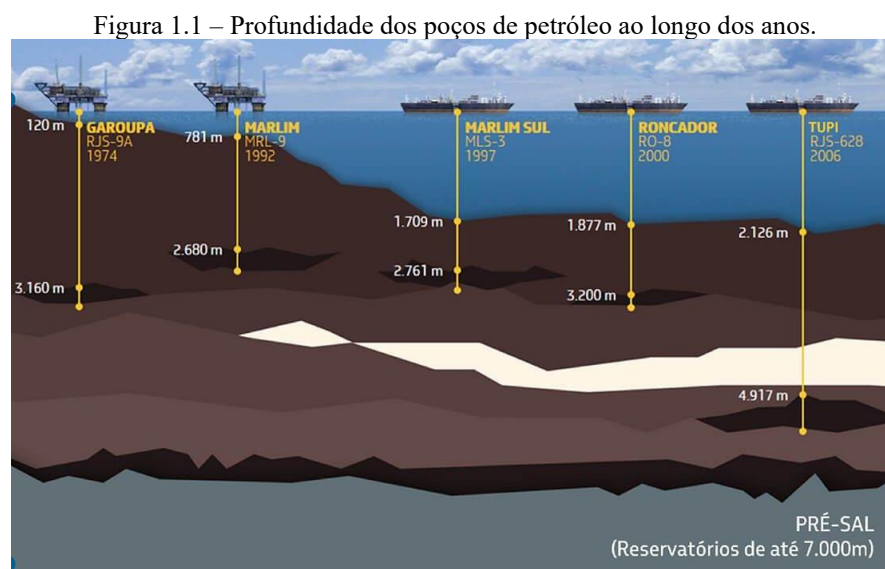


<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1 Teste com a câmara térmica .....	41
4.2 Monitoramento da concentração volumétrica de sólidos.....	43
4.2.1 Curva de calibração .....	43
4.2.2 Teste de hipótese <i>t de Student</i> .....	45
4.2.3 Teste dinâmico.....	47
4.2.4 Teste de compactação .....	52
4.2.5 Teste com gradiente térmico.....	63
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
5.1 Considerações finais .....	71
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	72
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>78</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por combustíveis fósseis no Brasil, a busca por alta produtividade e eficiência na sua produção torna-se cada vez mais essencial, impulsionando extensas pesquisas e estudos com o objetivo de alcançar resultados aprimorados em termos de rendimento e eficácia. Empresas como a Petrobras enfrentam uma necessidade crescente de produção em larga escala, o que as motiva a explorar poços cada vez mais profundos. O campo de Tupi foi pioneiro nessa exploração, com um poço alcançando uma distância de 300 km da costa e uma profundidade de 7.000 m, conforme ilustrado na Figura 1.1, iniciando a exploração na camada pré-sal e atingindo uma produção diária de 1 milhão de barris. Atualmente, a empresa continua a explorar poços mais profundos, como o poço Monai, situado em uma região com 2.366 m de lâmina d'água (distância entre a superfície da água e o fundo do mar) e atingindo uma profundidade recorde de 7.700 m. No entanto, o poço Monai é exclusivamente exploratório, utilizado para estudos de geologia, pressões atingidas, presença de reservatórios e propriedades das rochas perfuradas (PETROBRAS, 2024).



Fonte: Petrobras, 2024.

Explorar camadas tão profundas requer extensa pesquisa e desenvolvimento, envolvendo o uso de equipamentos sofisticados e rigoroso controle operacional. Todo esse controle é essencial devido às condições operacionais extremas encontradas em poços profundos, onde temperaturas e pressões elevadas são comuns. Compreender como conduzir o

processo exploratório e de produção nessas condições extremas é crucial. No entanto, é desafiador definir valores gerais para temperatura e pressão, pois são variáveis dependentes de diversas propriedades, como a região de exploração, o processo de perfuração, a formulação do fluido utilizado, a profundidade do poço, entre outros fatores (ALCOFRA, 2014).

De acordo com Silva (2016), reservatórios submetidos a altas temperaturas e pressões (*HTHP*) estão se tornando cada vez mais comuns. Para que um reservatório seja classificado como *HTHP*, as temperaturas e pressões em condições de fundo de poço devem partir de 150°C e 69 MPa, podendo chegar a situações extremas como 260°C e 241 MPa. Além disso, para se chegar a essa classificação, necessita de um conhecimento prévio geológico, compreendendo sobre poços expostos a altos gradientes térmicos.

O gradiente geotérmico é a variação de temperatura por quilômetro percorrido em profundidade nos poços de perfuração, esse valor pode variar de 23,7°C/km até 36,5°C/km, dependendo da região perfurada. Sendo assim, quando se fala de poços ultra profundos, não há como não falar das condições de altas temperaturas (ROCHA E AZEVEDO, 2009).

Alguns problemas relacionados a poços profundos expostos a altas temperaturas já foram vivenciados, como o ocorrido no Golfo do México, no campo de Marlin. Em que uma coluna de perfuração colapsou após duas horas de operação, sendo causado pelo aumento da temperatura que resultou em um aumento de pressão anular (VARGO JR *et al.*, 2002).

Outra situação ocorreu durante o processo de perfuração no poço Pompano A-31 no Golfo do México, em que ocorreu a deformação do poço por um colapso no revestimento da tubulação, causado pelas altas temperaturas atingidas durante a circulação do fluido de perfuração, chegando a 82°C, demonstrando que as falhas podem ocorrer em temperaturas mais baixas que as condições *HTHP* (PATTILLO *et al.*, 2004).

Sendo assim, seja no processo de exploração ou de perfuração, é necessário considerar essa variação de temperatura ao se investigar regiões mais profundas.

O fluido de perfuração utilizado no processo de exploração dos poços de petróleo está submetido a estes gradientes térmicos, sendo necessário entender todas as consequências de tal influência. Em alguns casos, o fluido não possui resistência ao calor gerado, podendo causar consequências ruins em todo o processo de perfuração. Uma delas é a degradação dos componentes químicos presentes no fluido, acarretando a perda de suas propriedades reológicas, como viscosidade, capacidade de suspensão de sólidos e propriedades de lubrificação. Outra é a redução da eficácia do fluido, fazendo com que este deixe de fazer suas funções primárias, como a remoção de detritos, podendo levar à obstrução dos equipamentos,

diminuindo assim a eficiência da operação. Além disso, pode afetar a capacidade do fluido de controlar a pressão do poço, podendo perder o domínio sobre o poço e posteriormente podendo ocorrer uma possível parada operacional (NASCIMENTO *et al.*, 2013).

Sobre a capacidade de suspensão de sólidos, essa é uma propriedade crucial dos fluidos de perfuração, ela que determina a eficácia na remoção e transporte de detritos. Os fluidos são compostos majoritariamente por líquidos e sólidos uniformemente dispersos e suspensos, evitando a deposição no fundo do poço. A viscosidade desempenha um papel essencial na suspensão dos sólidos, pois fluidos mais viscosos tendem a manter os sólidos em suspensão por mais tempo, enquanto em fluidos menos viscosos, a sedimentação ocorre de forma mais rápida. A densidade é outra propriedade que influencia nessa capacidade, já que fluidos mais densos suportam uma maior quantidade de sólidos em suspensão comparado a fluidos menos densos (MOTTA *et al.*, 2017).

Quando se fala no fenômeno da sedimentação, nem todos os processos na indústria visam separar o sólido do líquido, como é o caso dos fluidos usados na perfuração de poços de petróleo. Nesses fluidos, a sedimentação ocorre quando as partículas sólidas depositam no fundo dos tanques de armazenamento ou nas superfícies internas das tubulações, podendo causar entupimentos.

A gestão adequada dos fluidos de perfuração é essencial para garantir a eficiência do poço e a segurança operacional. A sedimentação pode afetar negativamente o desempenho dos equipamentos, a qualidade do poço perfurado e a vida útil dos fluidos. Portanto, é importante monitorar e controlar esse fenômeno, adotando medidas preventivas e corretivas para manter os fluidos em condições adequadas ao longo do processo.

Atualmente, grande parte dos estudos encontrados na literatura que envolvem sedimentação sob aquecimento (Mkpenie *et al.* (2007), Nascimento *et. al* (2013), Motta *et al.* (2017), Nadella *et al.* (2020), Ferraz *et. al* (2020), Tang *et al.* (2021) e Oliveira *et al.* (2023)) não analisam detalhadamente o comportamento da sedimentação ou a composição dos sedimentos. Muitos desses estudos se limitam a observar a interface sólido/líquido e oferecem uma análise mais geral sobre o comportamento das suspensões, sem empregar uma técnica robusta para monitorar a concentração volumétrica de sólidos. Esta lacuna evidencia a importância de compreender o comportamento desses fluidos, especialmente quando expostos a gradientes térmicos. Diante disso, torna-se necessário aplicar uma técnica que possibilite o monitoramento da concentração volumétrica de sólidos. Neste trabalho, foi utilizada a técnica de atenuação de raios-gama (*TARG*), amplamente reconhecida na literatura por sua eficácia no

monitoramento das distribuições de concentrações volumétricas de partículas em diversos estudos publicados (Damasceno (1992), Arouca (2003), Arouca (2007), Moreira (2014), Fagundes (2015), Santos (2018), dentre outros) e foi utilizada pela primeira vez no monitoramento de fluidos quentes. Diante dessa necessidade de compreensão mais aprofundada e prevenção de situações adversas, as empresas estão cada vez mais investindo em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a eficiência e produtividade de suas operações.

O objetivo com esse trabalho foi fazer o monitoramento da concentração volumétrica de sólidos em suspensões aquosas aquecidas e submetidas a um gradiente térmico. Para isso foi necessário construir um equipamento em que fosse possível fazer o monitoramento através da *TARG* e aplicar gradientes de temperatura. Além disso, foram propostos testes iniciais para diagnosticar o desempenho do dispositivo. Por ser um trabalho pioneiro, utilizando a *TARG* em fluidos submetidos a altas temperaturas, as suspensões aqui trabalhadas foram compostas basicamente por água e carbonato de cálcio.

Este estudo está organizado em cinco capítulos, conforme detalhado a seguir, que abordam os respectivos conteúdos de forma resumida. O segundo capítulo oferece uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos na área da sedimentação e os mais relevantes envolvendo sedimentação sob aquecimento. No terceiro capítulo são descritos os procedimentos adotados para a construção do equipamento, para que assim seja possível conduzir os experimentos, incluindo os materiais utilizados e as ferramentas empregadas. Os resultados experimentais obtidos nesta dissertação são apresentados e discutidos no quarto capítulo. Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões alcançadas, juntamente com algumas sugestões para direcionar futuras pesquisas.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, serão abordados conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, além de destacar as principais referências de estudos previamente publicados que enriquecem a compreensão da separação de materiais particulados sedimentando e da sedimentação de fluidos em condições de elevada temperatura.

#### 2.1 Processo de perfuração de poços de petróleo

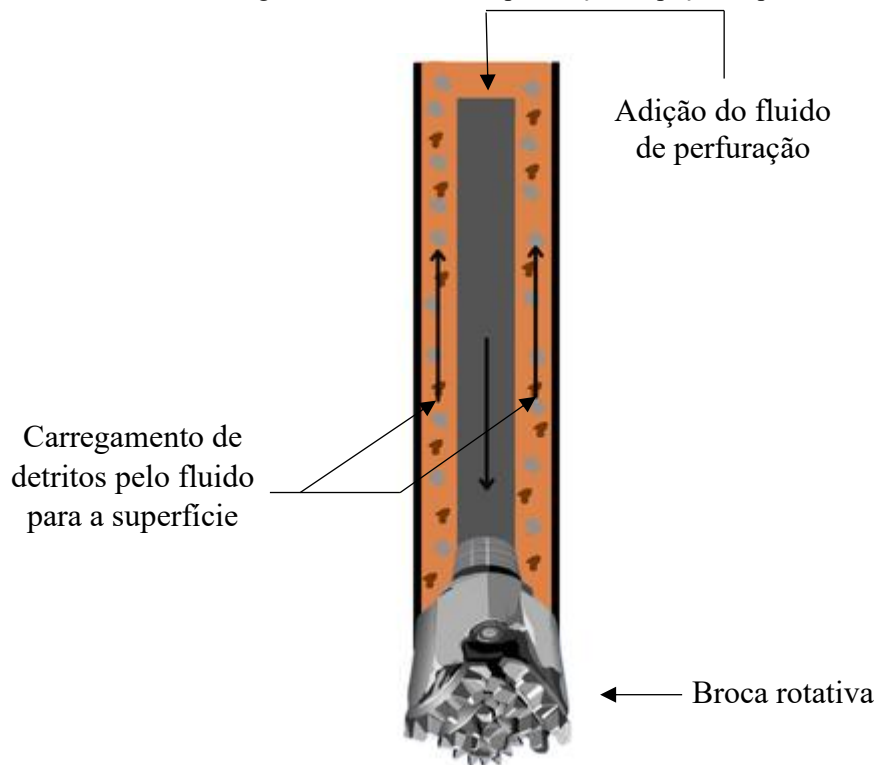
No processo de obtenção de petróleo e gás natural, um dos estágios mais desafiadores e complexos é a etapa de perfuração. Para a realização dessa etapa, várias outras tarefas são necessárias, começando pela investigação de áreas que possuem depósitos destes combustíveis, até a produção propriamente dita (CHRISTIANSEN *et al.*, 2024).

O primeiro passo do processo de extração é selecionar a região em que será feita a exploração, para isso um estudo é feito com base em dados geológicos e geofísicos, utilizando análise de dados sísmicos, amostragem de rochas e análise de sedimentos. Uma vez selecionada a área, os geofísicos utilizam de algumas ferramentas para obter informações do subsolo, como sísmica, gravidade e magnetometria. Sendo a sísmica uma das mais importantes, pois dela se consegue criar imagens do subsolo utilizando ondas sonoras na Terra (THOMAS *et al.* 2001).

Após a fase de exploração bem-sucedida, e por conseguinte a definição da área a ser perfurada, a região é preparada para receber a plataforma de perfuração, envolvendo a construção de bases sólidas e instalação de sistemas de segurança. Finalmente, a plataforma é instalada, composta por vários equipamentos (CHRISTIANSEN *et al.*, 2024).

Feita a instalação, inicia-se o processo de perfuração, que também ocorre em várias etapas. A primeira é a inserção da broca rotativa, projetada para cortar diferentes tipos de rocha e solo, sendo instalada na extremidade da sonda. Após instalada, inicia-se o processo de rotação da broca, e juntamente a isso, a circulação do fluido de perfuração, conforme Figura 2.1. A broca gira em alta velocidade e aplica grande pressão contra o solo, criando assim um poço de perfuração. Durante todo o processo ocorre o monitoramento contínuo de temperatura do poço, pressão e qualidade do fluido de perfuração, a fim de garantir o controle da operação. Após a conclusão da perfuração, o poço é preparado para as operações de produção (MOREIRA, 2014).

Figura 2.1 – Processo de perfuração de poços de petróleo.



Fonte: Elaborado pela autora.

O fluido de perfuração utilizado no processo citado anteriormente, desempenha vários papéis fundamentais, sendo eles:

- Limpeza do poço: Um dos principais objetivos no uso do fluido é o de transportar a lama e os cascalhos advindos do processo de quebra da rocha. Removendo detritos, rochas e sedimentos do poço, eles são levados para a superfície para serem separados e descartados. É de grande importância pois facilita o acesso ao reservatório.
- Controle de pressão: O fluido é essencial para controlar a pressão dentro do poço. Especialmente em situações de regiões mais profundas, em que se faz necessário o ajuste da pressão para se evitar problemas com o influxo de fluidos indesejados advindos da formação rochosa.
- Resfriamento da broca: O processo de quebra da rocha resulta no aquecimento da broca pela produção natural de calor, sendo necessário o fluido de perfuração para resfriamento, evitando danos ao equipamento.
- Estabilidade das paredes do poço: O fluido é utilizado para evitar desmoronamentos ou colapsos no reservatório, especialmente em formações rochosas instáveis (COLLINS *et al.*, 2024).

Diante das diversas funções do fluido de perfuração, a remoção de detritos, rochas e sedimentos destaca-se como a mais importante. Portanto, compreender o comportamento da concentração de sólidos nessas suspensões é de extrema relevância. Para alcançar esse entendimento, é fundamental estudar o fenômeno da sedimentação para prever seu comportamento em condições adversas.

### **2.1.1 Fluidos de perfuração**

Os fluidos de perfuração comumente utilizados variam em sua formulação, sendo ajustados conforme as necessidades específicas do poço a ser perfurado. São fluidos à base de água, óleo, fluidos sintéticos e fluidos pneumáticos. Os fluidos à base de água são os mais amplamente empregados, sendo compostos por água e aditivos que são ajustados conforme as necessidades particulares de cada poço. Eles são geralmente mais econômicos e apresentam menor impacto ambiental devido à sua facilidade de tratamento e descarte. No entanto, podem ser menos eficazes em formações altamente reativas à água e possuem um menor grau de lubrificação (FATTAH *et al.*, 2016).

Em situações onde o fluido anterior se mostra inadequado, é utilizado o fluido à base de óleo, que possui excelentes propriedades de lubrificação e maior estabilidade térmica. No entanto, ao contrário do fluido à base de água, estes são menos econômicos e apresentam maior impacto ambiental, o que torna o seu manuseio e descarte mais desafiadores devido à sua toxicidade (DAVOODI *et al.*, 2024).

Os fluidos sintéticos e pneumáticos são menos utilizados. O fluido sintético possui características bastante semelhantes às do fluido à base de óleo, com a vantagem adicional de ser menos tóxico e causar menor impacto ambiental, embora ainda seja um fluido de alto custo. Já o fluido pneumático distingue-se pela utilização de ar comprimido em vez de líquidos, sendo mais empregado em formações frágeis e instáveis. Sua aplicação é menos frequente devido à necessidade de equipamentos especializados (DAVOODI *et al.*, 2024).

O fluido empregado neste trabalho é o fluido à base de água na presença de um adensante, o carbonato de cálcio. Foi escolhido por ser o mais frequentemente utilizado e por seu fácil manuseio.

## **2.2 Sedimentação**

A sedimentação é um processo amplamente utilizado na indústria química para separar partículas sólidas em suspensão, com base na diferença de densidade entre os componentes,



viscosidade do meio e gravidade. Fluidos mais viscosos oferecem maior resistência ao movimento das partículas, dificultando a separação completa. Já em fluidos menos viscosos, as partículas têm mais liberdade para se mover e se separar, resultando em uma melhor segregação (MOREIRA, 2014).

O fenômeno da sedimentação tem sido estudado por anos e até hoje grandes estudiosos tem resultados valiosos para explicar o comportamento de diferentes fluidos. O estudo da sedimentação de partículas teve seu ponto de partida no trabalho de Stokes (1851). O pesquisador analisou o movimento lento de uma partícula individual em um fluido e derivou a famosa equação que descreve a força de arraste sobre uma partícula esférica e rígida movendo-se em um fluido com propriedades isotrópicas e comportamento newtoniano. A partir da equação desenvolvida por Stokes, tornou-se viável, por exemplo, calcular a velocidade terminal de partículas esféricas isoladas.

Coe e Clevenger (1916) iniciaram os estudos em testes de proveta para a utilização de sedimentadores na indústria química. Por meio dos testes de sedimentação em batelada, os autores conseguiram propor uma equação (Equação 2.1) para determinar a capacidade do sedimentador, estabelecendo a velocidade superficial de sólidos alimentados em um sedimentador ( $q_s$ ). Para que isso fosse possível, os ensaios de sedimentação em proveta deviam estar contidos na faixa de concentração de sólidos inicial ( $\varepsilon_{s0}$ ) e a faixa de concentração da lama final ( $\varepsilon_{su}$ ), encontrando a velocidade de sedimentação das partículas de concentração constante ( $v_{s0}$ ) em cada teste.

$$q_s = \frac{v_{s0} \theta}{\frac{1}{\varepsilon_{s0}} + \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (2.1)$$

Desses estudos, os autores conseguiriam distinguir as diferentes regiões que se definem no processo de sedimentação, sendo elas região de líquido clarificado, onde não há mais a presença de sólidos, ou seja, a concentração de sólidos nessa região é praticamente nula; região de concentração constante, em que a concentração não se diferente do valor da concentração inicial; região de transição, é uma região em que ocorre a variação da concentração de sólidos, partindo da concentração inicial de sólidos da suspensão indo até a concentração da suspensão na região de compressão; e região de compressão, onde as partículas maiores chegam mais rapidamente a base do recipiente e as partículas menores preenchem os vazios existentes, aumentando gradativamente a concentração local de sólidos até se chegar a estabilidade do sedimento.

Comings (1940) demonstrou que os resultados obtidos por Coe e Clevenger (1916) eram satisfatórios apenas em casos que se utilizasse suspensões pouco compressíveis.

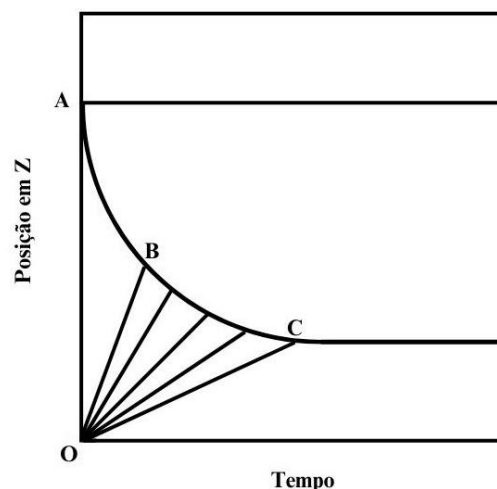
Alguns anos depois, Kynch (1952) utilizou da equação da continuidade para descrever o processo de sedimentação. Em sua teoria, o autor determinou que a velocidade de queda das partículas era função da concentração volumétrica de sólidos para uma determinada suspensão.

Conforme Moreira (2014), Kynch utilizou de algumas hipóteses simplificadoras para o equacionamento do modelo, como:

- a) Todas as partículas são pequenas, de mesmo tamanho, forma e densidade;
- b) O sólido e o fluido na mistura são incompressíveis;
- c) A velocidade relativa entre o sólido e o fluido na mistura é uma função apenas da concentração local de sólidos ( $\epsilon_s$ );
- d) A concentração de partículas é constante para qualquer camada horizontal da coluna;
- e) Para  $t = 0$  s, a suspensão possui a mesma concentração inicial de sólidos ( $\epsilon_{s0}$ ) ao longo de toda a altura da coluna de suspensão;
- f) Na base da proveta de testes, existe um contínuo e rápido aumento da concentração de sólidos de  $\epsilon_{s0}$  até a concentração máxima do sedimento  $\epsilon_{sm}$  (concentração final).

O modelo de Kynch (1952) não representa completamente o fenômeno da sedimentação, pois a interface descendente não foi descrita matematicamente, sendo necessário correlações empíricas para sua obtenção. Já a interface ascendente pode ser descrita pelas curvas de equi-concentrações conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 – Curva de sedimentação em batelada, mostrando as linhas de equi-concentração conforme modelo de Kynch (1952).



Fonte: Adaptado de Arouca, 2007.

De acordo com a Figura 2.2, baseada no modelo de Kynch (1952), é possível extrair algumas interpretações importantes, a região delimitada por AOB é a região onde a velocidade de sedimentação é constante ( $v_s = v_{s0}$ ) e a concentração volumétrica de sólidos é a mesma que a concentração inicial ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{s0}$ ), essa região foi determinada por Kynch como sendo a região de sedimentação livre.

Já a região demarcada por BOC é uma região onde se encontra as curvas de equi-concentrações, ou seja, são curvas que partem da origem e possuem diferentes inclinações dependendo da velocidade de sedimentação e da concentração de sólidos. Variando de  $v_k(\varepsilon_{s0})$ , em que a velocidade de sedimentação depende da concentração inicial de sólidos, até  $v_k(\varepsilon_{sm})$ , em que a velocidade de sedimentação é função da concentração máxima de sólidos, ou seja, concentração do sedimento estabilizado. Essa região foi determinada por Kynch como sendo a região de transição.

Além dessas duas regiões, o autor definiu mais duas. A região de líquido clarificado, em que  $\varepsilon_s$  é igual a zero, ou seja, região onde não há mais a presença de sólidos, delimitada pela região acima da curva ABC na Figura 2.2. E a região do sedimento incompressível, em que a velocidade de sedimentação é zero e a concentração se estabiliza em  $\varepsilon_{sm}$ , representada pela região abaixo de OC.

Apesar do estudo teórico de Kynch (1952) ter possibilitado interpretações extremamente relevantes ao tema, ele não pode ser utilizado para interpretar a compactação de sedimentos compressíveis, pois ele não levou em consideração as forças existentes sobre as partículas, característica que tem significativa influência na acomodação de partículas sólidas.

Depois disso, muitos pesquisadores basearam nos estudos de Coe e Clevenger (1916) e Kynch (1952) para desenvolverem novas teorias sobre o fenômeno da sedimentação. Shannon *et al.* (1963) esclareceram a relação entre espessamento contínuo e descontínuo, sendo dependentes de uma escolha adequada da coordenada do fluxo de sólidos. Os autores realizaram testes experimentais de sedimentação descontínua utilizando esferas rígidas em água.

Já em Fitch (1966), foi estudado de forma mais aprofundada a compressibilidade do sedimento, demonstrando a influência de uma partícula sob a outra pela proximidade entre elas. O autor concluiu que as camadas de sólidos exercem uma força de compressão sob as camadas mais abaixo. E referente as partículas que estão sedimentando, existe um suporte hidrodinâmico que as seguram, porém quando essa partícula se acomoda, esse fenômeno desaparece.

Em Harris *et al.* (1975), os experimentos foram conduzidos em lotes de sedimentação de lamas fosfáticas diluídas, nas quais foram adicionadas quantidades reduzidas de partículas

maiores para acelerar o processo. As curvas resultantes exibiram uma forma distintamente invertida em S, sem uma fase de sedimentação constante, e apresentaram um comportamento assintótico pronunciado, sugerindo a presença de material compressível. Embora nenhum agente floculante tenha sido introduzido, observou-se que as lamas se aglomeravam em pequenos agregados de partículas. Devido à complexidade do sistema, um modelo idealizado foi proposto. Diversas regiões da curva foram identificadas, cada uma indicando um mecanismo de sedimentação predominante em uma faixa específica de concentração. Modelos fenomenológicos foram propostos para cada região e expressos de forma simples (FAGUNDES, 2015).

Adorján (1975) desenvolveu um modelo matemático para a sedimentação contínua, utilizando as equações da continuidade e do movimento, com o objetivo de investigar a influência da altura do sedimento no projeto. O autor observou que os ensaios de sedimentação em batelada não oferecem todas as informações necessárias para o projeto de sedimentadores quando o material em questão é compressível. A partir da análise de seus resultados, ele destacou a existência de uma faixa limitada de capacidades dentro da qual o sedimentador pode operar para produzir uma concentração específica de lama, o que o levou a propor a definição de um fator de carga (CONCHA E BURGER, 2002).

D'Ávila (1976) apresentou um dos modelos que melhor descreve a sedimentação em batelada. Como a velocidade do fluido e do sólido são nulas em regiões mais ao fundo do reservatório, se faz necessário a resolução das equações da continuidade e do movimento referentes ao sólido. Para tornar o sistema determinado, d'Ávila adotou hipóteses constitutivas relacionadas à força resistiva e tensão nos sólidos. Ele argumentou que os tensores de tensão nos constituintes sólido e líquido são funções exclusivamente da porosidade do meio. Através dessas hipóteses, ele formulou um modelo matemático, descrevendo teoricamente o processo de sedimentação em batelada aplicando a Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo (NUNES, 2008).

Diante da necessidade de desenvolver uma teoria constitutiva, d'Ávila e Sampaio (1977a) estabeleceram os teoremas de representação das tensões dos componentes de uma suspensão e da força resistiva para várias condições de dependência funcional. Os autores evidenciaram que, se o tensor de tensão nos sólidos é exclusivamente uma função da porosidade da suspensão, ele contém apenas componentes relacionados à compressão. Neste estudo, os autores propuseram equações de estado para a tensão nos sólidos durante o processo de sedimentação. Além disso, investigaram o impacto das equações constitutivas para a tensão nos

sólidos no projeto de sedimentadores. Resolveram repetidamente o problema de valor inicial associado ao sistema proposto por d'Ávila (1976), empregando em cada iteração uma equação constitutiva diferente. Em cada caso, consideraram as condições estabelecidas no ponto crítico (a interseção das duas interfaces), determinadas pela resolução do primeiro problema de valor inicial, como as condições iniciais para um novo problema de valor inicial, representando um segundo estágio no processo de sedimentação. Compararam suas soluções com os resultados dos ensaios experimentais e, como conclusão, selecionaram a equação quadrática para a tensão em relação à porosidade como aquela que produz os melhores resultados (AROUCA, 2007).

A investigação sobre o projeto de sedimentadores realizada por d'Ávila e Sampaio (1977b) teve início com a análise das soluções numéricas do sistema de equações diferenciais estabelecido por d'Ávila (1976), o qual empregava uma equação constitutiva para a tensão nos sólidos linearmente relacionada à porosidade. Os valores da velocidade de sedimentação e da concentração volumétrica, obtidos por meio da resolução do sistema que necessariamente se ajustava à curva de sedimentação experimental, eram utilizados na equação da capacidade do sedimentador, com o valor mínimo sendo adotado no projeto. No entanto, essa metodologia não considerava os efeitos da compressibilidade do sedimento, os quais, como demonstrado por Adorján (1976), são de extrema importância (AROUCA, 2007).

Concha e Bascur (1977) examinaram o comportamento transitório de suspensões floculadas em um espessador ideal por meio da simulação usando a solução numérica da equação parabólica-hiperbólica da teoria fenomenológica de sedimentação. Os resultados numéricos apresentaram o comportamento previsto de sedimentação e consolidação durante a sedimentação em lote, bem como nas operações essenciais do espessamento contínuo: preenchimento, transição entre estados estacionários e esvaziamento de um espessador contínuo.

Tiller (1980) fundamentou seus estudos nos trabalhos de Kynch (1952) para desenvolver novas equações constitutivas. Concluiu que as características que descrevem o comportamento da taxa de sedimentação têm origem na superfície do sedimento ascendente, onde a velocidade ascendente do líquido influencia a taxa de queda das partículas. Derivou então novas equações partindo da premissa de que essas características têm origem no sedimento ascendente.

Wakeman e Holdich (1984) empregaram uma técnica não invasiva para avaliar a pressão nos sólidos por meio da concentração em testes de sedimentação em batelada. Essa abordagem se baseou na medição da diferença de potencial elétrico ao longo do recipiente em diferentes intervalos de tempo. Seu sistema incluía várias resistências elétricas distribuídas axialmente, e

a diferença de potencial entre cada par de resistências era medida por um voltímetro digital controlado por um computador. Ao variar a concentração, os pesquisadores conseguiram determinar a velocidade de sedimentação e a pressão nos sólidos. Seguindo uma linha similar à de Hamacher (1978), os autores concluíram que as forças inerciais da equação do movimento podiam ser negligenciadas em relação aos outros termos da equação. Além disso, observaram que os resultados para a pressão nos sólidos eram confiáveis apenas na região de compressão (FAGUNDES, 2015).

Concha e Bustos (1987) sugeriram em sua pesquisa uma adaptação da teoria de sedimentação de Kynch (1952). Os autores argumentaram que, embora essa teoria tenha influenciado muitos estudos subsequentes, ela não é adequada para lidar com problemas reais de sedimentação, principalmente devido ao comportamento compressível comum em lamas. Com o objetivo de incorporar as características compressíveis do sistema, Concha e Bustos (1987) propuseram uma nova condição, conforme Equação 2.2.

$$z = 0, t > 0 \rightarrow \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} = - \frac{(\rho_s - \rho_f)g\varepsilon_s}{\frac{dP_s}{d\varepsilon_s}} \quad (2.2)$$

em que  $\varepsilon_s$  é a concentração volumétrica de sólidos,  $\rho_s$  a densidade do sólido,  $\rho_f$  a densidade do líquido,  $g$  a aceleração da gravidade e  $P_s$  a pressão nos sólidos. Essa condição foi determinada aplicando-se a equação do movimento para os sólidos em  $z = 0$ , onde a velocidade das partículas sólidas é zero. Após examinar os resultados obtidos, os pesquisadores chegaram à conclusão de que essa nova abordagem do fenômeno de sedimentação é mais precisa para descrever o sistema. Além disso, observaram que, em suspensões mais compressíveis, as características não seguem trajetórias lineares, ao contrário do que foi sugerido por Kynch (1952) (ROCHA, 2018).

Depois disso, alguns pesquisadores utilizaram a técnica de atenuação de raios gama para avançar nos estudos envolvendo o fenômeno da sedimentação.

### 2.3 Estudos utilizando a técnica de atenuação de raios-gama (*TARG*)

Hamacher (1978) utilizou a *TARG* em testes de sedimentação em batelada. O autor descreveu a variação de concentração em função de tempo e espaço, condensando seu estudo nas regiões de sedimentação livre e compactação. Concluiu que para expressar a velocidade de sedimentação e pressão nos sólidos, precisaria de mais informações que apenas concentração de sólidos.

Damasceno *et al.* (1991) fez uso da técnica com o intuito de ajustar equações para a determinação de permeabilidade do meio e tensão dos sólidos. Demonstrando bons resultados com grande reprodutibilidade e pequeno desvio padrão.

Damasceno (1992), utilizando a mesma técnica, determinou novamente um equacionamento para permeabilidade e tensão dos sólidos, porém nesse momento para espessadores contínuos. Analisou que os parâmetros dependiam apenas da porosidade local, concluindo que a altura do sedimento é um fator importantíssimo no projeto de sedimentadores.

Ruiz *et al.* (1997a) detectaram as quatro regiões expostas por Kynch (1952) utilizando a *TARG*, com o intuito de monitorar a concentração indireta de sólidos variando a posição e o tempo. A concentração indireta de sólidos é uma técnica utilizada para estimar a quantidade de sólidos suspensos em uma solução ou mistura sem medir diretamente o peso ou o volume dos sólidos presentes.

Além disso, Ruiz *et al.* (1997b) obtiveram a distribuição granulométrica de sólidos pulverulentos, fazendo isso através de testes em suspensões concentradas de sólidos em água, utilizando a mesma técnica.

Ruiz (2000) utilizou a *TARG* para acompanhar a concentração em batelada de suspensões de carbonato de cálcio e caulim a 2 e 3%. Obteve valores de concentração em função de espaço e tempo e através disso, recorreu as equações de continuidade e movimento para um estudo mais aprofundado. Concluiu que a velocidade de sedimentação só pode ser dependente apenas da concentração de sólidos em casos de sedimentos pouco compressíveis.

Arouca (2003) empregou a técnica para monitorar suspensões de diferentes concentrações, porém agora com 8 e 12% de caulim. Através de testes estáticos e dinâmicos, determinou pressão nos sólidos e permeabilidade do meio poroso, respectivamente. Concluiu que ambos dependiam exclusivamente da concentração local de sólidos.

Em Arouca *et al.* (2005a), a técnica foi utilizada com o objetivo de analisar a cinética da sedimentação baseados no formato, distribuição granulométrica e densidade dos sólidos em suspensões sólido-líquido. Testes estáticos foram desenvolvidos para melhorar o entendimento da compressibilidade do material. Os autores concluíram que partículas esféricas sedimentavam mais rápido que partículas irregulares, e que essa análise não poderia depender apenas da densidade do sólido, sendo funções também do formato e distribuição da partícula. Ou seja, sólidos irregulares resultaram em sedimentos pouco compactados.

Em Arouca *et al.* (2005b) o objetivo foi avaliar o uso da técnica para a distribuição de concentração e obtenção de curvas de isoconcentrações utilizando caulim, carbonato de cálcio

e microesferas de vidro. A técnica se mostrou eficaz no monitoramento da concentração das suspensões. Sobre as curvas de isoconcentração, as inclinações se mostraram mais altas para concentrações próximas as iniciais e a medida que a concentração aumentava as curvas mostravam tendências não lineares.

Arouca (2007) fez uso da *TARG* no estudo da determinação de concentrações na sedimentação em batelada. Testes estáticos e dinâmicos foram desenvolvidos para a análise do comportamento de suspensões sólido-líquidos isotérmicos. Além disso, modelos matemáticos já estudados foram utilizados para se chegar a um modelo alternativo que contribuiria para o estudo. Esse modelo foi validado através dos testes experimentais. Analisando três sólidos diferentes, o autor concluiu que a sedimentação dependia não só da densidade do sólido, como também da forma e distribuição.

O autor provou que a velocidade de sedimentação da esfera de vidro fora 30 vezes maior comparada ao carbonato de cálcio, sendo explicada pelo seu formato mais regular. Além disso, mostrou a forte influência da distribuição granulométrica na sedimentação, pois partículas de maiores massas sedimentavam mais rápido. Sobre o efeito de forma, partículas mais regulares, ou de maior esfericidade resultaram em menores sedimentos com alto valores de concentração na base. Diferentemente para partículas irregulares, que resultaram em sedimentos mais compressíveis. E diante de todo o estudo, foi possível confirmar a eficácia da *TARG*, demonstrando bons resultados através de uma técnica não destrutiva.

O objetivo de Moreira (2014) foi monitorar a sedimentação de fluidos newtonianos, fluidos pseudoplásticos e fluidos pseudoplásticos com características tixotrópicas em diferentes concentrações, utilizando testes estáticos, dinâmicos e destrutivos. Os sólidos utilizados foram areia, carbonato de cálcio e microesferas de vidro, em diferentes distribuições granulométricas.

O autor concluiu que para os fluidos com características pseudoplásticas, nos pontos mais altos da proveta, onde a concentração de sólidos diminuía até zero, o monitoramento apresentou um comportamento exponencial, indicando uma passagem de interface descendente suavizada. No início da sedimentação, os sólidos sedimentaram mais rapidamente em comparação ao fluido newtoniano, mas essa tendência não se manteve. E na formação do sedimento, a concentração aumentou de forma quase imediata, sem a presença de uma curva constante.

Por outro lado, para o fluido com características newtonianas, o autor concluiu que nos pontos mais altos da proveta, o monitoramento indicou uma passagem de interface descendente



mais brusca. Na formação do sedimento, observou-se que, para o fluido newtoniano, o aumento da concentração ocorreu de maneira quase constante até se estabilizar.

O objetivo do estudo de Fagundes (2015) foi investigar as propriedades reológicas do fluido Br-Mul, fluido utilizado na perfuração de poços de petróleo, além de fazer o monitoramento da sedimentação de partículas sólidas quando deixado em repouso. Com o estudo foi possível obter a permeabilidade do meio poroso, a velocidade de sedimentação das partículas e uma equação constitutiva para pressão nos sólidos. O sólido utilizado para o estudo da sedimentação foi a barita de densidade  $4,5\text{g/cm}^3$  e o monitoramento foi feito por 365 dias.

O autor concluiu que com a *TARG* foi efetivamente possível fazer o monitoramento da concentração de sólidos do fluido proposto, e com isso, foi possível averiguar o comportamento das partículas sedimentando no fluido. Além disso, foi verificada a tendência dos gráficos obtidos, o que possibilitou concluir que no topo do sedimento, o desenvolvimento das curvas foi linear e no fundo do sedimento a característica foi logarítmica.

No estudo de Santos (2018), o objetivo foi reproduzir o comportamento do fluido confinado em poços com paradas operacionais, sendo assim, a investigação se deu em condições de baixa taxa de cisalhamento. Para isso, foram utilizados dois fluidos sintéticos a base de óleo, sendo diferenciados pela presença de carbonato de cálcio.

O autor concluiu que o fluido espessado com carbonato de cálcio se mostrou mais estável comparado ao fluido não espessado, sendo explicado pelos maiores valores de viscosidade aparente, que ocasionou uma maior resistência a deformação. Apresentou também uma baixa variação no perfil de concentração, explicado pelo baixo valor de velocidade de sedimentação, causada por uma maior concentração de sólidos. E por fim, o fluido espessado resultou em uma coluna de sedimento mais elevada e incompressível, que aplicou maior pressão sob os sólidos.

## **2.4 Sedimentação sob aquecimento**

A sedimentação sob aquecimento é o fenômeno da deposição de sólidos influenciada pela variação de temperatura. É um processo físico em que partículas sólidas em suspensão se separam devido a mudança de densidade e/ou viscosidade do fluido.

A densidade de uma suspensão está relacionada a massa de líquidos e sólidos que a compõem e ao volume que todas as moléculas ocupam. Quando ocorre a mudança de temperatura do meio, as partículas presentes ganham ou perdem energia cinética, o que altera a distância média entre elas, alterando a densidade.

Quando a temperatura de um fluido aumenta, as partículas se agitam, afastando uma das outras, ocupando um maior volume, tendo como resultando a diminuição da densidade. Sendo o contrário válido também, o fluido sendo exposto a menores temperaturas, as partículas tendem a se agruparem, ocupando um menor volume, aumentando a densidade (RAVEN *et al.*, 2014).

Em relação a viscosidade, a explicação é muito parecida, quando um fluido viscoso é submetido a maiores temperaturas, suas moléculas se agitam, reduzindo a coesão entre elas e permitindo que elas escoem mais facilmente. De forma geral, com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da viscosidade (NASCIMENTO *et al.* 2013, MOTTA *et al.* 2017, TANG *et al.* 2021).

No entanto, não se deve generalizar, pois alguns fluidos apresentam o comportamento contrário, como fluidos viscoelásticos. O aumento da temperatura pode causar o aumento da viscosidade devido a mudanças na estrutura molecular do fluido. Sendo assim, vai depender do tipo de fluido em questão e de suas propriedades específicas (ALADE *et al.* 2023).

Posto isto, vale ressaltar que a sedimentação sob aquecimento depende das propriedades das partículas em suspensão, do fluido em que estão suspensas e das condições de temperatura.

#### **2.4.1 Estudos envolvendo a sedimentação sob aquecimento**

Em Mkpennie *et al.* (2007), ao analisar os efeitos da temperatura na sedimentação de metais insolúveis, os autores observaram o quanto o aumento da temperatura influencia na taxa de sedimentação. As temperaturas investigas no trabalho foram 8, 21, 28 e 50°C e a taxa de sedimentação foi obtida através da variação do volume no cilindro de testes. Para que fosse possível fazer a leitura da sedimentação dos íons metálicos, foram adicionados 20 ml dos agentes precipitantes (0,1M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) a 20 ml dos íons metálicos (0,01-0,2 M) em uma proveta de 100 ml, agitados e deixados em repouso. Dentre os metais trabalhados (Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup> e Ni<sup>2+</sup>) o zinco apresentou maior taxa de sedimentação e o níquel a menor. Concluíram que um aumento de 20°C na temperatura, pôde dobrar a taxa de sedimentação, constatando de forma geral, que há um aumento na taxa de sedimentação com a temperatura.

Já em Nascimento *et al.* (2013), ao avaliar a estabilidade térmica de fluidos de perfuração argilosos, aditivados com polímeros e lubrificante, verificaram que sob elevada temperatura ocorreu significativa alteração na reologia das emulsões. O fluido de perfuração formulado pelos autores fora colocado em um forno para envelhecimento térmico durante 16h nas temperaturas trabalhadas, sendo elas a ambiente ( $FT_{amb}$ ), 107°C ( $FT_1$ ), 121°C ( $FT_2$ ) e 177°C ( $FT_3$ ).

Um dos resultados obtidos foi das propriedades reológicas do fluido. Notou-se uma queda extrema da viscosidade aparente e do limite de escoamento em uma certa faixa de temperatura. Outra propriedade analisada foi a viscosidade plástica, que teve um decréscimo com o aumento da temperatura, mas não demonstrou uma queda tão brusca. A alteração destas propriedades foi explicada pela redução da força de coesão causada pelo aumento da temperatura, ou seja, a viscosidade é inversamente proporcional a temperatura.

Outra análise feita foi a de volume de filtrado e espessura da torta. Quando se faz a inspeção do fluido formulado a temperatura ambiente, pode se concluir que ele possui melhores propriedades reológicas, pois nesta condição o polímero é expandido pelo contato com a água, sofrendo hidratação, havendo a interação da argila com essa molécula, aumentando a viscosidade e diminuindo o volume de filtrado pela força de interação presente.

Motta *et al.* (2017) estudaram sobre a quebra de emulsões preparadas através de amostras de petróleo com óleo leve e pesado, submetidas a diferentes temperaturas, 25° e 60°C. Identificaram que com o aumento da temperatura ocorreu a redução da viscosidade, explicada pelo aumento das distâncias intermoleculares, causando uma diminuição das forças atrativas entre as moléculas, favorecendo o aumento da velocidade de sedimentação.

Diante dos vários objetivos de Nadella *et al.* (2020), um deles foi utilizar análise de vídeo e imagem para quantificar a velocidade de sedimentação, e outro foi detalhar a eficiência do processo entre 4 e 44°C. O fluido utilizado foi água de formação nativa, rica em matéria orgânica. Os autores concluíram que o tamanho e morfologia do floco variavam com a mudança de temperatura e que a velocidade de sedimentação estava intrinsicamente ligada a isso. Constataram um aumento na taxa de sedimentação entre 4 e 22°C, na presença de polímero. Sobre a viscosidade média, na temperatura de 4°C foram obtidos maiores valores, e em 44°C foram obtidos menores valores, pois com o aumento da temperatura há a redução da viscosidade.

Ferraz *et. al* (2020) examinaram o impacto da temperatura e do tempo de sedimentação prévia na dinâmica de sedimentação de partículas e no volume de filtrado obtido de suspensões não-Newtonianas. Para isso, foram preparadas suspensões contendo uma solução aquosa de goma xantana adensada com barita, um sólido comum na indústria petrolífera utilizado para ajustar a densidade dos fluidos de perfuração. As suspensões foram mantidas em recipientes com altura calibrada a 25°C e 50°C, por 7 e 14 dias, respectivamente, para observar a interface entre as regiões clarificadas e de sedimentação livre. Nos ensaios de filtração com e sem sedimentação prévia, as suspensões foram mantidas em uma célula de filtração sob pressão e temperatura constantes antes do início da filtração. Os resultados indicaram um aumento tanto

na velocidade de avanço da interface clarificado/sedimentação livre nos experimentos de sedimentação quanto na taxa de filtração em operações conduzidas a temperaturas mais elevadas. A influência da temperatura mostrou-se crucial para a dinâmica da interface e para o volume de filtrado coletado. Além disso, o aumento na concentração do viscosificante resultou em uma redução na velocidade de avanço da interface de sedimentação, mantendo os sólidos em suspensão por mais tempo, indicando um retardo na formação do sedimento. Observou-se também um aumento no volume de filtrado para ambas as suspensões com o aumento do tempo de sedimentação prévia.

Em Tang *et al.* (2021) foi utilizado três diferentes métodos de separação, filtração por diluição, separação centrífuga e sedimentação térmica, para quantificar a concentração de cromo, alumínio e álcalis da região de clarificação. Com isso, os autores analisaram qual seria o mais eficiente, em que resultasse em uma solução com menor teor de concentração. Feito isso, foi analisado ainda a velocidade de sedimentação das partículas submetidas a diferentes temperaturas, com o intuito de selecionar a melhor temperatura de trabalho.

Para fazer a análise por sedimentação térmica, o fluido foi colocado em uma proveta de 1000 ml e submetido a diferentes temperaturas em um forno de secagem, sendo elas 70°C, 90°C, 110°C, 130°C e 150°C. De 30 em 30 minutos foram analisados os teores dos componentes propostos e a altura do sedimento.

Um dos resultados obtidos foi o comportamento da sedimentação em função da temperatura. Com o aumento da temperatura, houve um aumento na velocidade de sedimentação, permitindo que o processo fosse concluído em 90 minutos a 150°C. Portanto, a sedimentação térmica demonstrou ser um método favorável para a separação sólido-líquido em sistemas de alta viscosidade e alta densidade.

Outra análise feita foi a variação da viscosidade da pasta com o aumento da temperatura. A influência da temperatura na mesma foi obviamente observada. Foi confirmado ainda que a viscosidade da pasta foi inversamente proporcional a velocidade de sedimentação, sendo consistente com Stokes. Na temperatura máxima de 150°C, a velocidade de sedimentação atingiu seu valor máximo e a viscosidade o mínimo de 2,5 Pa.s.

Para os autores, entre as três técnicas avaliadas, a que trouxe um menor teor de cromo na região de compressão e conseqüente menor número de lavagens para atingir o padrão de emissão mais rapidamente foi a sedimentação térmica. Além disso, foi a técnica com menor tempo de separação.

Em Alade *et al.* (2023) o objetivo do estudo foi investigar a segregação da barita do

fluido de perfuração com fluido termoquímico incorporado, utilizando a técnica fluidodinâmica computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics - CFD*). Sendo guiados pelas características reológicas dos fluidos a base de água (*WBM*) e óleo (*OBM*). Além disso, foi feita a análise do efeito da temperatura na reologia do fluido.

O primeiro resultado obtido foi a relação da viscosidade aparente com a temperatura de ambos os fluidos, *WBM* e *OBM*. Percebe-se que para o fluido *OBM*, a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da temperatura, assim como ocorreu para o *WBM* entre 25 e 50°C. Porém entre 50°C e 90°C ocorreu um aumento da mesma, podendo ser explicado pela diminuição da estabilidade de tal fluido para temperaturas mais elevadas.

Além disso, foi obtido o comportamento reológico influenciado pelo aumento da temperatura. Pôde se perceber que para o fluido *OBM*, ocorre uma diminuição da tensão de cisalhamento com o aumento da temperatura e da taxa de cisalhamento. Sendo explicado pelo comportamento pseudoplástico do fluido. Diferentemente para o fluido *WBM*, que se comportou de formas diferentes entre duas faixas de temperatura. Entre 25 e 50°C, ocorreu uma diminuição da tensão de cisalhamento com o aumento da temperatura e da taxa de cisalhamento. Mas entre 70 e 90°C, ocorreu o aumento da tensão de cisalhamento nas mesmas condições. Sendo possivelmente explicado pela evaporação da água a elevadas temperaturas.

Uma análise importante feita no estudo foi da velocidade de sedimentação ( $V_{STH}$ ). De modo geral, o  $V_{STH}$  aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, pois para fluidos não-newtonianos, ocorre a queda da viscosidade aparente, afinando o fluido. Para o *OBM*, o  $V_{STH}$  aumentou com o aumento da temperatura (25-120°C), indicando um maior potencial de flacidez da barita. Diferentemente para o *WBM*, em que o  $V_{STH}$  diminuiu com o aumento da temperatura, podendo ser explicado pelo comportamento da viscosidade, indicando ainda um menor potencial de flacidez da barita. Comparando o  $V_{STH}$  dos dois fluidos, a baixas temperaturas (25-50°C) o *OBM* tem menor velocidade de sedimentação que o *WBM*. Porém em temperaturas mais elevadas (70-120°C), é visto o contrário.

Sendo assim, percebe-se que a viscosidade do fluido tem grande influência na segregação da barita. Ou seja, a velocidade de sedimentação foi afetada pela mudança das propriedades reológicas do fluido.

Em Oliveira *et al.* (2023) o objetivo do estudo foi avaliar os efeitos térmicos na sedimentação da calcita em uma solução de 0,2% de goma xantana em água. O aquecimento foi feito através de uma serpentina em torno da proveta, chegando em aproximadamente 65°C. Os autores concluíram que com o aumento temperatura ocorreu um aumento significativo na

velocidade de sedimentação e no grau de compactação do sedimento. Podendo ser explicado pela diminuição da viscosidade da solução presente, apesar de suas propriedades reológicas se manterem.

Neste capítulo foram apresentadas as publicações mais relevantes relacionadas ao estudo do fenômeno da sedimentação, o fenômeno da sedimentação utilizando a técnica de atenuação de raios-gama e o fenômeno da sedimentação submetida a altas temperaturas.

## CAPÍTULO 3

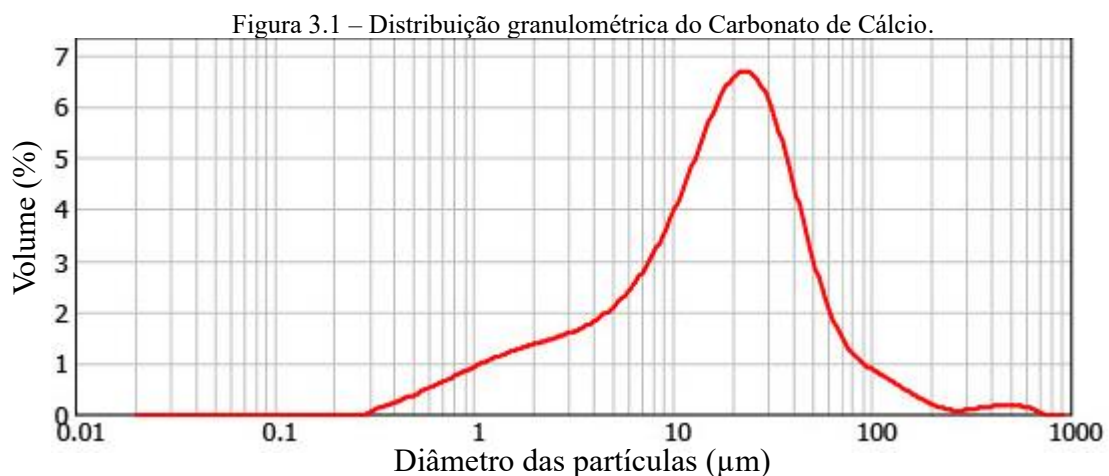
### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado os materiais necessários para a realização dos experimentos, e com isso a metodologia adotada para cada teste em específico. Além disso, será explicada as razões e justificativas por trás das escolhas feitas em relação aos métodos e materiais, visando alcançar os objetivos propostos neste estudo.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Sólido

Em todos os testes o sólido utilizado foi o carbonato de cálcio, sua granulometria foi obtida por difração a laser no analisador de partículas *Malvern Mastersizer 2000 Hydro 2000MU*. A Figura 3.1 apresenta a distribuição volumétrica do diâmetro de partículas do carbonato de cálcio e na Tabela 3.1 se encontra os diâmetros característicos das distribuições.



Fonte: *Mastersizer 2000*, 2024.

Tabela 3.1 – Diâmetros característicos do Carbonato de Cálcio.

	Diâmetro Característico (µm)
D <sub>3,2</sub> - Sauter	5,80
D <sub>0,1</sub>	2,28
D <sub>0,5</sub>	17,48
D <sub>0,9</sub>	52,79

Fonte: Elaborado pela autora.

A densidade do sólido foi obtida por picnometria a gás Hélio, no equipamento *micromeritics AccuPyc 1330*, resultando no valor de  $2,78 \pm 0,0042 \text{ g/cm}^3$ . Este sólido foi escolhido por ser um componente versátil e eficaz na formulação de fluidos de perfuração, desempenhando um papel fundamental no adensamento do fluido, estabilização de formações e controle de custos, ao mesmo tempo em que oferece benefícios adicionais em termos de compatibilidade ambiental (SANTOS, 2018).

O carbonato de cálcio foi adquirido pela empresa Sinergia Científica em quatro sacos contendo 25 kg do produto. A especificação granulométrica escolhida foi de *mesh 325*, indicando um tamanho de partícula específico que atende às necessidades do estudo proposto.

Há uma diferença na concentração de sólidos na formulação das suspensões que varia de acordo com o tipo de teste realizado. No teste de análise de hipóteses, uma solução com 15% v/v de carbonato de cálcio em água destilada foi preparada, visando gerar um sedimento com altura suficiente para a coleta e análise de dados no cilindro de teste. Para os testes dinâmicos e de compactação, foi preparada uma solução com 13% v/v de carbonato de cálcio em água destilada, uma concentração que resultou em uma altura de sedimento adequada no reservatório de testes para a obtenção de dados. Já para o teste com gradiente térmico, uma solução com 25% v/v de carbonato de cálcio em água destilada foi elaborada. Este monitoramento, focado na formação do sedimento, exigia uma altura de leito maior, justificando a escolha de uma concentração mais elevada de sólidos. Essa variação na concentração dos sólidos é reflexo da necessidade de diferentes condições para cada tipo de teste, com o objetivo de alcançar os resultados específicos de cada experimento.

A concentração de carbonato de cálcio na formulação de fluidos de perfuração pode variar cerca de 5% a 30% em concentração na formulação do fluido, dependendo de vários fatores, incluindo as especificidades do poço a ser perfurado, os objetivos da operação de perfuração, as propriedades desejadas do fluido e as condições geológicas do local (SKALLE, 2011).

A concentração específica de carbonato de cálcio é determinada através de cálculos de engenharia de fluidos de perfuração. A quantidade de carbonato de cálcio necessária para alcançar a densidade desejada do fluido é então calculada com base em sua densidade específica e na relação peso/volume (FATTAH *et al.*, 2016).

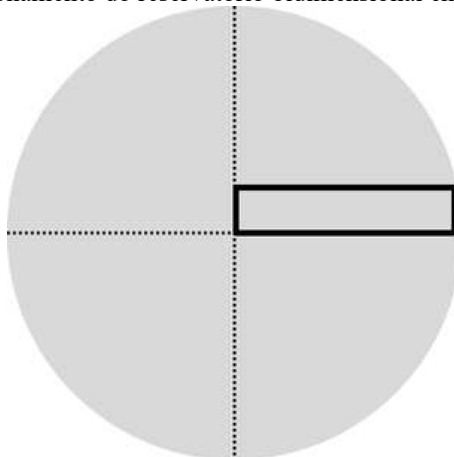


### 3.1.2 Unidade experimental

Foi necessário construir um equipamento que permitisse submeter a área de sedimentação a um gradiente térmico, uma vez que não havia nenhum dispositivo disponível para tal estudo. Além do gradiente térmico, era essencial aplicar a técnica de atenuação de raios gama. Portanto, a unidade experimental precisava possibilitar a aplicação de tal técnica.

Geralmente, ao estudar o fenômeno de sedimentação, utiliza-se vidraria de testes em formato cilíndrico, devido à semelhança com os poços de perfuração, conforme Moreira (2014), Fagundes (2015) e Santos (2018). No entanto, em um projeto piloto, algumas modificações se tornam necessárias para viabilizar o estudo, uma vez que a aplicação de um gradiente térmico em um cilindro de testes seria mais complexa e exigiria um investimento elevado. Assim, a ideia foi proposta conforme ilustrado na Figura 3.2, na qual as paredes do poço são submetidas ao gradiente térmico.

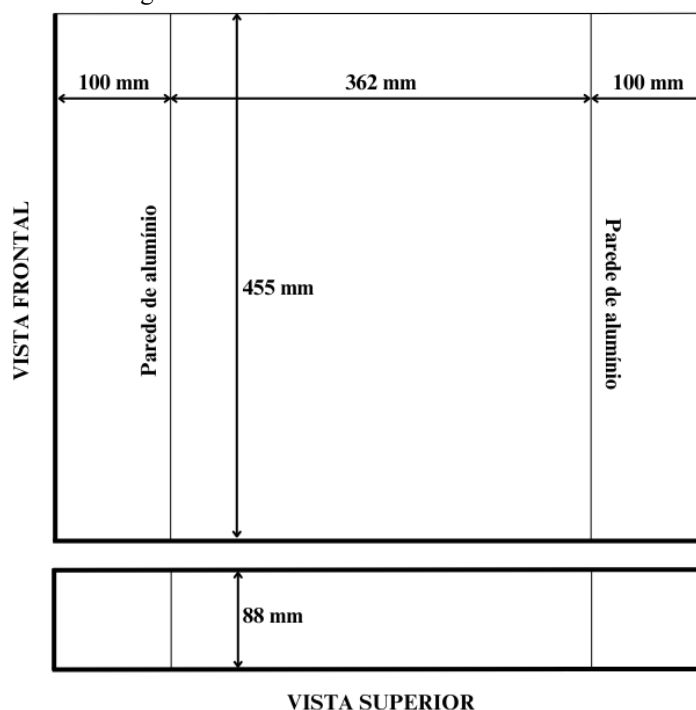
Figura 3.2 – Posicionamento do reservatório bidimensional em um poço cilíndrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, foi elaborada a estrutura do reservatório juntamente com as dimensões de cada compartimento, conforme ilustrado na Figura 3.3. Optou-se pelo uso de vidro na confecção do tanque de testes devido à sua aplicação prévia na *TARG* e a por facilitar o acompanhamento visual do processo de sedimentação. As dimensões foram determinadas com base em algumas considerações. A largura de 88 mm foi escolhida para viabilizar o acesso manual ao reservatório, facilitando a limpeza quando necessário ou para qualquer outra operação que demande o uso das mãos. O comprimento de 100 mm dos compartimentos em ambos os lados se destina à adição de óleo térmico e, por conseguinte, das resistências para seu aquecimento.

Figura 3.3 – Dimensões do reservatório de testes.



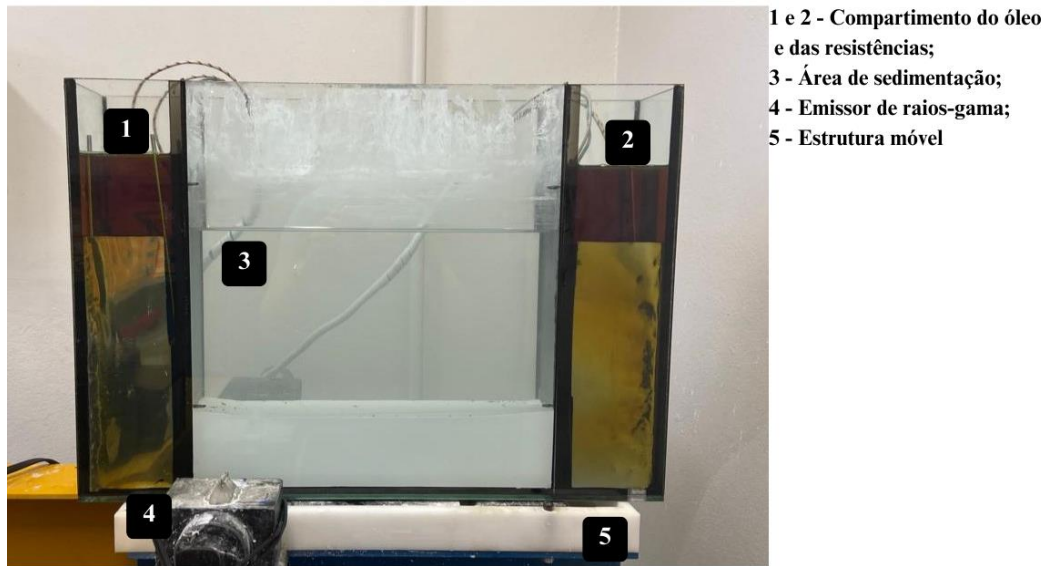
Fonte: Elaborado pela autora.

Após enfrentar problemas com o aquecimento rápido do óleo e a fragilidade do vidro não temperado, foram implementadas medidas corretivas. O aquecimento abrupto do óleo causou uma mudança repentina de temperatura no vidro, que não suportou a variação e acabou trincando. Para solucionar essa questão e garantir maior segurança e durabilidade, foi instalada uma placa de alumínio para proteção das paredes da área onde o óleo é manipulado. Além disso, em todos os testes subsequentes, o aquecimento foi conduzido de forma gradual e ao longo de um período prolongado.

A área de sedimentação, localizada onde o comprimento atinge 362 mm e a altura 455 mm, foi dimensionada de modo a proporcionar uma distância adequada entre as paredes aquecidas, permitindo o estudo da suspensão sujeita a um gradiente térmico. Além disso, foi considerada uma altura suficiente que possibilitasse a observação e o monitoramento do fenômeno da sedimentação ao longo do tempo.

Para uma melhor condução de calor advinda do óleo térmico até a área de sedimentação, foram colocadas duas placas de alumínio de 2 mm de espessura, uma em cada lado, separando as regiões entre óleo e suspensão, podendo ser visto na Figura 3.4, onde é apresentado o reservatório real. O alumínio foi escolhido por ser um bom condutor de calor, apresentando coeficiente de condutividade térmico de  $230 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Já o vidro se comporta como um isolante térmico, possuindo um coeficiente de  $0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Por essa razão, foi mais coerente colocar um material condutor de calor nesse local, pois o intuito é ocorrer a transferência térmica.

Figura 3.4 – Reservatório de testes.



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram conduzidos diversos testes para detectar potenciais vazamentos entre as diferentes áreas do reservatório. Caso algum vazamento fosse identificado, imediatamente era devidamente vedado e o teste era repetido até que nenhuma transferência de líquido fosse registrada. Todo esse processo foi crucial para garantir a segurança e a eficiência do sistema.

Com o reservatório pronto, o desenvolvimento do aparato seguiu para a montagem do equipamento necessário para aquecer o óleo e monitorar as temperaturas operacionais. Para isso, foi adquirido o óleo da marca *Vector* fornecido pela empresa *Quimidrau*, e para o aquecimento do óleo, foram utilizadas duas resistências de 500 W de potência, posicionando uma em cada lado do reservatório.

Para a montagem da caixa de controle térmico, optou-se pelo relé de estado sólido SSR de 25 A. Sua principal função consistiu em regular a alimentação para a resistência, permitindo o acionamento e desligamento conforme necessário. Além disso, foi incorporado o controlador PID, responsável por estabelecer o ponto de ajuste da temperatura, sua precisão é assegurada por meio do cálculo proporcional integral derivativo.

O processo ocorreu da seguinte maneira: foi determinada a temperatura desejada no controlador PID, esse sinal foi emitido para o relé de estado sólido, que energizou a resistência até que a temperatura alvo fosse alcançada. Uma vez atingido o valor estipulado, o relé recebia um sinal para desligar a resistência. Este ciclo se repetiu continuamente durante todo o funcionamento do equipamento.

Para monitorar a temperatura do óleo, foram implementados quatro sensores de temperatura PT-100, dois em cada lado do reservatório, um próximo à superfície do óleo e outro

mais centralizado.

O contator Weg de 18 A é um dispositivo eletromecânico essencial para garantir a segurança em situações de emergência. Ele atua como uma salvaguarda adicional, prontamente desativando o sistema caso a temperatura exceda um limite predefinido. É importante ressaltar que, na estrutura do sistema, já estão presentes os controladores PID, responsáveis pelo desarme automático em condições adversas. Portanto, o contator Weg entra em ação somente como uma medida de contingência, acionando-se apenas se os controladores não responderem conforme esperado.

Com o equipamento operando perfeitamente, desde o reservatório sem problemas estruturais até o sistema eletrônico para aquecimento do óleo térmico, os testes puderam prosseguir conforme serão apresentados adiante.

### **3.1.3 Ebulidor**

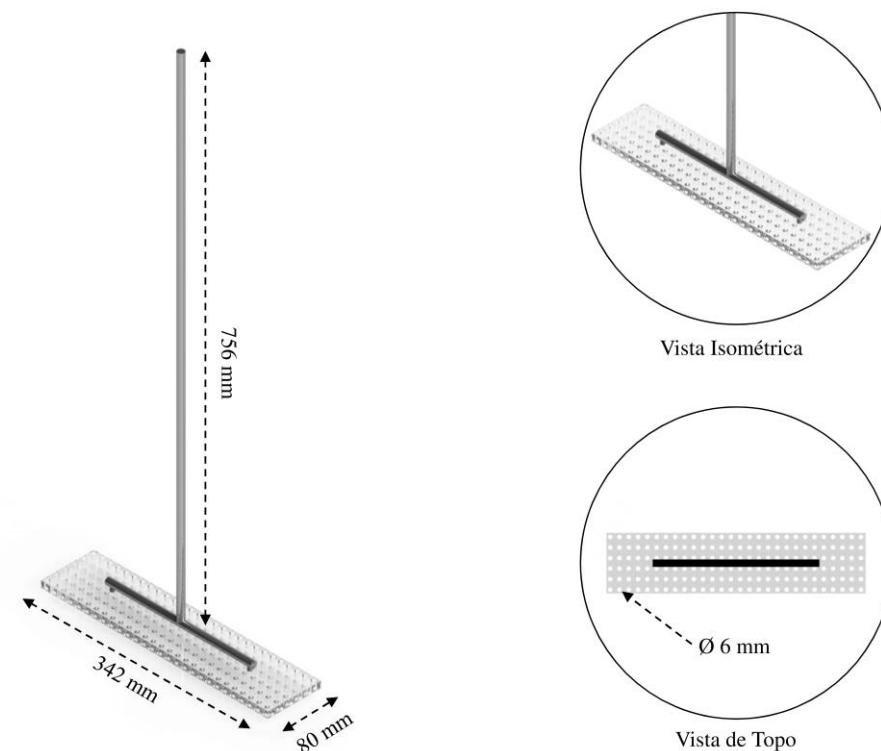
O ebulidor desempenhou um papel fundamental em diversos experimentos, fornecendo o aquecimento necessário às suspensões. Ele foi empregado tanto no teste da câmara térmica quanto no teste dinâmico e no teste de compactação. Ele foi posicionado dentro da suspensão na região de sedimentação, como pode ser visto na Figura 3.4, identificado como o número 3. Embora todo o equipamento tenha sido projetado para aquecer as suspensões, o tempo necessário para atingir as temperaturas desejadas era significativo. Nesse contexto, o ebulidor atuou como uma ferramenta crucial, acelerando o processo de aquecimento e otimizando os procedimentos de teste.

### **3.1.4 Homogeneizador**

Para homogeneização das suspensões, foi construído um agitador axial com geometria retangular, conforme Figura 3.5, embasado no agitador axial cilíndrico desenvolvido por Ruiz (2000). Seu dimensionamento foi baseado do reservatório de testes concebido para o desenvolvimento dos testes propostos para este trabalho.

Sendo assim, no processo de homogeneização, o agitador foi movimentado axialmente desde a base do reservatório até próximo da superfície da suspensão, não ultrapassando esse ponto para não ocorrer a entrada de ar e consequentemente, a não formação de bolhas.

Figura 3.5 – Imagem representativa do agitador axial retangular.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.5 Câmera térmica

Para fazer o monitoramento térmico foi utilizada uma câmera térmica da marca FLIR, modelo E8xt Wifi, que foi adquirida através da empresa Vórtex equipamentos.

As câmeras térmicas produzidas pela FLIR detectam a energia infravermelha emitida por objetos, permitindo medir a temperatura de qualquer região sem necessidade do toque físico. São ferramentas essenciais para diagnóstico de problemas elétricos, mecânicos e estruturais, por possuir detector de infravermelho de 76.800 pixels (320 x 240), podendo ler temperaturas de -20°C até 250°. (Manual, 2024)

### 3.2 Metodologia dos testes experimentais

Neste trabalho foram conduzidos testes distintos para a realização de análises específicas. O primeiro teste foi para analisar a precisão dos valores obtidos pela câmera térmica e determinar a melhor posição para a captura das imagens. O próximo teste foi para definir se seria necessário produzir novas suspensões para as réplicas dos testes, utilizando o teste de hipótese *t de Student*. Em seguida, foi realizado um teste dinâmico com aquecimento, visando investigar a influência da temperatura no tempo de sedimentação. Outro experimento foi o teste de compactação, em que foi possível analisar a influência da temperatura no sedimento

formado, verificando se as suspensões quentes resultavam em sedimentos mais ou menos compactados. Finalmente, foi realizado o teste com gradiente térmico, com o propósito de analisar o efeito da condução de calor na sedimentação e, conseqüentemente, no sedimento resultante.

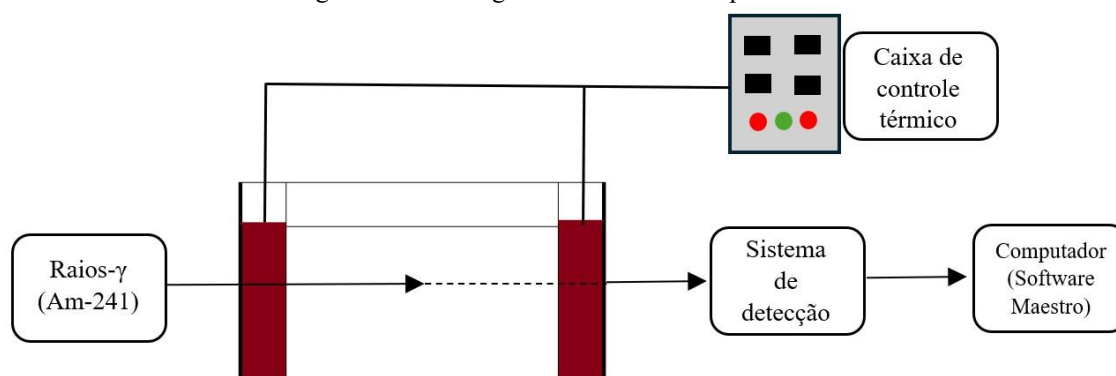
### 3.2.1 Unidade experimental da aplicação de radioisótopos

A aplicação de técnicas de atenuação de raios- $\gamma$  representa uma abordagem valiosa na obtenção indireta da concentração volumétrica de partículas em um fluido durante testes de sedimentação em batelada, preservando a integridade da configuração e estabilidade do meio.

Os ensaios para determinação da concentração volumétrica de sólidos em fluidos quentes, foram conduzidos na unidade experimental de atenuação de radioisótopos localizada no Laboratório de Separação Sólido-Líquido (LABSEP) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Para a execução eficaz deste trabalho, adotou-se um sistema de detecção de radiação, integrado a uma estrutura metálica. A referida estrutura metálica conta com uma plataforma móvel que facilita o ajuste preciso da posição vertical ( $Z$ ) e horizontal ( $X$ ) do sistema de detecção de radiação, conforme Figura 3.6. Essa capacidade de ajuste possibilita o posicionamento do feixe horizontal de radiação em diferentes posições, viabilizando o monitoramento da concentração de sólidos desde a base até o topo e desde a extremidade esquerda até a direita do reservatório de testes.

Figura 3.6 – Fluxograma da estrutural experimental.



Fonte: Elaborado pela autora.

O conjunto de direcionamento/detecção é constituído por dois blocos de chumbo alinhados entre si. Ambos os blocos possuem arestas de 100 mm e apresentam um orifício central de aproximadamente 5 mm voltado para o recipiente de testes. O chumbo utilizado tem a finalidade de resguardar o operador contra a exposição à radiação. Em um desses blocos, se

encontra a fonte selada de raios- $\gamma$  ( $^{241}\text{Am}$ ). No outro bloco de chumbo, encontra-se acoplado o sistema de detecção da radiação, alinhado com o orifício do primeiro bloco. O módulo primário de detecção de radiação é constituído por um conjunto de cristais de iodeto de sódio ativados com tálio, os quais emitem luz ao absorver os fótons gama. Essa luz é transformada em energia e é recebida por um equipamento chamado *digibase*, que transforma essa energia em pulsos e os envia para um software chamado Maestro.

No software Maestro o valor ótimo de voltagem utilizado foi de 673 V, o ROI que determina a área de leitura da contagem de pulsos foi de 30 a 47 e o tempo de leitura de cada pulso foi de 20 s.

### 3.2.1.1 Radioisótopo amerício-241

O amerício-241 ( $\text{Am-241}$ ) é um radioisótopo com diversas aplicações na ciência e na indústria devido às suas propriedades radioativas. Uma das suas funções é ser fonte de raios gama, podendo ser aplicado na radiografia industrial, na medicina nuclear, na espectroscopia gama e em estudos científicos diversos. Eles são utilizados por sua capacidade de penetrar na matéria e fornecer informações detalhadas sobre a composição e a estrutura dos materiais, sendo particularmente úteis na análise de amostras em laboratórios de pesquisa (FREITAS, 1980).

Um dado crucial que justifica a utilização desse material para fins de pesquisa, é o seu tempo de meia-vida de aproximadamente 432 anos. Isso significa que, após esse período, metade da quantidade inicial de  $\text{Am-241}$  se decairá em outros isótopos por meio de emissões radioativas. Pelo seu tempo de meia-vida ser longo, permite a sua utilização em estudos sem grande necessidade de correções (AROUCA, 2007).

Outro fato importante é que os raios gama são radiações eletromagnéticas de alta energia e alta frequência. Eles não possuem massa nem carga elétrica e viajam a uma velocidade de luz no vácuo. A energia dos fótons de raios gama emitidos pelo  $\text{Am-241}$  varia, mas geralmente está na faixa de 60 keV (quiloelétron-volts), o que permite vários estudos relacionados a sedimentação, podendo atravessar suspensões sólido-líquido (MOREIRA, 2014).

### 3.2.1.2 Técnica de atenuação de raios- $\gamma$

De acordo com a equação de Lambert (Equação 3.1), para quantificar a intensidade de energia ( $E$ ) de um feixe monoenergético colimado de raios gama que atravessam um meio físico ( $I$ ), é necessário saber a intensidade de energia antes da passagem pelo meio físico ( $I_0$ ), o

coeficiente de atenuação mássico do meio ( $\sigma$ ), a densidade do meio ( $\rho$ ) e a espessura deste meio ( $y$ ).

$$I(E)=I_0\exp(-\sigma(E)\rho y) \quad (3.1)$$

No caso específico em que esse meio é uma suspensão sólido-líquido e o meio de referência é uma solução livre de sólidos, a equação de Lambert se reduz a Equação 3.2:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \beta\varepsilon_S \quad (3.2)$$

em que  $\varepsilon_S$  é a concentração volumétrica de sólidos e  $\beta$  um parâmetro obtido experimentalmente.

Porém, para se utilizar a equação reduzida é necessário fazer uma correção do termo de intensidade de energia inicial e final ( $I_0$  e  $I$ ) para contagem do número de pulsos ( $R_0$  e  $R$ ). Essa correção é feita pelo tempo de resolução do sistema ou tempo morto ( $\tau$ ). Esse é o intervalo de tempo necessário para que dois fótons consecutivos sejam detectados pelo sistema como eventos separados. Utilizando das Equações 3.3 e 3.4, corrigindo para contagem de pulsos, gerou-se a equação 3.5.

$$R = \frac{I}{I - \tau I} \quad (3.3)$$

$$R_0 = \frac{I_0}{I_0 - \tau I_0} \quad (3.4)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta\varepsilon_S \quad (3.5)$$

sendo  $R$  a contagem corrigida do número de pulsos que passam pela suspensão concentrada e  $R_0$  a contagem corrigida do número de pulsos que passam pelo líquido clarificado.

### 3.2.1.3 Tempo de resolução do sistema

Para a determinação do tempo de resolução do sistema se faz necessário possuir duas fontes radioativas com diferentes energias (GARDNER; ELY JR, 1967). Porém, quando não se tem as duas fontes, algum outro método se faz necessário, sendo este proposto alguns anos depois por Damasceno (1992). Para este segundo, apenas uma fonte radioativa é suficiente, os materiais essenciais para a aplicação do método são duas placas com diferentes espessuras, simulando as duas fontes propostas inicialmente.

Para a obtenção do valor de tempo morto, o desenvolvimento do experimento ocorreu da seguinte maneira. Foram adquiridos dois blocos de acrílico de tamanhos diferentes, sendo um chamado de bloco A e o outro de bloco B. De posse dos blocos, o experimento pôde ser iniciado. Primeiramente foi feita a leitura da contagem de pulsos sem nenhum material entre a



fonte e o detector, esse valor será chamado aqui de contagem base. Logo em seguida, foi feita a leitura apenas com o bloco A posicionado entre a fonte e o detector, esse valor fora subtraído da contagem base, resultando no valor de  $I_A$ . O mesmo procedimento ocorreu para o bloco B, resultando no valor de  $I_B$ . Para a obtenção do valor de  $I_{AB}$ , os dois blocos juntos foram colocados entre a fonte e o detector, o resultado fora subtraído da contagem base. Para a obtenção do valor de  $I_G$  selou-se a fonte com uma tampa de chumbo, pois ele é determinado através de uma fonte radioativa diferente do radioisótopo utilizado. De posse de todos os valores, os mesmos puderam ser aplicados na Equação 3.6 (GARDNER; ELY JR, 1967):

$$\tau = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_G}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (3.6)$$

A Tabela 3.2 apresenta os valores adquiridos experimentalmente para a obtenção do tempo morto.

Tabela 3.2 – Dados para o cálculo do tempo morto.

	Contagem de pulsos [s <sup>-1</sup> ]
$I_A$	884,3
$I_B$	1343,87
$I_{AB}$	1960,2
$I_G$	1,54

Fonte: Elaborado pela autora.

Substituindo os valores na Equação 3.6, obteve-se o valor de tempo morto de  $\tau = (2,12 \cdot 10^{-4} \pm 2,82 \cdot 10^{-5})$  s.

#### 3.2.1.4 Curva de calibração para determinação do parâmetro $\beta$

Para o estudo da sedimentação de suspensões através do conhecimento da concentração local de sólidos ao longo do tempo, é necessário estimar o parâmetro  $\beta$  presente na Equação 3.5. Este parâmetro é a taxa de variação da concentração de partículas com base nos valores corrigidos das contagens de pulsos. Pode ser descrito como a tangente dos valores plotados no eixo das abcissas em relação ao eixo das ordenadas.

Esse parâmetro varia conforme o tipo de vidraria utilizada. Portanto, para este trabalho, foi necessário determinar dois valores: um beta para o sistema suspensão com carbonato de cálcio na vidraria cilíndrica, utilizado no teste de hipótese; e um beta para o sistema suspensão com carbonato de cálcio na vidraria construída para os testes bidimensionais, utilizado para os demais experimentos de aplicação da *TARG*.

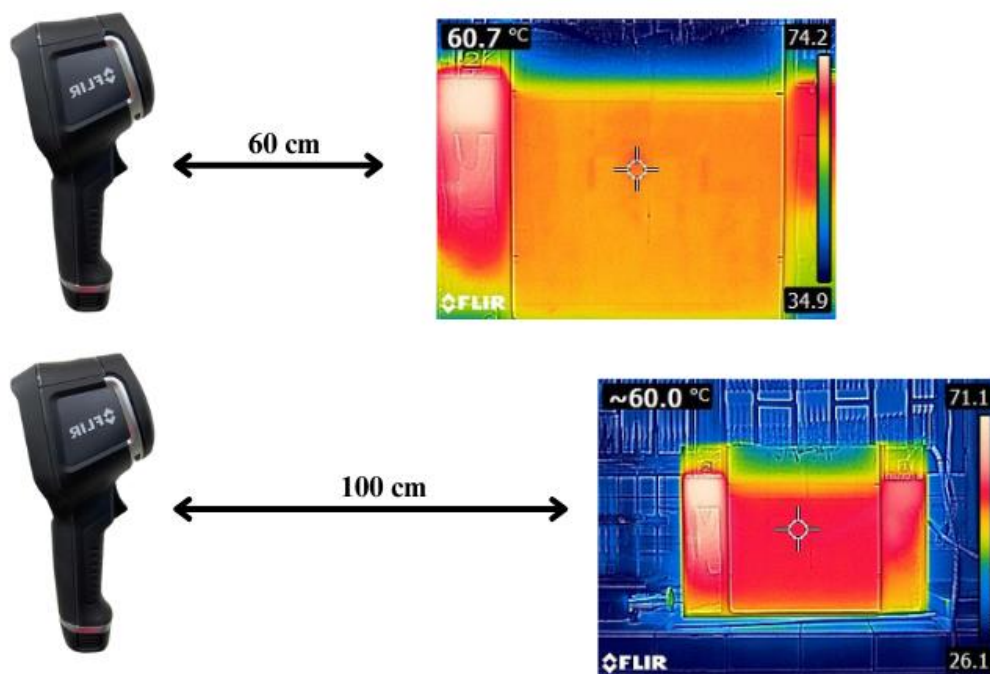
Sendo assim, para a primeira vidraria citada anteriormente, foram feitas leituras de concentração de sólidos em suspensões com diferentes concentrações, sendo elas 0%, 2%, 7%,

12%, 17% e 25%, e para a segunda vidraria 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18% e 21%. Posteriormente, utilizou-se da regressão linear para a determinação da equação da reta, determinando assim o parâmetro  $\beta$ . Quanto mais próximo o valor do coeficiente de determinação estiver de 1, menos os resultados serão afetados por erros aleatórios.

### 3.2.2 Teste com a câmera térmica

Para analisar o desempenho das leituras obtidas pela câmera e possibilitar a comparação dos valores, foi realizado um teste utilizando um termômetro da marca *Incoterm*, com uma precisão de variação de 0,1°C. O procedimento consistiu em aquecer o reservatório até as temperaturas desejadas de 40°C e 60°C, realizando leituras simultâneas com ambos os equipamentos, câmera e termômetro. Além disso, como pode ser visto na Figura 3.7, foram conduzidas leituras com a câmera a diferentes distâncias do reservatório de teste, mais próxima, com aproximadamente 60 cm de distância, e mais distante, com aproximadamente 100 cm de distância, explorando diferentes posições para avaliar possíveis interferências nos valores medidos.

Figura 3.7 – Leitura com a câmera térmica a 60 e 100 cm do reservatório de testes.



Fonte: Elaborado pela autora.

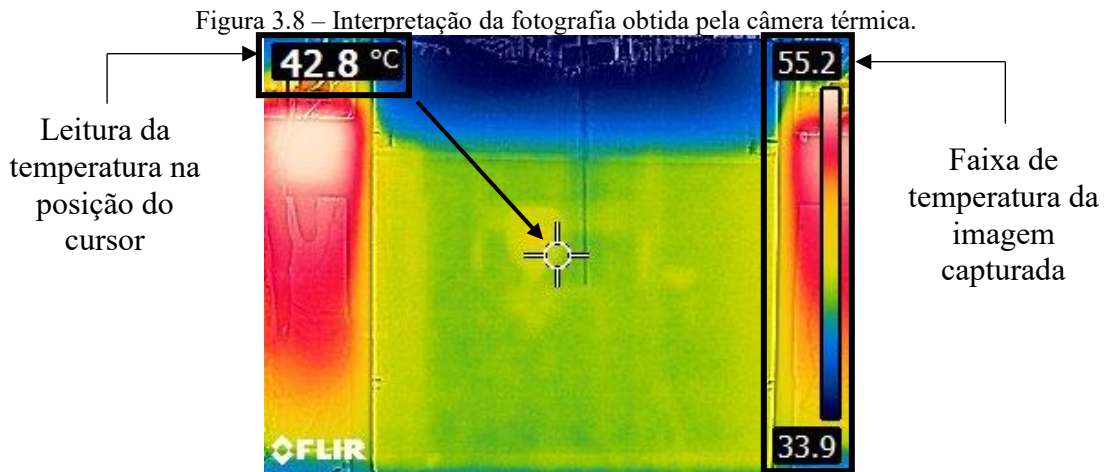
Para uma análise mais detalhada dos resultados, foi calculado o erro absoluto e o erro relativo utilizando as Equações 3.7 e 3.8, respectivamente. Este processo permite identificar e quantificar qualquer discrepância entre as leituras da câmera e do termômetro de referência, proporcionando uma avaliação abrangente da precisão do sistema de medição.

$$E_A = |A - a| \quad (3.7)$$

$$E_R = \frac{E_A}{A} \cdot 100 \quad (3.8)$$

sendo  $E_A$  o erro absoluto, ' $A$ ' o valor exato, ' $a$ ' o valor aproximado e  $E_R$  o erro relativo. Considerando o valor exato o lido pelo termômetro *Incoterm*.

A Figura 3.8 possibilita o entendimento de como interpretar a foto obtida pela câmera. O valor de temperatura exibido no canto superior esquerdo da figura corresponde à temperatura no local onde o cursor está posicionado. O lado direito da figura se remete a faixa de temperatura de toda a imagem capturada.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.3 Teste de hipótese

O objetivo com esse experimento foi definir se haveria a necessidade de produzir novas suspensões a cada novo teste, se tratando de suspensões simples como as feitas em todos os experimentos nesse trabalho, composta basicamente por água e carbonato de cálcio. Para fim de fazer uma análise comparativa das médias, dois testes foram realizados, uma triplicata com três suspensões produzidas do início, e uma triplicata utilizando a mesma suspensão, sendo que todo o procedimento para o teste foi feito de forma idêntica. Foi produzido 0,5 L de uma suspensão de água destilada com 15% v/v de carbonato de cálcio e adicionada em um cilindro de testes. Para as leituras utilizando a *TARG*, foi definida uma posição bem ao centro do cilindro e diferentes posições em Z, sendo elas 12,5; 12; 11,5; 11; 10; 9; 8; 7 e 6 cm.

Para a análise comparativa entre as duas médias foi utilizado o teste de hipótese *t de Student*. Este teste consiste basicamente em rejeitar ou não uma hipótese nula baseada em dados estatísticos, e uma das premissas para se utilizar deste teste de hipótese é o de não se conhecer

a variância populacional, usando assim a variância amostral. Dentro do teste  $t$  existem algumas alternativas de testes, aqui foi utilizado o teste de amostra dupla presumindo que os dados provêm de amostras com diferentes variações. O teste vai dizer se há a possibilidade de as duas amostras serem oriundas de populações com mesmo valor de média. A Equação 3.9 é utilizada para estabelecer o valor estatístico  $t'$ .

$$t' = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \Delta_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{m} + \frac{S_2^2}{n}}} \quad (3.9)$$

sendo  $\bar{x}$  a média da primeira amostra,  $\bar{y}$  a média da segunda amostra,  $\Delta_0$  baseado na hipótese nula,  $S_1^2$  a variância da primeira amostra,  $S_2^2$  a variância da segunda amostra, e  $m$  e  $n$  o tamanho de cada amostra.

Além disso, se faz necessário calcular os graus de liberdade para a obtenção do valor crítico de  $t$ , utilizando a tabela  $t$ , para isso, segue Equação 3.10.

$$GL = \frac{\left(\frac{S_1^2}{m} + \frac{S_2^2}{n}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{m}\right)^2}{m-1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n}\right)^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

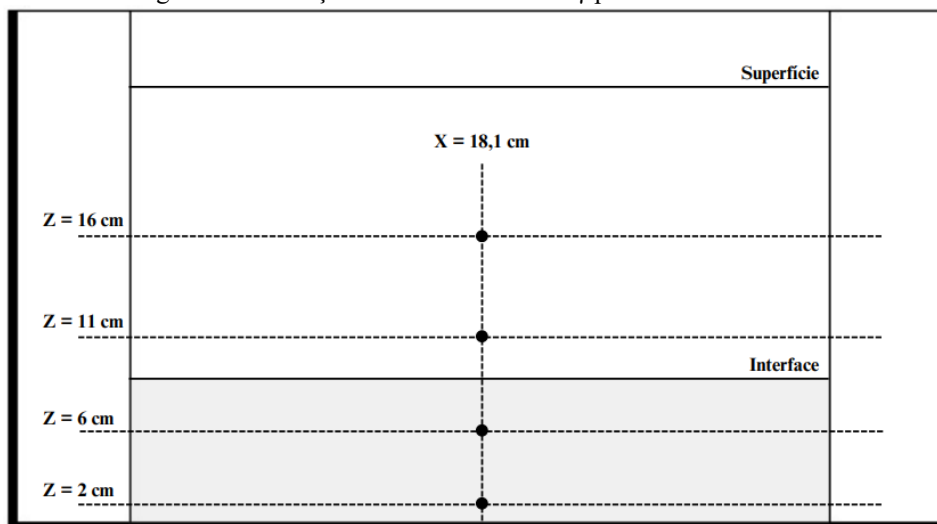
Sendo assim, foi aplicado o teste de hipótese  $t$  de *Student* para comparar duas amostras independentes, considerando uma significância de  $\alpha = 5\%$ . Para o teste foi considerado que as médias seriam iguais como hipótese nula  $H_0$ , e que seriam diferentes como hipótese alternativa  $H_1$ . Primeiramente foram calculados os valores de graus de liberdade, utilizando a Equação 3.10, para que fosse possível encontrar os valores de  $t$ -crítico bicaudal na tabela, para cada posição do reservatório. Feito isso, foi calculado o valor estatístico  $t'$  utilizando a Equação 3.9. E para que a hipótese nula fosse rejeitada ou não, o valor estatístico  $t'$  teria que estar fora da região crítica, ou seja, estar entre os valores negativo e positivo de cada valor de  $t$ -crítico obtido.

### 3.2.4 Teste dinâmico

O propósito deste experimento consistiu na análise da influência da temperatura na velocidade de sedimentação. Para atingir esse objetivo, a leitura foi realizada durante o processo dinâmico de sedimentação, ou seja, com a mesma acontecendo, e abordada em distintas temperaturas para fins de comparação, 25°C, 40°C e 60°C, onde a suspensão foi aquecida e o calor das duas paredes do reservatório foram utilizadas como mantenedoras da temperatura. Inicialmente, uma suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 13% v/v foi

preparada, totalizando 10 L, e adicionada ao reservatório de testes. Adicionalmente, a coleta de dados para a contagem de pulsos foi efetuada em diferentes posições no reservatório, fixando-se ao centro do tanque de testes, em  $X = 18,1$  cm e variando em  $Z = 16$  cm,  $Z = 11$  cm,  $Z = 6$  cm e  $Z = 2$  cm, conforme ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Posição do emissor de raios- $\gamma$  para o teste dinâmico.



Fonte: Elaborado pela autora.

A primeira condição trabalhada foi a temperatura ambiente, aproximadamente 25°C. O emissor de raios gama foi inicialmente colocado na posição  $X = 18,1$  cm e  $Z = 16$  cm, e a solução foi cuidadosamente homogeneizada até atingir completa uniformidade. Posteriormente, o homogeneizador foi removido gradualmente, e em seguida, a coleta da contagem de pulsos foi iniciada. A leitura dessa posição específica foi finalizada com a passagem da interface descendente.

Em seguida, o emissor foi reposicionado para a próxima coordenada em  $Z = 11$  cm, repetindo-se o método mencionado anteriormente. Para as posições em  $Z = 6$  cm e  $Z = 2$  cm, a principal variável foi o tempo de leitura, uma vez que a passagem da interface não ocorreria. Dessa forma, aguardou-se até que o sedimento estabilizasse antes de encerrar a coleta da contagem, esse tempo foi de aproximadamente duas horas.

A segunda condição abordada foi a temperatura de 40°C. Para atingir esse valor, o óleo fora aquecido a 60°C e foi necessário a ajuda de um ebulidor para otimizar o processo de aquecimento da suspensão. Nesse contexto, o papel principal do óleo foi manter a suspensão em uma temperatura estabilizada. O controle térmico foi integralmente monitorado por meio de uma câmera térmica. Dessa forma, a leitura da câmera permitiu verificar se a suspensão alcançava a temperatura desejada.

Após essa verificação, o processo seguiu conforme mencionado anteriormente, o emissor foi posicionado, a solução completamente homogeneizada e, imediatamente, iniciou-se a coleta dos resultados. Cada mudança na posição do emissor exigia um ajuste na temperatura da solução, devido à inevitável perda de calor para o ambiente, uma vez que o sistema não era completamente isolado. Portanto, a cada início de teste, a temperatura era ajustada para o valor desejado de leitura.

A terceira condição investigada envolveu a temperatura de 60°C, com o óleo sendo aquecido até cerca de 80°C. O procedimento aconteceu de maneira semelhante aos demais testes, o emissor foi posicionado, a solução foi completamente homogeneizada e a coleta da contagem de pulsos foi iniciada imediatamente. Neste caso, observou-se uma maior perda de calor, decorrente da significativa diferença de temperatura com o ambiente circundante. Assim como nas situações anteriores, o ajuste da temperatura foi realizado da mesma forma.

É relevante ressaltar que todos os testes foram conduzidos em triplicata, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

### **3.2.5 Teste de compactação**

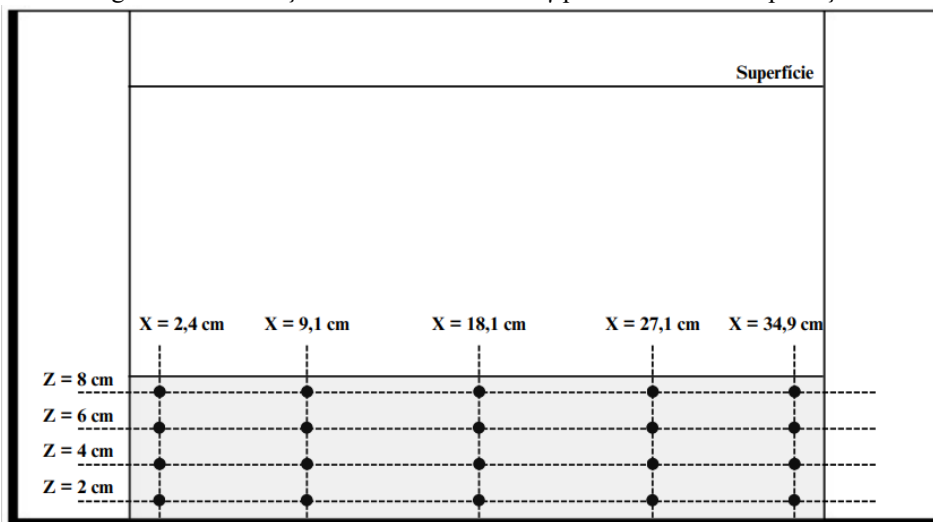
O objetivo com este experimento foi analisar o sedimento formado de suspensões submetidas a diferentes temperaturas. Para atingir esse objetivo, a leitura foi feita após a estabilização do sedimento e abordada em distintas temperaturas para fins de comparação, aquecendo primeiramente as suspensões e utilizando do aquecimento das duas paredes do reservatório como fonte para manutenção da temperatura. Inicialmente, uma suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 13% v/v foi preparada, totalizando 10 L, e adicionada ao reservatório de testes.

Foram realizadas 20 medições em diferentes pontos do reservatório, distribuídas em variadas posições. As leituras na direção  $X$  ocorreram em cinco posições específicas: uma central, em  $X = 18,1$  cm, duas equidistantes do centro, em  $X = 9,1$  cm e  $X = 27,1$  cm, e duas próximas às paredes quentes, em  $X = 2,4$  cm e  $X = 34,9$  cm. Na direção  $Z$ , as medições foram feitas em quatro alturas:  $Z = 8$  cm,  $Z = 6$  cm,  $Z = 4$  cm e  $Z = 2$  cm.

A primeira condição trabalhada foi a temperatura ambiente, aproximadamente 25°C. Como a leitura foi apenas do sedimento formado, não houve a necessidade de posicionar o emissor antes da homogeneização da suspensão, sendo assim, foi feita a homogeneização, o homogeneizador foi removido de forma cuidadosa e logo aguardou-se a completa estabilização

do sedimento, em torno de três horas. Após a completa estabilização, todos os pontos foram lidos, conforme Figura 3.10.

Figura 3.10 – Posição do emissor de raios- $\gamma$  para o teste de compactação.



Fonte: Elaborado pela autora.

A segunda condição abordada foi a temperatura de 40°C. Para atingir esse valor, o óleo fora aquecido a 60°C e foi necessário a ajuda de um ebulidor para otimizar o processo de aquecimento da suspensão. Nesse contexto, o papel principal do óleo foi manter a solução em uma temperatura estabilizada. O controle térmico foi integralmente monitorado por meio de uma câmera térmica. Dessa forma, a leitura da câmera permitiu verificar se a suspensão alcançava a temperatura desejada, além disso, permitiu verificar a temperatura após estabilização do sedimento. O teste se desdobrou de forma muito similar ao anterior, quando a suspensão atingiu a temperatura, foi feita a homogeneização, o homogeneizador foi removido de forma cuidadosa e logo aguardou-se a completa estabilização do sedimento para a leitura dos pontos, em torno de duas horas e trinta minutos.

A terceira condição investigada envolveu a temperatura de 60°C, com o óleo sendo aquecido até cerca de 80°C. O procedimento aconteceu de maneira semelhante aos demais testes, quando a suspensão atingiu a temperatura, foi feita a homogeneização, o homogeneizador foi removido de forma cuidadosa e logo aguardou-se a completa estabilização do sedimento, em torno de duas horas. Após a estabilização do sedimento, os pontos foram lidos conforme Figura 3.10.

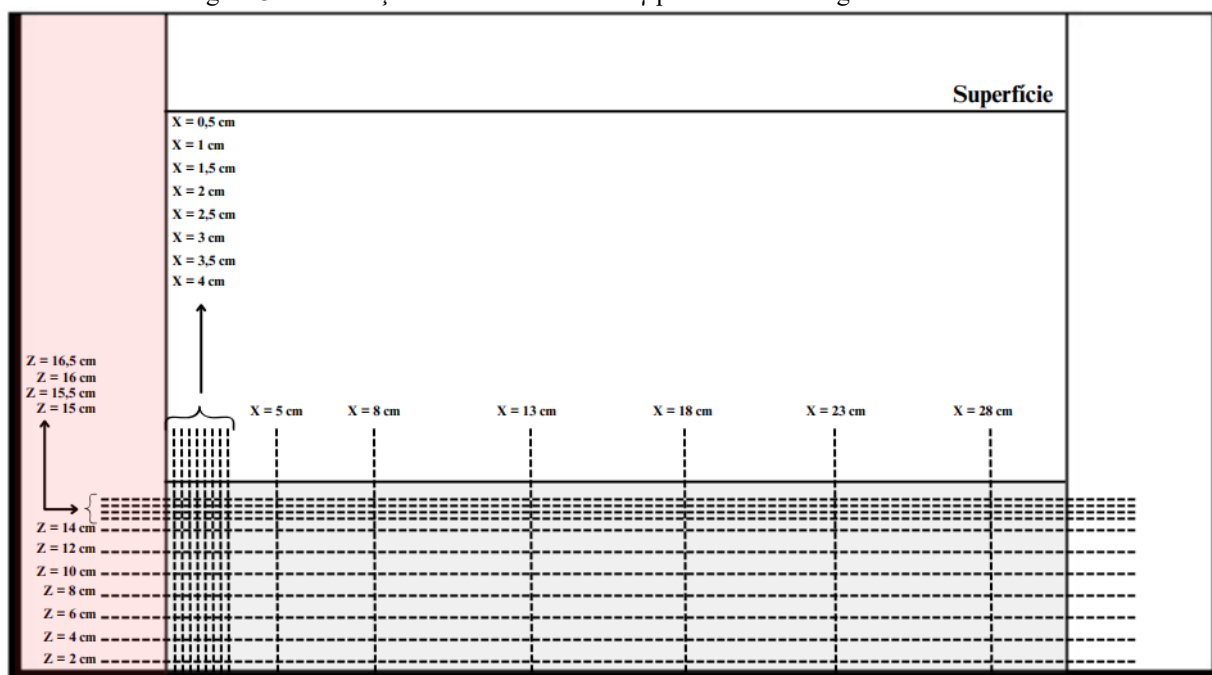
Os experimentos foram realizados ao longo de um período de 2 horas a 25°C, 4 horas a 40°C e 5 horas a 60°C, levando em consideração o tempo necessário para aquecer tanto o óleo quanto a suspensão.

Todos os testes foram conduzidos em triplicata, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

### 3.2.6 Teste com gradiente térmico

O propósito do teste foi analisar a influência do gradiente térmico na sedimentação e no sedimento formado. Nesse contexto, apenas uma parede do reservatório de testes fora aquecida, atingindo a temperatura de 70°C. As posições de leitura correspondem às interseções das linhas representadas pela Figura 3.11, totalizando 154 pontos.

Figura 3.11 – Posição do emissor de raios- $\gamma$  para o teste com gradiente térmico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realizar o experimento, 10 L de uma suspensão de carbonato de cálcio a 25% v/v em água destilada foram preparados. A suspensão foi homogeneizada até sua completa diluição, e o homogeneizador foi retirado cuidadosamente, permitindo que a sedimentação ocorresse com o acompanhamento exclusivo da condução de calor.

Mediante a Figura 3.11 é possível observar que há um maior número de pontos próximos à parede quente, o que pode ser explicado pela importância de compreender melhor o comportamento do sedimento nessa região. Além disso, durante a realização dos testes, observou-se que as leituras mais distantes da parede quente e próximas à parede fria apresentaram valores repetitivos. Portanto, concluiu-se que não era necessário um refinamento adicional nessa região.



Utilizando a câmera térmica, foram capturadas imagens para analisar o comportamento de condução térmica durante o processo de sedimentação. Após aproximadamente 3 horas, quando o sedimento se estabilizou, a leitura do sedimento foi realizada.

De modo similar aos testes anteriores, todos os testes foram conduzidos em triplicata, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo deste estudo. Primeiramente, serão expostos os resultados do teste com a câmera térmica, evidenciando sua utilidade para os experimentos em questão. Os resultados do teste de hipótese, do teste dinâmico, do teste de compactação e do teste com gradiente térmico serão apresentados com base nos testes experimentais. Sendo assim, serão destacadas as descobertas mais significativas, ressaltando suas contribuições para a área de estudo em questão.

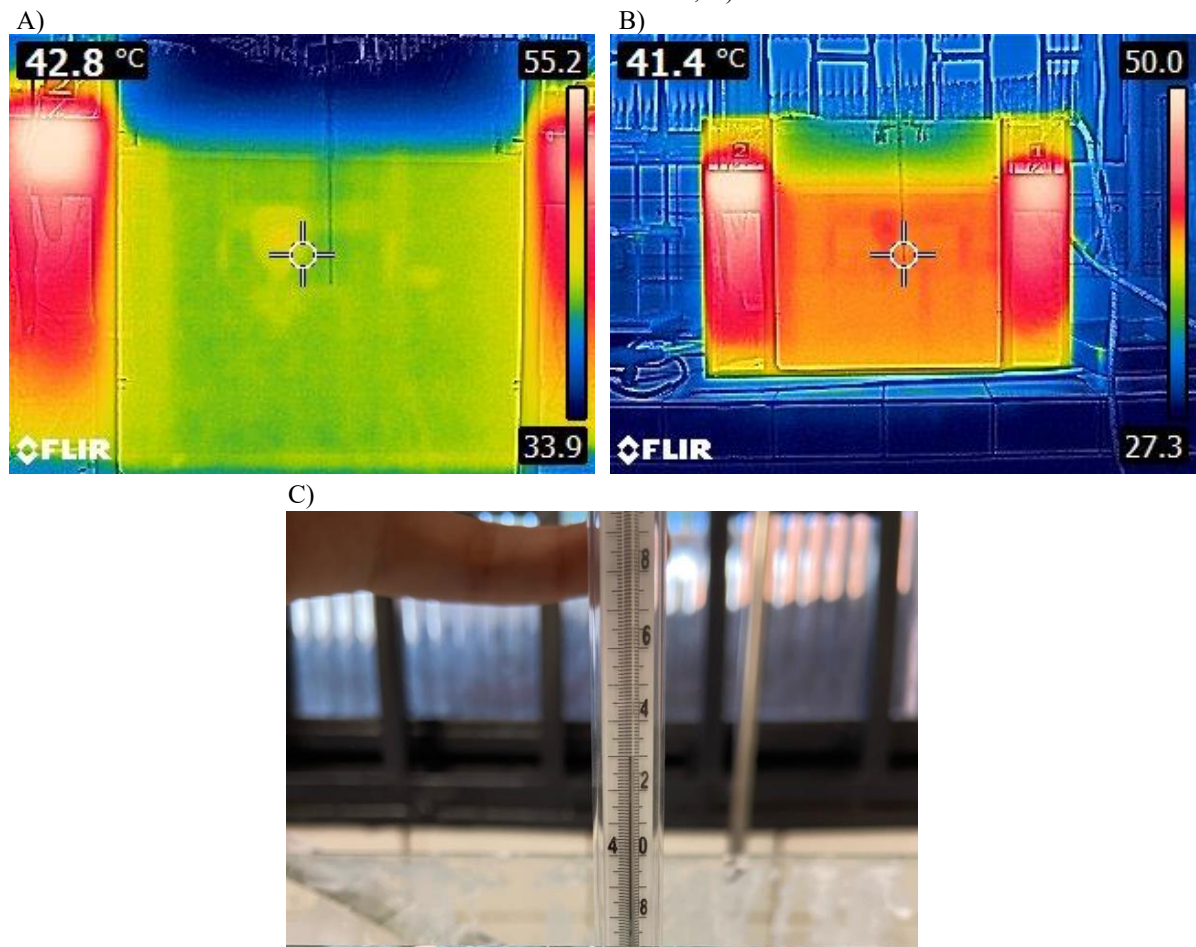
#### **4.1 Teste com a câmera térmica**

O objetivo deste teste é determinar a posição ideal da câmera térmica em relação ao reservatório de testes, bem como comparar as leituras de temperatura obtidas com os valores registrados por um termômetro. Isso permitirá avaliar o nível de precisão e erro das leituras da câmera térmica.

Para obter o primeiro resultado dos testes com a câmera, o fluido foi aquecido até aproximadamente 40°C com a ajuda de um ebulidor, enquanto o óleo atingiu cerca de 60°C, sendo esse monitoramento representado pela Figura 4.1. A análise da Figura 4.1A revelou que a temperatura da suspensão foi medida em 42,8°C, com o reservatório de testes ocupando todo o campo de visão da câmera, o que representa uma captura mais próxima do tanque de testes, com uma distância aproximada de 60 cm. Ao afastar a câmera do reservatório, até uma distância de 100 cm, a temperatura no mesmo ponto foi registrada como 41,4°C, como mostrado na Figura 4.1B, indicando um erro relativo de 3,27%. Este resultado esclarece que, para o teste em questão, a posição não influencia significativamente a precisão da câmera.

Concomitantemente, utilizando um termômetro Incoterm, conforme apresentado na Figura 4.1C, a temperatura foi medida como 43°C, resultando em um erro relativo de apenas 0,47% em comparação com o valor de 42,8°C na posição mais próxima ao reservatório (cerca de 60 cm). Esse resultado confere confiabilidade à medição da câmera e se aproxima mais do valor inicial obtido na Figura 4.1A. Assim, a câmera posicionada mais próxima ao tanque de testes (Figura 4.1A) será considerada a padrão para acompanhamento durante todos os testes subsequentes.

Figura 4.1 – Leitura da temperatura de 40°C A) com a câmera térmica próxima ao reservatório de testes; B) com a câmera térmica distante do reservatório de testes; C) com o termômetro Incoterm.



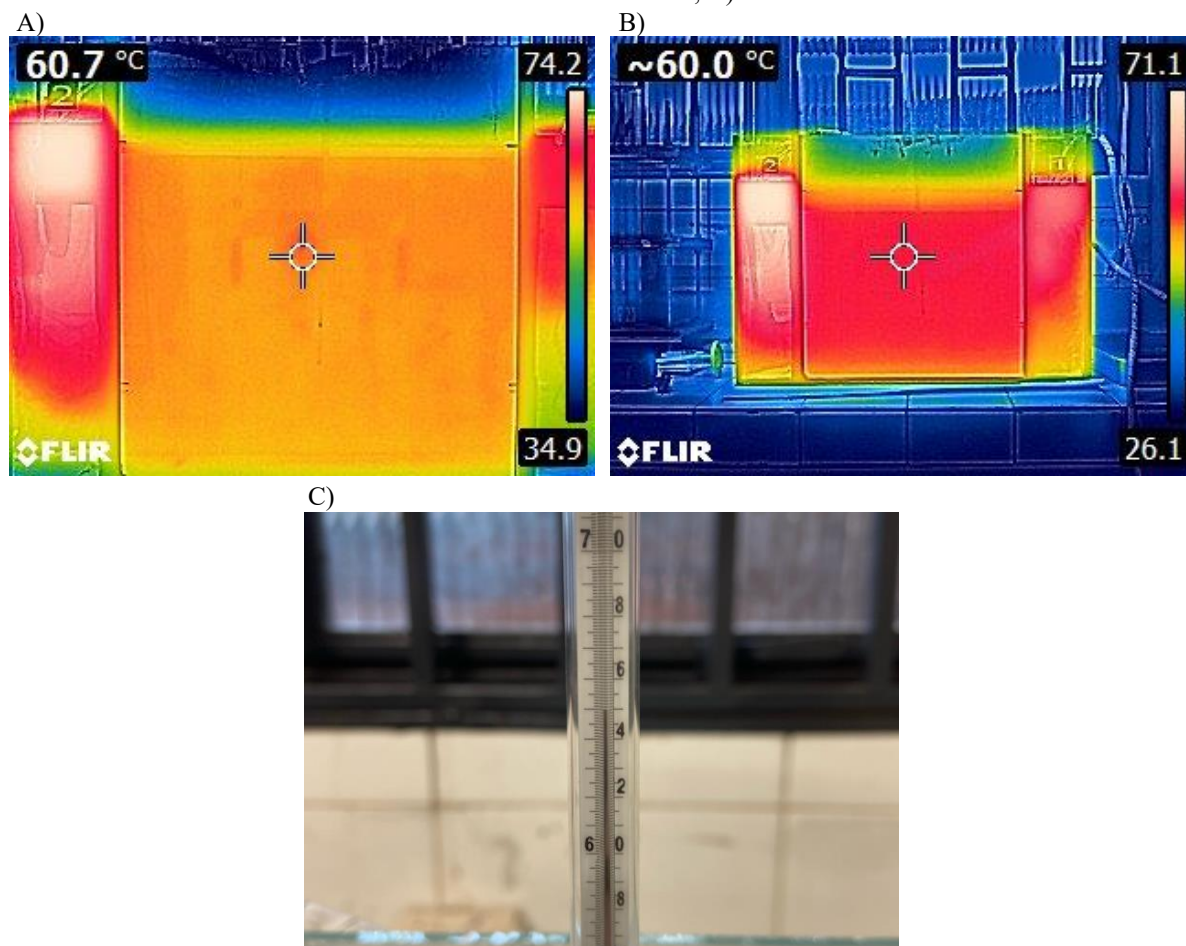
Fonte: Elaborado pela autora.

O próximo conjunto de resultados foi obtido seguindo essencialmente o mesmo procedimento, porém com a suspensão aquecida a 60°C, conforme mostrado na Figura 4.2. O óleo, por sua vez, foi aquecido até aproximadamente 80°C. Na análise da Figura 4.2A, a temperatura da suspensão obtida pela câmera foi de 60,7°C, com o reservatório de testes preenchendo completamente o campo de visão da câmera, indicando uma captura mais próxima do tanque de testes. Em uma distância maior, a temperatura no mesmo ponto foi registrada como 60°C, conforme apresentado na Figura 4.2B, resultando em um erro relativo de 1,15%. Esse resultado reafirma que, para o teste em questão, a posição não influencia significativamente o resultado.

Simultaneamente, a leitura utilizando o termômetro Incoterm, conforme mostrado na Figura 4.2C, indicou um valor de 64,9°C, representando um erro relativo de 6,47%. Apesar desse erro significativo, a utilização da câmera térmica se destaca como uma das melhores opções para esse tipo de teste, devido à sua natureza não destrutiva. Embora os termopares forneçam resultados altamente precisos em termos de temperatura, sua inserção nas suspensões

interferiria no fenômeno de sedimentação e, conseqüentemente, nos resultados. Isso não seria pertinente para os experimentos em questão, tornando a câmera térmica uma das alternativas mais viáveis.

Figura 4.2 – Leitura da temperatura de 60°C A) com a câmera térmica próxima ao reservatório de testes; B) com a câmera térmica distante do reservatório de testes; C) com o termômetro Incoterm.



Fonte: Elaborado pela autora.

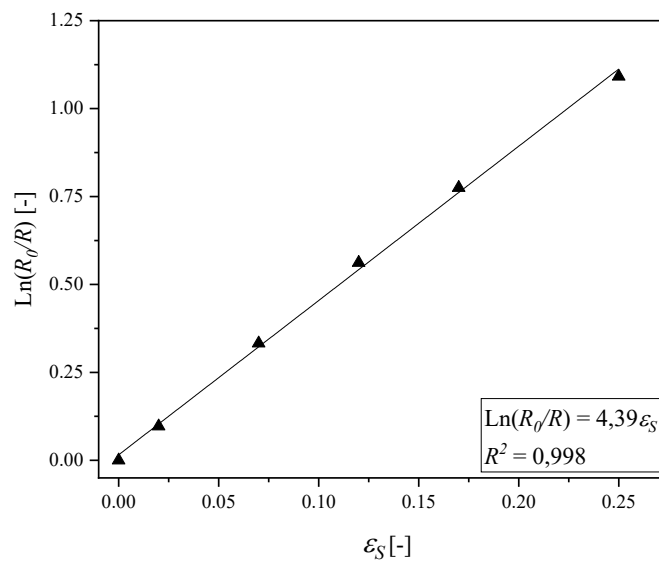
Além disso, os erros obtidos estão dentro de uma faixa de tolerância para os testes propostos. A diferença entre os valores medidos provavelmente se deve ao aumento da temperatura da suspensão de 40°C para 60°C. Isso ocorreu porque a diferença de temperatura em relação ao ambiente possivelmente tem um impacto significativo na precisão das leituras da câmera térmica. A 40°C, os erros obtidos foram mínimos devido à pequena perda de calor para o ambiente. Por outro lado, a 60°C, os erros foram maiores devido à maior perda de calor para o ambiente. No entanto, é importante ressaltar que essas variações de temperatura não afetaram negativamente os resultados dos testes.

## 4.2 Monitoramento da concentração volumétrica de sólidos

### 4.2.1 Curva de calibração

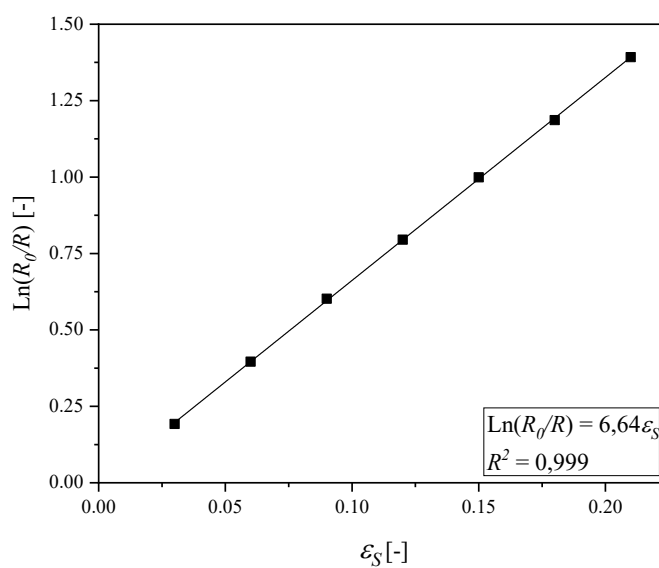
A curva de calibração foi essencial para determinar o parâmetro  $\beta$  utilizado nos cálculos de todos os resultados apresentados neste estudo. A Figura 4.3 apresenta os pontos obtidos a partir do teste experimental utilizando como vidraria o cilindro e a Figura 4.4 apresenta as leituras obtidas por meio do teste experimental utilizando como vidraria o reservatório bidimensional.

Figura 4.3 – Curva de calibração para estimar o parâmetro  $\beta$  do cilindro de testes.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.4 – Curva de calibração para estimar o parâmetro  $\beta$  do reservatório bidimensional.



Fonte: Elaborado pela autora.

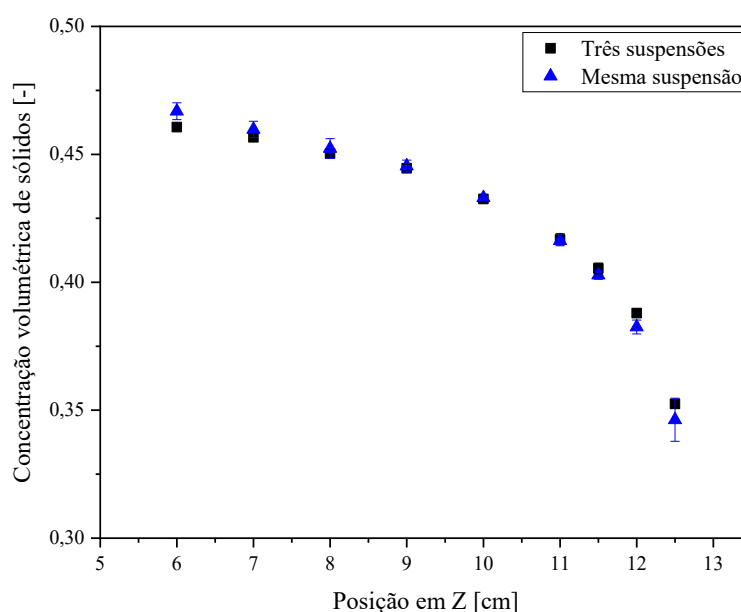
Conforme Figura 4.3, a linha que melhor se ajustou aos pontos lidos no cilindro de testes foi linearizada, resultando em um valor de  $\beta$  de 4,39, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,998. Já para o reservatório bidimensional, o valor obtido para o parâmetro  $\beta$  foi de 6,64, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,999, inclusive o parâmetro estimado foi empregado para qualquer posição do reservatório de testes.

Os diferentes valores de  $\beta$  se justificam pelas variações estruturais das vidrarias utilizadas. Embora o tipo de suspensão também influencie o valor, isso não será considerado aqui, pois as suspensões utilizadas foram as mesmas. A espessura de cada material tem influência no parâmetro calculado, sendo que no cilindro a espessura do vidro era de 3 mm e do reservatório bidimensional era de 6 mm. Além disso, a geometria dos recipientes também interferiu no parâmetro, sendo um cilíndrico, tendo como diâmetro 50 mm, e o outro um paralelepípedo retângulo com largura de 88 mm. Ambos os testes mostraram excelente correlação entre os pontos e a linha de regressão, evidenciando que os resultados foram pouco afetados por erros aleatórios.

#### 4.2.2 Teste de hipótese *t de Student*

O objetivo do teste foi determinar se seria necessário produzir uma nova suspensão para cada novo teste realizado, ou seja, verificar se seria necessário reiniciar o teste do zero para realizar as réplicas dos experimentos. O resultado está representado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Monitoramento para a análise de hipótese.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores de média e variância da concentração volumétrica de sólidos para cada posição do cilindro de testes estão apresentados na Tabela 4.1, pois através deles foram calculados os valores de graus de liberdade e  $t$ -estatístico.

Tabela 4.1 – Valores de média e variância para a análise de hipótese.

Posição em Z (cm)	Média de $\varepsilon_s$ de três suspensões	Variância de $\varepsilon_s$ de três suspensões	Média de $\varepsilon_s$ de uma suspensão	Variância de $\varepsilon_s$ de uma suspensão
12,5	0,35	4,04E-06	0,35	1,07E-04
12	0,39	3,82E-07	0,38	1,09E-05
11,5	0,41	6,83E-06	0,40	4,27E-06
11	0,42	8,33E-06	0,42	9,88E-07
10	0,43	1,68E-06	0,43	4,50E-07
9	0,44	3,51E-06	0,45	8,19E-06
8	0,45	3,61E-06	0,45	2,22E-05
7	0,46	2,30E-06	0,46	1,53E-05
6	0,46	2,17E-06	0,47	1,62E-05

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir desses valores, foram determinados os graus de liberdade para cada posição do reservatório. Com base nesses resultados, recorreu-se à tabela  $t$  para obter o valor crítico bicaudal de  $t$ . Além disso, o valor estatístico  $t$  foi calculado para possibilitar a não rejeição ou rejeição da hipótese nula.

Tabela 4.2 – Valores de graus de liberdade,  $t$ -crítico bicaudal e valor estatístico  $t$  para a análise de hipótese.

Posição em Z (cm)	Graus de liberdade	$t$ -crítico bicaudal ( $\pm$ )	Valor estatístico $t$
12,5	2	4,3	1,02
12	2	4,3	2,80
11,5	4	2,78	1,35
11	2	4,3	0,23
10	3	3,18	-0,58
9	3	3,18	-0,44
8	3	3,18	-0,66
7	3	3,18	-1,27
6	3	3,18	-2,52

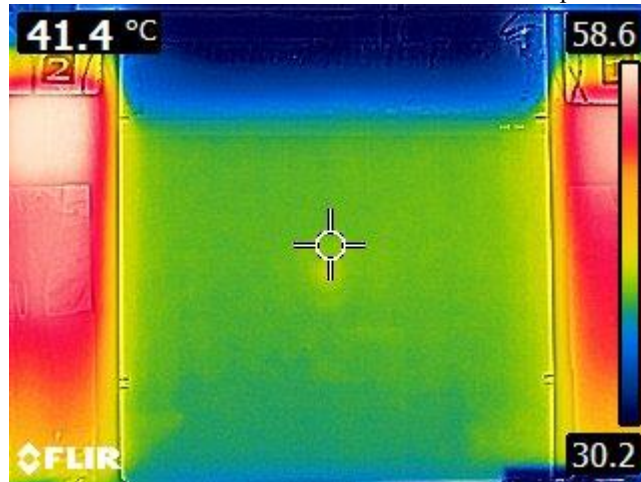
Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores estatísticos  $t$  para todas as posições do reservatório de testes não atingiram as regiões críticas, possibilitando a não rejeição da hipótese nula. Ou seja, quando não se rejeita  $H_0$  com um nível de significância de 5%, isto representa que 95% dos dados pertencem a mesma população. Com uma probabilidade tão alta, não há justificativa para rejeitar a igualdade entre as médias. Portanto, para a réplica dos testes não é preciso produzir uma nova suspensão quando se tratando de suspensões simples como água e carbonato de cálcio.

### 4.2.3 Teste dinâmico

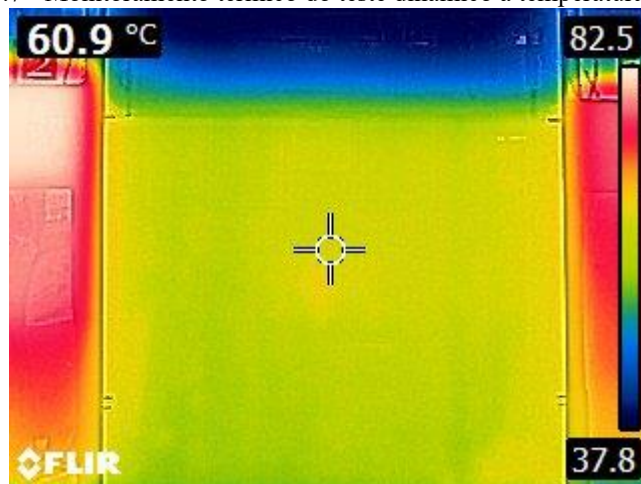
Por meio do teste dinâmico, foi possível monitorar a sedimentação dos sólidos em diferentes temperaturas, nas Figuras 4.6 e 4.7 é possível ver o monitoramento térmico a 40°C e 60°C, respectivamente.

Figura 4.6 – Monitoramento térmico do teste dinâmico a temperatura de 40°C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.7 - Monitoramento térmico do teste dinâmico a temperatura de 60°C.

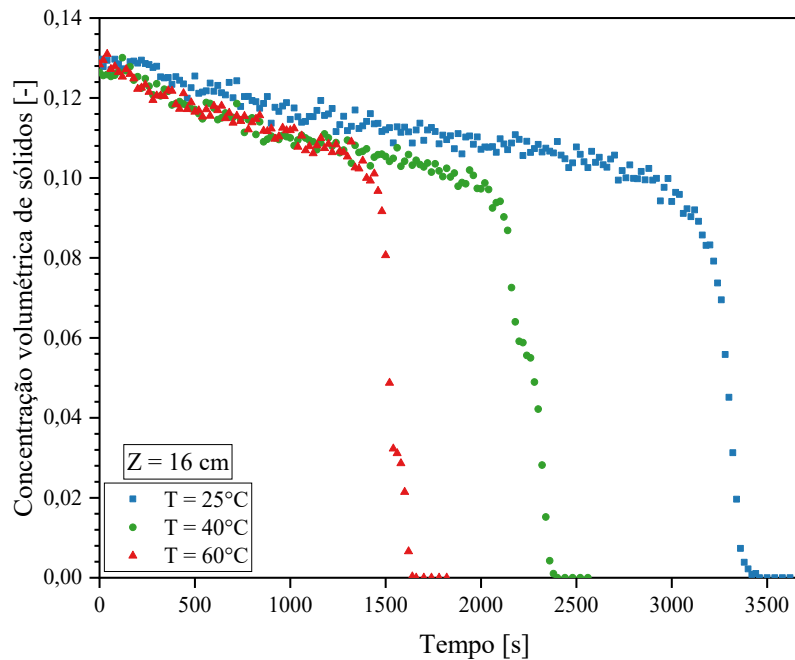


Fonte: Elaborado pela autora.

Foram selecionadas quatro posições do reservatório de testes para analisar e comparar o tempo e a velocidade de sedimentação em diferentes condições térmicas. O primeiro ponto de monitoramento foi estabelecido em  $Z = 16$  cm (Figura 4.8), representando o ponto mais alto considerado neste teste.



Figura 4.8 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $Z = 16$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

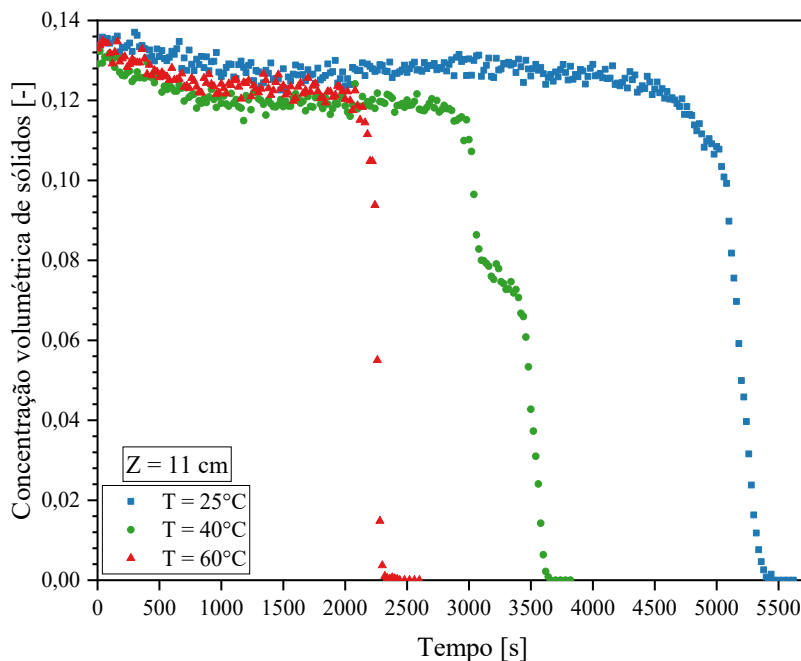
Nessa posição específica, durante o processo de sedimentação, foi observado o momento em que ocorreu a passagem da interface, marcando a separação entre o fluido concentrado e o fluido clarificado. Inicialmente, o gráfico representativo partiu de uma concentração de 13%, que corresponde à concentração da solução homogeneizada, e progrediu até atingir o valor zero. Isso ocorreu após a passagem da interface, indicando que não havia mais sólidos presentes no líquido clarificado.

A análise mais significativa desse teste reside no tempo de sedimentação. Notavelmente, para a suspensão à temperatura ambiente, o ponto de passagem da interface foi observado em 3480 segundos, indicando um comportamento mais lento na posição determinada. Por outro lado, o fluido submetido a 40°C levou apenas 2420 segundos para que sua concentração atingisse o valor zero, evidenciando um comportamento mais acelerado em comparação à suspensão à temperatura ambiente. Por fim, o fluido submetido a 60°C demonstrou uma velocidade ainda mais rápida, com a passagem ocorrendo em apenas 1680 segundos, indicando um comportamento ainda mais ligeiro em comparação com as outras temperaturas, conforme Figura 4.8.

O próximo ponto de monitoramento foi definido em  $Z = 11$  cm (Figura 4.9), da mesma forma que em  $Z = 16$  cm, foi observado o momento em que ocorreu a passagem da interface, marcando a separação entre o fluido concentrado e o fluido clarificado. Partindo inicialmente

da concentração de 13%, e progredindo até atingir o valor zero. Isso ocorreu após a passagem da interface, indicando que não havia mais sólidos presentes no líquido clarificado.

Figura 4.9 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $Z = 11$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

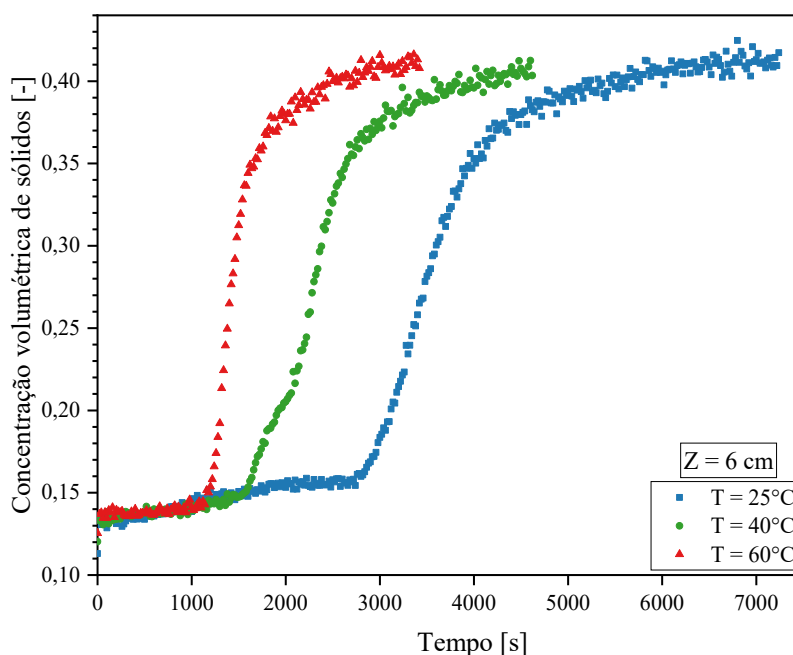
O que difere de uma posição para outra é o comportamento das curvas com o monitoramento da concentração de sólidos e obviamente o tempo da passagem da interface. Ao analisar as curvas da Figura 4.8, percebe-se que ocorre um decaimento gradual da concentração de sólidos, diferindo da Figura 4.9, em que a concentração inicial se manteve por um tempo até se chegar à região de transição, em que a concentração de sólidos decai até o valor de zero. Ou seja, os sólidos se encontram na região de sedimentação livre, como demonstrado por Kynch (1952), em que a concentração de sólidos é a mesma do valor inicial e a velocidade de sedimentação é constante.

A análise mais relevante desse teste está no tempo de sedimentação. Notavelmente, para a suspensão à temperatura ambiente, o ponto de passagem da interface foi observado em 5480 segundos, indicando um comportamento mais lento na posição determinada. Por outro lado, o fluido submetido a 40°C levou apenas 3680 segundos para que sua concentração atingisse o valor zero, evidenciando um comportamento mais acelerado em comparação à suspensão à temperatura ambiente. Por fim, o fluido submetido a 60°C demonstrou uma velocidade ainda maior, com a passagem ocorrendo em apenas 2460 segundos, indicando um comportamento notavelmente mais rápido em comparação com as outras temperaturas, conforme Figura 4.9. De modo geral, fica claro um aumento no tempo de passagem da interface, comparada a posição

de  $Z = 16$  cm, chegando a ter até 2000 segundos de diferença, explicada evidentemente pela posição no reservatório de testes.

O próximo ponto de monitoramento foi definido em  $Z = 6$  cm (Figura 4.10), diferentemente dos dois anteriores, nesta posição não ocorre a passagem da interface, e sim a estabilização do sedimento formado. Partindo inicialmente da concentração inicial da suspensão e progredindo até atingir o valor de máxima concentração nessa posição de 41%.

Figura 4.10 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $Z = 6$  cm.



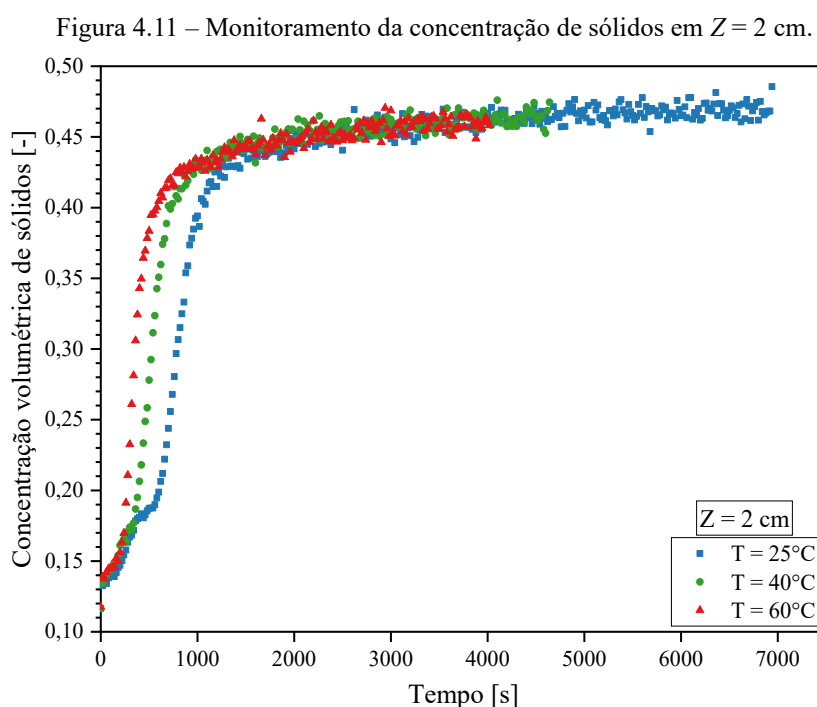
Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como nos testes anteriores, a mais importante análise desses ensaios se encontra no tempo de sedimentação. Fazendo uma análise minuciosa nos dados, para a suspensão à temperatura ambiente, o ponto de estabilização do sedimento foi observado em 5820 segundos, indicando um comportamento mais lento na posição determinada. A leitura ainda foi acompanhada por algum tempo, até 7240 segundos, para a confirmação da estabilização do sedimento, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada 41%.

O fluido submetido a 40°C levou apenas 3640 segundos para que sua concentração atingisse o sedimento estabilizado, evidenciando que nesta temperatura ocorre a estabilização do sedimento de forma mais rápida que comparada à suspensão à temperatura ambiente. A leitura ainda foi acompanhada por algum tempo, até 4620 segundos, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada de 40%.

Por fim, o fluido submetido a 60°C demonstrou uma velocidade ainda mais rápida, com a estabilização ocorrendo em apenas 2440 segundos. A leitura ainda foi acompanhada até 3420 segundos, para a confirmação da estabilização do sedimento, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada de 40%.

O próximo ponto de monitoramento foi estabelecido em  $Z = 2$  cm (Figura 4.11), de forma similar a posição anterior, neste ponto não ocorre a passagem da interface, e sim a estabilização do sedimento formado. Partindo inicialmente da concentração de 13% e progredindo até atingir o valor de máxima concentração nessa posição de 47%.



Fonte: Elaborado pela autora.

Sobre a observação do tempo de sedimentação para a suspensão à temperatura ambiente, o ponto de estabilização do sedimento foi observado em 2740 segundos, indicando um comportamento mais lento na posição determinada. A leitura ainda foi acompanhada por algum tempo, até 6920 segundos, para a confirmação da estabilização do sedimento, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada de 47%.

O fluido submetido a 40°C levou apenas 2040 segundos para que sua concentração atingisse o sedimento estabilizado, evidenciando que nesta temperatura ocorre a estabilização do sedimento de forma mais rápida que comparada à suspensão à temperatura ambiente. A leitura foi acompanhada até 4620 segundos, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada de 47%.

Por fim, o fluido submetido a 60°C demonstrou uma velocidade ainda mais rápida, com a estabilização ocorrendo em apenas 1760 segundos. A leitura ainda foi acompanhada até 4020 segundos, e os resultados demonstraram que a concentração se manteve em uma faixa aproximada de 46%.

Diante dos resultados apresentados, é notável a influência da temperatura no tempo de sedimentação, como mostrado por Mkpenie *et al.* (2007), Motta *et al.* (2017), Nadella *et al.* (2020), Tang *et al.* (2021) e Alade *et al.* (2023). A explicação para justificar essa influência está relacionada à viscosidade do fluido. Quando o fluido é aquecido, as forças de coesão entre as moléculas tendem a diminuir à medida que a temperatura aumenta. Isso interfere na interação do fluido com as partículas sólidas, resultando em uma dispersão maior dessas partículas. Portanto, ao ser aquecido, o fluido apresenta uma redução em sua viscosidade, o que facilita a passagem do sólido e acelera o processo de sedimentação em comparação ao observado em temperaturas mais baixas, mesmo que o fluido em questão apresente características newtonianas, essa explicação ainda é aplicável, uma vez que todo fluido possui uma viscosidade, mesmo que mínima.

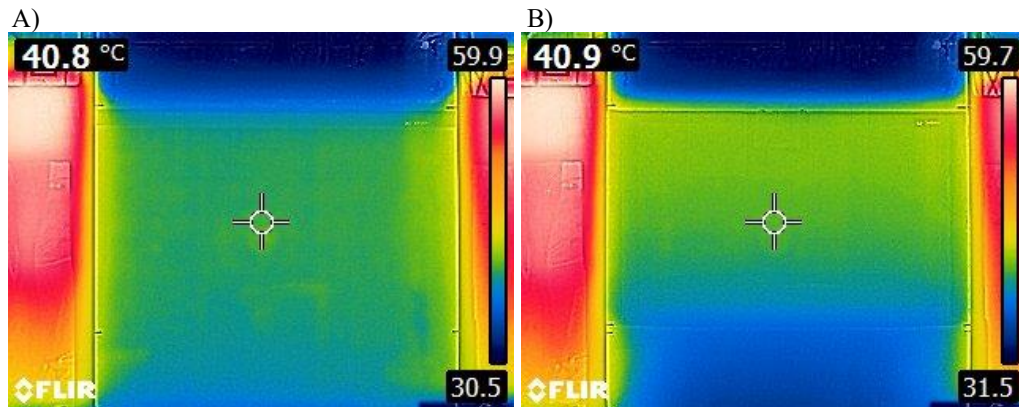
Os resultados apresentados nesta seção estão sem os respectivos desvios-padrão, o que foi feito para facilitar a visualização e interpretação. Os gráficos contendo esses desvios estão disponíveis no Apêndice A.

#### **4.2.4 Teste de compactação**

Este teste foi concebido para analisar a influência da temperatura na formação do sedimento, ou seja, para avaliar se em temperaturas mais elevadas o sedimento se manteria de forma semelhante à temperatura ambiente ou se apresentaria maior ou menor compactação. O monitoramento térmico do teste a 40°C é mostrado na Figura 4.12. O início da sedimentação é ilustrado na Figura 4.12A, enquanto a estabilização do sedimento é apresentada na Figura 4.12B.

Após a completa estabilização do sedimento, a temperatura da suspensão se manteve quase que a mesma, o que demonstra que a perda de calor nessa temperatura trabalhada foi mínima. Além disso, pode ser visto que os sólidos presentes no leito formado estão a uma temperatura mais baixa que o líquido, isso se explica pelo fato de que o sólido possui um calor específico maior do que o líquido, ou seja, o sólido precisa receber mais calor para que seja possível aumentar sua temperatura. Adicionalmente, o sólido perderá calor mais facilmente que o líquido, pela mesma razão.

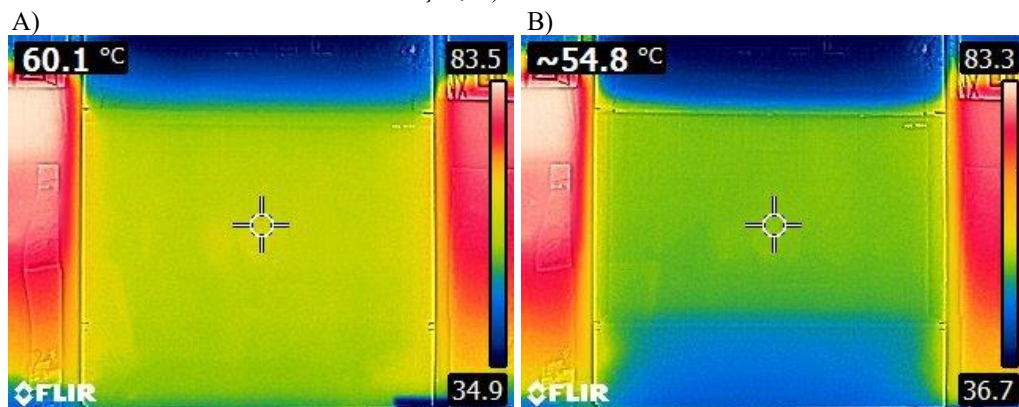
Figura 4.12 – Monitoramento térmico do teste de compactação a temperatura de 40°C. A) início da sedimentação; B) sedimento formado.



Fonte: Elaborado pela autora.

O monitoramento térmico do teste a 60°C é mostrado na Figura 4.13. O início da sedimentação é ilustrado na Figura 4.13A, enquanto a estabilização do sedimento é apresentada na Figura 4.13B.

Figura 4.13 – Monitoramento térmico do teste de compactação a temperatura de 60°C. A) início da sedimentação; B) sedimento formado.



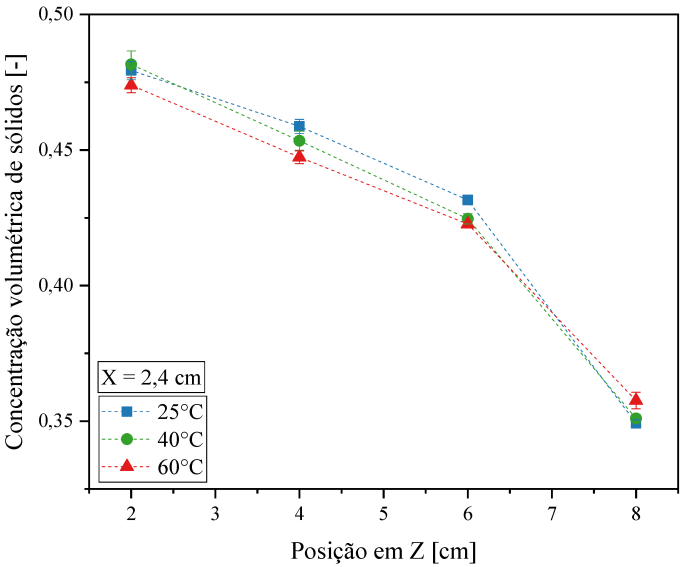
Fonte: Elaborado pela autora.

Mediante a Figura 4.13, é nítido perceber que ocorreu uma perda maior de calor desde a suspensão homogeneizada até o sedimento formado, possivelmente explicado pela maior diferença de temperatura com o ambiente externo. Como o delta de temperatura é maior, a perda de calor se apresentou de forma mais acentuada. Mas apesar disso, ainda foi possível obter resultados que geraram discussões pertinentes ao tema.

Os testes foram conduzidos em cinco posições diferentes em  $X$  e quatro posições diferentes em  $Z$ , a primeira posição analisada foi em  $X = 2,4$  cm. É uma posição bem próxima a parede aquecida do reservatório, sendo os resultados possivelmente influenciados por tal proximidade. A Figura 4.14 apresenta os resultados do monitoramento da concentração volumétrica de sólidos variando com as quatro posições em  $Z$ . E as Figuras 4.15 e 4.16

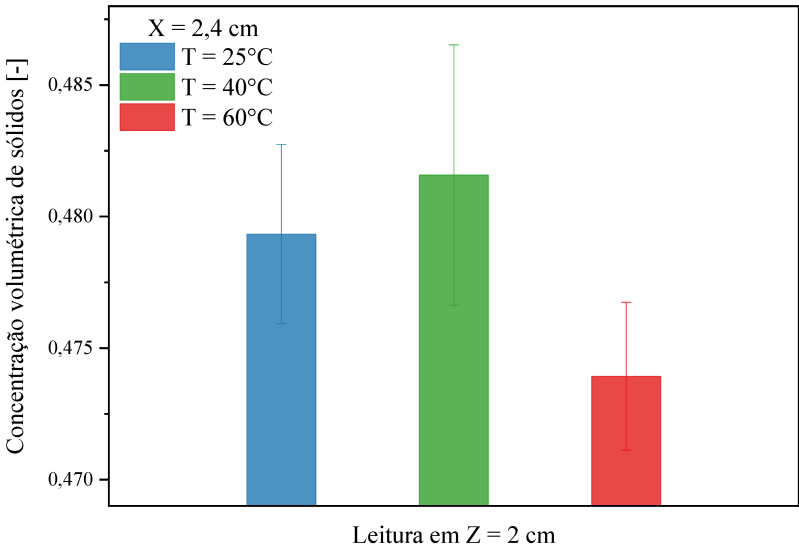
apresentam o monitoramento da posição mais profunda e mais a superfície do sedimento, respectivamente. Esses dois últimos serão apresentados como gráficos em barra para facilitar o entendimento do comportamento do leito.

Figura 4.14 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 2,4$ .



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.15 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 2,4$  e  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

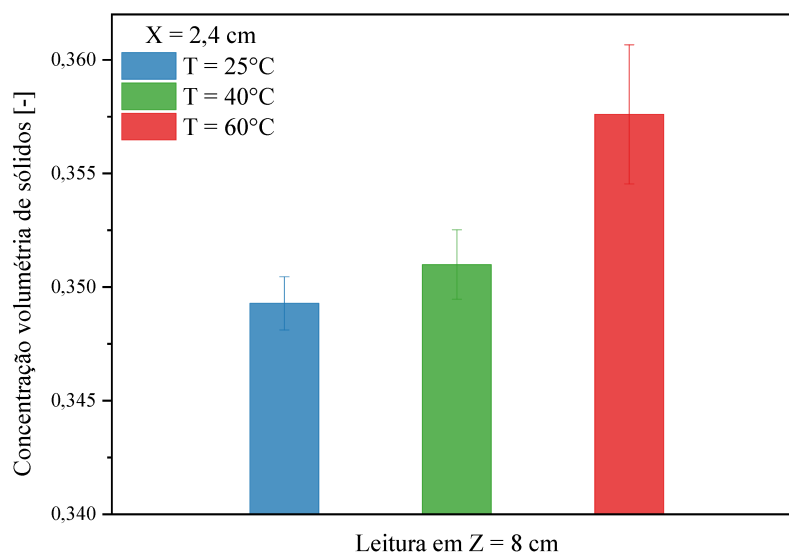
Na camada mais profunda do sedimento, a uma profundidade de  $Z = 2$  cm (Figura 4.15), ao analisar os valores de concentração de sólidos a 25°C e 40°C, é desafiador determinar o

comportamento dos sólidos diante desse pequeno aumento de temperatura. No entanto, ao considerar a temperatura de 60°C, torna-se evidente uma disparidade na concentração em comparação com os outros dois pontos de medição.

Em termos numéricos, a concentração de sólidos foi de 47,9% a 25°C para 47,4% a 60°C. Apesar da pouca diferença, o valor de concentração para a suspensão a 60°C foi menor do que a 25°C. Esse mesmo comportamento é observado para  $Z = 4$  cm e  $Z = 6$  cm.

Por outro lado, na posição mais próxima à superfície, localizada em  $Z = 8$  cm e ilustrada na Figura 4.16, é claramente observável que a concentração de sólidos a 60°C é superior àquela a 25°C. Em termos quantitativos, foi registrado concentrações de 35,8% e 34,9%, respectivamente, indicando uma diferença mais expressiva de quase 1% na concentração. Esse fenômeno pode ser atribuído ao comportamento do sedimento em áreas mais profundas, conforme delineado na Figura 4.15. A 60°C, na base do leito, as concentrações são menores, sugerindo uma possível expansão do leito e, conseqüentemente, uma elevação do sedimento. Dessa forma, ao realizar a medição no mesmo ponto a 25°C, na verdade está sendo avaliado uma posição mais profunda em 60°C devido ao aumento do leito, explicando assim o maior valor na concentração de sólidos.

Figura 4.16 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 2,4$  e  $Z = 8$  cm.

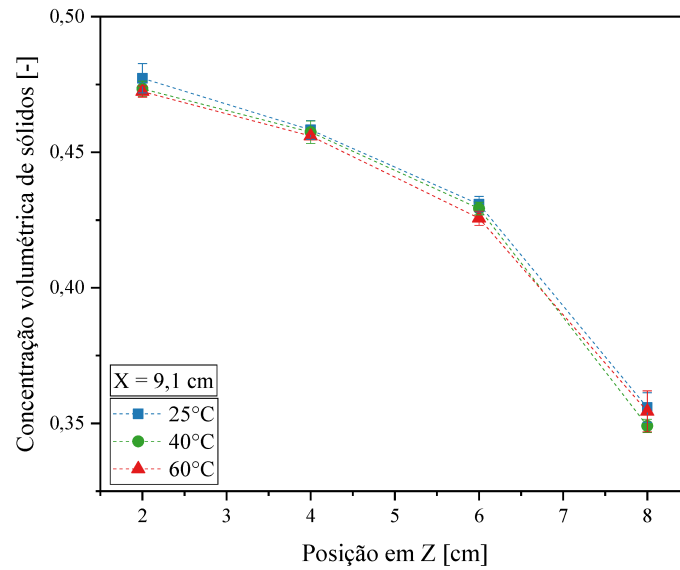


Fonte: Elaborado pela autora.

Em  $X = 9,1$  cm (Figura 4.17), a parede quente do reservatório de testes não influenciou tão intensamente como no resultado anterior, e é possível ver um comportamento ligeiramente diferente do sedimento.



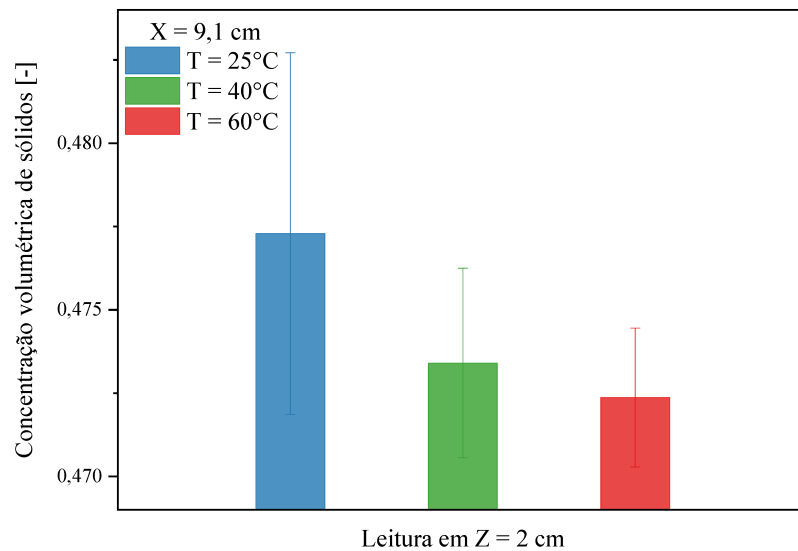
Figura 4.17 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 9,1$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

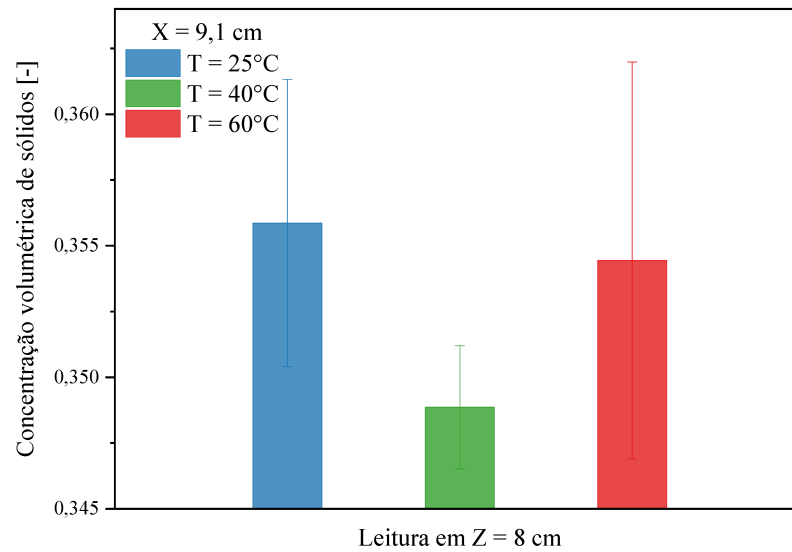
O monitoramento em  $Z = 2$  cm e  $Z = 8$  cm estão apresentados nas Figura 4.18 e 4.19, respectivamente.

Figura 4.18 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 9,1$  cm e  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.19 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 9,1$  cm e  $Z = 8$  cm.



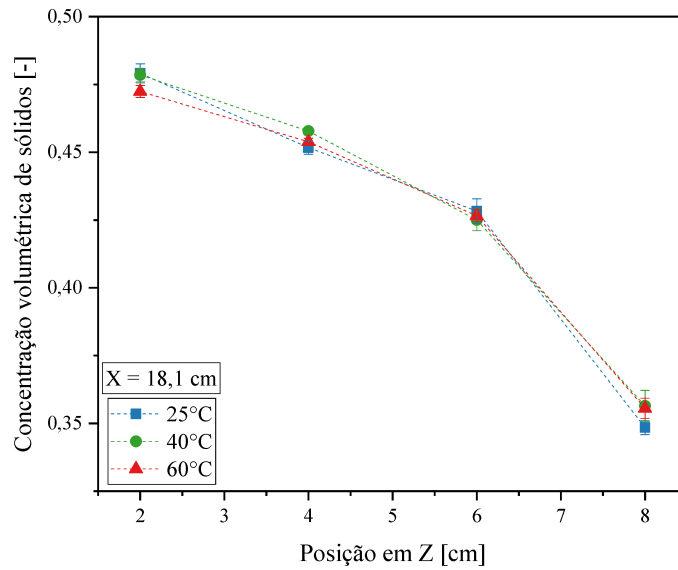
Fonte: Elaborado pela autora.

Ao examinar a posição em  $Z = 2$  cm (Figura 4.18), nota-se que tanto a 40°C quanto a 60°C, as concentrações foram inferiores às registradas a 25°C, marcando 47,3% para 40°C, 47,2% para 60°C e 47,7% para 25°C. Esse padrão reflete, de maneira muito semelhante ao observado em  $X = 2,4$  cm, que as concentrações em camadas mais profundas são mais altas à temperatura de 25°C, o que resulta em um sedimento mais compactado. Para as posições mais centrais do sedimento, em  $Z = 4$  cm e 6 cm, o comportamento é semelhante, embora as concentrações não apresentem diferenças tão significativas.

Para a posição mais próxima à interface, em  $Z = 8$  cm (Figura 4.19), os valores de concentração para 25°C e 60°C foram muito próximos, registrando 35,6% e 35,4%, respectivamente. Esse resultado difere da observação em  $X = 2,4$  cm. Apesar dessa diferença, ainda é possível considerar a expansão dos sólidos pelo comportamento visto nas regiões mais profundas, conforme Figura 4.18.

Outra posição monitorada foi em  $X = 18,1$  cm, como mostrado na Figura 4.20. Esta posição encontra-se no centro exato do reservatório de testes, sendo a mais distante das paredes quentes. Os resultados obtidos são bastante semelhantes aos encontrados nas duas posições anteriores, com exceção da posição em  $Z = 4$  cm. Nas temperaturas de 40°C e 60°C, as concentrações mostram-se mais altas do que a 25°C. A razão para esse comportamento não é facilmente explicada, visto que ao analisar os outros pontos em  $Z$ , torna-se evidente a expansão do leito em temperaturas mais elevadas.

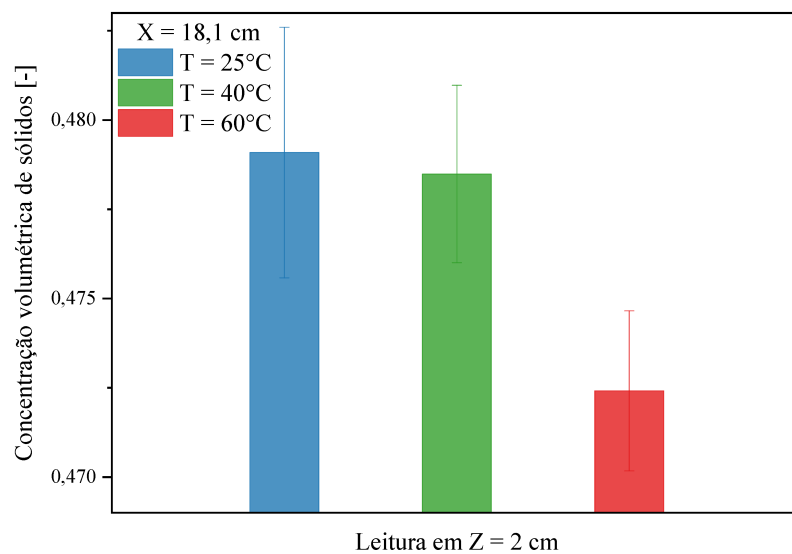
Figura 4.20 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 18,1$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em  $Z = 2$  cm (Figura 4.21), tanto a 25°C quanto a 40°C, as concentrações apresentaram valores muito próximos, registrando 47,9% e 47,8%, respectivamente. No entanto, à temperatura de 60°C, a leitura obtida foi de 47,2% de sólidos, evidenciado mais uma vez a expansão no leito para maiores temperaturas.

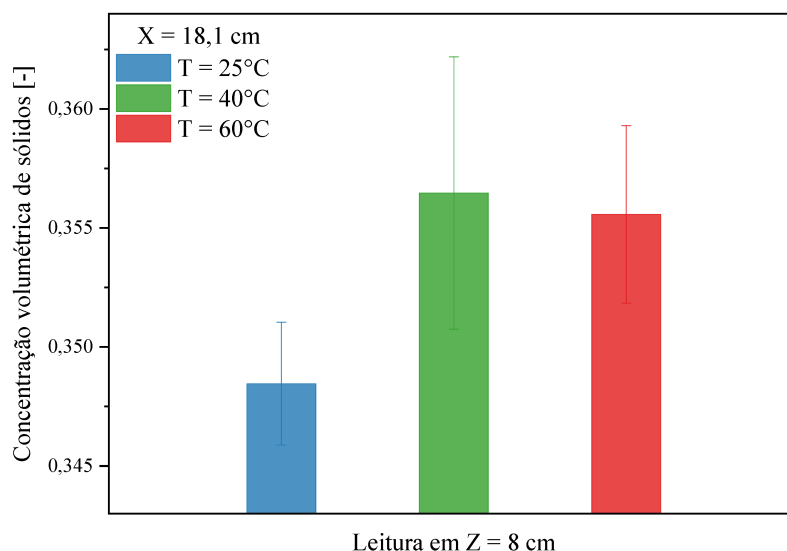
Figura 4.21 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 18,1$  cm e  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a posição mais próxima à interface, em  $Z = 8$  cm (Figura 4.22), os valores de concentração para 40°C e 60°C foram bastante próximos e superiores aos registrados a 25°C, evidenciando, assim como nas posições anteriores, uma elevação do leito.

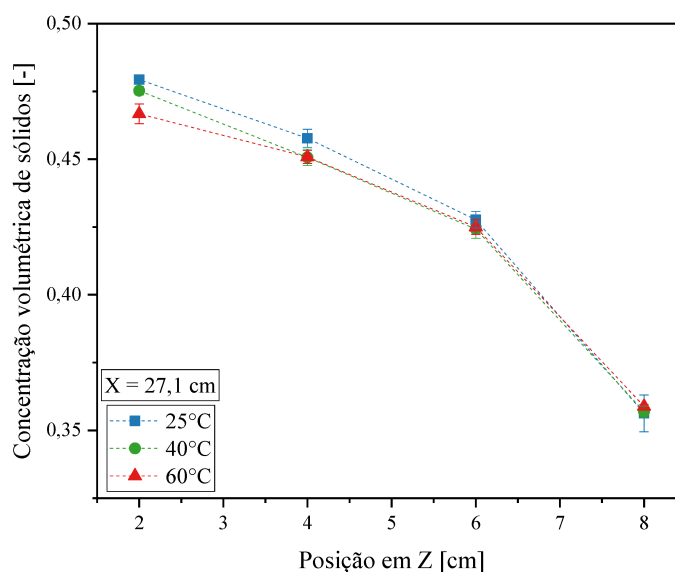
Figura 4.22 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 18,1$  cm e  $Z = 8$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

O monitoramento para  $X = 27,1$  cm está apresentando na Figura 4.23.

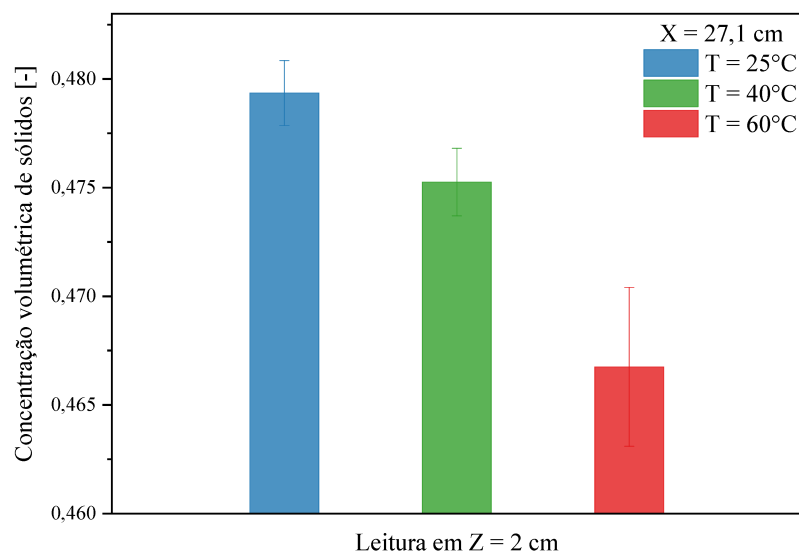
Figura 4.23 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 27,1$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

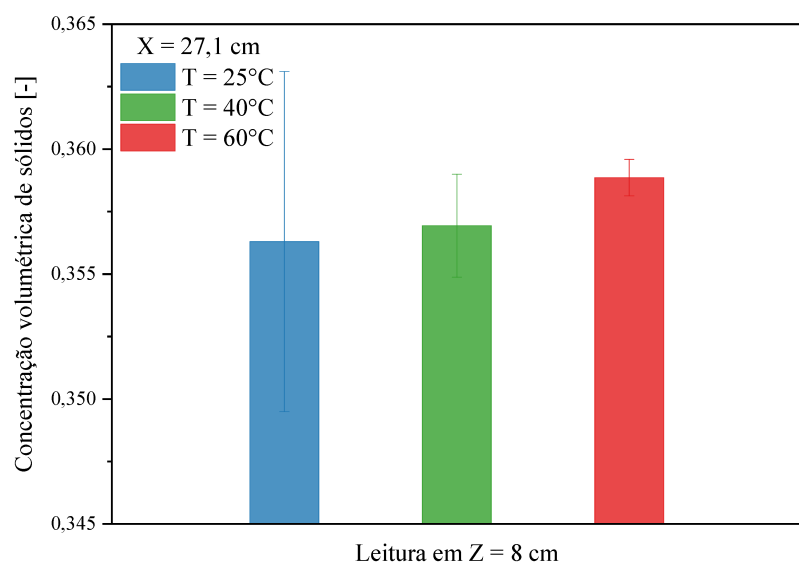
O comportamento do sedimento para  $X = 27,1$  cm é muito semelhante aos apresentados anteriormente. Na Figura 4.24 está representado o monitoramento das posições mais profundas do sedimento e na Figura 4.25 as posições mais próximas a superfície do leito.

Figura 4.24 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 27,1$  cm e  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.25 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 27,1$  cm e  $Z = 8$  cm.



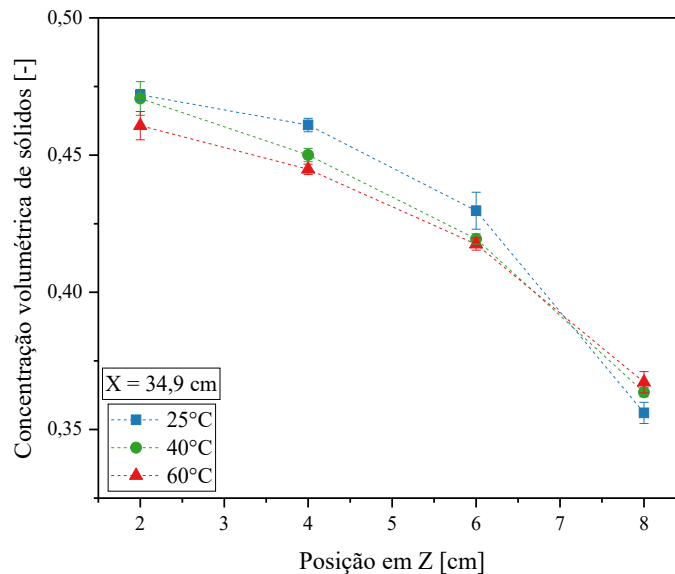
Fonte: Elaborado pela autora.

Na posição  $Z = 2$  cm, a concentração a  $25^{\circ}\text{C}$  é maior, o que resultou em um sedimento mais compactado, ao contrário do observado a  $60^{\circ}\text{C}$ , que resultou em um sedimento mais

expandido. Quanto às posições mais centrais do sedimento, em  $Z = 4$  cm e 6 cm, o desempenho é muito similar, destacando-se especialmente em  $Z = 4$  cm, onde esse comportamento é bem pronunciado. E na leitura em  $Z = 8$  cm (Figura 4.25), o padrão se repete, com concentrações mais altas para o sedimento a 60°C.

E por fim, a posição em  $X = 34,9$  cm, conforme ilustrado na Figura 4.26.

Figura 4.26 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 34,9$  cm.



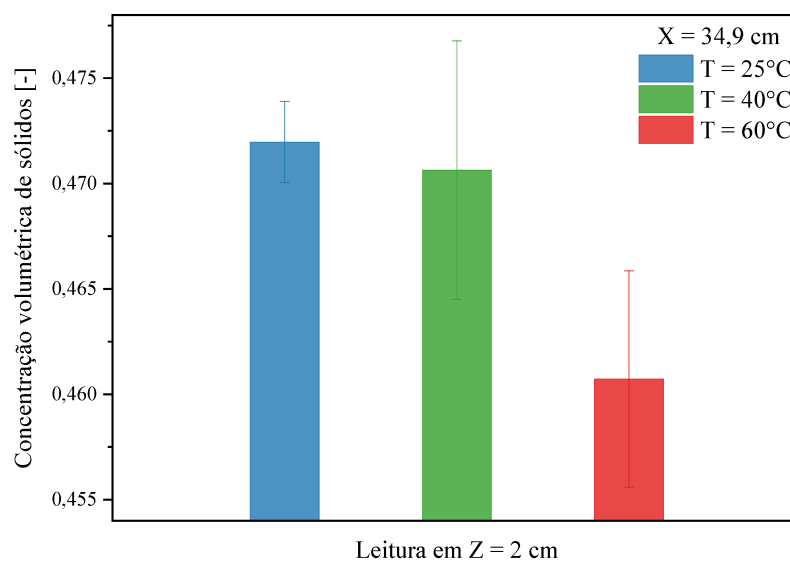
Fonte: Elaborado pela autora.

Embora esta posição esteja igualmente próxima à parede aquecida do reservatório, é a parede oposta em relação a  $X = 2,4$  cm, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

Para  $Z = 2$  cm (Figura 4.27), foi observado que a concentração de sólidos para 25°C e 40°C apresentou valores muito próximos, 47,2% e 47,1%, respectivamente. No entanto, para 60°C, há uma diferença evidente na concentração em comparação com os outros dois pontos, registrando 46,1%. Isso confirma novamente a tendência de concentrações menores para temperaturas mais altas, e vice-versa. Este mesmo padrão de comportamento é observado para  $Z = 4$  cm e 6 cm.

Diferentemente para a posição mais próxima a superfície, em  $Z = 8$  cm (Figura 4.28), é evidente que a 60°C apresentou valores de concentração mais elevados do que a 25°C, registrando numericamente 36,7% e 35,6%, respectivamente. Isso reitera o que foi explicado anteriormente, atribuindo esse fenômeno à elevação do leito.

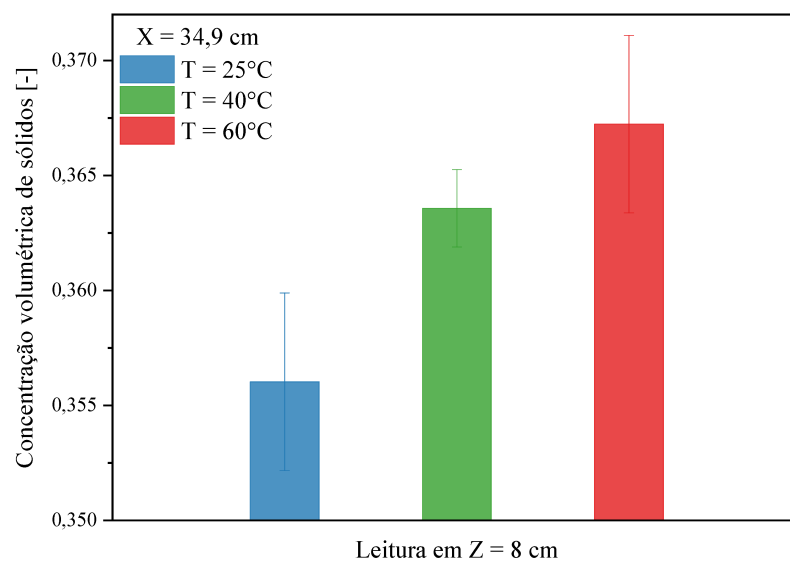
Figura 4.27 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 34,9$  cm e  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral, é possível observar que a concentração de sólidos varia conforme a posição no sedimento. Valores menores de concentração são encontrados em regiões mais próximas à superfície do sedimento, enquanto valores maiores de concentração são observados em posições mais profundas.

Figura 4.28 – Monitoramento da concentração de sólidos em  $X = 34,9$  cm e  $Z = 8$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, fazendo uma análise de todos os pontos apresentados, pôde-se concluir que a temperatura influencia não só no tempo de sedimentação, mas também no sedimento formado. Para posições mais ao fundo do reservatório, foram medidas concentrações menores para a temperatura de 60°C e maiores para 25°C, demonstrando que o sedimento se apresenta mais compactado em temperaturas menores, e conseqüentemente mais expandido quando exposto a temperaturas maiores. Para posições mais próximas à interface do sedimento, foi possível se chegar à mesma conclusão, porém fazendo uma análise diferente, pois nesta posição as concentrações para 60°C são maiores do que a 25°C, isso se explica exatamente pela expansão do sedimento, pois ao se expandir, o leito fica mais alto, e ao se fazer a leitura do mesmo ponto lido a 25°C, aquele ponto está em uma posição mais profunda do sedimento, trazendo valores maiores de concentração.

Tudo isso pode ser explicado pela mudança de densidade e viscosidade causada pela variação de temperatura, neste caso, pelo aumento da mesma. Quando os fluidos são expostos a temperaturas mais elevadas, as forças intermoleculares tendem a diminuir, resultando em um aumento do espaçamento entre as moléculas. Isso, por sua vez, leva a um aumento no volume ocupado pelo fluido, o que naturalmente diminui sua densidade.

Conforme Alcofra (2014) observou, em condições reais de fundo de poço, esse comportamento é comumente encontrado. Em regiões profundas, onde a temperatura do reservatório tende a aumentar, há uma intensificação na troca de calor com os fluidos. Esse aquecimento resulta na expansão do fluido confinado no anular do poço, promovendo a dilatação de toda a estrutura e induzindo um aumento de pressão.

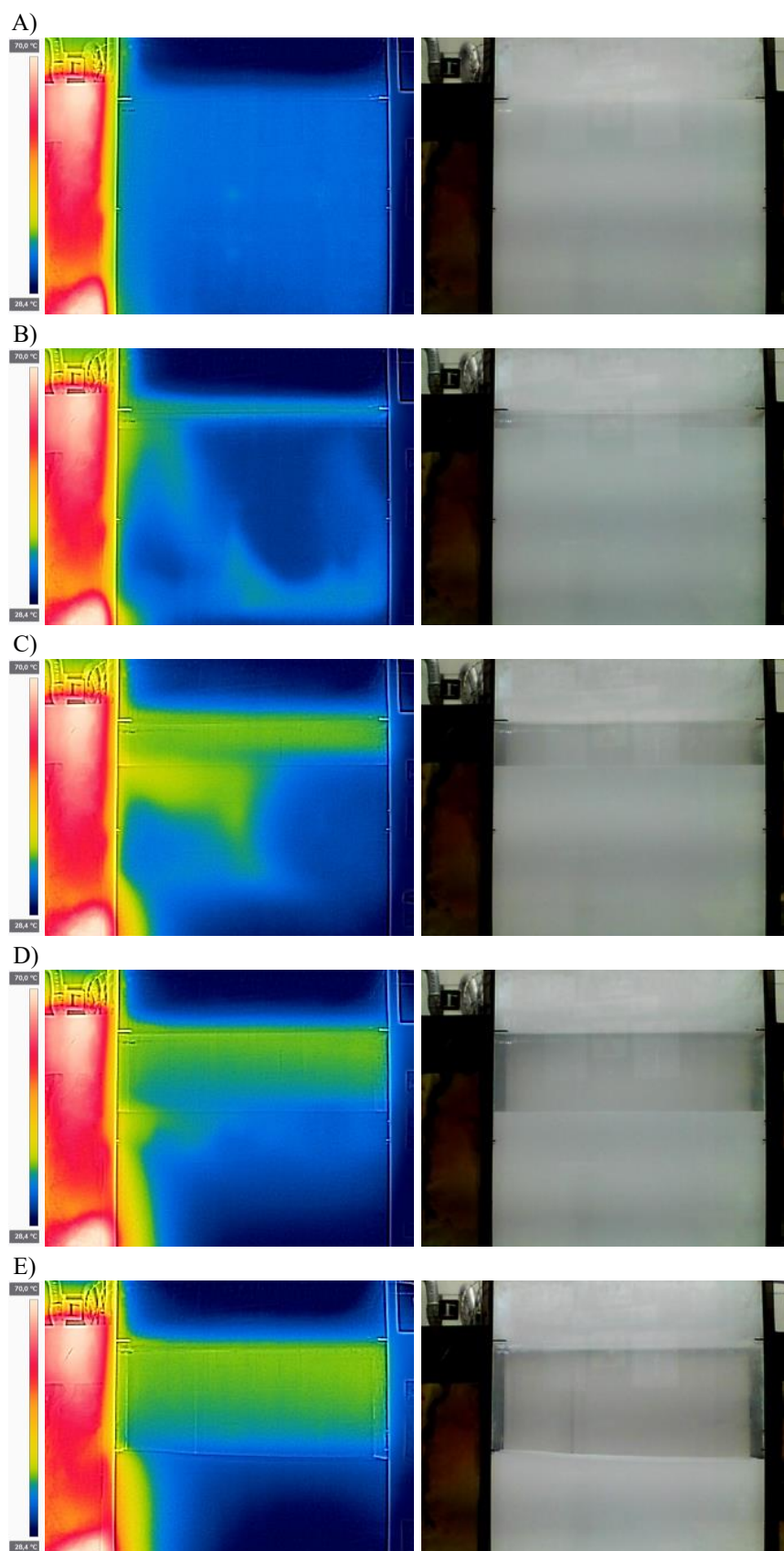
No entanto, o estudo de Oliveira *et al.* (2023) apresentou conclusões divergentes em relação à compactação do sedimento. Os autores observaram um aumento no grau de compactação da suspensão sob condições de aquecimento isotérmico, com base na análise da altura do sedimento formado após aproximadamente duas horas de sedimentação. Apesar disso, os próprios autores sugeriram que um período mais prolongado de ensaios seria ideal para uma análise mais precisa do grau de compactação.

#### **4.2.5 Teste com gradiente térmico**

O objetivo deste teste foi analisar a influência da condução de calor na sedimentação, com foco especial no sedimento formado. O monitoramento térmico (Figura 4.29) foi feito juntamente com o fenômeno da sedimentação, desde o início até a estabilização do sedimento.



Figura 4.29 - Monitoramento da temperatura do teste com gradiente térmico em A)  $t = 0$  min; B)  $t = 25$  min; C)  $t = 60$  min; D)  $t = 120$  min; E)  $t = 180$  min.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a estabilização do sedimento, observou-se claramente um comportamento distinto dos sólidos próximos à parede quente em comparação aos sólidos próximos à parede fria, como ilustrado na Figura 4.30.

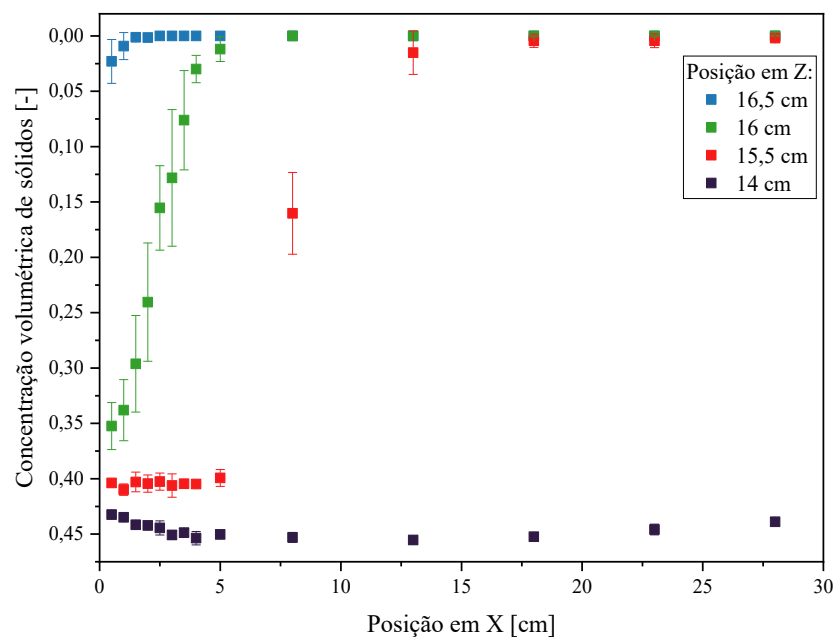
Figura 4.30 – Comportamento dos sólidos após estabilização do sedimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Diante disso, o primeiro monitoramento apresentado demonstra o acompanhamento das posições mais superficiais do sedimento formado após a completa sedimentação, conforme Figura 4.31.

Figura 4.31 – Monitoramento da superfície do sedimento nas posições de  $Z = 16,5$  cm; 16 cm; 15,5 cm; e 14 cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

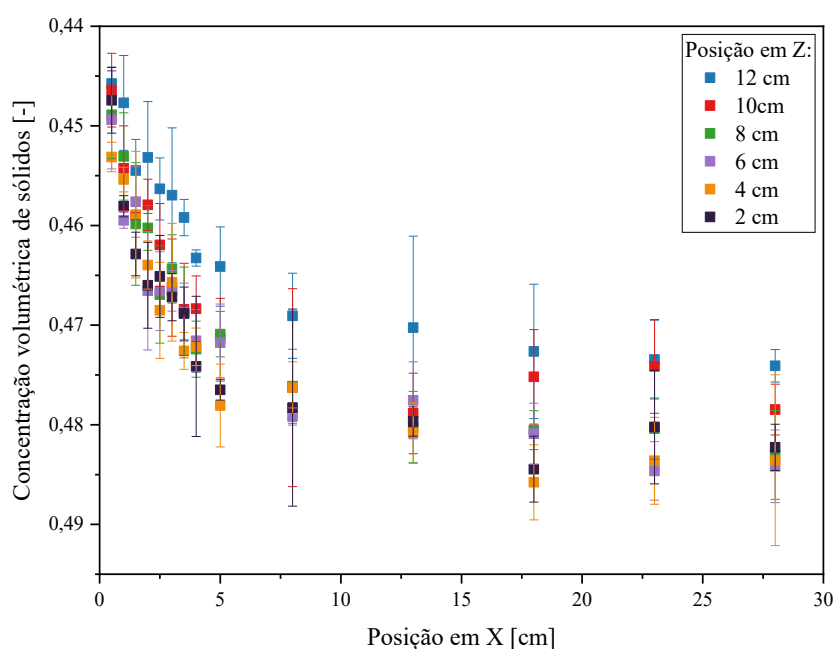
Para uma melhor compreensão dos resultados, a ordenada, que expressa a concentração volumétrica de sólidos, foi invertida. Isso se deve ao fato de que a variação da posição em  $Z$  ocorre de cima para baixo, o que torna mais clara a visualização dos valores obtidos.

É importante salientar que a posição em  $X = 0$  cm corresponde à parede aquecida a  $70^{\circ}\text{C}$ , enquanto em  $X = 29$  cm está a parede sem aquecimento. Assim, é evidente que os valores de concentração de sólidos variam de acordo com a proximidade de cada parede.

Ao analisar os pontos em  $Z = 16,5$  cm, observa-se que, próximo à parede aquecida, já é possível encontrar 2% de sólidos, enquanto ao se distanciar dessa parede, essa concentração cai para zero. Este padrão se repete na posição  $Z = 16$  cm, porém de maneira mais acentuada, próxima à parede aquecida a concentração atinge 35%, diminuindo gradualmente à medida que se afasta até atingir zero. Em outras palavras, há uma concentração maior de sólidos próxima à parede aquecida, um fenômeno que não ocorre próxima à parede fria.

O próximo conjunto de resultados, representado pela Figura 4.32, exhibe o monitoramento das posições mais profundas do sedimento formado após a estabilização do leito. Assim como na figura anterior, a ordenada que expressa a concentração volumétrica de sólidos foi invertida para facilitar a compreensão dos resultados, considerando que a variação da posição em  $Z$  ocorre de cima para baixo.

Figura 4.32 – Monitoramento mais ao fundo do sedimento nas posições de  $Z = 12$  cm; 10 cm; 8 cm; 6 cm; 4 cm e 2 cm.



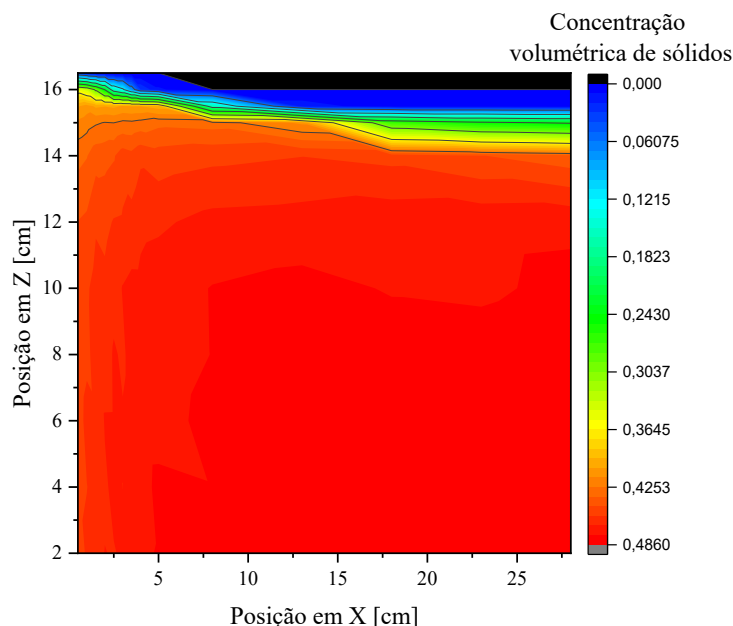
Fonte: Elaborado pela autora.

O objetivo principal dessa análise é visualizar os resultados de forma geral. Observa-se que, para todas as posições, a concentração de sólidos parte de aproximadamente 45% próximo à parede quente. À medida que se afasta dessa parede, os valores de concentração aumentam para cerca de 48%. Isso indica um comportamento oposto em comparação com as posições mais a superfície do leito.

Portanto, nas regiões mais profundas do sedimento e próximas à parede quente, as concentrações de sólidos são menores, ocorrendo uma expansão dos sólidos nessas áreas. Por outro lado, nas camadas mais superficiais, observa-se uma concentração maior de sólidos próxima à mesma parede, explicada pela expansão ocorrida nas regiões mais profundas.

Outra abordagem de análise é apresentada pelo gráfico de superfície de contorno, conforme ilustrado na Figura 4.33. Nesta representação, dados tridimensionais XYZ são plotados para proporcionar uma visualização bidimensional em uma superfície de contorno. Foi plotado posição em Z por posição em X, sendo que as superfícies ilustram os valores de concentração de sólidos. As superfícies em azul e vermelho representam os menores e maiores valores de concentração, respectivamente.

Figura 4.33 – Gráfico de superfície de contorno.



Fonte: Elaborado pela autora.

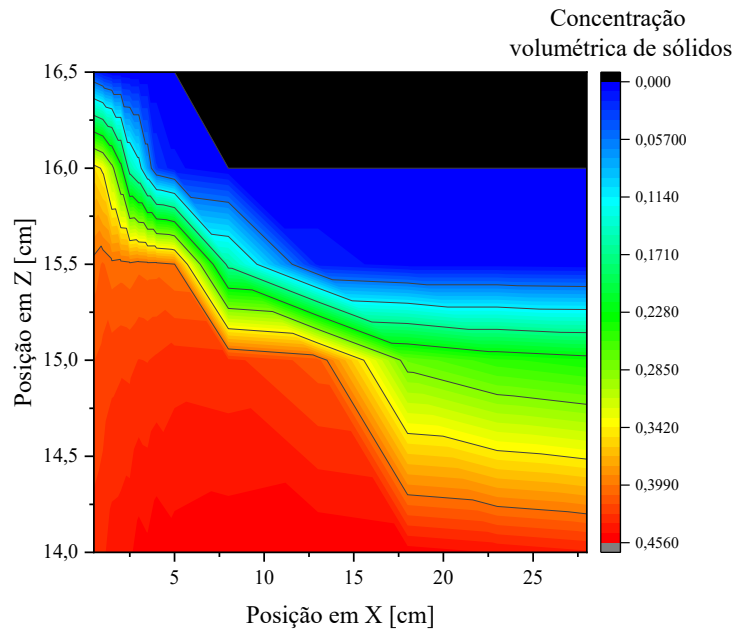
É evidente a presença maior de sólidos na superfície próxima à parede quente, enquanto a presença desses sólidos é praticamente ausente próxima à parede fria.

Além disso, o gráfico permite analisar camadas de cores de cima para baixo e da esquerda para a direita, revelando de forma clara um sedimento mais compactado nas regiões

mais profundas, próximas à parede fria, e menos compactado, com concentrações menores, próximo à parede quente.

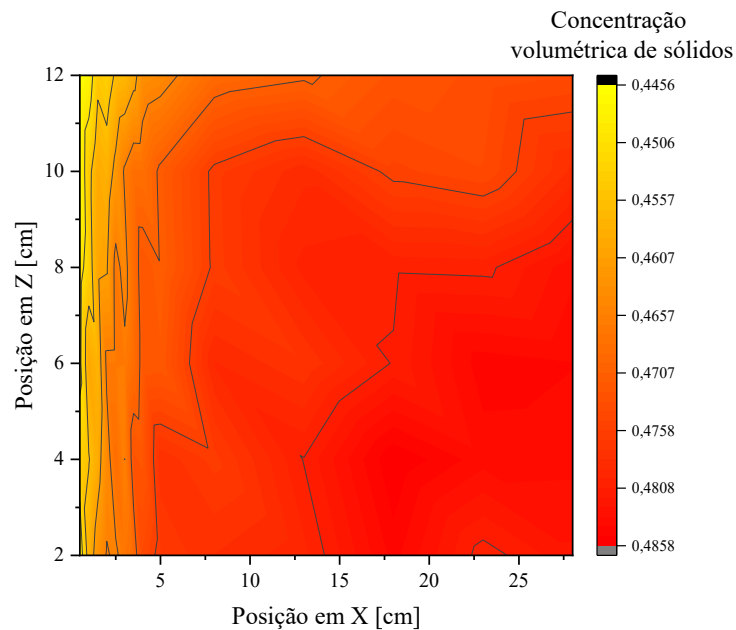
Ainda com o objetivo de elucidar os resultados, foram plotadas as superfícies de contorno de forma separada, a Figura 4.34 representa as concentrações mais a superfície do sedimento e a Figura 4.35 as concentrações das regiões mais profundas.

Figura 4.34 – Gráfico de superfície de contorno nas regiões superiores do sedimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

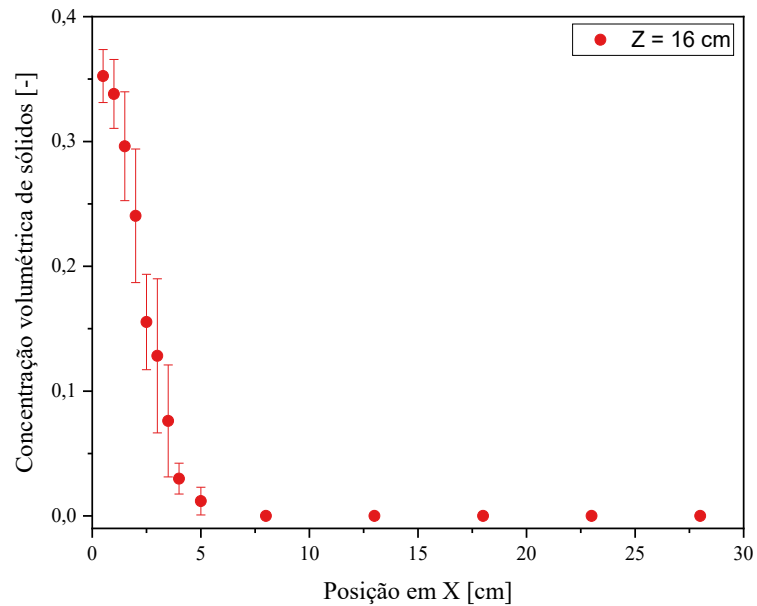
Figura 4.35 – Gráfico de superfície de contorno nas regiões inferiores do sedimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, os pontos mais representativos foram individualmente plotados. O monitoramento da posição em  $Z = 16$  cm ilustra a variação na concentração de sólidos em função da posição em  $X$ , como mostrado na Figura 4.36.

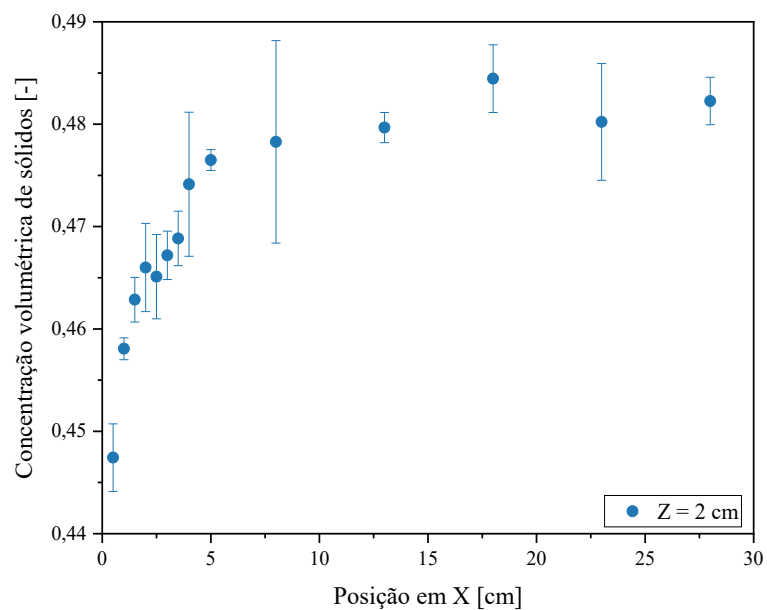
Figura 4.36 – Monitoramento em  $Z = 16$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

E o monitoramento da posição em  $Z = 2$  cm, em que representa o monitoramento das regiões mais profundas do sedimento, como mostrado na Figura 4.37.

Figura 4.37 – Monitoramento em  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise abrangente dos gráficos e resultados confirmam que a quantidade de sólidos presentes na superfície próximo a parede quente, como pode ser visto na Figura 4.36, é resultado da expansão ocorrida nas regiões mais profundas, como pode ser visto na Figura 4.37, demonstrando de forma clara a influência da temperatura na compactação dos sólidos. Independentemente de o fluido estar completamente aquecido ou apenas receber calor de uma fonte externa, essa condição afetará o comportamento dos sólidos presentes no fluido.

Diversos elementos podem justificar os consideráveis desvios-padrão evidenciados nos resultados. Entre esses fatores, merece destaque a dificuldade em se trabalhar com sedimentação de partículas em água. Além disso, deve se considerar as limitações do equipamento, uma vez que é uma tecnologia nova em fase de testes, como demonstrado pelos experimentos aqui apresentados. Além disso, trata-se de um equipamento que requer um grande volume de suspensão, 10 litros em um reservatório bidimensional com gradiente térmico, e, devido à sua natureza, cada teste pode resultar em comportamentos distintos, o que naturalmente gera variações nos resultados.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Neste capítulo será apresentado as principais conclusões obtidas através de todo o estudo desenvolvido neste trabalho, desde a construção do reservatório de testes até os monitoramentos feitos com influência térmica. Além disso, será proposto algumas sugestões para trabalhos futuros.

#### 5.1 Considerações finais

- O reservatório de testes desenhado e construído para o desenvolvimento dos estudos propostos demonstrou a possibilidade de se fazer o monitoramento da concentração de sólidos concomitantemente com o aquecimento da suspensão.
- A técnica de atenuação de raios de gama se mostrou eficaz na obtenção da concentração volumétrica de sólidos em fluidos submetidos a aquecimento.
- A câmera térmica *FLIR E8xt Wifi* demonstrou ser uma ótima ferramenta para monitoramento da temperatura das suspensões e da condução de calor advinda de uma fonte quente.
- O teste de hipótese  $t$  de *Student* permitiu concluir que, ao utilizar água e carbonato de cálcio, não há necessidade de produzir novas suspensões para as réplicas dos testes.
- O teste dinâmico revelou que suspensões a temperaturas mais elevadas sedimentam mais rapidamente do que aquelas a temperaturas mais baixas. Essa observação corrobora as conclusões descritas na literatura sobre o impacto da temperatura na velocidade de sedimentação.
- O teste estático, realizado para investigar a influência da temperatura na compactação do sedimento, demonstrou que suspensões aquecidas geram sedimentos mais expandidos. Isso significa que, em comparação com suspensões à temperatura ambiente, há uma menor concentração de sólidos em áreas mais profundas do leito. Além disso, o aumento da expansão do leito resulta em um crescimento do seu volume, indicando um leito mais elevado.
- O outro teste estático, que analisou a influência do calor proveniente de uma parede quente, revelou resultados consistentes e semelhantes aos observados no teste de compactação do sedimento. Próximo à parede quente, nas áreas mais profundas do reservatório, a concentração de sólidos foi menor, levando a um sedimento mais



expandido e, conseqüentemente, mais elevado. Em contraste, nas regiões adjacentes à parede fria, a concentração de sólidos foi maior, resultando em um leito mais compactado e sem a presença de sólidos na superfície, devido à não ocorrência da expansão do leito.

- Apesar do estudo ter sido feito com um fluido newtoniano, ele traz resultados interessantes relacionados ao processo de perfuração de poços ultraprofundos, sendo um grande avanço para trabalhos mais voltados ao tema.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Continuar os estudos do comportamento dos sólidos em suspensões aquecidas, para compreender se existe a ocorrência de outros fenômenos além da expansão do leito.
- Estudar o comportamento de suspensões com características pseudoplásticas, similar ao fluido de perfuração, influenciados por um gradiente térmico.
- Estudar o comportamento de fluidos reais utilizados na etapa de perfuração de poços de petróleo, influenciados por um gradiente térmico.
- Estudar o comportamento de suspensões utilizando diferentes sólidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADORJÁN, L. A. A theory of sediment compression. In: 11TH INTERNATIONAL MINERAL CONGRESS, 1975.

ALADE, Olalekan; MAHMOUD, Mohamed; AL-NIKHLI, Ayman. Rheological studies and numerical investigation of barite sag potential of drilling fluids with thermochemical fluid additive using computational fluid dynamics (CFD) - Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 220, Part A, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111179>

ALCOFRA, Elisa L. M. Aumento de pressão de fluido confinado no anular de poços de petróleo. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro, PUC-RJ, 2014.

AROUCA, Fábio O. Obtenção Experimental das Equações Constitutivas para o Espessamento e Filtração Utilizando Técnica de Atenuação de Radiações de Altas Energias. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, UFU, 2003.

AROUCA, Fábio O.; DAMASCENO, João J. R. Analysis of the behavior of solid-liquid systems based on the shape, size distribution, and density of the solid particles. FIFTH INTERNATIONAL LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY - PTECH, 2005a.  
<https://doi.org/10.4028/0-87849-423-5.35>

AROUCA, Fábio O.; DAMASCENO, João J. R. Concentration profiles and iso-concentration curves for batch settling using the gamma rays attenuation technique. FIFTH INTERNATIONAL LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY - PTECH, 2005b.  
<https://doi.org/10.4028/0-87849-423-5.29>

AROUCA, Fábio O. Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada. Tese (Doutorado), Uberlândia, UFU, 2007.

CHRISTIANSEN, F. G.; WHITEHEAD D.; BOJESSEN-KOEFOED J. A.; BOSERUP J.; CHRISTIANSEN O. C. A. Drilling history of Greenland – Exploration for minerals and petroleum, and scientific projects, The Extractive Industries and Society, v. 17, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101417>.

COMINGS, E. W. Thickening calcium carbonate slurries, Ind. Eng. Chem. Vol. 32 (5), p. 663-667, 1940.  
<https://doi.org/10.1021/ie50365a016>

CONCHA, F. J.; BASCUR, O. Phenomenological model of sedimentation. XII INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 1977.

CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. Modification of the Kynch theory of sedimentation. *AIChE Journal*, p. 312–315, 1987.

CONCHA, F.; BURGER R. A century of research in sedimentation and thickening. *KONA* n. 20, 2002.

DAMASCENO, João J. R.; HENRIQUE, H. M.; MASSARANI, G. Um modelo para a sedimentação não estacionária. XIX Encontro Sobre Escoamento Em Meios Porosos, 1991.

DAMASCENO, João J. R. Uma Contribuição ao Estudo do Espessamento Contínuo. Tese (Doutorado), Rio de Janeiro, UFRJ, 1992.

d'ÁVILA, J. S. Uma análise da teoria de Kynch para a sedimentação. *Revista Brasileira de Tecnologia*, p. 447-453, 1976.

d'ÁVILA, J. S.; SAMPAIO, R. Equações de estado para a pressão no sólido. II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 1977a.

d'ÁVILA, J. S.; SAMPAIO, R. Projeto de um sedimentador usando as equações da continuidade e do movimento. III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MECÂNICA DOS FLUIDOS, 1977b.

d'ÁVILA, J. S.; SAMPAIO, R. Influência de equações de estado para a pressão no sólido no projeto de um sedimentador contínuo. V ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, v. 3, p. 1-11, 1977c.

DAVOODI, S.; AL-SHARGABI, M.; WOOD, D. A.; RUKAVISHNIKOV, V. S.; MINAEV, K. M. Synthetic polymers: A review of applications in drilling fluids, *Petroleum Science*, v. 21, p. 475-518, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.015>.

FAGUNDES, Flávia M. Estudo da Estabilidade da Suspensão Constituinte do Fluido Br-Mul/Petrobras. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, UFU, 2015.

FATTAH, K. A.; LASHIN, A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. *Journal of African Earth Sciences*, v. 117, p. 345-357, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.02.003>

FERRAZ, I.; BORGES, F. R. O.; CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M. Efeito da temperatura e do tempo de sedimentação prévia no processo de filtração de suspensões não-newtonianas. VIII Reunião Anual de Iniciação Científica (RAIC 2020) e II Reunião Anual de Iniciação em Inovação e Desenvolvimento Tecnológico (RAIDTec 2020) – UFRRJ. UFRRJ, 2020.

FITCH, E. B. Current theory and thickener design. *Ind. Eng. Chem.*, v. 58(10), p. 18-28, 1966.  
<https://doi.org/10.1021/ie50682a006>

FREITAS, Suely P. Estudo da sedimentação com segregação usando técnicas de atenuação de raios gama. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro, UFRJ, 1980.

GARDNER, R. P.; ELY JR, R. L. Radioisotope measurement application in engineering. Reinhold Publishing Corporation, New York, EUA, 1967.

HAMACHER, M. E. Um Estudo da Sedimentação Utilizando o Método da Atenuação de Raios Gama. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro, UFRJ, 1978.

HARRIS, C. C.; SOMASUNDARAN, P.; JENSEN, R. R. Sedimentation of compressible materials: Analysis of batch sedimentation curve. Powder Technology, v. 11, p. 75- 84, 1975. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(75\)80026-X](https://doi.org/10.1016/0032-5910(75)80026-X)

Manual FLIR E8 Wifi. 2024. Acesso em: < <https://www.flir.com.br/support/products/e8-wifi/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions#Documents> >.

MKPENIE, Victor N.; EBONG, Goddy; ABASIEKONG, Beauty. Studies on the effect of temperature on the sedimentation of insoluble metal carbonates. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, v. 11, n. 4, p. 67-69, 2007.

MOREIRA, Bruno A. Estudo da sedimentação em suspensões de fluido com características reológicas pseudoplásticas. Tese (Doutorado), Uberlândia, UFU, 2014.

MOTTA, Cíntia D.; PORFÍRIO, Livia M.; GOMES, Vanessa L. A. Estudo experimental do efeito da temperatura e da velocidade de sedimentação das emulsões. Ciências exatas e tecnológicas, Maceió, v. 4, n. 1, p. 129-136, 2017.

NADELLA, Mahith; SHARMA, Ramesh; CHELLAM, Shankararaman. Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric coagulant for reuse in hydraulic fracturing: Temperature effects on aggregation and high-rate sedimentation, Water Research, v. 170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115330>

NASCIMENTO, Renalle C. A. de M.; MAGALHÃES, Juliano; PEREIRA, Eugênio; AMORIM, Luciana V. Degradação térmica de fluidos de perfuração argilosos aditivados com polímeros e lubrificante. 2013. Acesso em: 08/06/2023. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200009>

NUNES, Janaina F. Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões floculentas. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, UFU, 2008.

OLIVEIRA, Kamila de Sá; SILVA, Diego C.; MORAIS, Victor H. R.; FRANÇA, Luis F. Avaliação preliminar dos efeitos térmicos na sedimentação de adensante em fluidos de perfuração. IX Encontro Nacional de Construção de Poços de Petróleo e Gás - ENAHPE 2023. G - 154.

PATTILLO, P. D.; COCALES, B. W.; MOREY, S. C. Analysis of an Annular Pressure Buildup Failure During Drill Ahead" SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 20-21 June, Galveston, Texas, USA. Paper no. 90151. 2004. <https://doi.org/10.2523/89775-MS>

PETROBRÁS, Tupi: Conheça 8 Curiosidades Sobre O Campo Mais Produtivo Do Pré-Sal. 2024. Disponível em: <https://encr.pw/bltsj>. Acesso em: 15/04/2024

PETROBRÁS, Conheça O Monai, O Poço De Petróleo Mais Profundo Do Brasil. 2024. Disponível em: <https://encr.pw/Oklbk>. Acesso em: 15/04/2024

PIRES, Luiz F. Soil analysis using nuclear techniques: A literature review of the gamma ray attenuation method, Soil and Tillage Research, v. 184, p. 216-234, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.015>

RAVEN, P. H.; JOHNSON, G. B.; MASON, K. A.; LOSOS, J. B.; SINGER, S. R. The nature of molecules and properties of water. In Biology (10th ed., AP ed., pp. 17-30), 2014. New York, NY: McGraw-Hill.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. Projeto de Poços de Petróleo - Geopressões e Assentamento de Colunas e Revestimentos, 2ª Edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

ROCHA, R. R. Estudo teórico-experimental da sedimentação em batelada: Monitoramento e modelagem de perfis de concentração de sólidos e análise de equações constitutivas. Dissertação (Mestrado), Seropédica, UFRRJ, 2018.

RUIZ, M. I.; FERNANDES, R. S.; DAMASCENO, J. J. R. Mapeamento de concentração de sólidos em função da posição e do tempo para ensaios de sedimentação em batelada. XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1997a.

RUIZ, M. I.; FERNANDES, R. S.; DAMASCENO, J. J. R. Uma análise crítica sobre o uso da técnica de atenuação de raios gama na obtenção da granulometria de sólidos. XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1997b.

RUIZ, M. I. Estudo da Sedimentação em Batelada com o Auxílio da Técnica de Atenuação de Raios Gama. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, UFU, 2000.

SANTOS, N. B. C.; FAGUNDES, F. M.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. Sedimentation of solids in drilling fluids used in oil well drilling operations. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 162, p. 137-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.026>

SCALLE, P. Drilling Fluid Engineering. 2011

SHANNON, P. T.; STRUPE, E.; TORY, E. M. Batch and continuous thickening. Ind. Eng. Chem. Fundamentals, N.9, p. 422-427, 1970.  
<https://doi.org/10.1021/i160035a019>

SILVA, A. O. M., Perfuração e completção de poços HPHT. Monografia (Graduação), Rio de Janeiro, UFF, 2016.

TANG, Xiaoyu; HE, Shihao; QIU, Facheng; QIN, Xianfeng; QUAN, Xuejun; ZHANG, Xingran; LI, Wensheng. Intensification of solid-liquid separation by thermal sedimentation in pressure oxidative leaching process of chromite, Minerals Engineering, v. 164, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106825>

THOMAS, J. E. et al. Fundamentos de engenharia de petróleo. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

TILLER, Frank M. Revision of kynch sedimentation theory. AIChE Journal, v. 27, p. p. 823-829, 1981.  
<https://doi.org/10.1002/aic.690270517>

VARGO, R. F., PAYNE, M., FAUL, R., LEBLANC, J., AND GRIFFITH, J. E., Practical and successful prevention of annular pressure buildup on the Marlin Project. SPE Annual Technical Conference. San Antonio, Texas. Paper no. 77473. 2002.  
<https://doi.org/10.2118/77473-MS>

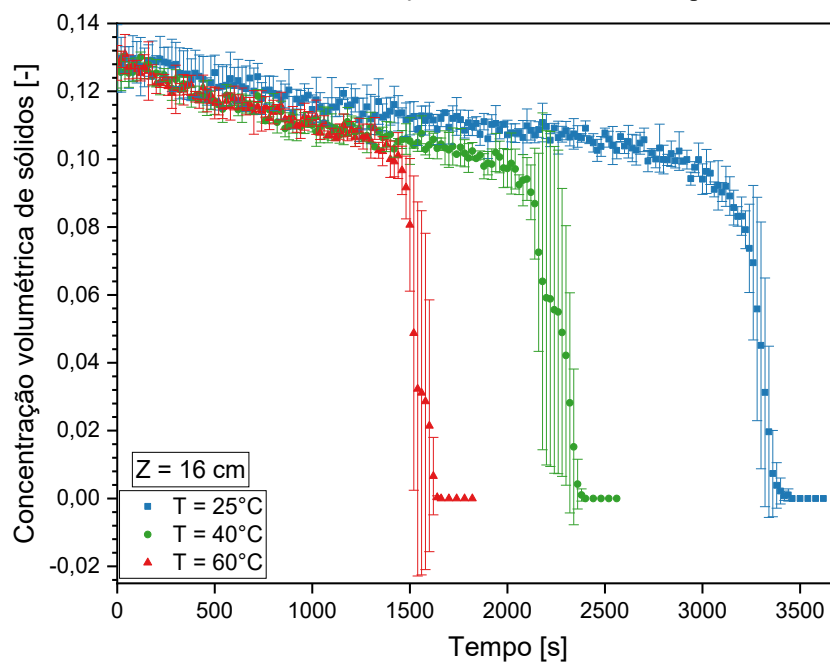
## Apêndice A

Este apêndice apresenta os resultados do teste dinâmico com seus respectivos desvios-padrão. Observa-se a presença de valores elevados de desvios-padrão, os quais podem ser atribuídos a diversas causas. Entre elas, destaca-se a complexidade inerente à mistura de água e carbonato de cálcio, que pode levar a uma distribuição não uniforme das partículas na suspensão, resultando em variabilidade nos resultados.

Outra possível fonte de desvio é a preparação da suspensão em si, que requer cuidados específicos para garantir a homogeneidade. Pequenas variações no processo de mistura podem causar diferenças significativas na concentração do carbonato de cálcio, influenciando diretamente os resultados dos testes. Adicionalmente, os efeitos térmicos, que são difíceis de controlar com precisão, podem alterar a solubilidade do carbonato de cálcio na água, introduzindo mais uma variável de incerteza nos experimentos.

A Figura A.1 representa o monitoramento da concentração de sólidos na posição  $Z = 16$  cm do teste dinâmico.

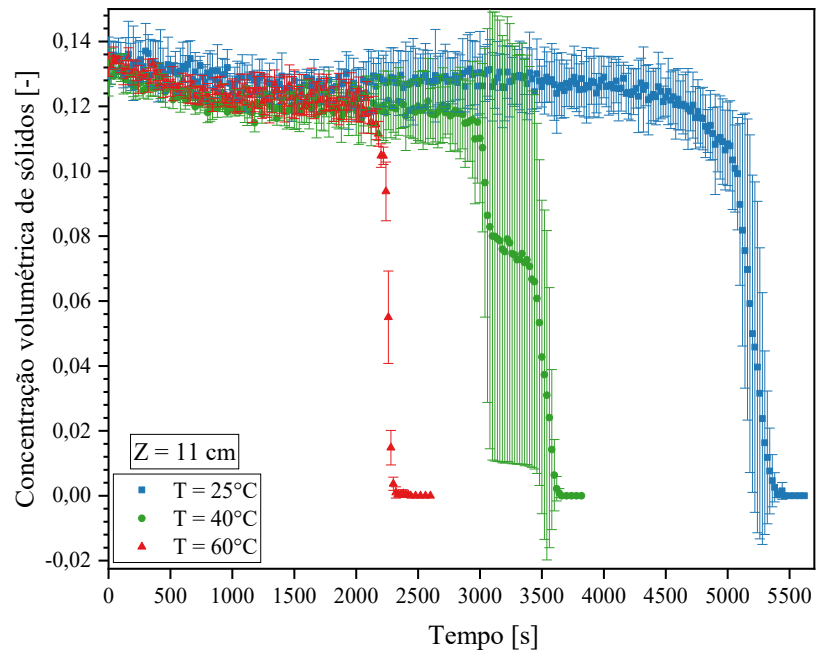
Figura A.1 – Monitoramento da concentração de sólidos com desvio padrão em  $Z = 16$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura A.2 representa o monitoramento da concentração de sólidos na posição  $Z = 11$  cm do teste dinâmico.

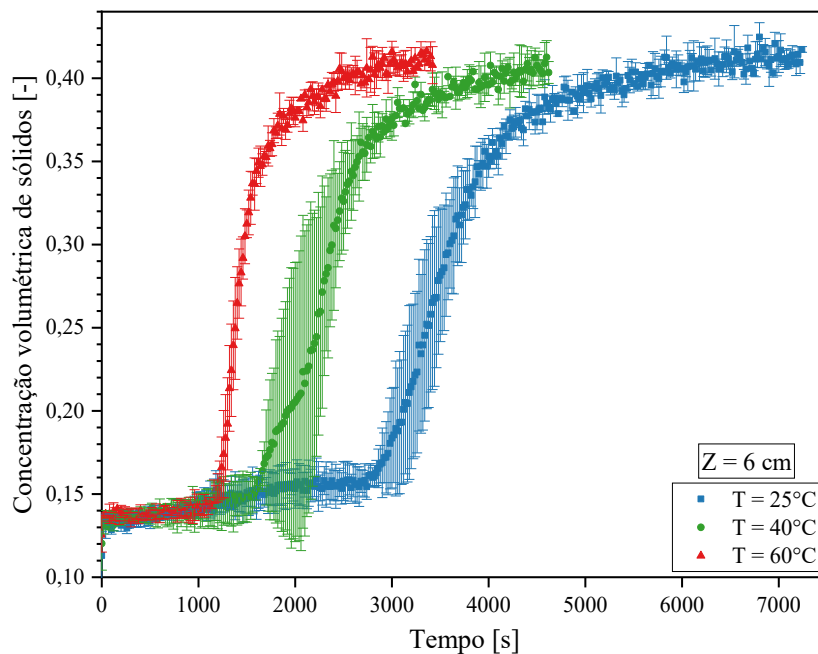
Figura A.2 – Monitoramento da concentração de sólidos com desvio padrão em  $Z = 11$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura A.3 representa o monitoramento da concentração de sólidos na posição  $Z = 6$  cm do teste dinâmico.

Figura A.3 – Monitoramento da concentração de sólidos com desvio padrão em  $Z = 6$  cm.

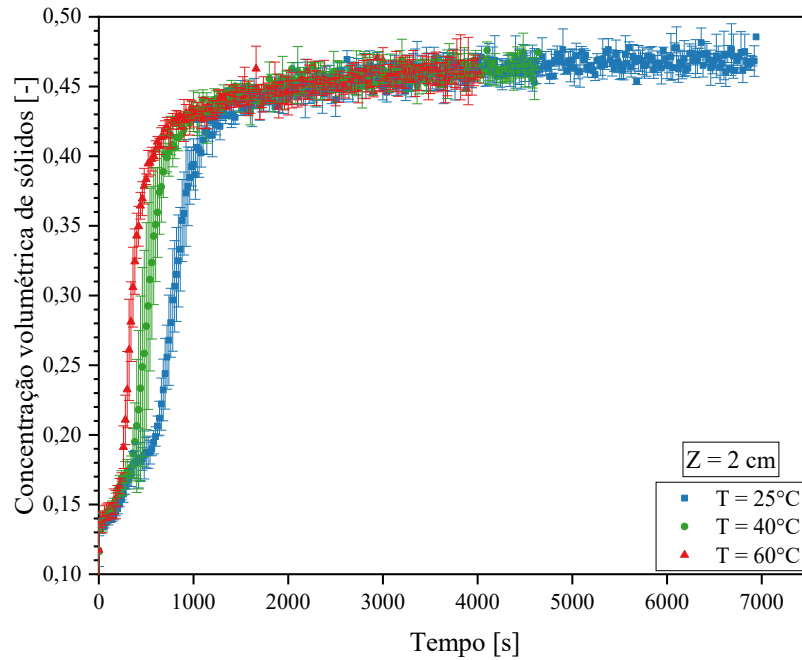


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura A.4 representa o monitoramento da concentração de sólidos na posição  $Z = 2$  cm do teste dinâmico.



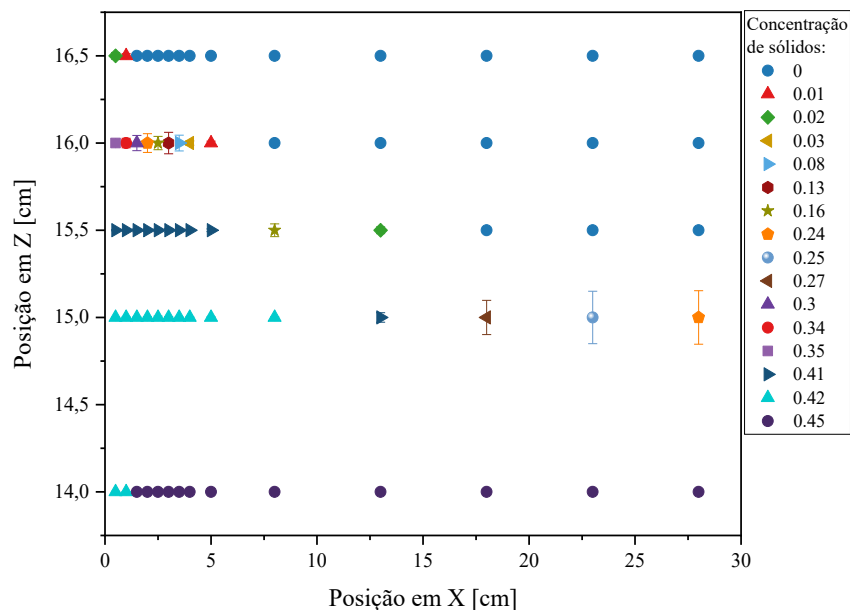
Figura A.4 – Monitoramento da concentração de sólidos com desvio padrão em  $Z = 2$  cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, esse apêndice apresenta também os resultados do teste com gradiente térmico por outra perspectiva, para uma interpretação mais detalhada dos resultados. Na Figura A.5, os dados são dispostos conforme a disposição do reservatório de testes, onde o eixo  $y$  representa a posição em  $Z$  e o eixo  $x$  a posição em  $X$ . Este gráfico, especificamente, retrata os valores de concentração de sólidos na superfície do sedimento.

Figura A.5 – Monitoramento da superfície do sedimento nas posições de  $Z = 16,5$  cm; 16 cm; 15,5 cm; 15 cm; e 14 cm, com representação do reservatório de testes.

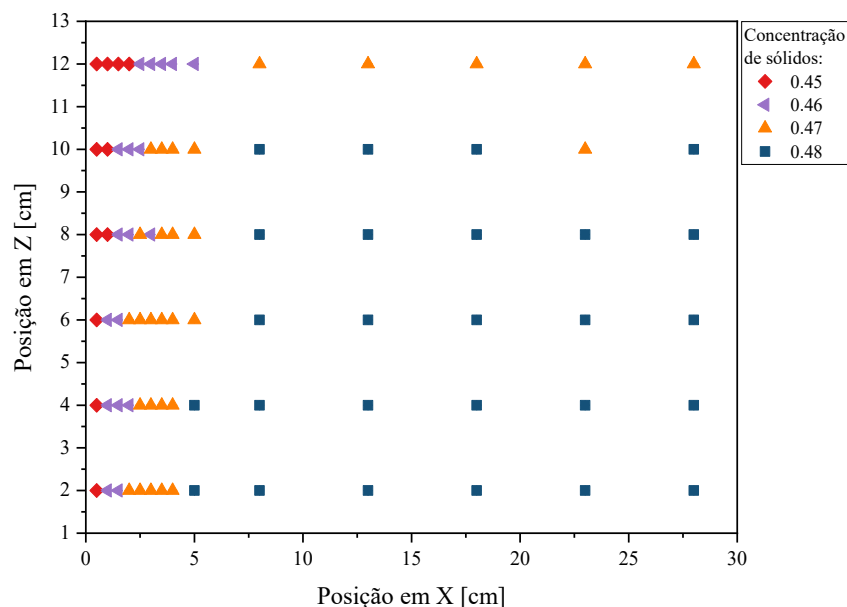


Fonte: Elaborado pela autora.

Essa representação permite uma visualização mais nítida dos valores de concentração em cada ponto analisado. Por exemplo, em  $Z = 16,5$  cm, observa-se que é possível encontrar 2% de sólidos próximo à parede quente, diminuindo para 1% ao se afastar dessa parede e chegando a zero, indicando uma clarificação do líquido. Já em  $Z = 16$  cm, os valores são ainda mais expressivos, iniciando em 35%, reduzindo gradualmente para 34%, 30%, 24%, 16%, 13%, 8%, 3%, 1% e, finalmente, zero. Isso evidencia uma concentração de sólidos mais elevada próxima à parede quente, uma característica ausente próxima à parede fria.

Da mesma forma, a Figura A.6 foi concebida para uma interpretação mais detalhada dos dados, desta vez representando as posições mais profundas no reservatório de testes. É evidente a menor presença de sólidos próxima à parede quente, com um aumento gradual em direção à parede fria. Isso mais uma vez confirma como o calor influencia a formação do sedimento, mesmo em suspensões que não foram previamente aquecidas, sendo a parede aquecida a única fonte de calor aqui presente.

Figura A.6 – Monitoramento mais ao fundo do sedimento nas posições de  $Z = 12$  cm; 10 cm; 8 cm; 6 cm; 4 cm; e 2 cm, com representação do reservatório de testes.



Fonte: Elaborado pela autora.