

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

HELIO DE OLIVEIRA JUNIOR

ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO E ACOMODAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SISTEMAS
SUBMETIDOS A GRADIENTES DE TEMPERATURAS

Uberlândia - MG

2025

HELIO DE OLIVEIRA JUNIOR

**ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO E ACOMODAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SISTEMAS
SUBMETIDOS A GRADIENTES DE TEMPERATURAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
Doutor em Engenharia Química.

Área de concentração: Processos de separação

Orientador: Fábio de Oliveira Arouca

Coorientador: João Jorge Ribeiro Damasceno

Uberlândia - MG

2025

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

| | |
|--|--|
| O48 | Oliveira Junior, Hélio de, 1986- |
| 2025 | ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO E ACOMODAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SISTEMAS SUBMETIDOS A GRADIENTES DE TEMPERATURAS [recurso eletrônico] / Hélio de Oliveira Junior. - 2025. |
| <p>Orientador: Fábio de Oliveira Arouca. Coorientador: João Jorge Ribeiro Damasceno. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.369 Inclui bibliografia.</p> | |
| <p>1. Engenharia química. I. Arouca, Fábio de Oliveira,1977-, (Orient.). II. Damasceno, João Jorge Ribeiro,1957-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.</p> | |
| CDU: 66.0 | |

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: | Tese de Doutorado, 9/2025, PPGEQ | | | | |
| Data: | 24 de julho de 2025 | Hora de início: | 15:00 | Hora de encerramento: | 17:40 |
| Matrícula do Discente: | 12123EQU003 | | | | |
| Nome do Discente: | Helio de Oliveira Junior | | | | |
| Título do Trabalho: | Estudo da sedimentação e acomodação de partículas em sistemas submetidos 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: Flávia Marques Fagundes - PPD/FEQUI/UFU e Professores Doutores: Claudia Miriam Scheid Pereira - DEQ/UFRRJ, Mônica Lopes Aguiar - DEQ/UFSCar, Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU, Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, João Jorge Ribeiro Damasceno - PPGEQ/UFU, coorientador, e Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do 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 o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final considerando o candidato:

Aprovado

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

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 24/07/2025, às 17:44, 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 24/07/2025, às 17:44, 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 **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/07/2025, às 17:44, 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 24/07/2025, às 17:45, 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, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/07/2025, às 17:45, 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 **Claudia Miriam Scheid Pereira, Usuário Externo**, em 24/07/2025, às 17:45, 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 **Mônica Lopes Aguiar, Usuário Externo**, em 24/07/2025, às 17:46, 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_verificar&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6536221** e o código CRC **B65EC8B4**.

*Dedico este trabalho a minha esposa Juliana
e aos meus filhos Isabelle e Gabriel*

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão a Deus por tudo em minha vida. Neste momento especial, Ele tem me guiado e colocado pessoas ao meu lado que muito contribuíram comigo em meio às minhas dificuldades.

Agradeço aos meus pais, Hélio de Oliveira e Joscelina F. A. Oliveira, pelo apoio incondicional em todos os meus projetos. Aos meus irmãos, Ana Cristina de Oliveira e Bruno de Oliveira, pelo amor constante e por estarem sempre presentes.

Aos meus amigos de laboratório, Gabriel, Raquel, Flávia e Ana, quantas conversas boas compartilhamos! A colaboração de vocês foi essencial para a realização deste trabalho.

Sou imensamente grato ao meu orientador, Professor Fábio Arouca. Nada disso seria possível sem sua orientação. Tornou-se um verdadeiro amigo, sempre paciente, compreensivo e sincero. Suas orientações me transformaram tanto profissional quanto pessoalmente. Minha mais sincera gratidão.

Sinto orgulho em ter como coorientador o grande Professor Damasceno, cuja sabedoria admiro e almejo alcançar um dia.

Agradeço a todos os professores do PPGEQ/UFU, sempre gentis e dispostos a instruir em qualquer circunstância.

E, por fim, meu agradecimento especial aos parceiros FAPEMIG, CAPES, CNPq e à PETROBRAS pelo apoio financeiro que tornou este trabalho possível.

“Aqueles que passam por nós não vão sós.
Deixam um pouco de si e levam um pouco de nós.”

(O Pequeno Príncipe, Antoine de Saint-

Exupéry, 1943)

RESUMO

A sedimentação constitui um processo amplamente empregado na indústria, abrangendo distintos setores. Dentre os fatores que influenciam sua eficiência, a temperatura exerce papel determinante na separação sólido-líquido. Um exemplo notável ocorre na perfuração de poços de petróleo, em que o fluido de perfuração é submetido ao aquecimento decorrente das condições geotérmicas, com incremento de temperatura à medida que se aprofunda o poço. Durante interrupções na circulação do fluido de perfuração, partículas em suspensão tendem a sedimentar, o que pode comprometer a integridade do poço. Nesse contexto, este trabalho investigou o comportamento da sedimentação e da acomodação de partículas em sistemas sujeitos a diferentes condições térmicas, com ênfase na formação e na estrutura do leito sedimentado. O objetivo principal foi avaliar o comportamento do leito sedimentado em função da temperatura de sedimentação, considerando tanto condições isotérmicas quanto cenários com gradientes térmicos, em sistemas contendo apenas água, bem como em fluidos mais complexos, como os fluidos de perfuração. Para isso, foram preparados sistemas contendo suspensões de carbonato de cálcio em água e fluidos de perfuração com diferentes concentrações de sólidos. As análises envolveram ensaios de sedimentação em condições isotérmicas e com gradientes de temperatura horizontais e verticais. A determinação do perfil de concentração de sólidos foi realizada por meio da técnica de atenuação de raios gama, método não destrutivo que permite avaliar a distribuição de concentração dos sólidos no leito sedimentado. Os resultados indicam que o aumento da temperatura acelera o processo de sedimentação, reduz a viscosidade do fluido e altera a estrutura do leito sedimentado, promovendo a expansão do sedimento. Em sistemas com gradiente térmico, observou-se a migração de partículas em direção às regiões aquecidas e a formação de leitos assimétricos com variações de concentração ao longo do eixo horizontal. Em fluidos de perfuração, a temperatura influenciou diretamente a reologia e a resistência à sedimentação, sendo possível observar diferenças significativa entre as amostras analisadas. A pesquisa contribui para o entendimento dos efeitos térmicos na sedimentação, fornecendo subsídios para o projeto e a operação de sistemas industriais nos quais as variações de temperatura são relevantes, como na perfuração de poços de petróleo.

Palavras-chave: sedimentação térmica; gradiente de temperatura; técnica de atenuação de raios gama; sedimentação isotérmica; sedimento sob aquecimento.

ABSTRACT

Sedimentation is a widely used process in industry, encompassing various sectors. Among the factors that influence its efficiency, temperature plays a decisive role in solid-liquid separation. A notable example occurs in oil well drilling, where the drilling fluid is subjected to heating due to geothermal conditions, with a temperature increase as the well depth increases. During interruptions in drilling fluid circulation, suspended particles tend to settle, which can compromise well integrity. In this context, this work investigated the behavior of sedimentation and particle arrangement in systems subjected to different thermal conditions, with emphasis on the formation and structure of the sediment bed. The main objective was to evaluate the behavior of the sediment bed as a function of the sedimentation temperature, considering both isothermal conditions and scenarios with thermal gradients, in systems containing only water as well as more complex fluids, such as drilling fluids. For this purpose, systems containing calcium carbonate suspensions in water and drilling fluids with different solid concentrations were prepared. The analyses included sedimentation tests under isothermal conditions and with horizontal and vertical temperature gradients. The solid concentration profile was determined using the gamma-ray attenuation technique, a non-destructive method that allows the assessment of the solids concentration distribution in the sediment bed. The results indicate that increasing the temperature accelerates the sedimentation process, reduces fluid viscosity, and alters the structure of the sediment bed by promoting sediment expansion. In systems with thermal gradients, particle migration towards heated regions and the formation of asymmetric beds with concentration variations along the horizontal axis were observed. In drilling fluids, temperature directly influenced rheology and resistance to sedimentation, with significant differences observed between the samples analyzed. This research contributes to the understanding of thermal effects on sedimentation, providing insights for the design and operation of industrial systems where temperature variations are relevant, such as in oil well drilling.

Keywords: thermal sedimentation; temperature gradient; gamma-ray attenuation technique; isothermal sedimentation; heated sediment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Sedimentação em duas dimensões a) isotérmica b) com gradiente de temperatura. | 3 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.1 – Sedimentação de suspensão concentrada (a) sedimentação tipo 1 (b) sedimentação tipo 2. | 7 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.2 – Efeito da concentração na sedimentação de suspensões de carbonato de cálcio. | 8 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.3 – Efeito da concentração na taxa de sedimentação mássica de suspensões de carbonato de cálcio. | 8 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.4 – Curva de equi-concentração prevista pela teoria de Kynch. | 10 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.5 – Processo de sedimentação, (a) sedimento incompressível e (b) sedimento compressível. | 10 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.6 – Conjunto do sistema de atenuação de raios gama (TARG). | 15 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.7 – Balanço de forças estáticas no sedimento. | 17 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.8 – Queda da interface descendente de suspensões contendo cromato de sódio em temperaturas variadas. | 21 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.9 – Relação entre viscosidade aparente e velocidade de sedimentação. | 21 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.10 – Cimentação de poços de petróleo em águas profundas, a) poço de petróleo com anular fechado sem alívio de pressão anular, b) poço de petróleo com anular aberto para o alívio de pressão anular. | 23 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.11 – Deformação em um fluido. | 24 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.12 – Vários tipos de comportamento de fluxo. | 26 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.13 – Comportamento de fluido pseudoplástico com tensão limite de escoamento. | 27 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.14 – Curva de fluxo típica de fluidos tixotrópico. | 28 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 2.15 – Interação de partículas em dispersões tixotrópicas. | 29 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.1 – Distribuição da fração volumétrica do carbonato de cálcio. | 34 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.2 – Fração volumétrica acumulada do carbonato de cálcio. | 35 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.3 – Imagem do material sólidos no microscópio eletrônico de varredura. | 36 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.4 – Proveta cilíndrica de vidro utilizada nas leituras unidimensionais com TARG. | 37 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.5 – Recipientes de teste utilizados nos ensaios bidimensionais, a) recipiente com aquecimento lateral, b) recipiente com aquecimento na base. | 38 |
| <hr style="border-top: 1px dotted black;"/> | |
| Figura 3.6 – Conjunto fonte, detector e suporte, fonte radioativa ^{241}Am a esquerda, detector com fotomultiplicador a direita, suporte para recipientes contendo a suspensão no centro.... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7 – Curvas de calibração dos recipientes de teste, (a) cilíndrico (provetas), (b) retangular com aquecimento lateral, (c) retangular com aquecimento na base..... | 42 |
| Figura 3.8 – Provetas idênticas utilizadas nos testes de sedimentação isotérmica..... | 44 |
| Figura 3.9 – Estufa laboratorial com controle PID utilizada para o aquecimento e controle de temperatura..... | 45 |
| Figura 3.10 – Gráfico da altura da interface descendente em função do tempo – Teste preliminar de estabilização do sedimento. | 46 |
| Figura 3.11 – Provetas no interior da estufa contendo o sedimento da suspensão de carbonato de cálcio 15% v/v em água destilada..... | 48 |
| Figura 3.12 – Provetas de teste com fluidos de perfuração BrCarb 10 e BrCarb 11, a) provetas no interior da estufa, b) posição da interface descendente. | 49 |
| Figura 3.13 – Provetas de teste com fluidos de perfuração em temperatura ambiente a) BrCarb10, b) BrCarb11. | 50 |
| Figura 3.14 – Reômetros digitais, (a) reômetro Anton Paar MCR 300, (b) reômetro Anton Paar MCR 302e. | 51 |
| Figura 3.15 – Recipiente de teste com aquecimento lateral. | 55 |
| Figura 3.16 – Detalhes da recirculação do óleo térmico. | 56 |
| Figura 3.17 – Câmera térmica E8 – FLIR. | 56 |
| Figura 3.18 – Malha de leitura das concentrações..... | 57 |
| Figura 3.19 – Descrição das temperaturas no recipiente de teste..... | 58 |
| Figura 3.20 – Recipiente de teste com aquecimento na base. | 60 |
| Figura 3.21 – Painel de controle de temperatura. | 61 |
| Figura 3.22 – Malha de leitura das concentrações..... | 62 |
| Figura 4.1 – Monitoramento da interface descendente da sedimentação de CaCO ₃ a 25 °C e 70 °C. | 63 |
| Figura 4.2 – Provetas no interior da estufa contendo o sedimento da suspensão de carbonato de cálcio 15% v/v em água destilada..... | 64 |
| Figura 4.3 – Altura do sedimento formado após 3 h para sedimentação a 25 °C, 70 °C e a após resfriamento de 70 °C para 25 °C. | 65 |
| Figura 4.4 – Concentração de sólidos para sedimentação a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C..... | 66 |
| Figura 4.5 - Concentração de sólidos para sedimentação a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C para altura adimensional. | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 – Pressão nos sólidos ao longo do sedimento formado em provetas a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento..... | 69 |
| Figura 4.7 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação para o teste B (aquecimento unilateral)..... | 71 |
| Figura 4.8 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação para o teste C (aquecimento bilateral)..... | 72 |
| Figura 4.9 – Altura do sedimento após resfriamento para os testes A, B e C. | 73 |
| Figura 4.10 – Imagem do sedimento para o teste B (aquecimento unilateral) após o resfriamento. | 74 |
| Figura 4.11 – Imagem do sedimento para o teste C (aquecimento bilateral) após o resfriamento. | 75 |
| Figura 4.12 – Regiões de estudo da concentração de sólidos, i – camadas profundas; ii – camadas intermediarias; iii – camadas superficiais do sedimento. | 76 |
| Figura 4.13 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 1,5$ e $3,5$ cm. | 76 |
| Figura 4.14 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 6$ e $8,5$ cm. | 77 |
| Figura 4.15 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 9,5$ cm e 10 cm. | 78 |
| Figura 4.16 – Concentração de sólidos do teste B para posições $x = 1,5$ e 21 e 35 cm. | 79 |
| Figura 4.17 – Pressão nos sólidos do teste B para as posições $x = 1,5$ e 21 e 35 cm. | 80 |
| Figura 4.18 - Concentração de sólidos para sedimentação no teste B para $x = 1,5$; 21 e 35 cm sendo altura adimensional. | 81 |
| Figura 4.19 - Velocidade de sedimentação em um recipiente bidimensional, a) em condição isotérmica, b) em condição de gradiente térmico. | 82 |
| Figura 4.20 – Movimento convectivo em um recipiente bidimensional em condição de gradiente térmico. | 83 |
| Figura 4.21 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 1,5$ cm e $3,5$ cm. | 84 |
| Figura 4.22 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 6$ cm e $8,5$ cm. | 84 |
| Figura 4.23 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 9,5$ cm e 10 cm. | 85 |
| Figura 4.24 - Concentração de sólidos do teste C para posições $x = 1,5$; 18 e 35 cm.... | 86 |
| Figura 4.25 - Pressão nos sólidos do teste C para as posições $x = 1,5$ e 18 e 35 cm..... | 88 |
| Figura 4.26 - Concentração de sólidos para sedimentação no teste C para $x = 1,5$; 18 e 35 cm sendo altura adimensional. | 88 |
| Figura 4.27 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação com gradiente de temperatura vertical (aquecimento na base). | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.28 – Altura do sedimento formado com e sem gradiente de temperatura vertical..... | 92 |
| Figura 4.29 – Concentração de sólidos para x = 1,5 cm com e sem gradiente de temperatura vertical..... | 93 |
| Figura 4.30 – Concentração de sólidos para x = 15 cm com e sem gradiente de temperatura vertical..... | 94 |
| Figura 4.31 – Concentração de sólidos para x = 28 cm com e sem gradiente de temperatura vertical..... | 95 |
| Figura 4.32 – Curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10. | 97 |
| Figura 4.33 – Curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb11. | 97 |
| Figura 4.34 – Ajuste e curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11. | 99 |
| Figura 4.35 - Curva de fluxo de alta taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11 para 25 °C e 70 °C..... | 100 |
| Figura 4.36 – Ajuste para curva de fluxo de alta taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11 para 25 °C e 70 °C..... | 102 |
| Figura 4.37 – Varredura de temperatura de 25 °C a 70 °C para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s ⁻¹ do fluido BrCarb10 e ajuste da Eq. 4.4..... | 103 |
| Figura 4.38 – Varredura de temperatura de 25 °C a 70 °C para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s ⁻¹ do fluido BrCarb11 e ajuste da Eq. 4.4..... | 103 |
| Figura 4.39 – Linearização dos dados de varredura de temperatura para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s ⁻¹ do fluido BrCarb10. | 106 |
| Figura 4.40 – Linearização dos dados de varredura de temperatura para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s ⁻¹ do fluido BrCarb11. | 107 |
| Figura 4.41 - Varredura de amplitude da tensão mostrando os módulos de armazenamento e perda dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11. | 108 |
| Figura 4.42 - Teste de tixotropia de 3 intervalos para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11. | 109 |
| Figura 4.43 – Concentração de sólidos após 280 dias de sedimentação a temperatura ambiente para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11. | 111 |
| Figura 4.44 – Concentração de sólidos após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11. | 113 |
| Figura 4.45 – Concentração de sólidos para o BrCarb10 após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C e após 94 dias de sedimentação a temperatura ambiente. | 114 |

Figura 4.46 – Concentração de sólidos para o BrCarb11 após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C e após 61 dias de sedimentação a temperatura ambiente.....115

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1 – Parâmetros do Modelo RRB..... | 35 |
| Tabela 3.2 – Diâmetros volumétricos característicos..... | 36 |
| Tabela 3.3 – Valores utilizados no cálculo do tempo de resolução do sistema..... | 40 |
| Tabela 3.4 – Valores de β obtidos nas curvas de calibração..... | 41 |
| Tabela 3.5 – Valores de β obtidos para os fluidos de perfuração para recipientes de teste a temperatura ambiente e a 70 °C..... | 51 |
| Tabela 3.6 – Temperaturas iniciais para teste com gradiente de temperatura..... | 58 |
| Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação em provetas a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento..... | 67 |
| Tabela 4.2 - Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação para o teste B.. | 80 |
| Tabela 4.3 - Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação para o teste C.. | 87 |
| Tabela 4.4 - Parâmetros reológicos dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11 para baixas taxas de cisalhamento (25 °C). .. | 98 |
| Tabela 4.5 – Redução média da viscosidade aparente dos fluidos em porcentagem, após o aumento da temperatura de 25 °C para 70 °C para as taxas de cisalhamento 10, 200 e 1000 s ⁻¹ . .. | 101 |
| Tabela 4.6 - Parâmetros reológicos dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11 para altas taxas de cisalhamento (25 °C e 70 °C)..... | 102 |
| Tabela 4.7 - Parâmetros da Eq. 4.4 para varredura de temperatura de 25 °C e 70 °C do BrCarb10. | 105 |
| Tabela 4.8 - Parâmetros da Eq. 4.4 para varredura de temperatura de 25 °C e 70 °C do BrCarb11. | 105 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 | Sedimentação..... | 5 |
| 2.2 | Técnica de atenuação de raios gama (TARG)..... | 13 |
| 2.3 | Pressão nos Sólidos | 15 |
| 2.4 | Influência da temperatura na sedimentação | 18 |
| | <i> 2.4.1 Acúmulo de Pressão Anular (APB).....</i> | <i>22</i> |
| 2.5 | Reologia | 24 |
| | <i> 2.5.1 Reologia de fluidos de perfuração de poços de petróleo e a influência da temperatura.....</i> | <i>29</i> |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 3.1 | Materiais Sólidos..... | 33 |
| 3.2 | Determinação da concentração de sólidos pela TARG | 37 |
| 3.3 | Testes de sedimentação isotérmica em água | 43 |
| 3.4 | Testes de sedimentação isotérmica em fluidos de perfuração à base de água | 48 |
| | <i> 3.4.1 Caracterização reológica dos fluidos de perfuração.....</i> | <i>51</i> |
| 3.5 | Testes de sedimentação com gradiente de temperatura horizontal | 54 |
| 3.6 | Testes de sedimentação com gradiente de temperatura vertical..... | 59 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 63 |
| 4.1 | Sedimentação isotérmica..... | 63 |
| 4.2 | Sedimentação com gradiente de temperatura horizontal | 69 |
| | <i> 4.2.1 Monitoramento do gradiente de temperatura</i> | <i>70</i> |
| | <i> 4.2.2 Altura do Sedimento no reservatório de teste</i> | <i>73</i> |
| | <i> 4.2.3 Concentração de sólidos do sedimento para o teste B (aquecimento unilateral)</i> | <i>75</i> |
| | <i> 4.2.4 Concentração de sólidos do sedimento para o teste C (aquecimento bilateral)....</i> | <i>83</i> |
| 4.3 | Sedimentação com gradiente de temperatura vertical..... | 89 |
| 4.4 | Sedimentação em fluidos de perfuração | 96 |
| | <i> 4.4.1 Reologia dos fluidos</i> | <i>96</i> |
| | <i> 4.4.2 Velocidade de sedimentação e concentração de sólidos.....</i> | <i>110</i> |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 116 |
| | REFERÊNCIAS..... | 119 |

APÊNDICE A.....127

1 INTRODUÇÃO

A sedimentação é uma operação unitária essencial em processos de separação sólido-líquido e está presente em diversos contextos da engenharia química. Seu comportamento depende de uma série de variáveis, como características geométricas e tamanho das partículas, densidade, propriedades físico-químicas do fluido de dispersão, concentração da suspensão e condições operacionais. Entre essas variáveis, a viscosidade do meio exerce papel central, pois atua diretamente na resistência ao movimento das partículas, sendo, portanto, uma propriedade fundamental para a previsão da velocidade de sedimentação (Coulson e Richardson, 2019).

Não há, entretanto, um fator isolado que domine o fenômeno. A interação entre os múltiplos parâmetros envolvidos exige uma análise integrada, na qual nenhum deles pode ser considerado secundário. A temperatura, frequentemente tratada de forma secundária em estudos clássicos de sedimentação, vem sendo incorporada de modo mais rigoroso em sistemas sujeitos a variações térmicas. Evidências experimentais demonstram que a temperatura pode alterar significativamente a cinética de sedimentação (Mkpenie et al., 2007; Goula et al., 2008; Xu et al., 2020).

Esse efeito térmico torna-se ainda mais relevante em meios viscosos com comportamento reológico não-newtoniano, como nos fluidos pseudoplásticos. Nesses sistemas, o aquecimento promove alterações estruturais no fluido, reduzindo de forma acentuada a viscosidade aparente e, com isso, elevando a velocidade terminal das partículas em dezenas ou até centenas de vezes. A literatura destaca que esse fenômeno impacta diretamente a estabilidade da suspensão e a eficiência de processos contínuos que envolvem variações térmicas (Herhaft et al., 2003).

Uma operação de grande relevância, na qual os efeitos da sedimentação se manifestam de forma crítica, é a perfuração de poços de petróleo. Nessa atividade, utilizam-se fluidos de perfuração formulados com propriedades reológicas específicas, geralmente com comportamento pseudoplástico, para garantir a estabilidade do sistema, o transporte eficiente de cascalhos e a prevenção de problemas operacionais durante paradas de bombeamento (Fagundes, 2015).

Esses fluidos devem apresentar elevada resistência à sedimentação, pois a deposição de material particulado em regiões indesejadas do poço pode comprometer a operação, ocasionando o travamento da coluna de perfuração ou o aumento da pressão no anular (Bradford et al., 2002).

Um fator determinante nesse contexto é a variação de temperatura ao longo da profundidade do poço. Devido às características geotérmicas do subsolo, a temperatura aumenta gradualmente, atingindo valores significativos em poços profundos (Macenić et al., 2020). Essa elevação térmica afeta diretamente as propriedades reológicas dos fluidos de perfuração, reduzindo sua viscosidade e alterando sua capacidade de manter partículas sólidas em suspensão.

De modo geral, verifica-se que o aumento da temperatura tende a acelerar a velocidade de sedimentação, principalmente em razão da redução da viscosidade do fluido. Estudos recentes confirmam e detalham esse comportamento, demonstrando que a elevação térmica modifica a cinética do processo (Xu et al., 2020; Tang et al., 2021).

Investigações envolvendo sedimentação floculada revelam que o efeito da temperatura pode variar de acordo com as condições do sistema. Em ambientes com baixa turbulência, a temperatura elevada tende a aumentar a velocidade de sedimentação. Já sob cisalhamento intenso, o aumento da temperatura reduz a deposição devido à menor estabilidade dos flocos (Lau, 1994).

Apesar da ampla disponibilidade de estudos voltados à velocidade de sedimentação e à influência da temperatura, a literatura ainda carece de investigações sistemáticas sobre o comportamento do sistema após o término da sedimentação. Em especial, há uma notável escassez de informações sobre as propriedades físicas do leito sedimentado, como o perfil de concentração, o grau de compactação e as alterações dimensionais decorrentes de variações térmicas.

A formação do sedimento pode resultar em leitos com diferentes alturas, densidades e graus de compactação, dependendo das condições térmicas presentes durante o processo. Além disso, a combinação entre a concentração inicial de sólidos e as variações de temperatura influencia tanto a dinâmica da sedimentação quanto as propriedades do leito de material depositado ao final do processo.

Outro ponto que merece destaque é que a maioria dos estudos disponíveis na literatura aborda a sedimentação em condições isotérmicas, ou seja, quando toda a suspensão é mantida a uma temperatura uniforme e constante. Nesses casos, a análise do processo torna-se mais simples e controlada, permitindo o uso de modelos clássicos consolidados. No entanto, quando se consideram condições de gradientes térmicos, especialmente no que se refere ao leito sedimentado formado sob essas circunstâncias, observa-se uma escassez significativa de investigações experimentais e teóricas.

A teoria proposta por Kynch (1952), amplamente utilizada para descrever a sedimentação em batelada, parte do pressuposto de que o processo ocorre de forma unidimensional, com a concentração de sólidos variando ao longo do eixo vertical (z). Dentro dessa abordagem, espera-se que, em sistemas bidimensionais sob condição isotérmica, a velocidade de sedimentação e as propriedades do sedimento formado se mantenham invariáveis ao longo do eixo horizontal (x), como ilustrado esquematicamente na Figura 1.1(a).

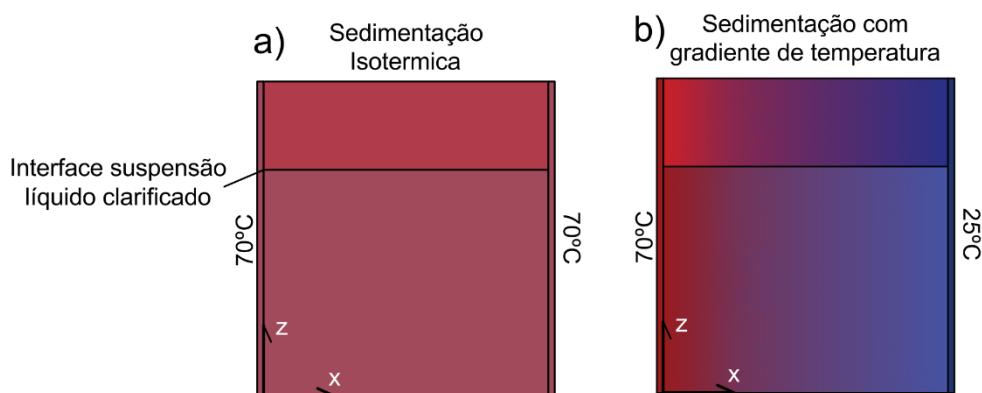


Figura 1.1 – Sedimentação, (a) isotérmica, (b) com gradiente de temperatura.
Fonte: o autor.

Essa uniformidade, no entanto, pode ser comprometida quando há a introdução de gradientes térmicos (Figura 1.1(b)), uma vez que a variação espacial da temperatura implica em variações locais de viscosidade e densidade do fluido, afetando a simetria do escoamento e a formação do leito sedimentado. Consequentemente, haverá alteração na velocidade de sedimentação e no perfil de concentração de sólidos ao longo do eixo (x).

Dessa forma, a compreensão aprofundada das propriedades do leito sedimentado sob diferentes condições térmicas representa uma lacuna importante na literatura e constitui um aspecto essencial para a modelagem e o controle de processos que envolvem suspensões concentradas.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento do leito sedimentado em função da temperatura, considerando tanto condições isotérmicas quanto cenários com gradientes térmicos, em sistemas contendo apenas água, bem como em fluidos mais complexos, como os fluidos de perfuração. Para atingir esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as alterações no perfil de concentração de sólidos em suspensões sedimentadas sob diferentes temperaturas em regime isotérmico;

- Avaliar a ocorrência de expansão no leito sedimentado e quantificar seu grau em distintas temperaturas de sedimentação isotérmica;
- Estudar os efeitos da sedimentação sob gradientes térmicos na estrutura final do leito sedimentado;
- Investigar a velocidade de sedimentação e o perfil de concentração de sólidos em fluidos de perfuração sob diferentes temperaturas isotérmicas;
- Avaliar o efeito combinado entre a concentração de sólidos e a temperatura na sedimentação de fluidos de perfuração.

Para a condução deste estudo, foram preparadas suspensões de carbonato de cálcio em água destilada, avaliadas sob diferentes condições térmicas, incluindo regimes isotérmicos e situações com gradientes de temperatura. Foram também testados dois fluidos de perfuração à base de água, formulados com diferentes concentrações de sólidos. Nesses sistemas, os ensaios foram realizados em condições isotérmicas, de forma a isolar os efeitos da temperatura na sedimentação de fluidos com comportamento não newtoniano.

Para o aquecimento das amostras e a formação controlada dos gradientes térmicos, foram empregados sistemas de aquecimento especialmente desenvolvidos para este trabalho, incluindo estufas laboratoriais com controle de temperatura PID e dispositivos auxiliares projetados para garantir a estabilidade térmica durante os ensaios. A determinação da concentração de sólidos ao longo da altura das colunas de sedimentação foi realizada por meio da técnica de atenuação de raios gama, método não destrutivo que possibilita a caracterização precisa da distribuição espacial dos sólidos em suspensão e no sedimento formado.

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre sedimentação, influência da temperatura, pressão nos sólidos, reologia e fluidos de perfuração. O Capítulo 3 descreve os procedimentos experimentais, materiais, métodos e equipamentos utilizados. O Capítulo 4 traz a análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 reúne as principais conclusões e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para o desenvolvimento deste trabalho, além de destacar as principais referências sobre sedimentação e propriedades reológicas, com ênfase na influência da temperatura nessas propriedades.

2.1 Sedimentação

Como descrito anteriormente, a sedimentação é uma operação unitária amplamente utilizada para a separação de sólidos suspensos em um líquido. Sua principal vantagem, quando realizada por gravidade, é o baixo custo, bastando fornecer um recipiente adequado e tempo de residência suficiente (Svarovsky, 2001).

Ao longo dos anos, o fenômeno da sedimentação tem sido amplamente estudado, sendo um tema de grande relevância na engenharia e na ciência dos materiais. Um dos primeiros trabalhos de destaque nessa área foi desenvolvido por Stokes (1851), resultando na formulação da Lei de Stokes. Essa lei descreve a força de resistência experimentada por partículas esféricas ao se moverem em fluidos viscosos, expressa pela (Eq. 2.1),

$$\vec{F} = -6\pi r\mu\vec{v} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que \vec{F} , é a força de resistência, r , o raio da partícula esférica, μ , é a viscosidade dinâmica do fluido, \vec{v} , é a velocidade da partícula.

A formulação proposta por Stokes representa um marco na compreensão do comportamento de partículas em suspensão e é utilizada até os dias de hoje.

No contexto da sedimentação, a velocidade terminal (v) de uma partícula que se desloca verticalmente em um fluido viscoso, devido ao seu próprio peso, pode ser calculada igualando a força de resistência à força gravitacional, conforme mostrado na (Eq. 2.2),

$$v = \frac{2r^2g(\rho_s - \rho_f)}{9\mu} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

sendo, ρ_s e ρ_f , as massas específicas do sólido (esfera) e do fluido, respectivamente, e g a aceleração da gravidade.

Vale ressaltar que a velocidade de sedimentação determinada pela equação de Stokes corresponde à velocidade relativa entre a partícula e o fluido circundante. Essa formulação

assume escoamento laminar, caracterizado por número de Reynolds inferior a 1, e considera o movimento da partícula em um meio fluido infinito.

Diversas tentativas foram feitas para prever a velocidade de sedimentação de partículas em suspensão concentrada. Robinson (1926) sugeriu uma modificação da lei de Stokes e utilizando na (Eq. 2.2) o diâmetro médio das partículas (d_{md}), a massa específica da suspensão (ρ_{sup}), a viscosidade dinâmica da suspensão (μ_{sup}) e (v_s) a velocidade de sedimentação da suspensão (interface descendente).

$$v_s = k_r \frac{d_{md}^2 g(\rho_s - \rho_{sup})}{\mu_{sup}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Segundo o autor, o fator, k_r , deve ser o mesmo para qualquer tipo de sólido, independentemente do tamanho da partícula, desde que os formatos das partículas grandes e pequenas sejam semelhantes.

Steinour (1944) estudou a sedimentação de pequenas partículas uniformes e adotou uma abordagem semelhante, utilizando a viscosidade dinâmica do fluido, a densidade da suspensão e uma função da porosidade ($f(\varepsilon_f)$) para considerar o efeito da estrutura da suspensão. Ele obteve a seguinte expressão para a velocidade de sedimentação (Eq. 2.4),

$$v_s = \frac{\varepsilon_f^2 d_{md}^2 g(\rho_s - \rho_{sup})}{18\mu} f(\varepsilon_f) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

no qual $f(\varepsilon_f)$ é uma função da porosidade (ε_f), definida empiricamente como $f(\varepsilon_f) = 10^{-1,82(1-\varepsilon_f)}$.

A sedimentação de lamas metalúrgicas foi estudada por Coe e Clevenger (1916), que concluíram que uma suspensão concentrada pode sedimentar de duas formas distintas. No primeiro caso, denominado sedimentação tipo 1, após um breve período inicial de aceleração, a interface entre o líquido clarificado e a suspensão move-se para baixo a uma taxa constante, acumulando uma camada de sedimento no fundo do recipiente. Quando essa interface se aproxima da camada de sedimento, sua taxa de descida diminui até alcançar o "ponto crítico de sedimentação". A partir desse ponto, a sedimentação ocorre apenas pela consolidação do sedimento, com o líquido sendo forçado a subir ao redor dos sólidos. Como a área de fluxo é gradualmente reduzida, a taxa diminui progressivamente. Na Figura 2.1(a), um estágio do processo de sedimentação é ilustrado: A é o líquido clarificado, B é a suspensão na concentração original, C é a zona de transição de concentração e D é o sedimento formado. A taxa de sedimentação permanece constante até que a interface superior atinja o topo da zona C, e então

diminui até que o ponto crítico de sedimentação seja atingido, momento em que as zonas B e C desaparecem.

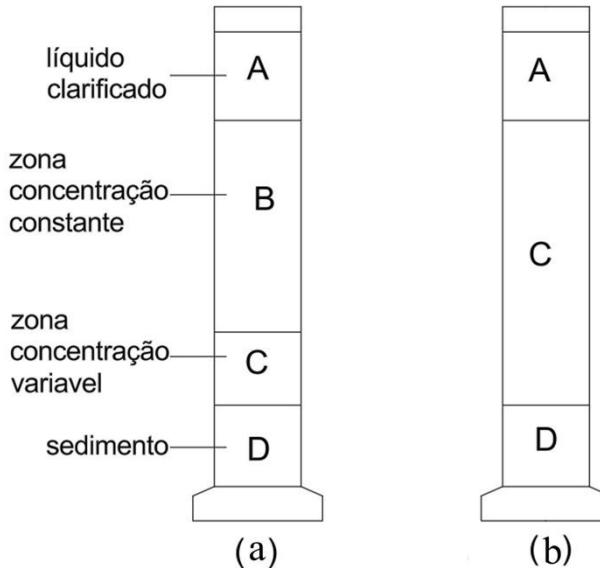


Figura 2.1 – Sedimentação de suspensão concentrada (a) sedimentação do tipo 1 (b) sedimentação do tipo 2.

Fonte: o autor.

A sedimentação (tipo 2), é menos comum e ocorre quando a faixa de tamanhos de partícula na suspensão é muito ampla ou em suspensões altamente concentradas. Como mostrado na Figura 2.1(b), a taxa de sedimentação diminui progressivamente ao longo de toda a operação, pois não há uma zona de concentração constante, e a zona C se estende da interface superior até a camada de sedimento.

Os autores propuseram a equação (Eq. 2.5 para determinar a capacidade do sedimentador, estabelecendo a velocidade superficial de sólidos alimentados (q_s). Ensaios de sedimentação em proveta foram conduzidos para a faixa de concentração de sólidos inicial (ε_{s0}) e a faixa de concentração da lama final (ε_{su}), obtendo-se a velocidade de sedimentação das partículas de concentração constante (v_{s0}) em cada teste.

$$q_s = \frac{v_{s0}}{\frac{1}{\varepsilon_{s0}} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Conforme discutido nos estudos apresentados até o momento, o aumento da concentração da suspensão promove a redução da taxa de sedimentação. Esse comportamento é atribuído à intensificação da velocidade ascendente do fluido, à diminuição do caminho

efetivo para a ascensão e reposicionamento do fluido em relação às partículas, e ao aumento das interações partícula-partícula e das forças viscosas de cisalhamento. Esses efeitos combinados resultam na diminuição da velocidade de sedimentação.

Na Figura 2.2, são apresentadas curvas típicas de sedimentação para uma suspensão de carbonato de cálcio em água, nas quais se observa a influência das concentrações de sólidos na sedimentação. Na Figura 2.3, o fluxo mássico de sedimentação ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) é plotado em função da concentração da suspensão. Essa curva apresenta um valor máximo correspondente a uma concentração volumétrica de 2%, indicando um ponto de equilíbrio entre a taxa de sedimentação e a interferência causada pelo aumento da concentração de partículas.

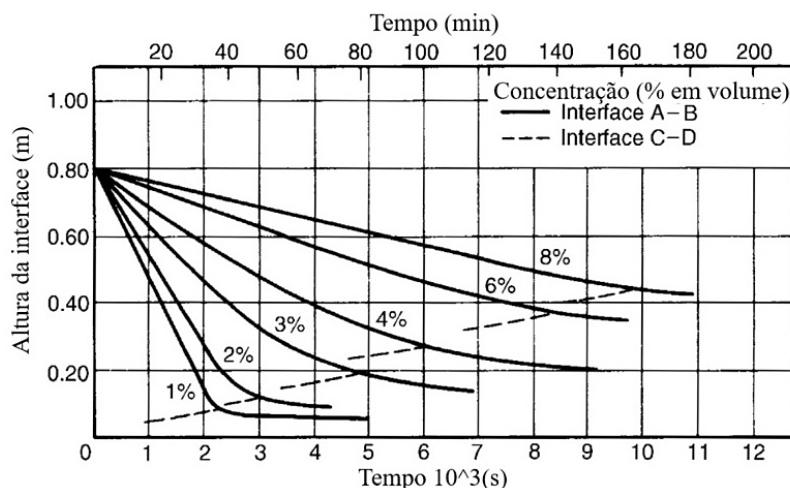


Figura 2.2 – Efeito da concentração na sedimentação de suspensões de carbonato de cálcio.

Fonte: Coulson e Richardson (2019), licença Elsevier nº6027681020461 – 14/05/2025.

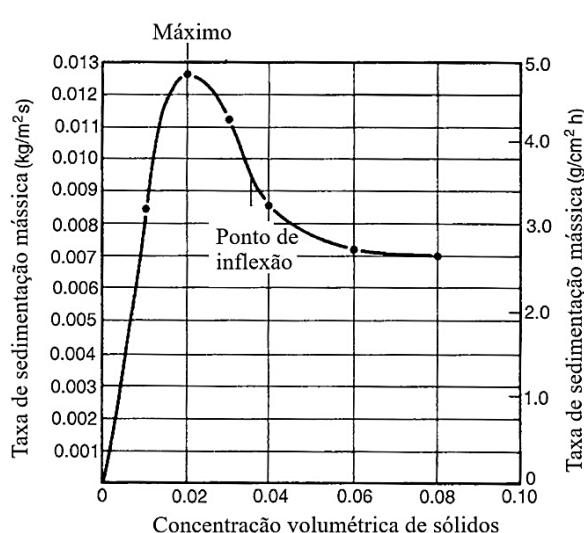


Figura 2.3 – Efeito da concentração na taxa de sedimentação mássica de suspensões de carbonato de cálcio.

Fonte: Coulson e Richardson (2019), licença Elsevier nº6027681020461 – 14/05/2025.

Outro trabalho de grande relevância na área da sedimentação é o modelo proposto por Kynch (1952), que parte da equação da continuidade para o constituinte sólido, formulando uma descrição simplificada do processo de sedimentação em batelada. Com base no monitoramento da interface descendente e na concentração inicial, Kynch descreveu a sedimentação de partículas sólidas como um fenômeno de propagação de ondas.

Kynch admitiu as seguintes hipóteses em seus trabalhos:

- A sedimentação é um fenômeno unidimensional;
- A concentração aumenta com o tempo em direção ao fundo do recipiente;
- A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração tende ao seu valor máximo;
- A velocidade de sedimentação de todas as partículas na dispersão depende apenas da concentração local de sólidos;
- Os efeitos de parede são desprezíveis;

Com essas suposições, Kynch utilizou a equação da continuidade para os sólidos, descrevendo o fenômeno na forma unidimensional.

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = \frac{\partial q_s}{\partial z} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

A (Eq. 2.6) estabelece que a concentração de sólidos (ε_s), varia continuamente ao longo do tempo (t) e que a velocidade superficial dos sólidos (q_s), se altera com a posição (z) no recipiente. Assim, considerando a hipótese de que a velocidade de sedimentação das partículas depende da concentração local, conclui-se que q_s , definido na (Eq. 2.7, também é função exclusivamente de, ε_s ,

$$q_s = \varepsilon_s v_s \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que v_s , é a velocidade de intersticial dos sólidos.

Embora o modelo de Kynch (1952) represente de forma razoável o fenômeno de sedimentação em batelada, sua teoria não descreve a interface descendente. Isso ocorre porque o modelo expressa matematicamente apenas a interface ascendente, prevendo unicamente a propagação de ondas de concentração do fundo do recipiente até o topo do sedimento, conforme ilustrado pelas curvas de equi-concentração na Figura 2.4. Em que ε_s , ε_{s0} e ε_{sm} correspondem, respectivamente, à concentração volumétrica de sólidos, à concentração volumétrica inicial de sólidos e à concentração volumétrica máxima de sólidos.

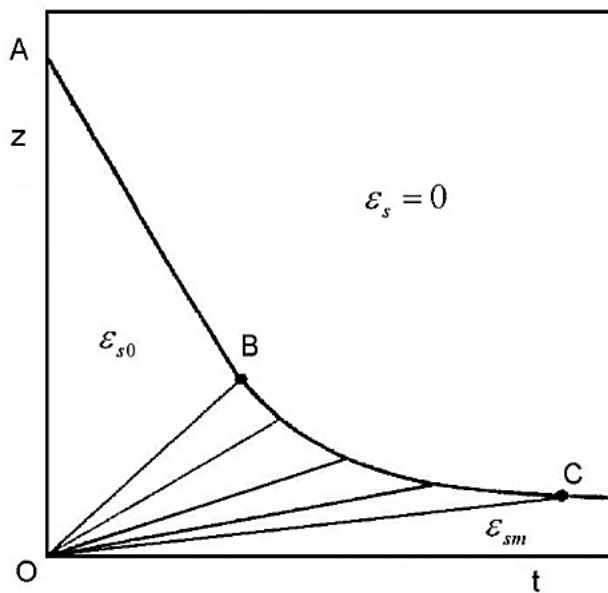


Figura 2.4 – Curvas de equi-concentração prevista pela teoria de Kynch.

Fonte: (Damasceno, 1992).

A compressibilidade é uma propriedade específica do sedimento e pode ser influenciada por fatores como esfericidade, distribuição do tamanho das partículas e sua massa específica. Sedimentos compressíveis não podem ser descritos pela teoria de Kynch, pois a acomodação das partículas envolve forças não consideradas em seu modelo. No entanto, para suspensões reais com baixas concentrações de sólidos, o modelo de Kynch pode ser considerado aceitável. A Figura 2.5 ilustra a diferença entre um sedimento incompressível, conforme descrito por Kynch, e um sedimento compressível.

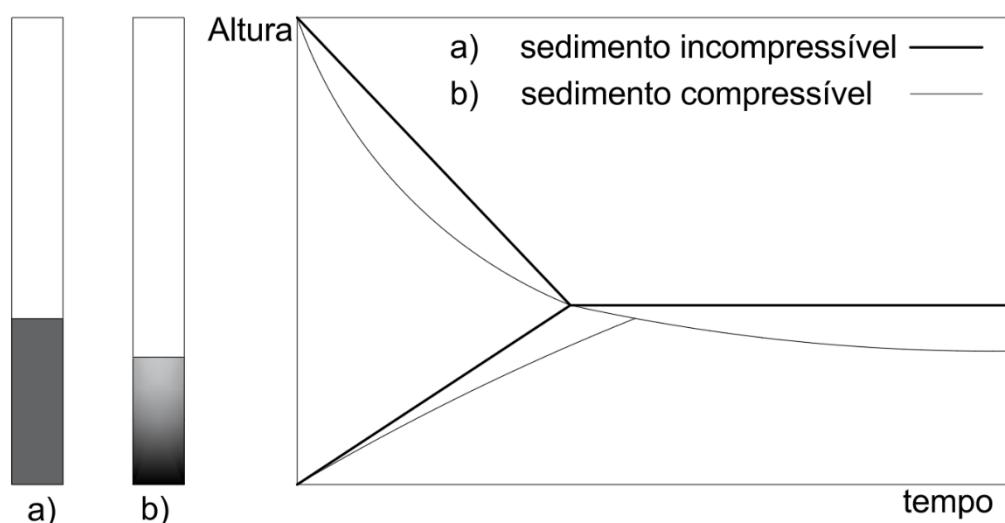


Figura 2.5 – Processo de sedimentação, (a) sedimento incompressível e (b) sedimento compressível.

Fonte: Arouca (2007).

D'ávila (1978) desenvolveu um modelo matemático para descrever a sedimentação de partículas em meio fluido, considerando a evolução das interfaces dentro do sistema. A abordagem adotada baseia-se na formulação hiperbólica das equações diferenciais que governam o deslocamento das interfaces de sedimentação, representando uma interface descendente e outra ascendente.

O modelo propõe um sistema de equações que envolve parâmetros como a viscosidade dinâmica (μ), a diferença de densidade entre partículas (ρ_s) e fluidos (ρ_f), a permeabilidade (k) da estrutura sedimentada e a velocidade de sedimentação de referência (v_{s0}). A partir de um sistema de equações adimensionais, (Eq. 2.8) e (Eq. 2.9),

$$M = \frac{z_0}{v_{s0} t_0}, K = \frac{P_{s0}}{\rho_s v_{s0}}, A = \frac{\mu z_0}{\rho_s v_{s0} k(\varepsilon_f)}, B = \frac{(\rho_s - \rho_f) g z_0}{\rho_s v_{s0}^2} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$V = \frac{v_s}{v_{s0}}, T = \frac{t}{t_0}, Z = \frac{z}{z_0}, P = \frac{P_s}{P_{s0}} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

sendo, P_{s0} pressão nos sólidos em ε_{s0} e z_0 altura inicial. D'ávila demonstrou que a evolução das interfaces é governada por:

$$\frac{dZ}{dT} = \frac{1}{M} \left(V - \sqrt{-K \frac{dP}{d\varepsilon_l}} \right) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$\frac{dZ}{dT} = \frac{1}{M} \left(V + \sqrt{-K \frac{dP}{d\varepsilon_l}} \right) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Essas equações descrevem a propagação das interfaces em sentidos opostos, uma descendente e outra ascendente, caracterizando o comportamento hiperbólico do sistema. O estudo permitiu prever a dinâmica da sedimentação em diferentes condições operacionais e contribuiu significativamente para o entendimento dos processos de compactação e formação de leitos sedimentares.

Hallermeier (1981) desenvolveu um método muito utilizado para calcular velocidades de sedimentação. Em seu modelo, utiliza uma relação segmentada entre o número de Reynolds e o índice de flutuabilidade de Arquimedes. O desenvolvimento sugere que a relação da (Eq. 2.12) é uma abordagem lógica para calcular a velocidade de sedimentação,

$$R_e = C_1 A_r + C_t \sqrt{A_r} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

em que R_e é o número de Reynolds associado a uma partícula em queda; A_r é o índice de flutuabilidade de Arquimedes, C_1 e C_t são coeficientes tabulados experimentalmente que são funções de A_r e R_e .

O número de Reynolds é dado pela (Eq. 2.13),

$$R_e = \frac{v_s d}{\nu} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que d é o diâmetro característico da partícula, ν é a viscosidade cinemática do fluido, v_s a velocidade de sedimentação. O índice de flutuabilidade de Arquimedes é dado pela (Eq. 2.14),

$$A_r = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^3}{\rho_f \nu^2} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

combinando das equações (Eq. 2.12), (Eq. 2.13) e (Eq. 2.14) e isolando v_s temos,

$$v_s = C_1 \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{\rho_f \nu} + C_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)gd}{\rho_f}} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Na (Eq. 2.15), o primeiro termo está associado ao regime de escoamento laminar, enquanto o segundo termo está relacionado ao regime de escoamento turbulento. Os coeficientes C_1 e C_t são tabelados e dependem do índice de flutuabilidade de Arquimedes.

Ahrens (2000), desenvolveu uma equação contínua para estimar a velocidade de queda de partículas sedimentares, superando as limitações do modelo de Hallermeier (1981), que utilizava relações segmentadas baseadas nos números de Reynolds e de Arquimedes. O modelo proposto por Ahrens (2000) permite calcular a velocidade terminal de sedimentação por meio da combinação dos regimes de escoamento laminar e turbulento, expressos em uma relação contínua dependente dos coeficientes C_1 e C_t , ajustados com base em dados experimentais para areia de quartzo. Esses coeficientes são dados pelas (Eq. 2.16) e (Eq. 2.17).

$$C_1 = 0,055 \tanh(12A_r^{-0,59}e^{-0,00044A_r}) \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$$C_t = 1,06 \tanh(0,0164A_r^{0,5}e^{-120/A_r}) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Esses coeficientes foram obtidos por um processo iterativo de tentativa e erro, visando minimizar o erro em relação aos dados experimentais de Hallermeier (1981) para partículas de quartzo, cuja densidade relativa variava entre 1,58 e 1,67. O erro médio quadrático (RMS) obtido com o modelo foi de 8,06%, valor inferior ao erro do método original de Hallermeier (8,44%). Além disso, o modelo apresenta comportamento assintótico coerente com os limites teóricos dos escoamentos laminar e turbulento, conferindo robustez à formulação proposta.

2.2 Técnica de atenuação de raios gama (TARG)

A técnica de atenuação de raios gama (TARG) tem se mostrado uma ferramenta não destrutiva extremamente eficaz no monitoramento de processos físicos, com destaque para a sedimentação de partículas em meios líquidos. Fundamentada na interação entre a radiação eletromagnética de alta energia e a matéria, essa técnica permite a estimativa indireta de propriedades como densidade, concentração e porosidade de meios heterogêneos (Gardner e Ely Jr., 1967; Damasceno, 1992).

A TARG baseia-se na aplicação da Lei de Lambert-Beer (1852), segundo a qual a intensidade de um feixe de raios gama decai exponencialmente à medida que atravessa um meio físico, sendo atenuada em função da densidade e da espessura desse meio. Para sistemas dispersos, como suspensões sólido-líquido, é possível adaptar a equação para descrever a concentração volumétrica de sólidos (Damasceno, 1992). A expressão utilizada é,

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (\text{Eq. 2.18})$$

na qual R_0 e R representam as contagens pulsos de radiação na ausência e na presença de sólidos, respectivamente, e β é um parâmetro que depende do coeficiente de atenuação do material.

Um aspecto importante da técnica é a necessidade de correção da intensidade de radiação (I) pelo tempo de resposta (τ) ou tempo de resolução do sistema de detecção, que se refere ao intervalo mínimo entre dois pulsos detectados (Damasceno, 1992; Arouca, 2007), por meio da (Eq. 2.19),

$$R = \frac{I}{1 - I\tau} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

em que R é a contagem de pulsos real corrigida (número verdadeiro de pulsos que atingiram o detector), I a contagem registrada pelo sistema de detecção (intensidade de radiação) e τ o tempo de resposta do sistema (em segundos).

O valor de τ pode ser determinado por meio de um método com duas fontes radioativas ou por simulações com blocos de acrílico, como proposto por Damasceno (1992).

Nas últimas décadas, a TARG tem sido empregada para investigar o comportamento de sistemas sedimentares. Os primeiros trabalhos, como os de Hamacher (1978) e Damasceno (1992), utilizaram a técnica para caracterizar a distribuição de concentração de sólidos em

função do tempo e da altura da coluna de sedimentação, evidenciando regiões distintas do processo, como a sedimentação livre, a compactação e a zona de transição.

Estudos posteriores reforçaram o potencial da técnica. Arouca (2003), Arouca (2007) e Moreira (2014) aplicaram a TARG para quantificar propriedades como a permeabilidade do meio poroso e a pressão exercida pelos sólidos, observando variações significativas em função da morfologia das partículas, da distribuição granulométrica, dos tamanhos e das densidades dos sólidos. Esferas de vidro, por exemplo, apresentaram velocidades de sedimentação significativamente maiores do que partículas irregulares, devido à menor resistência hidrodinâmica.

Em contextos industriais, como na perfuração de poços de petróleo, a TARG também tem se mostrado útil. Fagundes et al. (2021) aplicaram a técnica para monitorar a sedimentação de carbonato de cálcio em fluido não newtoniano, observando perfis de concentração distintos no topo e na base da coluna, com comportamento linear e logarítmico, respectivamente. Tais resultados permitiram derivar equações constitutivas para a pressão nos sólidos.

Além disso, o estudo de Santos et al. (2018) investigou a estabilidade de fluidos à base de óleo contendo carbonato de cálcio, revelando que o aumento da viscosidade aparente, devido à adição de carbonato, retardava a sedimentação das partículas. A TARG foi essencial para acompanhar a evolução dos perfis de concentração ao longo do tempo de repouso do fluido.

O sistema TARG (Figura 2.6) aplicado no estudo da sedimentação foi idealizado inicialmente por Damasceno (1992) e posteriormente aprimorado por pesquisadores como Arouca (2007), Moreira (2014), Fagundes (2019), entre outros, na Pós-graduação em Engenharia Química da UFU. O sistema inclui uma fonte selada de amerício-241 (^{241}Am), um detector de cintilação com cristal de NaI(Tl) e um sistema de leitura computadorizado. A fonte é selada em um bloco de chumbo, que atua como blindagem e colimador, permitindo a formação de um feixe estreito e direcionado de radiação.

O detector converte a luz emitida no cintilador em pulsos elétricos proporcionais à intensidade da radiação incidente. A leitura contínua desses pulsos ao longo de diferentes alturas no recipiente de testes permite conhecer a distribuição de concentração em função da posição e do tempo.

A TARG destaca-se por sua alta resolução, aliada ao caráter não destrutivo, permitindo o monitoramento contínuo de processos sem interferir fisicamente no meio analisado. A versatilidade da técnica também se comprova em sistemas com fluidos newtonianos,

pseudoplásticos e tixotrópicos, abrindo possibilidades de aplicação em setores como mineração, petróleo, alimentos e fármacos (Moreira, 2014).

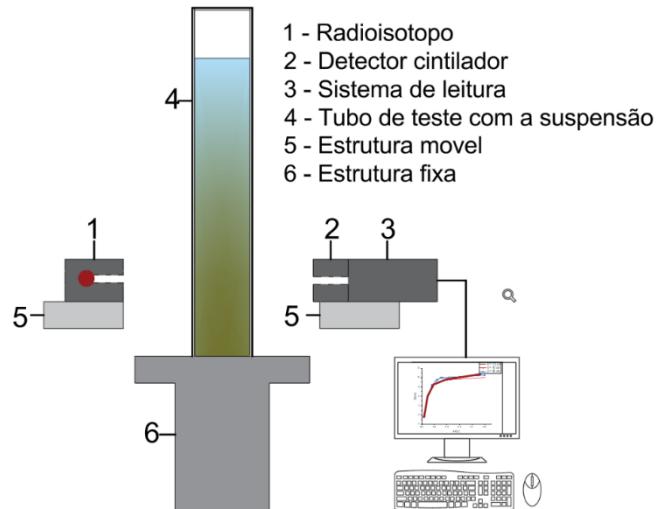


Figura 2.6 – Conjunto do sistema de atenuação de raios gama (TARG).
Fonte: o autor.

2.3 Pressão nos Sólidos

Diversas equações foram propostas na tentativa de descrever a compressibilidade de particulados e a pressão nos sólidos. A maioria dessas fórmulas baseia-se em transformações da relação clássica tensão/deformação ou força/deslocamento, em que a pressão de compactação ou o volume são transformados (Sonnergaard, 1999).

Heckel (1961) propôs um modelo de equação que se assemelha a uma reação química de primeira ordem, na qual a concentração é substituída pela porosidade ($1 - \varepsilon_s$) e o tempo pela pressão no sólido (P_s),

$$\frac{d\varepsilon_s}{dP_s} = K(1 - \varepsilon_s) \quad (\text{Eq. 2.20})$$

nesta equação observa-se que a taxa de variação da concentração de sólidos em relação à pressão é diretamente proporcional à porosidade, sendo K a constante de proporcionalidade.

Para Buscall (1987), as interações entre as partículas em uma suspensão concentrada influenciam a distribuição espacial das partículas e permitem que energia seja armazenada elasticamente na configuração do arranjo particulado. Assim, em um recipiente de profundidade finita, o acúmulo de partículas no fundo gera um gradiente de pressão que se propaga e se opõe à gravidade. Segundo o autor, três forças governam a consolidação de suspensões:

- A força gravitacional (ou centrífuga);
- A força de arrasto viscoso;
- A tensão interna da rede de partículas (chamada de pressão de partícula).

Concha e Bustos (1987) realizaram um estudo fundamentado na solução numérica de um modelo dinâmico aplicado à sedimentação em batelada de suspensões floculadas. Nesse estudo, foi analisada a influência dos parâmetros envolvidos na pressão dos sólidos e nas linhas de equi-concentração. Uma das conclusões dos autores é que a teoria original de Kynch não é adequada para descrever o comportamento de sedimentação de suspensões floculadas compressíveis além do ponto de compressão.

Damasceno (1992), propôs uma metodologia para determinação da pressão nos sólidos a partir do perfil de concentração de sólidos do meio e das seguintes hipóteses:

- O escoamento através do meio poroso é lento e unidimensional em regime permanente.
- A força resistiva é dada pela lei de Darcy.
- A tensão nos sólidos é função exclusiva da porosidade local.
- Os termos iniciais da equação do movimento para os sólidos são desprezíveis.
- O meio poroso é estático quando formado em um tubo vertical.
- Não há fluxo de líquido após a estabilização do sedimento.

A pressão nos sólidos é definida como a força exercida pelo peso das camadas superiores de sólidos sobre uma determinada posição z no sedimento.

Partindo da equação da continuidade para o constituinte sólido e considerando as hipóteses acima, é possível obter uma equação para o cálculo da pressão nos sólidos (P_s), dada pela (Eq. 2.22) (Damasceno, 1992),

$$\frac{dP_s}{dz} = g(\rho_s - \rho_f)\varepsilon_s(z) \quad (\text{Eq. 2.21})$$

$$P_s = g(\rho_s - \rho_f) \int_z^H \varepsilon_s(z) dz \quad (\text{Eq. 2.22})$$

na qual z é a posição vertical no tubo em que se deseja calcular a pressão nos sólidos naquele ponto, H é a altura total do sedimento formado.

Neste contexto, pode-se concluir que a decantação ou sedimentação propriamente dita caracteriza-se pela queda das partículas sólidas com um percurso médio livre relativamente grande, isto é, com pouca interação interparticular. Já a compressão destaca-se pelo rearranjo das partículas em uma matriz porosa com porosidade relativamente baixa, sendo a interação interparticular de grande relevância (Damasceno, 1992).

Arouca (2007), utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) proposta por Damasceno (1992), detalhou o comportamento das partículas na sedimentação quando submetidas a diferentes características, como a influência da esfericidade e da distribuição de tamanhos de partículas na sedimentação e na compactação dos sólidos. Além disso, o autor empregou a (Eq. 2.22) para o cálculo da pressão nos sólidos, utilizando a função $\varepsilon_s(z)$, definida pela (Eq. 2.23) proposta por Arouca (2003). Essa abordagem permite descrever a variação da concentração de sólidos em função da profundidade em um meio sedimentado, refletindo os efeitos da compressão nas camadas inferiores do leito sedimentado,

$$\varepsilon_s(z) = \frac{(\varepsilon_{sm} + bz)}{(1 + cz)} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

em que ε_{sm} representa a concentração máxima de sólidos do leito, b e c são parâmetros a serem calculados na regressão não linear do ajuste aos dados experimentais.

Goñi et al. (2017) desenvolveram uma equação para o cálculo da pressão nos sólidos similar à apresentada por Buscall (1987) e Damasceno (1992), mas com o diferencial de considerar o atrito estático entre as partículas e a parede do recipiente. A Figura 2.7 mostra as forças que atuam sobre um volume de controle do sedimento estabilizado na direção axial do recipiente.

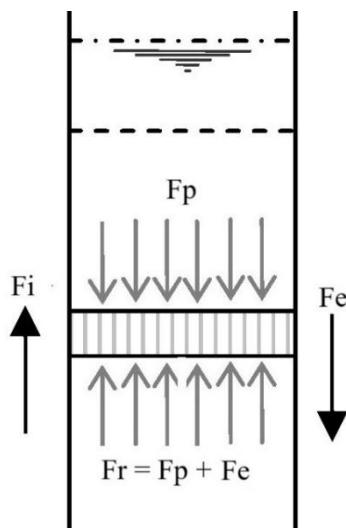


Figura 2.7 – Balanço de forças estáticas no sedimento.

Fonte: o autor.

Na representação, F_p é força peso acima do volume de controle, F_r é força de reação abaixo do volume de controle, F_i é a força de atrito na parede do recipiente e F_e é a força peso do volume de controle. A (Eq. 2.24) expressa o balanço de forças imediatamente abaixo do volume de controle.

$$-F_p + F_r + F_i - F_e = 0 \quad (\text{Eq. 2.24})$$

A resultante deste balanço equivale à (Eq. 2.21), com a subtração da força de atrito na parede do recipiente,

$$\frac{dP_s}{dz} = g(\rho_s - \rho_f)\varepsilon_s(z) - \frac{4\alpha K}{D} P_s \quad (\text{Eq. 2.25})$$

na qual α e k são parâmetros relacionados ao coeficiente de atrito e ao ângulo de aplicação desta força respectivamente, D é o diâmetro do tubo de teste.

Nos estudos deste trabalho, a força de atrito entre o sólido e a parede do recipiente foi desconsiderada. Tal simplificação é justificada pelo uso, na metodologia experimental, de um recipiente de vidro de superfície lisa, cuja baixa rugosidade implica em um coeficiente de atrito desprezível com o material particulado. Dessa forma, para o cálculo da pressão nos sólidos, adotou-se a (Eq. 2.22) em conjunto com a (Eq. 2.23), que descreve o perfil da concentração volumétrica de sólidos ao longo da altura da coluna de sedimentação. Essa abordagem permite estimar com maior precisão a distribuição da pressão sólida em sistemas nos quais os efeitos de atrito lateral são minimizados.

2.4 Influência da temperatura na sedimentação

Uma das principais variáveis no estudo da sedimentação é a velocidade de sedimentação das partículas, também chamada de velocidade terminal ou de queda (Zhiyao et al., 2008). A temperatura da suspensão interfere na dinâmica da sedimentação, alterando a velocidade de queda das partículas, a formação do leito sedimentado e o tempo de residência em processos contínuos (Mkpenie et al., 2007; Goula et al., 2008; Xu et al., 2020). Mudanças de temperatura durante a sedimentação podem causar perturbações em processos industriais e têm sido foco de diversas pesquisas, com aplicações variadas.

No modelo proposto por Stokes (1851), a velocidade terminal de sedimentação de uma partícula esférica em um fluido é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica (μ) do meio da (Eq. 2.26).

$$V_s = \frac{2r^2g(\rho_s - \rho_f)}{9\mu} \quad (\text{Eq. 2.26})$$

Como a viscosidade dos líquidos diminui com o aumento da temperatura, observa-se um aumento correspondente na velocidade de sedimentação quando o fluido é aquecido. Essa relação inversa entre temperatura e viscosidade implica que, em condições térmicas elevadas, partículas sedimentam mais rapidamente.

Hazen (1904), ao estudar o desempenho de tanques de sedimentação, observou que a temperatura exerce influência significativa sobre a eficiência do processo. Segundo o autor, partículas sedimentam mais rapidamente à medida que a temperatura da água aumenta, permitindo que um tanque de sedimentação realize até o dobro do trabalho de separação no verão em comparação ao inverno.

Rogers (1946) realizou experimentos envolvendo a sedimentação de hemácias utilizada para diagnóstico de doenças infecciosas e constatou que o aumento da temperatura do laboratório, e consequentemente da suspensão sanguínea, eleva a velocidade de sedimentação das hemácias, o que pode levar a diagnósticos equivocados.

Sarmiento e Urlherr (1979), ao estudarem suspensões de rejeitos do processo de produção de alumínio, concluíram que a variação da velocidade de sedimentação com a temperatura pode ser prevista exclusivamente a partir da mudança na viscosidade do líquido da suspensão, desde que a variação de temperatura seja pequena, entre aproximadamente 20 °C e 30 °C, em conformidade com a Lei de Stokes, na qual a velocidade de sedimentação é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do líquido.

Lau (1994) conduziu experimentos de sedimentação sob condições de escoamento em um canal circular com controle de temperatura. As suspensões consistiam em argila caulinítica dispersa em três meios distintos: água destilada, solução salina e água de rio contendo sedimentos naturais. Os resultados mostraram que, à medida que a temperatura aumentava, tanto a taxa de deposição quanto a velocidade de sedimentação diminuíam, conclusão que contrasta com estudos de Hazen (1904), Sarmiento e Urlherr (1979), Joudah (2014) e Tang et al. (2021), os quais indicam maior sedimentação com o aumento da temperatura.

Lau explicou essa diferença com base na floculação: em escoamentos turbulentos, o aumento da temperatura intensifica as forças repulsivas entre partículas (devido ao aumento da energia térmica), o que enfraquece a formação de flocos maiores e mais densos, essenciais para uma sedimentação eficiente. Assim, seu estudo revelou que, em condições de escoamento, a

redução da temperatura favorece a floculação e, consequentemente, aumenta a deposição, inviabilizando a aplicação direta da Lei de Stokes nesses sistemas.

Em um estudo de fluidodinâmica computacional (CFD), Goula et al. (2008), constataram que a elevação de apenas 1 °C na temperatura do afluente em um tanque de sedimentação contínua reduz consideravelmente a eficiência de remoção de partículas durante um determinado período, até que a temperatura do tanque e do afluente se igualem.

Ainda no contexto da sedimentação floculada, Joudah (2014) observou que o efeito da temperatura na formação e resistência dos flocos torna-se menos perceptível em águas com turbidez inicial mais elevada. Contudo, os resultados mostram que o tempo ótimo de floculação para uma sedimentação eficiente tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta e atinge 25 °C. Entre 10 °C e 25 °C, a diferença nos tempos de floculação é pequena, mas variações muito mais significativas ocorrem quando a temperatura está abaixo de 10 °C.

Tang et al. (2021) investigaram o processo de lixiviação da cromita, com foco na separação do cromato de sódio da pasta de lixiviação. O estudo avaliou diferentes métodos de separação sólido-líquido, determinando a velocidade de processamento de cada método. Foram comparados três processos: centrifugação, filtração e sedimentação com aquecimento, cada um analisado em relação ao tempo de separação e à eficiência na recuperação do cromato de sódio.

Os resultados mostraram que o processo de sedimentação com aquecimento obteve o melhor desempenho, reduzindo o tempo de separação sólido-líquido em até 72% quando comparado às demais técnicas. Para a sedimentação aquecida, o autor realizou experimentos com uma suspensão de cromita lixiviada em solução altamente alcalina (60% em massa de NaOH), uma polpa viscosa e densa resultante do processo de lixiviação com hidróxido de sódio concentrado.

O procedimento adotado compreendeu a transferência da polpa ainda quente para uma coluna de sedimentação de 1000 mL, a qual foi colocada em um forno de secagem com temperatura controlada, ajustado para 70, 90, 110, 130 e 150 °C. Durante o processo, mediu-se a altura do sedimento a cada 5 minutos.

Foi observado um aumento significativo na velocidade de sedimentação à medida que a temperatura era elevada. A sedimentação a 150 °C apresentou uma velocidade aproximadamente 400% maior que a observada a 70 °C, conforme ilustrado na Figura 2.8.

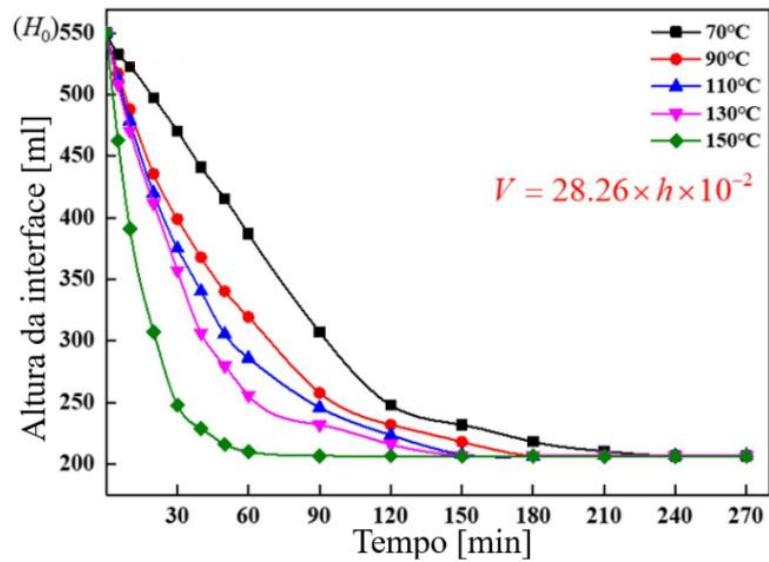


Figura 2.8 – Queda da interface descendente de suspensões contendo cromato de sódio em temperaturas variadas.

Fonte: Tang et al. (2021), licença Elsevier nº 6033181311870 – 20/05/2025.

Esse aumento na velocidade foi atribuído à redução da viscosidade aparente do meio, em conformidade com a Equação de Stokes. A relação entre viscosidade aparente e velocidade de sedimentação foi analisada, e os dados apresentados na Figura 2.9 reforçam a correlação teórica prevista. Assim, o estudo evidencia que a sedimentação com aquecimento é o método mais eficiente para a separação sólido-líquido no contexto da lixiviação da cromita, superando as alternativas convencionais de filtração e centrifugação.

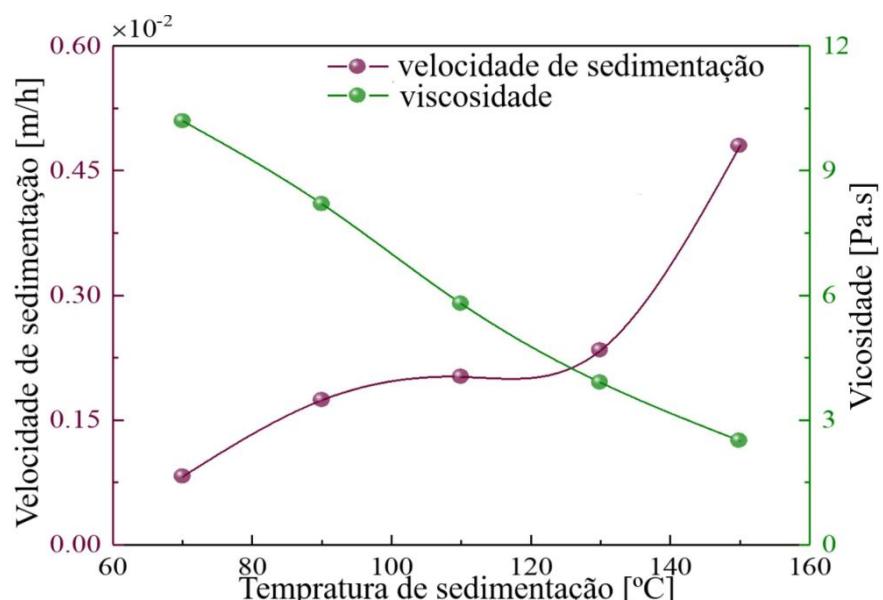


Figura 2.9 – Relação entre viscosidade aparente e velocidade de sedimentação.

Fonte: Tang et al. (2021), licença Elsevier nº 6033181311870 – 20/05/2025.

Motta et al. (2024) desenvolveram um modelo numérico para descrever o processo de sedimentação de sólidos (calcita) em suspensões não newtonianas confinadas no anular de poços de petróleo, considerando a influência de gradientes térmicos geotérmicos. Para isso, os autores utilizaram a Teoria de Mistura da Mecânica do Contínuo, incorporando a dependência da reologia do fluido com a temperatura, a taxa de cisalhamento e a concentração de sólidos. A metodologia envolveu a formulação e solução numérica das equações de balanço de massa e quantidade de movimento, utilizando o Método dos Volumes Finitos, com simulações para diferentes perfis de temperatura: isotérmicos, lineares e geotérmicos, ao longo de um período de até cinco anos.

Os principais resultados mostraram que o perfil de temperatura exerce forte influência sobre a velocidade de sedimentação, bem como sobre a formação e evolução das diferentes zonas de sedimentação, como a zona de sedimentação livre e a zona compactada. As simulações indicaram que, em perfis isotérmicos, a zona de sedimentação livre apresenta concentração constante igual à inicial, enquanto em perfis não uniformes essa concentração varia ao longo do tempo, podendo inclusive desaparecer. A análise de sensibilidade evidenciou que a concentração inicial de sólidos, o diâmetro médio das partículas e o índice de consistência têm papel determinante na dinâmica da sedimentação. Além disso, o modelo demonstrou comportamento coerente com os fenômenos físicos esperados.

2.4.1 Acúmulo de Pressão Anular (APB)

Um dos processos industriais impactados por variações na velocidade de sedimentação é a perfuração de poços de petróleo (Silva et al., 2019). Nesse processo, um fluido de perfuração é continuamente bombeado pela coluna de perfuração até a extremidade da broca, retornando pelo espaço anular formado entre a coluna e as paredes do poço.

Uma etapa importante na construção de poços de petróleo é a cimentação, que consiste na injeção de cimento no espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço. Durante esse procedimento, o fluido de perfuração pode ficar preso entre o cimento e a vedação presente na cabeça do poço (anular fechado), conforme ilustrado na Figura 2.10(a).

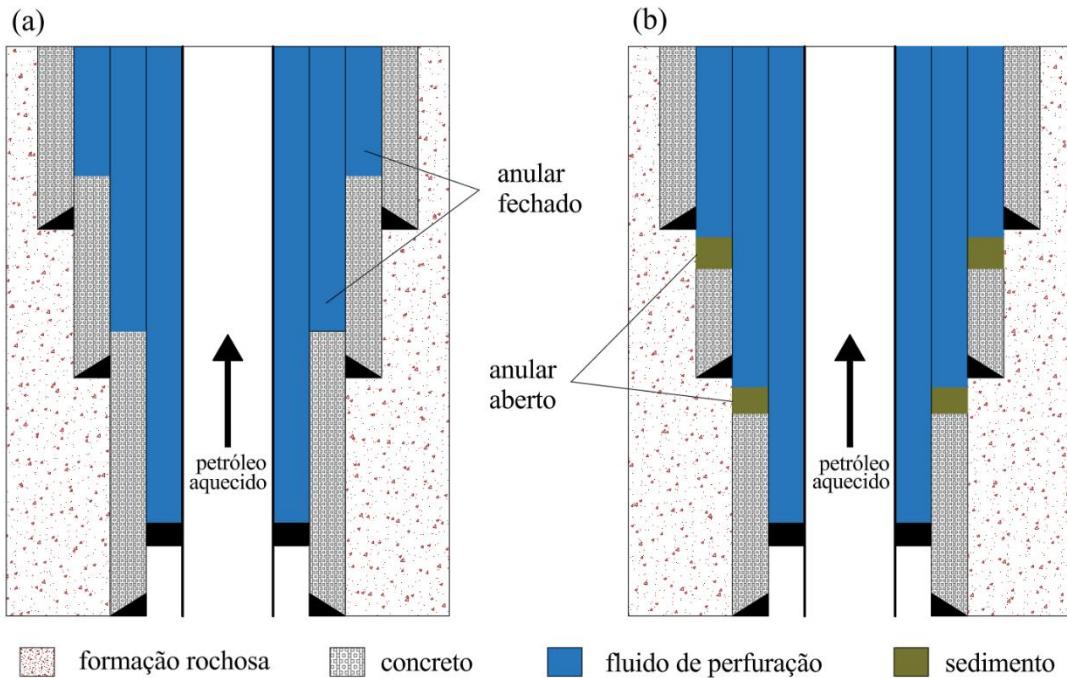


Figura 2.10 – Cimentação de poços de petróleo em águas profundas, a) poço de petróleo com anular fechado sem alívio de pressão anular, b) poço de petróleo com anular aberto para o alívio de pressão anular.

Fonte: o autor.

Concluída a perfuração e a construção do poço, inicia-se a produção (extração do petróleo). O petróleo é normalmente extraído a uma temperatura superior à do fluido aprisionado. Durante esse processo, o calor transferido pelo petróleo ao fluido confinado provoca sua expansão volumétrica, resultando em um aumento da pressão na região anular. Esse fenômeno é conhecido como Acúmulo de Pressão Anular (APB). O aumento da pressão anular pode causar acidentes graves, como falhas e colapso de tubulações, sendo mais provável que esse fenômeno afete a estrutura de poços de Alta Temperatura e Alta Pressão (HTHP) (Wu, 2021; Bradford et al., 2002).

Algumas estratégias são adotadas para a mitigação da APB, como o uso de pontos de vazamento. Em poços submarinos, uma técnica aplicada para mitigar o Acúmulo de Pressão Anular é a escassez de cimento. Esse método consiste em interromper a cimentação antes que o cimento atinja a base do revestimento anterior, deixando uma seção do anular desprovida de cimento (Figura 2.10(b)).

Com essa técnica, cria-se um caminho de alívio no anular, permitindo que o fluido aprisionado se desloque e seja drenado para o interior da formação rochosa à medida que se expande termicamente devido ao aquecimento. Esse mecanismo reduz o risco de sobrepressões

que poderiam comprometer a integridade estrutural do revestimento e da cimentação (O'Brien, 1996).

Entretanto, o fluido de perfuração, que possui em sua formulação materiais sólidos obturantes e adensantes de alta densidade, como o carbonato de cálcio e a barita, tende a sedimentar durante o período de confinamento, formando um bolo de lama (sedimento) no fundo do anular (Figura 2.10(b)). Esse sedimento cria resistência para a drenagem do fluido e o consequente alívio da pressão (Silva et al., 2019).

A sedimentação dos materiais sólidos que compõem o fluido de perfuração é acelerada pelo efeito térmico (aumento da temperatura), tornando a condição adversa da APB mais propícia de ocorrer em poços de alta temperatura. Isso torna imprescindível o estudo da influência da temperatura na sedimentação dos fluidos de perfuração.

No presente trabalho, foram realizados testes com fluidos de perfuração à base de água no contexto da sedimentação térmica.

2.5 Reologia

A viscosidade pode ser definida como a resistência ao movimento de escoamento de um material. Para a manutenção do fluxo em um fluido, energia deve ser continuamente fornecida (Schramm, 2006). Considere um fluido confinado entre duas placas, uma fixa e outra móvel. À medida que a placa móvel se desloca, gera-se um gradiente de velocidade no fluido, que varia de zero na interface com a placa fixa até o valor máximo na interface da placa móvel, como ilustrado na Figura 2.11.

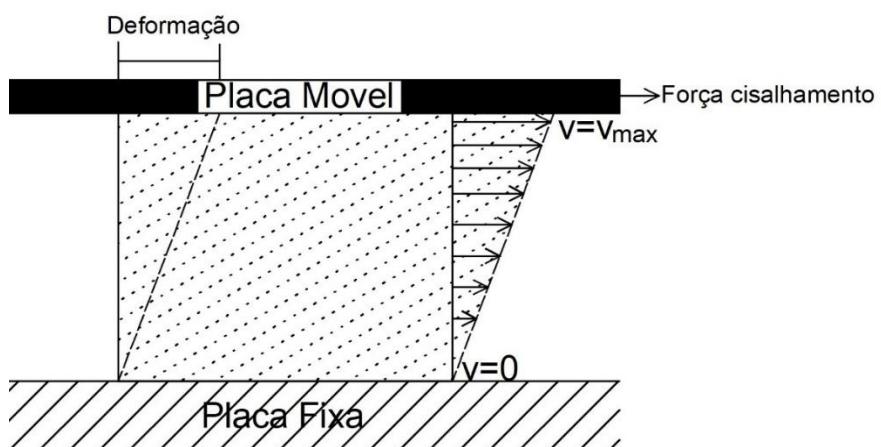


Figura 2.11 – Deformação em um fluido.

Fonte: o autor.

Matematicamente, a viscosidade dinâmica de um fluido Newtoniano, representada por μ pode ser descrita a partir da experiência realizada por Newton, em que um fluido é cisalhado entre duas placas (uma móvel e outra estacionária), conforme a (Eq. 2.27),

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Eq. 2.27})$$

sendo τ é a tensão cisalhante e $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento.

Para um fluido não newtoniano, a viscosidade aparente, representada por η , descreve a propriedade física de um líquido de resistir ao escoamento induzido pelo cisalhamento, podendo depender de seis parâmetros (Schramm, 2006),

$$\eta = f(S, T, P, \dot{\gamma}, t, E) \quad (\text{Eq. 2.28})$$

S - natureza físico-química da substância (ex.: água, óleo, mel, polímero fundido).

T - temperatura da substância. Experimentos mostram que a viscosidade é fortemente influenciada por mudanças de temperatura; por exemplo, a viscosidade de um óleo mineral diminui cerca de 10% para um aumento de apenas 1 °C.

P - pressão. Apesar de ser menos investigada que a temperatura, a pressão comprime os fluidos, aumentando a resistência intermolecular — o efeito é mais pronunciado em gases, mas também se aplica a líquidos sob altas pressões, como ocorre em lamas de perfuração (Torsvik et al., 2015).

$\dot{\gamma}$ - taxa de cisalhamento, fator decisivo que pode reduzir ou aumentar a viscosidade.

t - tempo, relacionado à dependência da viscosidade de alguns fluidos ao histórico de cisalhamento.

E - campo elétrico, relevante para suspensões cujo comportamento de fluxo é influenciado pela intensidade do campo elétrico (Schramm, 2006).

Neste estudo, foram desconsiderados os efeitos da pressão e do campo elétrico na viscosidade, visto que o objetivo principal é analisar isoladamente os efeitos da temperatura sobre as propriedades reológicas. A exclusão do campo elétrico também se justifica pelo fato de o fluido de perfuração avaliado não conter materiais magnetizáveis, não apresentando características eletrorreológicas (Loïc, 2020).

Para fluidos considerados Newtonianos, Newton assumiu que o gráfico correspondente à (Eq. 2.27) é uma reta que se inicia no ponto 0;0 da curva de fluxo, subindo com inclinação de ângulo α . Qualquer ponto nessa reta define pares de valores para τ e $\dot{\gamma}$, sendo a tangente do ângulo α igual a viscosidade μ . Assim, para um líquido cuja curva de fluxo é uma reta, a

viscosidade não varia com a taxa de cisalhamento, todos os líquidos que se enquadram nessa definição são chamados Newtonianos.

Já os fluidos que não exibem esse comportamento linear são denominados não newtonianos, sendo comuns em misturas de fluidos com partículas em suspensão. A Figura 2.12 mostra as classificações de fluidos não newtonianos e o fluido Newtoniano.

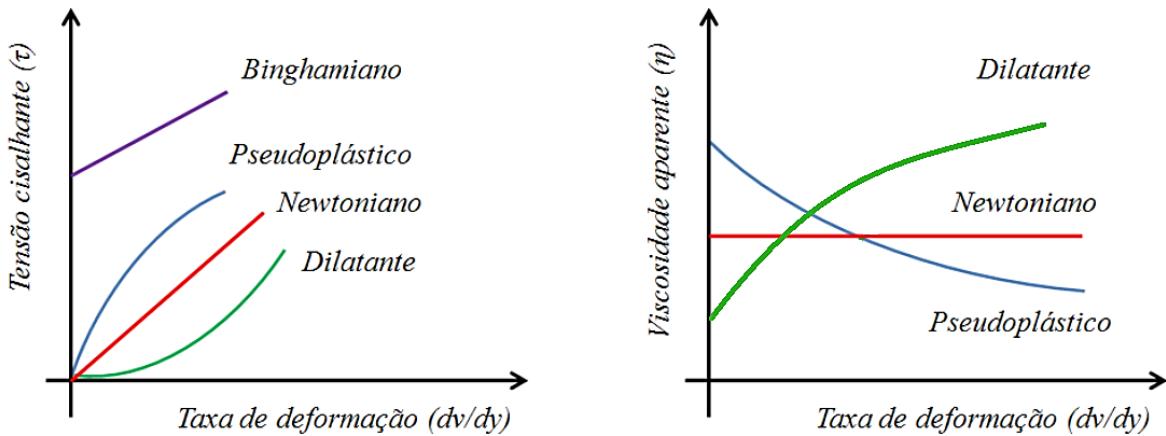


Figura 2.12 – Vários tipos de comportamento de fluxo.

Fonte: o autor.

Fluido Newtoniano: apresenta relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, com viscosidade constante, independente da taxa de cisalhamento. Exemplos típicos incluem água e óleo mineral. A relação é expressa por,

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Eq. 2.29})$$

em que μ é a viscosidade dinâmica.

Fluido Binghamiano: possui um limite de escoamento (τ_0) que deve ser superado para iniciar o fluxo. Após esse ponto, o comportamento tende a ser linear, semelhante ao de um fluido Newtoniano. É comum em fluidos de perfuração e suspensões concentradas,

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (\text{Eq. 2.30})$$

em que η_p é a viscosidade plástica ou índice de consistência do fluido.

Fluido Dilatante (ou de espessamento de cisalhamento): apresenta aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Ocorre em suspensões altamente concentradas de partículas sólidas, sendo descrito por modelos como a lei da potência,

$$\tau = k \dot{\gamma}^n, \quad n > 1 \quad (\text{Eq. 2.31})$$

em que k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento do fluido.

Fluido Pseudoplástico (ou de afinamento de cisalhamento): exibe diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é típico de soluções poliméricas e dispersões coloidais, como muitos fluidos de perfuração, também descrito pela lei da potência.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad 0 < n < 1 \quad (\text{Eq. 2.32})$$

O índice de comportamento n , indica o grau de desvio em relação ao comportamento Newtoniano. Valores de n próximos de 1 indicam comportamento próximo ao Newtoniano, enquanto valores mais distantes de 1 caracterizam forte dependência da viscosidade em relação à taxa de cisalhamento (Chhabra e Richardson, 2008).

Para fluidos pseudoplásticos com tensão limite de escoamento, o modelo mais adequado é o de Herschel-Bulkley, uma generalização da lei da potência (Eq. 2.33).

$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad (\text{Eq. 2.33})$$

A tensão limite de escoamento é a tensão mínima necessária para iniciar o movimento relativo entre camadas de um fluido ou partículas em suspensão, sendo especialmente relevante em sistemas não newtonianos, como suspensões concentradas, lamas e pastas. Esse parâmetro influencia significativamente a velocidade de decantação e a estabilidade da suspensão, sendo fundamental para a modelagem e o dimensionamento de equipamentos de processamento (Barnes (1999)). A Figura 2.13 apresenta o comportamento de um fluido pseudoplástico com tensão limite de escoamento.

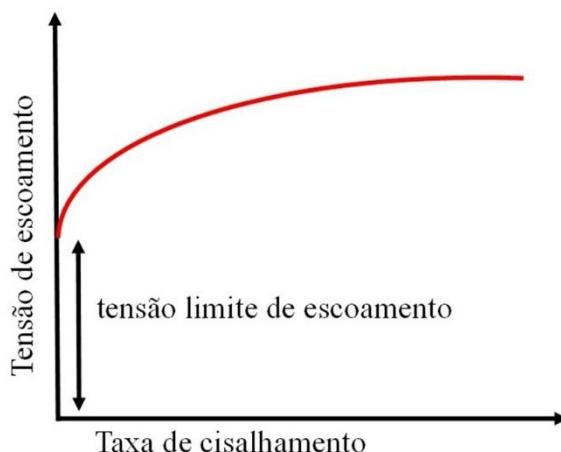


Figura 2.13 – Comportamento de fluido pseudoplástico com tensão limite de escoamento.
Fonte: o autor.

Outra característica reológica de grande importância industrial é a tixotropia. Em fluidos pseudoplásticos, a diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento

ocorre, principalmente, devido ao alinhamento de moléculas ou partículas na direção do escoamento, superando o movimento browniano. Quando o cisalhamento é reduzido ou interrompido, essa orientação se desfaz (Chhabra e Richardson, 2008).

Ao plotar uma curva de escoamento de um fluido não newtoniano sem tensão limite de escoamento, observa-se que, para uma taxa de cisalhamento crescente (a chamada “curva superior”), a resposta reológica difere daquela obtida para uma taxa decrescente (“curva inferior”). Em alguns casos, ambas as curvas se sobrepõem, indicando comportamento reversível (Schramm, 2006).

Contudo, muitas dispersões apresentam interações moleculares dependentes do tempo, conferindo ao sistema características tixotrópicas pronunciadas: sua estrutura interna se reconstrói lentamente após cessar o cisalhamento (Schramm, 2006). A Figura 2.14 mostra uma curva de fluxo típica de fluidos tixotrópico.

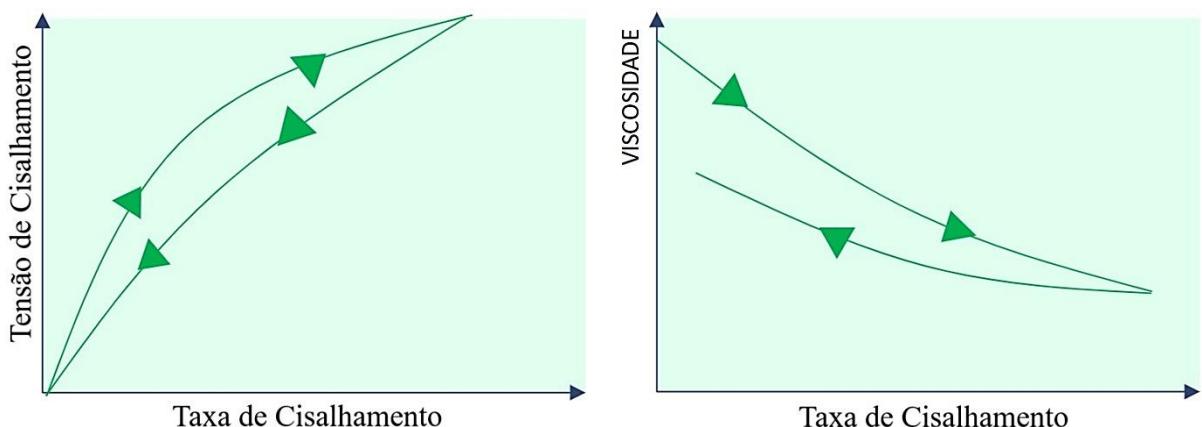


Figura 2.14 – Curva de fluxo típica de fluidos tixotrópico.

Fonte: o autor.

Algumas dispersões coloidais podem formar uma estrutura tridimensional chamada “gel”, formada por ligações fracas entre partículas, como ligações de hidrogênio ou iônicas. Essas forças são relativamente frágeis e podem ser rompidas facilmente sob cisalhamento prolongado (Figura 2.15).

À medida que essas ligações são rompidas, a viscosidade aparente do sistema diminui progressivamente até atingir, de forma assintótica, um valor mínimo correspondente à taxa de cisalhamento aplicada — o estado “sol” (Loïc, 2020). Um fluido tixotrópico pode alternar entre os estados de gel e sol repetidamente, sem perda significativa de sua capacidade de reestruturação.

Nem todos os materiais que sofrem degradação estrutural por cisalhamento são tixotrópicos. Por exemplo, iogurtes não se reestruturam espontaneamente após o repouso, não apresentando comportamento tixotrópico (Schramm, 2006).

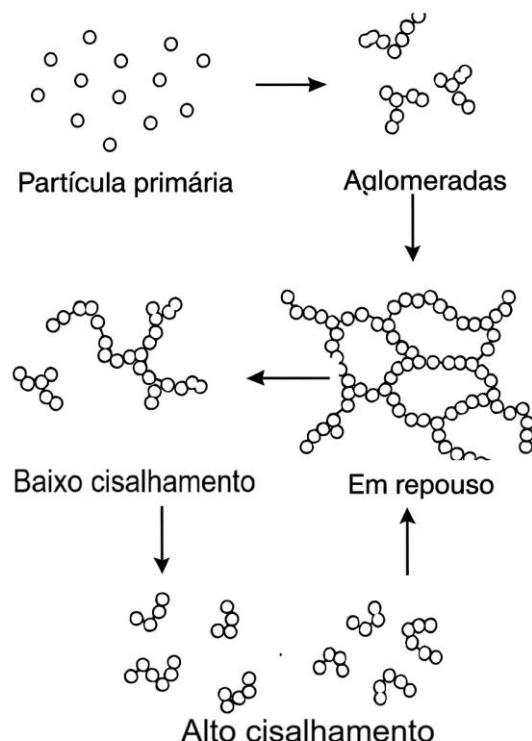


Figura 2.15 – Interação de partículas em dispersões tixotrópicas.
Fonte: o autor.

2.5.1 Reologia de fluidos de perfuração de poços de petróleo e a influência da temperatura.

Com a função de lubrificar e resfriar a broca, o fluido de perfuração de poços de petróleo também transporta o cascalho de rocha para a superfície, realizando a limpeza do poço. Esses fluidos, também chamados de lama de perfuração, em sua maioria, apresentam comportamento reológico pseudoplástico, embora essa característica não seja uma regra (Fagundes et al., 2019).

A exposição dos fluidos de perfuração a elevadas temperaturas promove alterações em seu comportamento reológico, de modo que as propriedades avaliadas em condições de superfície não refletem, necessariamente, aquelas observadas nas profundidades do poço. Essa divergência pode comprometer o desempenho do fluido, visto que sua formulação é projetada

para atender a parâmetros específicos. Assim, qualquer modificação nas propriedades originais tende a impactar as condições operacionais durante a perfuração.

Prever a velocidade de sedimentação em poços profundos não é uma tarefa simples, devido às variações de temperatura ao longo do poço. Estudos de Macenić et al. (2020), Kelishami et al. (2022) e Facci et al. (2024) indicam que o gradiente geotérmico de poços de petróleo varia de 20 a 40 °C/km, dependendo das características geológicas da região.

Saasen (1998) investigou a influência da reologia dos fluidos de perfuração na eficiência da limpeza do poço durante operações, com ênfase especial na perda de carga por atrito no anular. Em experimentos conduzidos com diferentes fluidos de perfuração à base de água viscosificados com polímeros e bentonita, bem como fluidos à base de óleo, foi avaliado o desempenho de limpeza. As análises mostraram que, embora parâmetros como viscosidade aparente, tensão de escoamento e taxa de cisalhamento sejam importantes para caracterizar o comportamento do fluido, a eficiência na remoção de cascalhos correlaciona-se mais diretamente com a perda de carga por atrito do que com qualquer parâmetro reológico isolado. Assim, recomenda-se que o projeto de fluidos de perfuração considere a otimização da perda de carga anular como critério principal, evitando o uso excessivo de aditivos que promovam a formação de géis estruturais, os quais dificultam a liberação dos cascalhos do leito sedimentado.

Herzhaft et al. (2003) conduziram um estudo experimental sobre a influência da temperatura nas propriedades reológicas de fluidos de perfuração à base de óleo. Foram utilizados reômetros MCR102 e MCR302 para medições em uma faixa de temperatura entre 28 °C e 50 °C. Os resultados mostraram que a viscosidade aparente dos fluidos diminui com o aumento da temperatura, comportamento compatível com o modelo de Arrhenius (Eq. 2.34), com dependência exponencial inversa da temperatura. Essa variação é atribuída à resposta térmica da microestrutura do fluido, cuja organização interna torna-se menos resistente ao escoamento à medida que a temperatura aumenta,

$$\eta(T) = \eta_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (\text{Eq. 2.34})$$

em que η_0 (fator pré-exponencial), representa a viscosidade teórica em uma temperatura de referência, E_a , (energia de ativação da viscosidade) mede a sensibilidade da viscosidade aparente à temperatura, R , (constante dos gases), 8,314 J/mol·K., T (temperatura em Kelvin).

Além disso, observou-se a existência de dois regimes reológicos distintos nas curvas de escoamento: um comportamento aproximadamente Newtoniano em baixas taxas de cisalhamento e um regime de pseudoplasticidade típico do modelo de Herschel-Bulkley em

taxas de cisalhamento mais elevadas. A transição entre esses regimes é definida por uma taxa crítica de cisalhamento, que se mostrou dependente da temperatura. Com o aumento da temperatura, essa taxa crítica se desloca para valores mais elevados, sugerindo que a energia térmica favorece a transição estrutural interna do fluido, antecipando o comportamento não newtoniano.

Sukhoboka (2017) investigou a influência da temperatura e da pressão sobre as propriedades reológicas de fluidos de perfuração à base de água, por meio de ensaios laboratoriais realizados com reômetro equipado com célula pressurizada. As medições de viscosidade aparente foram conduzidas em uma ampla faixa de temperatura, de 20 °C a 150 °C, com incrementos de 10 °C, abrangendo fluidos à base de água e óleo com diferentes composições de aditivos. A autora comparou sistematicamente os efeitos da temperatura e da pressão (até 150 bar) sobre a viscosidade aparente e concluiu que a temperatura exerce um impacto muito mais significativo do que a pressão. As curvas reológicas obtidas demonstraram uma redução acentuada da viscosidade aparente com o aumento da temperatura, comportamento observado de forma consistente entre as amostras testadas.

A redução da viscosidade aparente foi atribuída principalmente à degradação térmica dos polímeros utilizados como agentes viscosificantes e ao fenômeno de flocação da bentonita em soluções salinas, especialmente sob condições térmicas elevadas. Tais alterações estruturais contribuem para a perda de estabilidade dos fluidos em ambientes de alta temperatura. Os resultados também evidenciaram que a escolha dos aditivos e o controle de suas concentrações desempenham papel fundamental na manutenção da estabilidade reológica dos fluidos de perfuração em condições severas. Portanto, a formulação adequada torna-se essencial para garantir o desempenho esperado do fluido durante a operação de perfuração, especialmente em poços de alta temperatura e pressão.

Os aditivos viscosificantes presentes na formulação de fluidos de perfuração podem sofrer alterações significativas com o aumento da temperatura, como relatado por Vivas e Salehi (2021), que avaliaram o comportamento reológico de fluidos de perfuração à base de água sob temperaturas de até 204,5 °C. Observou-se estabilidade até cerca de 93,3 °C, seguida por alterações significativas atribuídas à gelificação do fluido. Esse efeito foi relacionado à presença de soda cáustica (NaOH), que apresentou baixa estabilidade térmica. Em contrapartida, a bentonita demonstrou elevada resistência térmica, mesmo após múltiplos ciclos de aquecimento. Dentre os aditivos testados para controle de pH, a cal (lime) mostrou-se mais

estável que o KOH e o NaOH, mantendo a viscosidade aparente praticamente constante em altas temperaturas.

Concluídas as discussões teóricas que fundamentam este trabalho, o Capítulo 3 apresenta os materiais, equipamentos e metodologias experimentais adotados para investigar os efeitos da temperatura na sedimentação e nas propriedades reológicas de suspensões de carbonato de cálcio em água destilada e em fluidos de perfuração à base de água, conforme os objetivos definidos na INTRODUÇÃO.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos experimentais adotados na condução dos testes propostos, juntamente com a descrição dos materiais e equipamentos utilizados neste estudo.

3.1 Materiais Sólidos

Foram realizados testes de sedimentação em recipientes cilíndricos e retangulares, com e sem aquecimento. Em todos os testes, foram utilizadas suspensões de carbonato de cálcio (CaCO_3), mineral obtido por peneiramento na malha 325 ASTM (American Society for Testing and Materials).

Antes do início dos ensaios, é fundamental determinar algumas características do sólido, como sua densidade e distribuição granulométrica. O carbonato de cálcio mineral, frequentemente denominado GCC (Ground Calcium Carbonate), utilizado neste estudo, foi fornecido pela empresa Sinergia Científica - Comércio de Produtos para Laboratórios Ltda. Trata-se de uma matéria-prima de baixo custo e ampla aplicação industrial, sendo empregada em diversos setores, como fabricação de papel, tintas, plásticos, fluidos de perfuração, tratamento de solos, isolamento acústico e produção de ferro gusa, entre outros. Devido à sua versatilidade e extensa utilização, o carbonato de cálcio foi selecionado neste trabalho com o objetivo de gerar dados úteis para atingir os objetivos propostos (Moreira, 2014).

No contexto dos fluidos de perfuração, esse material atua principalmente como agente obturante, contribuindo para a formação de uma camada de baixa permeabilidade nas paredes do poço, reduzindo ou impedindo a migração do fluido para as formações rochosas (Santos et al., 2018).

Quimicamente, o carbonato de cálcio é o constituinte predominante de minerais como calcário, mármore, aragonita e calcita. Na forma pura, o CaCO_3 se apresenta como um pó branco, cristalino, inodoro e alcalino. É um material estável, não inflamável, não corrosivo, não tóxico, praticamente insolúvel em água e sem tendência à bioacumulação. Sua obtenção se dá por meio da reação entre o óxido de cálcio (cal virgem) e o dióxido de carbono (Oliveira Junior, 2014).

A caracterização granulométrica foi realizada por difração a laser, utilizando o analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000 Hydro 2000MU. A Figura 3.1 apresenta a distribuição volumétrica do diâmetro das partículas de carbonato de cálcio utilizadas.

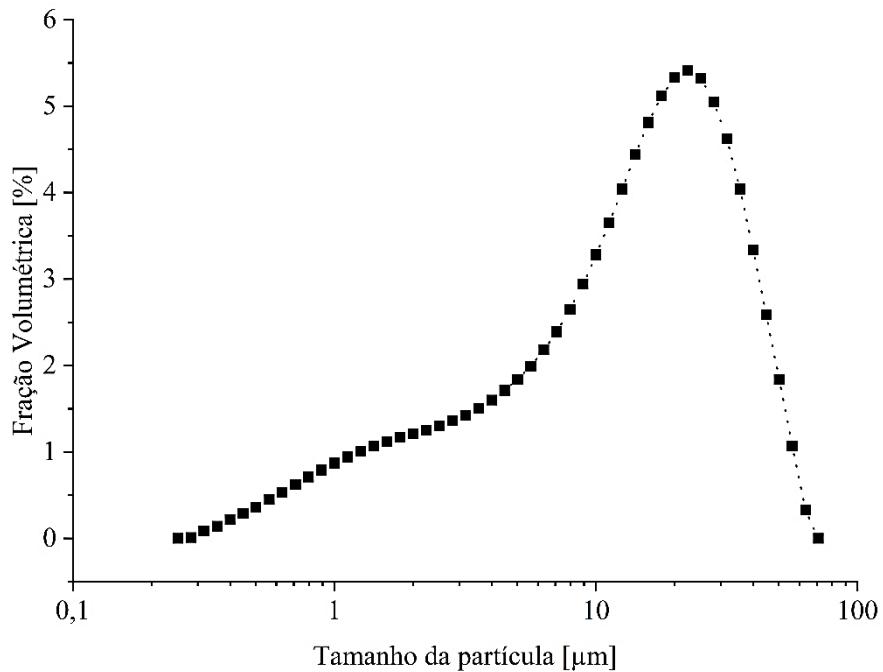


Figura 3.1 – Distribuição da fração volumétrica do carbonato de cálcio.
Fonte: o autor.

Observa-se que a distribuição é assimétrica, com um pico máximo de aproximadamente 5,5% em fração volumétrica para partículas em torno de 25 μm . A curva indica predominância de partículas na faixa entre 5 e 40 μm .

Também foi avaliada a fração volumétrica acumulada do CaCO_3 , apresentada na Figura 3.2. A figura mostra a evolução do acúmulo de partículas de carbonato de cálcio em função do tamanho, comparando os dados experimentais com a curva ajustada pelo modelo de Rosin-Rammler-Bennett (RRB) (Eq. 3.1),

$$Y(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{d'} \right)^n \right] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

em que $Y(d)$ é a fração acumulada para partículas menor que um dado diâmetro d , d' , é o parâmetro de tamanho característico (diâmetro onde 63,2% do material está abaixo) e n o parâmetro de uniformidade.

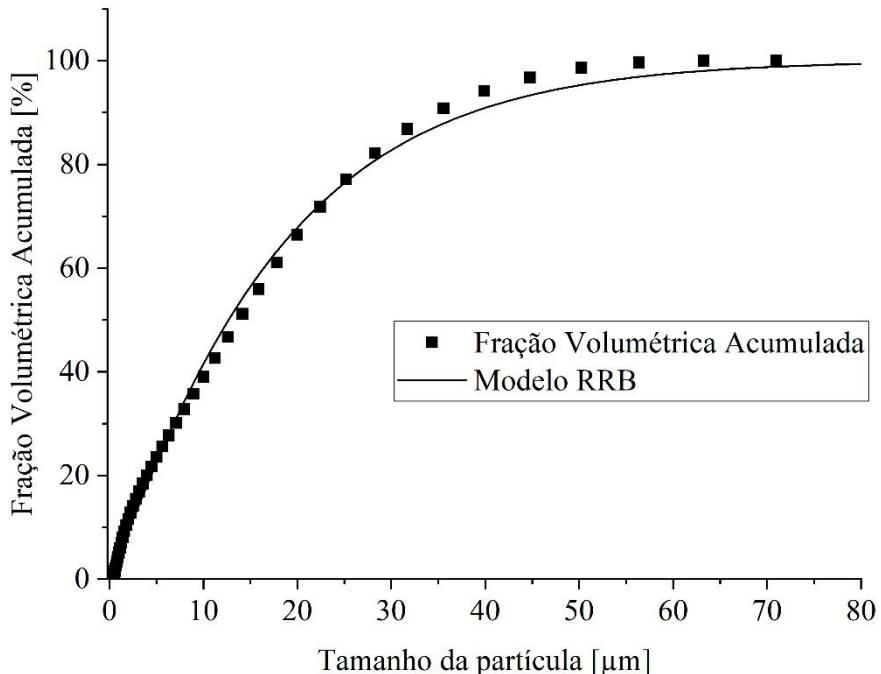


Figura 3.2 – Fração volumétrica acumulada do carbonato de cálcio.
Fonte: o autor.

Observa-se que o modelo RRB descreve adequadamente a distribuição dos dados, especialmente na faixa intermediária de tamanhos de partículas. A curva atinge valores próximos a 100% de fração acumulada em torno de 70 μm , indicando que praticamente todas as partículas da amostra possuem dimensões inferiores a esse valor. A boa concordância com o modelo reforça a adequação do carbonato de cálcio quanto à sua distribuição de tamanhos para aplicações que exigem controle granulométrico, como em fluidos de perfuração. Os valores dos parâmetros RRB estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do Modelo RRB.

| Parâmetro | Valor |
|------------------------|-------|
| d' [μm] | 17,81 |
| n [-] | 1,08 |

* $R^2 = 0,982$.

Fonte: o autor.

Os diâmetros volumétricos característicos correspondentes a 10%, 50% e 90% da distribuição cumulativa, juntamente com o diâmetro médio de Sauter, estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Diâmetros volumétricos característicos.

| Parâmetro | Diâmetro [μm] |
|---|------------------|
| D _{0,1} | 1,927 |
| D _{0,5} | 15,441 |
| D _{0,9} | 38,903 |
| D _{3,2} (D _{Sauter}) | 5,131 |

Fonte: o autor.

A densidade do carbonato de cálcio foi determinada utilizando um picnômetro a gás hélio Micromeritics AccuPyc® 1330, equipamento que calcula a densidade de sólidos, mesmo que porosos, por meio da variação de pressão do gás em uma câmara de volume conhecido. A densidade obtida foi de $2,6932 \pm 0,0045$ g/cm³.

As imagens de Micrografia Eletrônica de Varredura (MEV) foram obtidas com um microscópio Tescan, modelo VEGA 3 LMU, utilizando tensão de aceleração de 20 kV.

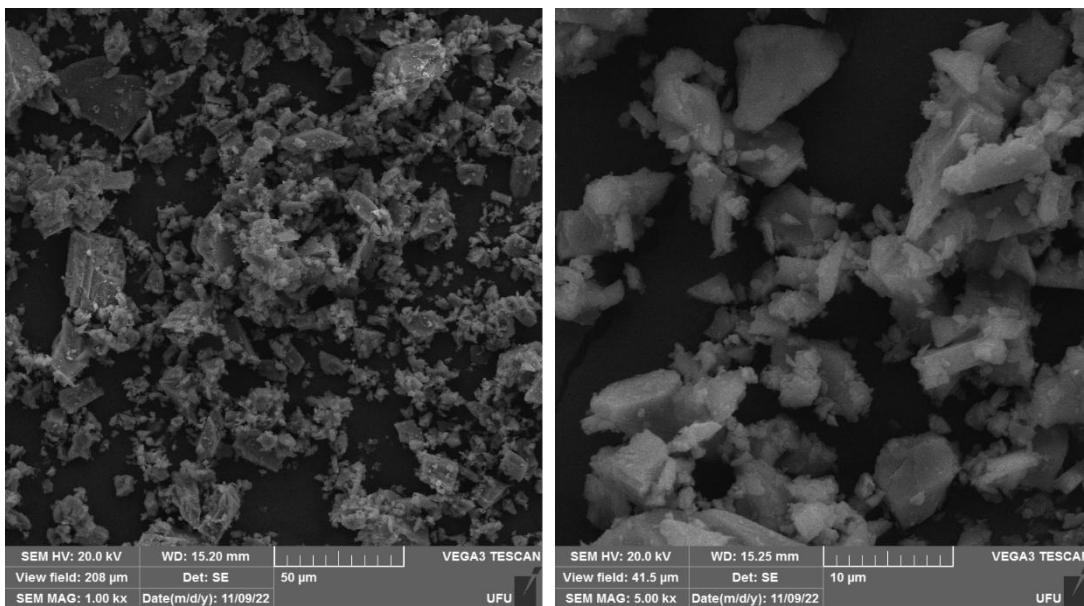


Figura 3.3 – Imagem do material sólidos no microscópio eletrônico de varredura.

Fonte: o autor.

Nas micrografias obtidas por MEV, observa-se que as partículas apresentam morfologias predominantemente irregulares e angulosas, com baixa esfericidade. Essa característica implica em maior resistência ao movimento descendente das partículas no fluido, devido ao aumento do arrasto hidrodinâmico. Como resultado, partículas com baixa esfericidade tendem a sedimentar mais lentamente em comparação com partículas esféricas de mesmo volume (Wang et al., 2009).

Além disso, nota-se nas micrografias a presença de aglomerados de partículas, fenômeno que pode ser atribuído a interações físico-químicas, como pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals. A aglomeração é sensível à temperatura, visto que o aumento térmico pode reduzir a viscosidade do meio contínuo e alterar o balanço de forças interparticulares (Tang et al., 2021).

3.2 Determinação da concentração de sólidos pela TARG

A Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) foi empregada para determinar o perfil de concentração de sólidos ao longo do sedimento formado nos ensaios de sedimentação. A técnica baseia-se na atenuação de um feixe colimado de radiação gama ao atravessar uma suspensão ou sedimento, permitindo a obtenção de perfis espaciais de concentração de forma não destrutiva e com alta resolução.

Os experimentos foram realizados em dois tipos de recipientes: provetas cilíndricas de vidro e recipientes de teste retangulares, também de vidro. Nos ensaios conduzidos em provetas, a TARG foi aplicada de forma unidimensional, com leituras ao longo do eixo vertical (eixo z), possibilitando a obtenção do perfil de concentração de sólidos na direção da altura. A Figura 3.4 apresenta a proveta utilizada nos ensaios unidimensionais com TARG, juntamente com a coordenada de leitura.

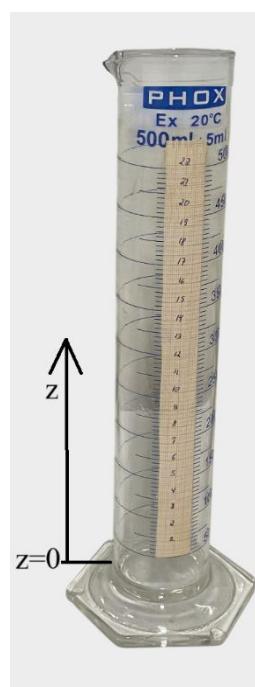


Figura 3.4 – Proveta cilíndrica de vidro utilizada nas leituras unidimensionais com TARG.

Fonte: o autor.

Nos ensaios realizados em células retangulares, a técnica foi utilizada em modo bidimensional, permitindo a análise da distribuição de concentração de sólidos em função da altura (eixo z) e do comprimento do recipiente (eixo x). Essa configuração possibilitou a observação de efeitos laterais, como gradientes transversais e eventuais assimetrias na sedimentação. A Figura 3.5 apresenta os recipientes de teste utilizados nos ensaios bidimensionais com TARG, juntamente com as coordenadas de leitura.

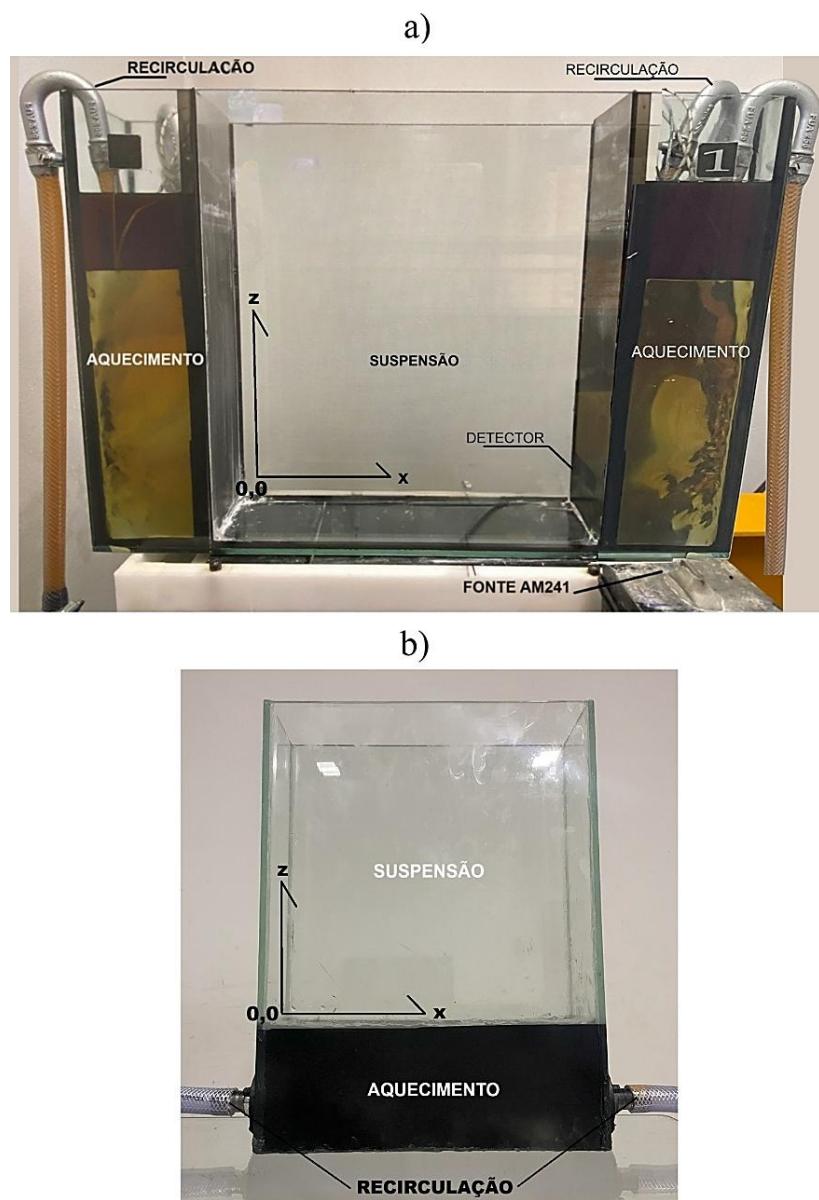


Figura 3.5 – Recipientes de teste utilizados nos ensaios bidimensionais, a) recipiente com aquecimento lateral, b) recipiente com aquecimento na base.

Fonte: o autor.

Podem ser observados dois tipos de recipientes de teste retangulares: o primeiro (Figura 3.5(a)) é um recipiente com capacidade de aquecimento lateral, podendo aquecer uma ou ambas as laterais simultaneamente; o segundo (Figura 3.5(b)) é um recipiente com aquecimento na base.

O aquecimento nos recipientes retangulares foi realizado por meio de uma resistência elétrica imersa em um óleo térmico, que permanecia em contínua recirculação para homogeneizar a temperatura nas câmaras de aquecimento. Detalhes adicionais desses recipientes são apresentados em seções posteriores.

Para cada leitura, os recipientes foram posicionados entre o feixe emitido pela fonte radioativa e o detector (sistema de contagem com fotomultiplicador). Detalhes do conjunto fonte, detector e suporte do recipiente podem ser observados na Figura 3.6.

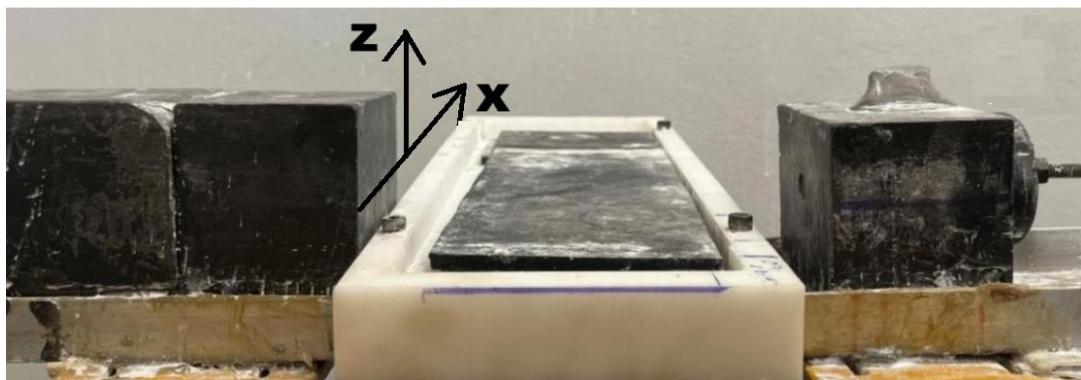


Figura 3.6 – Conjunto fonte, detector e suporte, fonte radioativa ^{241}Am a esquerda, detector com fotomultiplicador a direita, suporte para recipientes contendo a suspensão no centro.

Fonte: o autor.

Tanto a fonte quanto o detector possuíam movimentação nos eixos x e z, enquanto o suporte central permanecia fixo, permitindo a avaliação da concentração de sólidos em toda a área do sedimento formado.

Antes do início da aquisição dos dados experimentais, foi necessário caracterizar o sistema de detecção quanto ao tempo de resposta, ou seja, o intervalo associado ao processamento dos pulsos eletrônicos. Essa etapa é essencial, pois o tempo de resposta influencia diretamente a correção das leituras indiretas de concentração volumétrica de partículas obtidas por meio da TARG.

Para determinar o tempo de resposta do sistema, utilizaram-se placas de acrílico simulando diferentes fontes radioativas (A e B), conforme descrito por (Gardner e Ely, 1967). A metodologia adotada envolveu a aplicação da (Eq. 3.2), que permite calcular o tempo de

resposta com base em medições individuais com cada fonte e com ambas simultaneamente. O procedimento é descrito a seguir:

$$\tau = \frac{I_{ab} - I_a - I_b + I_{gr}}{I_a^2 + I_b^2 - I_{ab}^2} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Na equação, I_a representa a taxa de contagem com a fonte radioativa A; I_b , é a taxa com a fonte B; I_{ab} a contagem obtida com ambas as fontes presentes; e I_{gr} , a taxa de contagem de fundo (background), correspondente à radiação registrada na ausência das fontes, oriunda de fontes ambientais ou interferências externas.

Na ausência de duas fontes radioativas, utilizou-se o método alternativo com blocos acrílicos para simular as fontes A e B (Damasceno, 1992; Arouca, 2007; Moreira, 2014; Oliveira Junior, 2014). Os blocos são posicionados entre a fonte e o detector, absorvendo parte da radiação, enquanto outra parte atravessa o bloco e atinge o detector. A porção de radiação absorvida pelo bloco é considerada a intensidade da fonte I_a (ou I_b); ambos os blocos juntos equivalem à fonte I_{ab} . A Tabela 3.3 apresenta os valores referentes as leituras de I_a , I_b , I_{ab} e I_{gr} .

Tabela 3.3 – Valores utilizados no cálculo do tempo de resolução do sistema.

| Parâmetros | Taxa de contagem [s ⁻¹] |
|------------|--|
| I_a | 1492,17 |
| I_b | 1079,4 |
| I_{ab} | 2236,77 |
| I_{gr} | 3,49 |

Fonte: o autor.

O valor do tempo de resolução obtido foi $\tau = 0,0002056\text{ s}$.

Para a correção das contagens que chegam ao detector em função do tempo de resposta, utilizou-se a (Eq. 3.3).

$$R = \frac{I}{(1 - \tau I)} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Assim, todas as leituras realizadas nos experimentos foram previamente corrigidas antes de serem utilizadas no cálculo da concentração de sólidos do sedimento.

O cálculo da concentração de sólidos é efetuado por meio da (Eq. 3.4, conforme descrito na seção 2.2 (Técnica de atenuação de raios gama (TARG))).

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (\text{Eq. 3.4})$$

em que R_0 e R são as contagens de pulsos corrigidas na ausência e na presença de sólidos, respectivamente, e β é um parâmetro que depende do coeficiente de atenuação do material.

O parâmetro β foi obtido por meio de uma curva de calibração, utilizando suspensões com concentrações de sólidos conhecidas $\varepsilon_s = 0,02; 0,07; 0,12; 0,17$ e $0,23$. A partir dos dados de ε_s e $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$, aplicou-se regressão linear para determinar β , viabilizando a conversão dos dados de atenuação em valores quantitativos de concentração usando a (Eq. 3.4). A Figura 3.7 mostra as curvas de calibração para as provetas e para os recipientes retangulares: a) proveta; b) recipiente com aquecimento lateral; c) recipiente com aquecimento na base.

Tanto o parâmetro β quanto o valor de R_0 foram obtidos em uma posição central dos recipientes de teste (considerando o eixo x) e utilizados para calcular as concentrações de sólidos nas demais posições do sedimento (eixo z). Essa simplificação é viável, uma vez que os recipientes fabricados industrialmente apresentam variação mínima na espessura de suas paredes, o que não interfere significativamente nos resultados de concentração (Damasceno, 1992; Arouca, 2007; Moreira, 2014; Oliveira Junior, 2014). Medidas adicionais confirmaram a homogeneidade dos recipientes.

Todos os testes para determinação das curvas de calibração foram realizados em triplicata. A Tabela 3.4 apresenta os valores de β obtidos nos ajustes.

Tabela 3.4 – Valores de β obtidos nas curvas de calibração.

| RECIPIENTE | β | R^2 |
|------------------------------------|---------|-------|
| Proveta | 4,47 | 0,98 |
| Retangular com aquecimento lateral | 6,53 | 0,99 |
| Retangular com aquecimento na base | 6,25 | 0,99 |

Fonte: o autor.

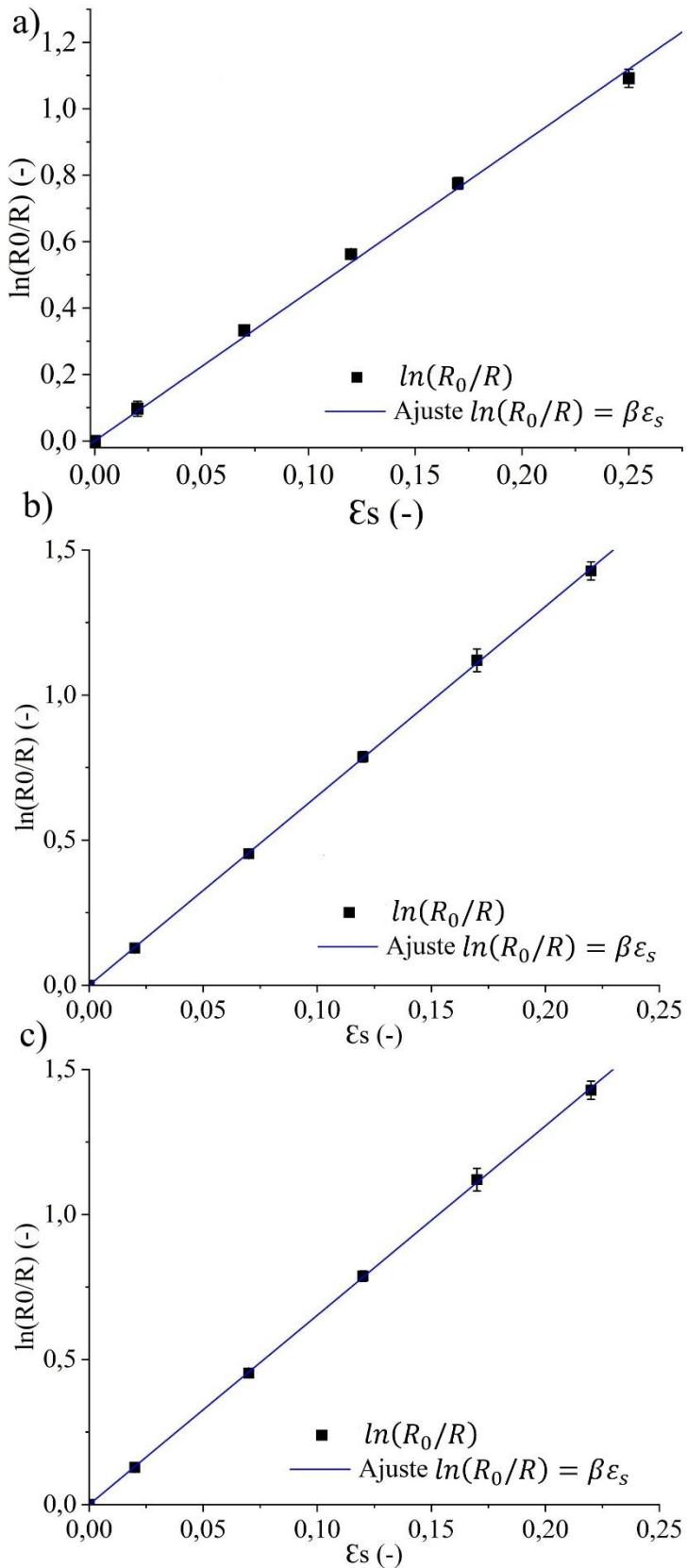


Figura 3.7 – Curvas de calibração dos recipientes de teste, (a) cilíndrico (provetas), (b) retangular com aquecimento lateral, (c) retangular com aquecimento na base.

Fonte: o autor

O uso da TARG permitiu não apenas a obtenção de perfis de concentração ao longo do sedimento, mas também forneceu subsídios para o cálculo da pressão efetiva nos sólidos sedimentados, por meio de modelos baseados no equilíbrio de forças (Damasceno, 1992), conforme a (Eq. 3.5) (ver detalhes na Secção 2.3),

$$P_s = g(\rho_s - \rho_f) \int_z^H \varepsilon_s(z) dz \quad (\text{Eq. 3.5})$$

em que $\varepsilon_s(z)$ é obtido pelo ajuste do modelo representado pela (Eq. 3.6 aos dados experimentais do perfil de concentração do sedimento estabilizado.

$$\varepsilon_s(z) = \frac{(\varepsilon_{sm} + bz)}{(1 + cz)} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

A concentração máxima de sólidos (ε_{sm}) pode ser interpretada fisicamente como a concentração máxima atingida pelo sedimento, geralmente localizada na base do recipiente de teste após a completa deposição dos sólidos.

3.3 Testes de sedimentação isotérmica em água

Os experimentos de sedimentação sob condições isotérmicas tiveram como objetivo avaliar, de forma qualitativa e quantitativa, a influência da temperatura na dinâmica da sedimentação em suspensões mantidas sob temperatura uniforme. Foram analisados três parâmetros principais: velocidade de sedimentação, altura final do sedimento estabilizado e o perfil de concentração de sólidos ao longo da altura do sedimento na condição de equilíbrio. A partir do perfil de concentração de sólidos, foi possível estimar a distribuição de pressão efetiva nos sólidos sedimentados (Damasceno, 1992).

Para os testes de sedimentação isotérmica, assim como para os demais ensaios realizados, foram adotadas as temperaturas de 25 °C e 70 °C. Esses valores foram escolhidos por estarem suficientemente afastados entre si, possibilitando uma melhor avaliação do efeito da temperatura sobre o processo de sedimentação. Outro critério considerado foi a viabilidade experimental: a temperatura de 25 °C é facilmente alcançada por meio de climatizadores, por estar próxima à temperatura ambiente em Uberlândia-MG; já a temperatura de 70 °C foi definida como limite superior viável, suficientemente elevada para representar condições térmicas intensificadas, mas ainda sem provocar perdas significativas por evaporação, a qual pode ser minimizada com vedação simples dos recipientes.

Foram realizados ensaios de sedimentação em provetas sob condições isotérmicas, nas temperaturas de 25 °C e 70 °C. A suspensão utilizada consistiu em uma mistura de carbonato de cálcio (CaCO_3) a 15% v/v em água destilada.

Os testes foram conduzidos em três provetas cilíndricas de vidro com capacidade de 500 mL e diâmetro interno de 5,1 cm, sendo todas as provetas idênticas em suas dimensões internas. O uso de três provetas iguais teve como objetivo realizar o mesmo experimento em triplicata. A Figura 3.8 apresenta a proveta utilizada nos experimentos.



Figura 3.8 – Provetas idênticas utilizadas nos testes de sedimentação isotérmica.
Fonte: o autor.

Foi fixado ao longo das provetas um papel milimetrado, cuidadosamente posicionado com origem na marca de 50 mL. Esse papel teve a finalidade de auxiliar na leitura da altura da interface descendente e da altura final do sedimento formado.

A verificação das dimensões das provetas, para garantir a uniformidade geométrica, foi realizada por duas metodologias complementares:

1. As dimensões internas de cada proveta foram medidas com paquímetro digital. Os resultados indicaram diâmetro interno de 5,1 cm e altura interna de 29,1 cm para todas, confirmando a equivalência dimensional.

2. Amostras de água destilada com massas de 60, 150 e 400 g foram pesadas em balança analítica e vertidas nas provetas, registrando-se a altura atingida pela coluna de líquido. Em todas as provetas, os níveis observados foram coincidentes: 3,1; 7,5 e 19,75 cm, respectivamente, confirmando a consistência volumétrica entre os recipientes.

Para o aquecimento da suspensão e controle preciso da temperatura durante os ensaios, utilizou-se uma estufa de laboratório com sistema de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo), garantindo estabilidade térmica e reduzindo flutuações indesejadas. A Figura 3.9 apresenta o modelo de estufa utilizada.



Figura 3.9 – Estufa laboratorial com controle PID utilizada para o aquecimento e controle de temperatura.

Fonte: o autor.

A estufa contava com dois termostatos digitais posicionados estratégicamente: o primeiro a 10 cm acima da base e o segundo, 10 cm abaixo do topo. A temperatura da suspensão foi considerada como a média aritmética dos valores indicados por esses sensores.

Um ensaio preliminar foi realizado para determinar o tempo necessário à completa estabilização do sedimento. Nesse teste, a suspensão de carbonato de cálcio a 15% v/v foi homogeneizada e colocada na proveta, permanecendo em repouso por cinco dias. Observou-se que, após as primeiras 3 horas, a altura do sedimento se estabilizou, sem variações mensuráveis,

mesmo com o tempo adicional. Assim, determinou-se que 3 horas eram suficientes para a completa sedimentação e estabilização do sedimento.

A Figura 3.10 apresenta o gráfico da variação da altura da interface descendente ao longo do tempo, referente ao teste preliminar.

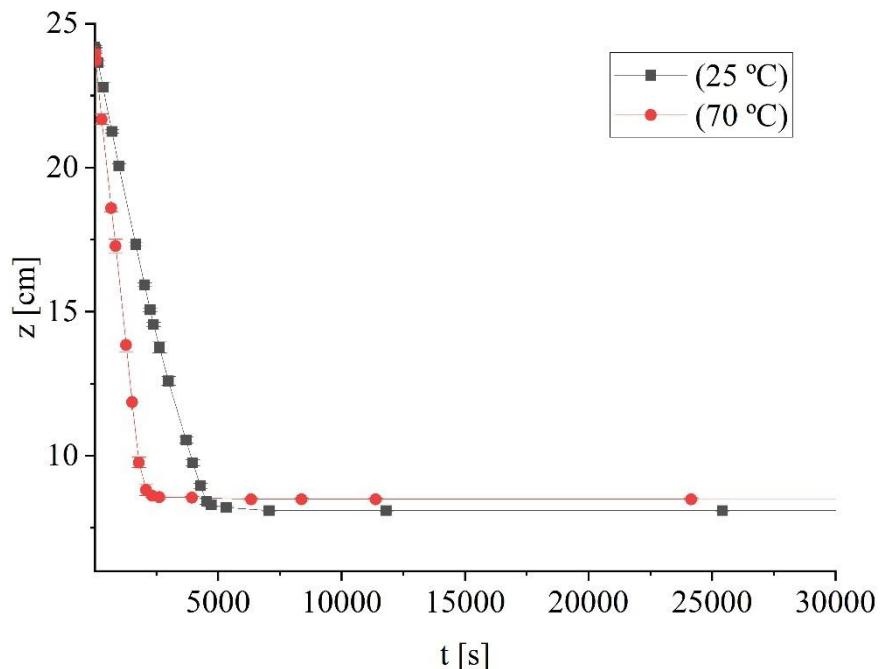


Figura 3.10 – Gráfico da altura da interface descendente em função do tempo – Teste preliminar de estabilização do sedimento.

Fonte: o autor.

Procedimento experimental

Nos tópicos anteriores, foram apresentados a caracterização dos equipamentos e a metodologia dos testes preliminares. Nesta seção, descreve-se o procedimento experimental para o teste de sedimentação sob condição isotérmica a 70 °C.

As três provetas cilíndricas aferidas foram preenchidas com 500 mL da suspensão de carbonato de cálcio a 15% v/v em água destilada e colocadas no interior da estufa, previamente ajustada para 70 °C. A temperatura ambiente da sala era de aproximadamente 23 °C.

Após 40 minutos na estufa, tempo necessário para que a suspensão atingisse condição térmica uniforme, realizou-se a homogeneização manual da suspensão em cada proveta, iniciando-se, a partir desse momento, o processo de sedimentação.

Durante a sedimentação, foram feitas leituras da posição da interface descendente em intervalos regulares: a cada 30 segundos nos estágios iniciais e, nas fases finais, em intervalos de até 30 minutos.

A altura da interface descendente e o tempo correspondente foram registrados com o auxílio de uma câmera digital, que incorporava automaticamente o horário exato nas imagens capturadas. Esse recurso permitiu avaliação precisa da posição da interface e do tempo de sedimentação para as três provetas de forma simultânea, minimizando o tempo de abertura da porta da estufa e, consequentemente, reduzindo a interferência térmica.

Após 3 horas de sedimentação, as provetas foram retiradas da estufa uma a uma, mantendo-se a integridade do sedimento formado. Imediatamente, procedeu-se à leitura do perfil de concentração de sólidos usando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG), ainda a 70 °C.

O tempo necessário para a leitura do perfil de concentração de sólidos na TARG foi de 180 segundos. Nesse período, a variação de temperatura do conjunto suspensão-proveta foi desprezível, visto que o vidro, material das provetas, possui baixa condutividade térmica, atuando como isolante térmico.

Concluída a leitura a quente, o sistema foi deixado em repouso para resfriamento natural até atingir a temperatura ambiente de 25 °C. Durante esse período, não houve qualquer perturbação no sistema, preservando-se a estrutura do sedimento. Após o resfriamento completo, realizou-se nova leitura do perfil de concentração de sólidos, agora com todo o conjunto à 25 °C.

Resumo das etapas do experimento:

- 1- Preenchimento das provetas com 500 mL da suspensão.
- 2- Colocação na estufa a 70 °C.
- 3- Aguardar 40 minutos para estabilização térmica.
- 4- Homogeneização e início da sedimentação.
- 5- Leitura da interface (com câmera, em intervalos de 30 s a 30 min).
- 6- Após 3 horas: retirada da estufa.
- 7- Leitura com TARG a 70 °C.
- 8- Resfriamento natural até 25 °C.
- 9- Leitura com TARG a 25 °C.

O mesmo procedimento descrito para o teste a 70 °C foi repetido para uma nova condição experimental, com a temperatura mantida em 25 °C. Todas as etapas de 1 a 7 foram seguidas. As etapas 8 e 9 foram desconsideradas, pois o sistema já estava à temperatura de 25 °C desde o início.

A Figura 3.11 apresenta as provetas no interior da estufa. As 3 provetas são idênticas em tamanho e volume.



Figura 3.11 – Provetas no interior da estufa contendo o sedimento da suspensão de carbonato de cálcio 15% v/v em água destilada.

Fonte: o autor.

3.4 Testes de sedimentação isotérmica em fluidos de perfuração à base de água

Além dos testes com a suspensão de carbonato de cálcio em água, também foram realizados ensaios de sedimentação isotérmica com dois fluidos de perfuração à base de água, fornecidos e preparados pelo laboratório de pesquisa da Petrobras, denominados BrCarb10 e BrCarb11. Ambos os fluidos foram formulados com água, carbonato, salmoura e polímeros viscosificantes, mas apresentam características distintas. O objetivo destes testes é o mesmo proposto para a sedimentação isotérmica em água: avaliar a influência da temperatura na dinâmica da sedimentação em suspensões mantidas sob diferentes temperaturas uniformes.

O fluido BrCarb10 apresentou densidade de 1,23 g/cm³ e concentração de carbonato de 9,84% v/v. Já o fluido BrCarb11 apresentou densidade de 1,36 g/cm³ e concentração de carbonato de 17,24% v/v. Os dados de concentração de sólidos foram fornecidos pela Petrobras.

Ambos os fluidos foram submetidos ao mesmo procedimento experimental descrito anteriormente na Secção 3.3, referente à suspensão de carbonato de cálcio em água, sob temperatura isotérmica de 70 °C e à temperatura ambiente (Uberlândia-MG). No entanto, devido à maior viscosidade aparente desses sistemas, uma modificação importante foi incorporada ao procedimento: o tempo de sedimentação a 70 °C foi estendido para 24 horas antes da leitura do perfil de concentração de sólidos por meio da TARG. Esse intervalo adicional foi necessário para garantir a visualização da interface descendente e um certo nível de sedimentação, uma vez que a maior viscosidade aparente dos fluidos de perfuração retarda significativamente o processo de sedimentação em comparação com sistemas contendo apenas água e carbonato. A Figura 3.12 apresenta os fluidos no interior da estufa e a interface de sedimentação durante os testes.

No teste conduzido à temperatura ambiente, a sedimentação dos fluidos de perfuração ocorreu de forma ainda mais lenta, exigindo um período experimental prolongado de 280 dias. Durante esse período, a interface de sedimentação foi monitorada periodicamente por meio da leitura das concentrações de sólidos ao longo da proveta, utilizando a Técnica de Atenuação de Radiação Gama (TARG). Os testes foram realizados entre agosto de 2024 e maio de 2025. Nesse intervalo, a temperatura média mensal na cidade de Uberlândia variou entre 20,6 °C e 23,2 °C, segundo dados do site Climate-data.org (2025). Na Figura 3.13 apresenta os fluidos de perfuração em processo de sedimentação à temperatura ambiente.

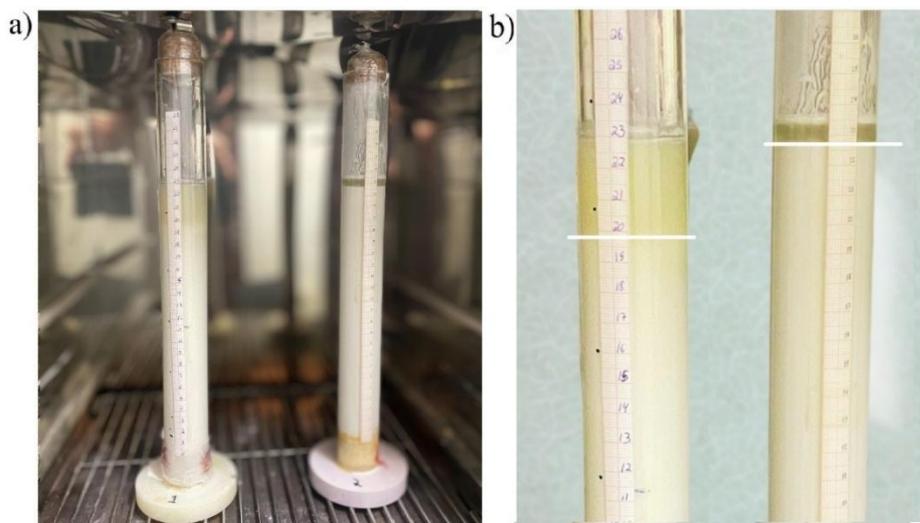


Figura 3.12 – Provetas de teste com fluidos de perfuração BrCarb 10 e BrCarb 11, a) provetas no interior da estufa, b) posição da interface descendente.

Fonte: o autor.

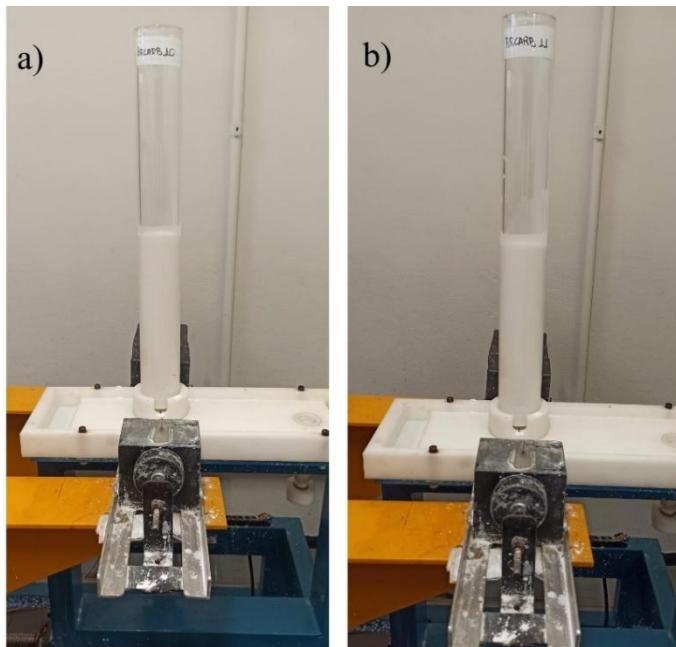


Figura 3.13 – Provetas de teste com fluidos de perfuração em temperatura ambiente a) BrCarb10, b) BrCarb11.

Fonte: o autor

Para a leitura da concentração de sólidos, foi necessária a determinação do parâmetro β , utilizado na equação de calibração da TARG (Eq. 3.4). Aplicou-se o método proposto por Fagundes (2015), que se baseia na utilização de apenas dois pontos da curva de calibração. Os pontos utilizados foram:

- $\varepsilon_s = 0$: correspondente ao líquido clarificado (sem sólidos) para os dois fluidos;
- $\varepsilon_s = 0,1$ e $\varepsilon_s = 0,17$: correspondente à concentração inicial de sólidos no fluido BrCarb10 e BrCarb11 respectivamente, obtida a partir da homogeneização do fluido.

O método tradicional de calibração da TARG, baseado em curvas experimentais com diferentes concentrações conhecidas, não pôde ser aplicado neste caso, pois os fluidos de perfuração foram fornecidos já preparados pela Petrobras, não sendo possível preparar amostras com teores variados de sólidos a partir da mesma formulação.

Com base no método proposto por Fagundes (2015), o valor de β foi determinado para quatro situações distintas: para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11, considerando tanto o recipiente de sedimentação à temperatura ambiente quanto o recipiente de sedimentação aquecido a 70 °C. Esses valores de β foram utilizados na conversão das leituras de atenuação

em perfis de concentração para cada fluido ensaiado. Ressalta-se que o valor de β não depende da temperatura, mas sim das características do recipiente e das propriedades da suspensão analisada. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de β obtidos para os fluidos de perfuração para recipientes de teste a temperatura ambiente e a 70 °C.

| Fluido | β | |
|----------|--------------------------------|-----------------------|
| | Recipiente para temp. ambiente | Recipiente para 70 °C |
| BrCarb10 | 3,32 | 2,02 |
| BrCarb11 | 3,64 | 2,52 |

Fonte: o autor.

3.4.1 Caracterização reológica dos fluidos de perfuração.

Neste estudo, investigou-se o efeito da temperatura sobre as propriedades reológicas de fluidos de perfuração à base de água contendo diferentes concentrações de carbonato de cálcio (10% e 17%), identificados como BrCarb10 e BrCarb11. Os ensaios foram realizados em reômetros Anton Paar, abrangendo faixas de temperatura de 25 °C a 70 °C, com o objetivo de avaliar o comportamento reológico em diferentes taxas de cisalhamento, bem como a tixotropia e as propriedades viscoelásticas. A Figura 3.14 apresenta os reômetros utilizados.

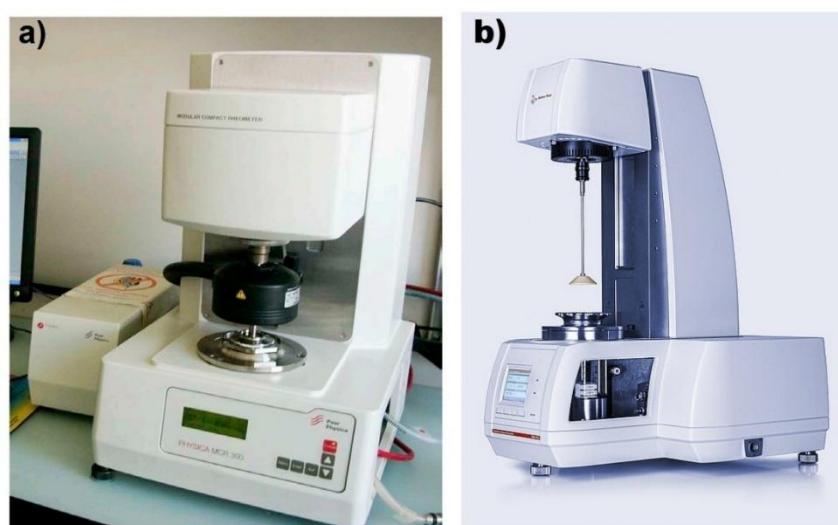


Figura 3.14 – Reômetros digitais, (a) reômetro Anton Paar MCR 300, (b) reômetro Anton Paar MCR 302e.

Fonte: o autor.

O primeiro reômetro, ilustrado na Figura 3.14(a), possui configuração, ajustes e periféricos voltados para operar em altas taxas de cisalhamento com fluidos viscosos. Foi utilizada a célula de medição CC27, composta por um sistema de cilindros concêntricos com capacidade de 20 mL. Já o segundo reômetro, mostrado na Figura 3.14(b), é configurado para atuar em baixas taxas de cisalhamento, também em fluidos viscosos, utilizando o sistema de medição de placas paralelas com o spindle CP40, que requer 1,5 mL de suspensão.

Todos os testes foram realizados em triplicata, a fim de assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados. Antes de cada ensaio, os fluidos foram homogeneizados em alta taxa de cisalhamento (600 s^{-1}) por 5 minutos e deixados em repouso por 10 minutos dentro do próprio recipiente de teste. Esse procedimento foi adotado para minimizar os efeitos do histórico de cisalhamento e garantir condições homogêneas para as medições.

Curva de fluxo em baixa taxa de cisalhamento

Os testes para obtenção da curva de fluxo em baixa taxa de cisalhamento foram realizados a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. O procedimento consistiu em uma rampa decrescente, reduzindo a taxa de cisalhamento de 10 s^{-1} para $0,01\text{ s}^{-1}$. Foram testadas três escalas de tempo, configuradas em intervalos logarítmicos: 60–200 s, 15–400 s e 6–20 s. O objetivo foi avaliar a dependência temporal das propriedades reológicas sob diferentes condições. Os dados coletados incluíram o comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para cada intervalo de tempo, permitindo identificar possíveis variações associadas à dependência reológica do fluido ao longo do tempo.

Curva de fluxo em alta taxa de cisalhamento

Os testes para obtenção da curva de fluxo em alta taxa de cisalhamento foram conduzidos nas temperaturas de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. O procedimento incluiu duas etapas: uma curva de ida, com taxa de cisalhamento crescente de 10 s^{-1} a 1000 s^{-1} , utilizando uma escala logarítmica de tempo de 25 s para 2 s; e uma curva de volta, com taxa de cisalhamento decrescente de 1000 s^{-1} a 10 s^{-1} , com escala logarítmica de tempo de 2 s para 25 s.

O objetivo foi avaliar a variação da viscosidade aparente nas duas temperaturas e identificar a presença de histerese entre as curvas de ida e volta, como indicador do nível de tixotropia dos fluidos.

Varredura de temperatura

Os testes de varredura de temperatura foram realizados no reômetro MRC 300 para investigar a variação da viscosidade aparente em função da temperatura e da taxa de cisalhamento. O procedimento consistiu em uma rampa de temperatura crescente de 25 °C a 70 °C, com taxa de aumento controlada de 0,004 °C/s. As medidas foram realizadas em taxas de cisalhamento constantes de 10, 50, 100, 300 e 600 s⁻¹.

Os dados foram coletados em escala de tempo linear, registrando um ponto a cada 23 segundos. Os ensaios possibilitaram avaliar a resposta da viscosidade aparente ao aumento gradual da temperatura, considerando diferentes taxas de cisalhamento, e identificar comportamentos térmicos relevantes, como dependência da temperatura e eventuais alterações na estrutura do fluido.

Teste de Tixotropia de Três Intervalos (3ITT)

O teste de Tixotropia de Três Intervalos (3ITT) foi realizado no reômetro MRC 302e (Anton Paar) a uma temperatura constante de 25 °C. O ensaio consistiu na aplicação de tensões de cisalhamento controladas em três etapas sequenciais, com a viscosidade aparente registrada ao longo do tempo em escala linear, com coleta de um ponto a cada 10 segundos.

Primeiro intervalo: tensão de 0,3 Pa aplicada durante 10 minutos, representando a condição inicial de repouso.

Segundo intervalo: tensão aumentada para 4 Pa durante 1 minuto, induzindo a ruptura da estrutura do fluido.

Terceiro intervalo: tensão reduzida novamente para 0,3 Pa, mantida até que a viscosidade aparente atingisse estabilidade.

O objetivo foi avaliar a dependência temporal do fluido, incluindo o tempo necessário para a recuperação parcial ou total da estrutura após a ruptura e o tempo para estabilização da viscosidade aparente.

Teste Dinâmico de Varredura de Amplitude

O teste Dinâmico de Varredura de Amplitude foi realizado no reômetro MRC 302e (Anton Paar) a 25 °C. O ensaio consistiu na aplicação de tensão oscilatória, variando de 0,01 Pa a 10 Pa, com frequência fixa de 1 Hz. Os dados foram coletados em escala de tempo linear, com registro de um ponto a cada 30 segundos.

Este teste permite avaliar o comportamento viscoelástico do fluido, identificando os limites das regiões linearmente elástica e viscoelástica não linear. A variação na tensão aplicada fornece informações sobre a capacidade do material de armazenar energia (módulo de armazenamento, G') e de dissipá-la como calor (módulo de perda, G'').

3.5 Testes de sedimentação com gradiente de temperatura horizontal

Neste experimento, uma suspensão de CaCO_3 a 15% v/v foi submetida a um gradiente de temperatura horizontal durante o processo de sedimentação. O objetivo foi avaliar a evolução da temperatura e a formação do sedimento sob essas condições.

Para a realização dos ensaios, foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEQ/UFU), vinculado ao Laboratório de Separação Sólido-Líquido, um sistema experimental específico para a geração de gradiente de temperatura horizontal.

O sistema de testes consistia em um recipiente dividido em três compartimentos isolados: dois menores, posicionados nas laterais, e um maior, localizado no centro. Os compartimentos laterais foram preenchidos com óleo térmico ISO VG32 tipo HL, escolhido por suas propriedades de transferência de calor e ampla faixa de operação (-12 °C a 300 °C). No compartimento central foi adicionada a suspensão em estudo. Os compartimentos foram separados por placas de alumínio de 2 mm de espessura, selecionadas pela baixa resistência térmica, favorecendo a condução de calor. O restante da estrutura do recipiente foi fabricado em vidro de 6 mm de espessura. A Figura 3.15 ilustra o recipiente de teste.

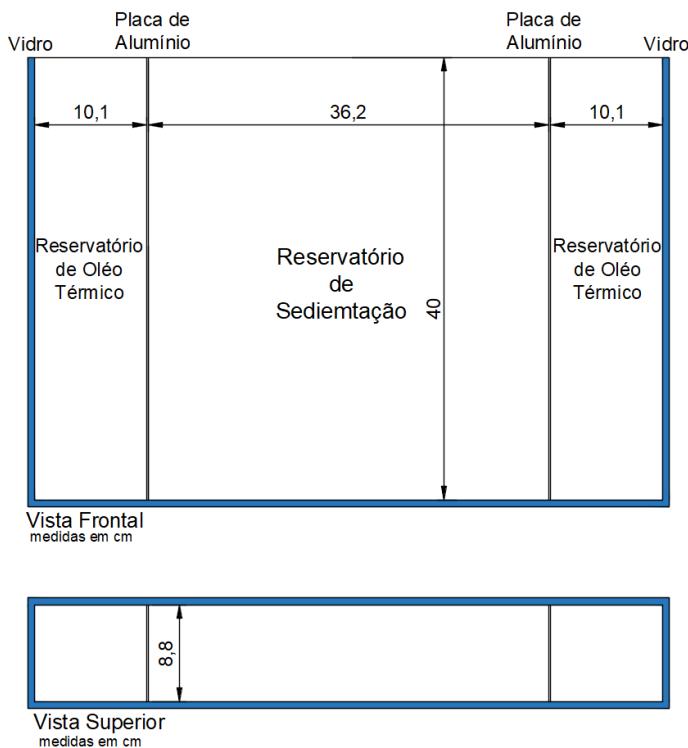


Figura 3.15 – Recipiente de teste com aquecimento lateral.
Fonte: o autor.

Nas laterais do recipiente, o óleo térmico era aquecido a 70 °C por meio de uma resistência elétrica de 500 W, controlada eletronicamente com o auxílio de termostatos e controladores de temperatura PID. Para garantir a homogeneidade da temperatura nos compartimentos laterais, bombas centrífugas promoviam a recirculação contínua do óleo. A Figura 3.16 apresenta as conexões para a recirculação do óleo térmico.

Os termostatos foram posicionados no centro dos reservatórios de óleo, estando submersos para efetuar a leitura direta da temperatura. Para monitorar o avanço do gradiente de temperatura, utilizou-se uma câmera térmica Teledyne FLIR modelo E8, que registra imagens térmicas com ajuste de faixa de temperatura manual ou automático, com resolução infravermelha de 76.800 pixels (320 x 240). Cada imagem térmica inclui data, hora, minuto e segundo da captura, informação essencial para determinar o tempo de sedimentação. No APÊNDICE A é apresentado o detalhamento da calibração dos parâmetros da câmera térmica. A Figura 3.17 mostra o equipamento utilizado.

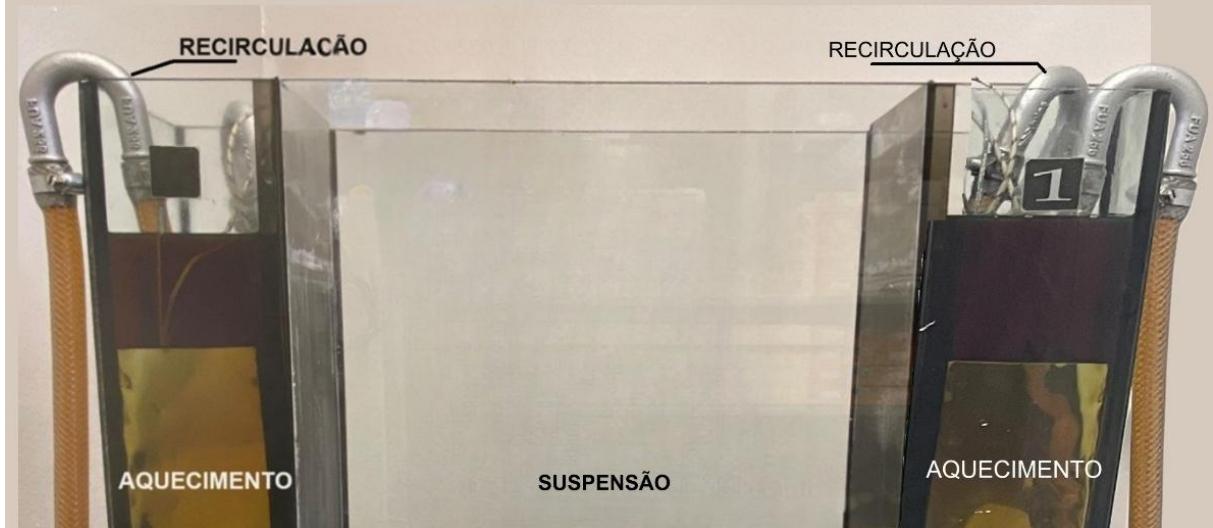


Figura 3.16 – Detalhes da recirculação do óleo térmico.

Fonte: o autor.



Figura 3.17 – Câmera térmica E8 – FLIR.

Fonte: o autor.

O recipiente de teste foi posicionado entre a fonte e o detector da TARG, equipamento com movimentação capaz de realizar leituras nos eixos x e z, conforme detalhado na Secção 3.2. Foi proposta uma malha de leitura para a concentração de sólidos nesses eixos. A Figura 3.18 mostra a distribuição espacial da malha de leitura.

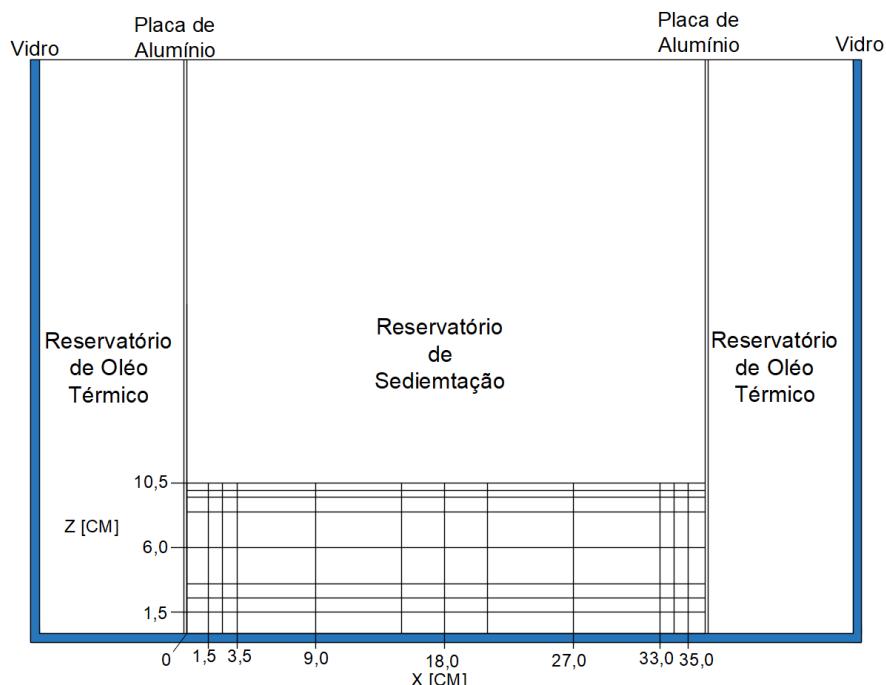


Figura 3.18 – Malha de leitura das concentrações.

Fonte: o autor.

Em cada ponto de interseção da malha, foi realizada a leitura da concentração de sólidos. Nota-se que o espaçamento é reduzido nas regiões próximas às paredes aquecidas, na base e na superfície do sedimento (interface sólido-líquido clarificado), enquanto nas demais regiões o espaçamento é maior. Essa configuração possibilita uma análise detalhada das variações de concentração próximas às zonas de maior gradiente térmico e na interface superior do sedimento, onde ocorrem as maiores flutuações de concentração(Oliveira Junior, 2014).

Foram realizados três ensaios de sedimentação, conforme descrito a seguir:

Teste A - Sedimentação sem aquecimento, apenas para avaliar a altura final do sedimento estabilizado. Esse ensaio serviu como referência e para definir a malha de leitura para os testes subsequentes.

Teste B – Sedimentação com aquecimento unilateral, onde apenas uma das laterais foi aquecida a 70 °C.

Teste C – Sedimentação com aquecimento bilateral, com ambas as laterais aquecidas a 70 °C.

Para cada teste (A, B e C), foram lidos 88 pontos no recipiente de teste, com duração aproximada de 5 minutos por ponto, realizados em triplicata. Avaliaram-se a altura final e a concentração de sólidos do sedimento estabilizado.

No início do processo ($t = 0$ min), a suspensão estava à temperatura ambiente, ajustada e mantida por climatizadores (ar-condicionado) a 25 °C, enquanto o óleo térmico estava a 25 °C ou 70 °C, conforme o teste executado (A, B ou C). A Figura 3.19 e a Tabela 3.6 apresentam a configuração inicial das temperaturas para cada condição.



Figura 3.19 – Descrição das temperaturas no recipiente de teste.
Fonte: o autor.

Tabela 3.6 – Temperaturas iniciais para teste com gradiente de temperatura.

| TESTE | T1 | Tsup [°C] | T2 |
|-------|----|--------------|----|
| A | 25 | 25 | 25 |
| B | 70 | 25 | 25 |
| C | 70 | 25 | 70 |

Fonte: o autor.

Após o ajuste das temperaturas, foram vertidos 10 litros de suspensão de carbonato de cálcio em água destilada (15% v/v) no compartimento central do recipiente, realizando-se a homogeneização da suspensão para dar início ao processo de sedimentação sob as condições iniciais especificadas (Tabela 3.6).

Conforme a sedimentação progredia, o calor difundia-se pela suspensão (testes B e C), estabelecendo um gradiente de temperatura ao longo do recipiente. Em intervalos regulares, imagens térmicas foram registradas para monitorar o avanço do gradiente térmico.

A sedimentação foi conduzida por três horas, tempo considerado suficiente para a estabilização do sedimento. Em seguida, a fonte de calor foi desligada e aguardou-se o

resfriamento natural do sistema até atingir 25 °C, monitorado com a câmera térmica para garantir uniformidade de temperatura em todo o recipiente.

Com o sistema completamente resfriado, procedeu-se à coleta dos dados: registrou-se a altura do sedimento ao longo do eixo x e determinou-se a concentração de sólidos de acordo com a malha apresentada na Figura 3.18.

A coleta de dados de concentração foi realizada apenas nos testes B e C, conduzidos sob condição de gradiente térmico. Nos ensaios isotérmicos (teste A), a concentração de sólidos foi avaliada apenas ao longo do eixo z, já apresentada na Secção 3.3, uma vez que, em condições isotérmicas, a sedimentação é um processo unidimensional (Kynch, 1952) e, portanto, não há variação significativa no eixo x.

3.6 Testes de sedimentação com gradiente de temperatura vertical

Os experimentos de sedimentação sob gradiente de temperatura vertical foram conduzidos com base em uma configuração semelhante à empregada nos estudos com aquecimento lateral (gradiente de temperatura horizontal). Nesta etapa, entretanto, a aplicação do gradiente térmico ocorreu de forma ascendente, com a fonte de calor posicionada na base do sistema, promovendo a transferência de calor de baixo para cima.

A suspensão utilizada nos ensaios foi composta por carbonato de cálcio disperso em água destilada, na concentração de 15% v/v. O objetivo dos testes foi avaliar a influência do gradiente de temperatura vertical no processo de sedimentação, investigando o avanço do perfil térmico ao longo do tempo, a altura final do sedimento formado e a distribuição de concentrações de sólidos no leito sedimentado, após o resfriamento completo do sistema.

Para a realização dos ensaios, o grupo de pesquisa da PPGEQ/UFU, vinculado ao Laboratório de Separação Sólido-Líquido, desenvolveu um sistema experimental específico para geração de gradiente de temperatura vertical. Esse sistema foi construído em vidro de 6 mm de espessura e composto por dois compartimentos: o inferior, destinado ao óleo térmico aquecido, e o superior, onde foi inserida a suspensão particulada. A separação entre os compartimentos foi feita por uma chapa de alumínio de 2 mm de espessura, escolhida por sua elevada condutividade térmica, o que favoreceu a transferência eficiente de calor para o compartimento superior.

O reservatório inferior contou com entrada e saída para recirculação do óleo térmico aquecido, o qual foi aquecido externamente em um reservatório auxiliar dotado de uma resistência elétrica de 500 W, responsável por elevar e manter a temperatura desejada durante o experimento. O sistema está representado esquematicamente na Figura 3.20.

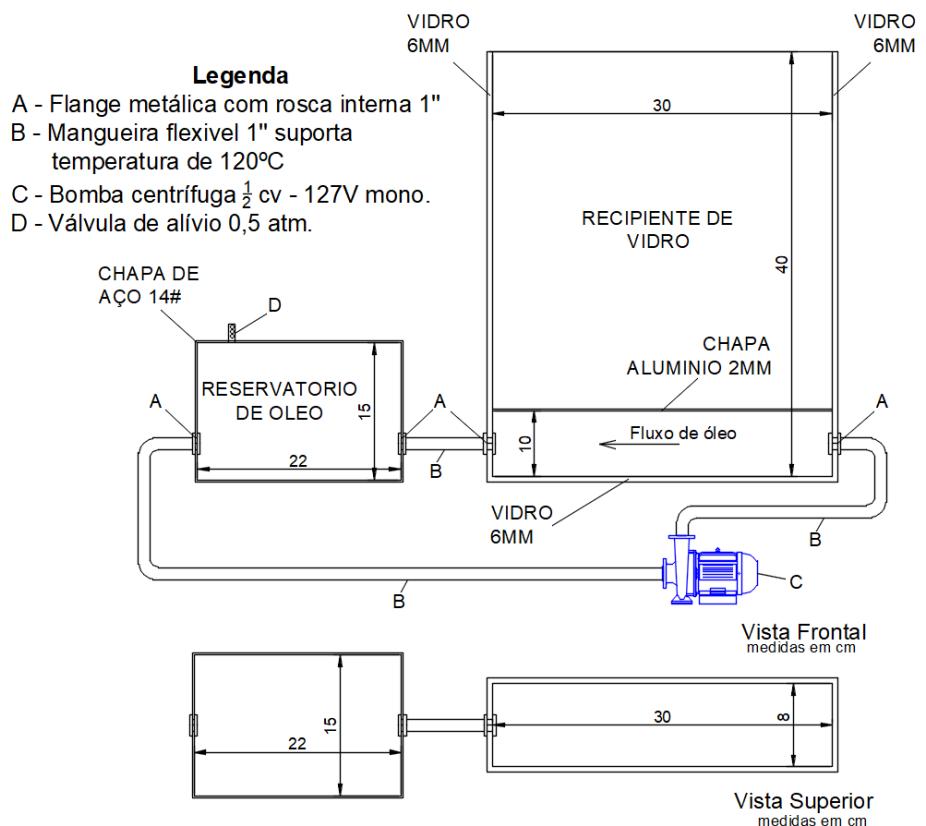


Figura 3.20 – Recipiente de teste com aquecimento na base.

Fonte: o autor.

O controle da temperatura do óleo térmico foi realizado por meio de um sistema automatizado com controlador PID, alimentado por sinais de termopares inseridos diretamente no reservatório de óleo. Esses sensores permitiram o monitoramento contínuo e preciso da temperatura, garantindo estabilidade térmica ao longo do tempo de ensaio.

A recirculação do óleo foi promovida por uma bomba centrífuga de 1/2 CV, que assegurou o fluxo constante através do compartimento inferior da célula, mantendo o gradiente térmico na interface com o compartimento superior. O painel de controle do sistema, contendo os dispositivos de comando e leitura das variáveis monitoradas, está apresentado na Figura 3.21.



Figura 3.21 – Painel de controle de temperatura.
Fonte: o autor.

O procedimento experimental consistiu no posicionamento do recipiente de teste entre a fonte e o detector do sistema TARG, permitindo o monitoramento por atenuação de radiação gama. O óleo térmico foi previamente aquecido até atingir 70 °C, e a suspensão de carbonato de cálcio (5 litros) foi então inserida no compartimento superior da célula de sedimentação.

Após a homogeneização da suspensão, iniciou-se o processo de sedimentação, conduzido durante um período contínuo de 3 horas. Durante esse intervalo, foram capturadas imagens térmicas em instantes previamente definidos, para acompanhar a evolução do gradiente de temperatura no sistema.

Ao término das 3 horas, o aquecimento foi desligado e o sistema permaneceu em repouso até o resfriamento completo. Em seguida, procedeu-se à medição da altura do sedimento formado e à determinação da concentração de sólidos ao longo dos eixos x e z do recipiente. A Figura 3.22 apresenta a malha de medição adotada, cujos pontos de leitura correspondem às interseções entre os referidos eixos.

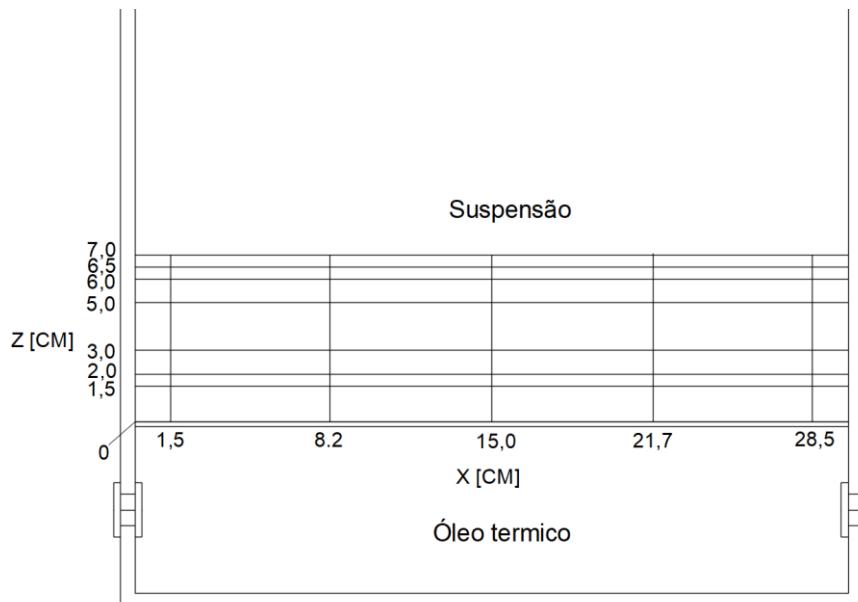


Figura 3.22 – Malha de leitura das concentrações.

Fonte: o autor.

No total, foram realizadas leituras de concentração de sólidos em 35 pontos distintos, com testes efetuados em triplicata. As medições foram planejadas de modo a manter uma distância mínima de 1,5 cm das paredes laterais e do fundo do recipiente, com o objetivo de evitar a influência de efeitos de parede e de possíveis irregularidades superficiais, garantindo a representatividade dos dados.

Todo o procedimento descrito nesta seção foi também repetido sob condição isotérmica a 25 °C. Para isso, a temperatura ambiente foi controlada por meio de climatizador do tipo ar-condicionado, instalado na sala de ensaio.

Encerrada a apresentação dos procedimentos experimentais, o Capítulo 4 passa à exposição dos principais resultados obtidos, acompanhados de uma análise crítica e detalhada, visando interpretar os efeitos térmicos sobre os processos de sedimentação e a estrutura dos leitos formados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos neste trabalho.

4.1 Sedimentação isotérmica

Nesta seção, são exibidos os resultados dos testes de sedimentação realizados com suspensões de carbonato de cálcio a 15% em volume. O estudo investigou a sedimentação em proveta para três condições distintas: sedimentação isotérmica a 25 °C, sedimentação isotérmica a 70 °C e reacomodação dos sólidos após o resfriamento de 70 °C para 25 °C.

O monitoramento da interface descendente durante a sedimentação de CaCO_3 em meio isotérmico foi realizado para avaliar a velocidade de sedimentação livre das partículas, o tempo de estabilização e a altura final do sedimento (H) a 25 °C e 70 °C. Os resultados desse monitoramento são apresentados na Figura 4.1.

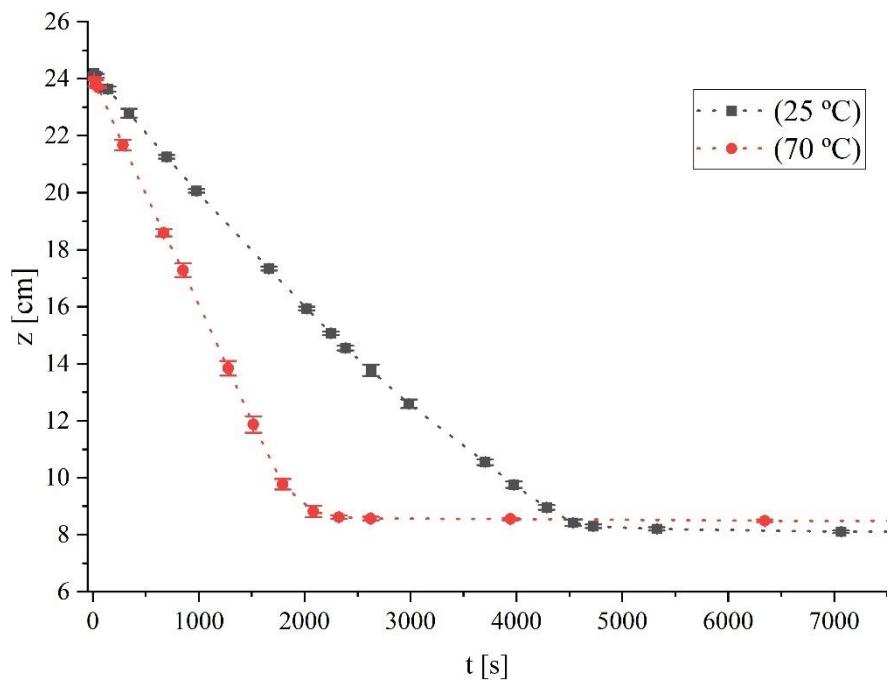


Figura 4.1 – Monitoramento da interface descendente da sedimentação de CaCO_3 a 25 °C e 70 °C.

Fonte: o autor.

A 70 °C, a interface de sedimentação desloca-se mais rapidamente em direção ao fundo do recipiente, quando comparada à observada a 25 °C. Esse fenômeno pode ser atribuído à redução da viscosidade dinâmica do meio líquido com o aumento da temperatura, o que facilita o movimento das partículas em suspensão, conforme observado nos trabalhos de Tang et al. (2021), Sarmiento e Urlherr (1979) e Mkpenie et al., (2007).

A diminuição da viscosidade dinâmica do fluido resulta em menor resistência ao movimento das partículas, aumentando assim a velocidade de sedimentação. Mesmo sendo um fenômeno físico, a sedimentação apresenta semelhanças com processos químicos que seguem um comportamento do tipo Arrhenius (Mkpenie et al., 2007).

Além disso, o aumento da temperatura pode promover a diminuição da densidade do líquido, alterando a diferença de densidade entre o sólido e o líquido, o que também pode influenciar a velocidade de sedimentação (Moreira, 2014; Alves, 2024).

A velocidade de sedimentação foi determinada pela inclinação da reta obtida a partir dos resultados apresentados na Figura 4.1. Para 25 °C, obteve-se $3,59 \times 10^{-3}$ cm/s (12,92 cm/h), enquanto a 70 °C foi de $8,01 \times 10^{-3}$ cm/s (28,85 cm/h), representando um aumento de 123% na taxa de sedimentação livre, a Figura 4.2 mostra uma imagem registrada durante os testes.

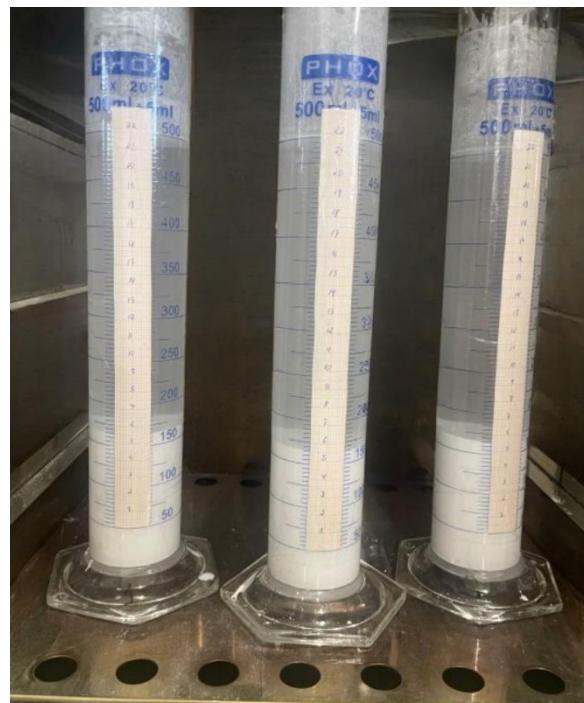


Figura 4.2 – Provetas no interior da estufa contendo o sedimento da suspensão de carbonato de cálcio 15% v/v em água destilada.

Fonte: o autor.

O gráfico apresentado na Figura 4.3 mostra a altura final do sedimento de CaCO_3 após 3 horas de sedimentação em provetas sob condições isotérmicas a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, bem como após o resfriamento do sedimento de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

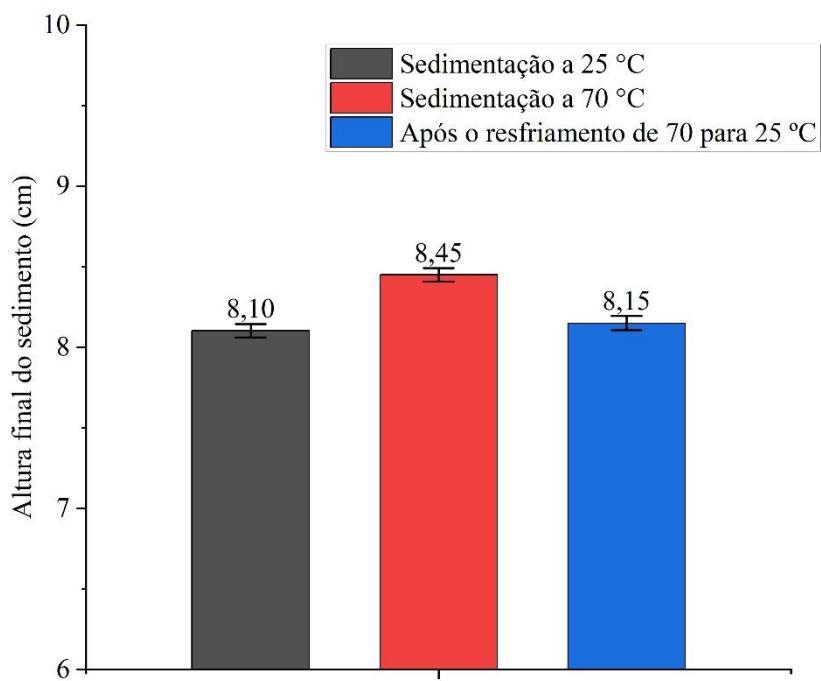


Figura 4.3 – Altura do sedimento formado após 3 h para sedimentação a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a após resfriamento de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fonte: o autor.

Observa-se que a altura final do sedimento (H) é maior quando o processo ocorre a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo 4,3% superior em comparação à sedimentação a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. A maior altura do sedimento a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ indica que o leito sedimentar permanece expandido nessa temperatura, considerando que o volume inicial de sólidos foi o mesmo em ambas as condições. Esse comportamento pode ser atribuído à ocorrência de movimentos convectivos na água, à redução da viscosidade dinâmica do fluido em condições de alta temperatura e a efeitos advectivos, que aumentam a mobilidade do fluido em sentido oposto ao das partículas, resultando em uma estrutura sedimentar menos compacta.

Após o resfriamento de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a altura do sedimento diminui para um valor muito próximo ao observado na sedimentação a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essa redução na expansão do leito sedimentar pode ser atribuída à diminuição dos movimentos convectivos no fluido. Com a diminuição da convecção, as partículas se reorganizam em uma configuração mais densa, o que reduz a expansão do leito. Nessa nova condição, a altura do leito é apenas 0,62% maior em

comparação com a sedimentação realizada diretamente a 25 °C, indicando que a expansão praticamente desaparece com a redução da temperatura.

A concentração volumétrica de sólidos foi determinada por meio da TARG ao longo do sedimento formado nas provetas para os três casos analisados: sedimentação a 70 °C, a 25 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C. As leituras foram efetuadas após 3 horas de sedimentação, e os resultados estão apresentados na Figura 4.4.

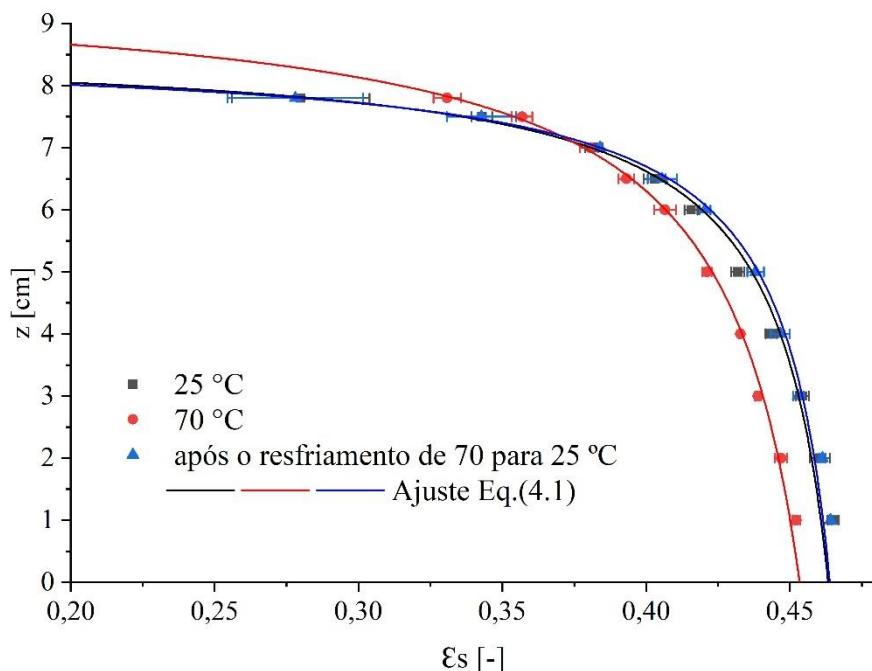


Figura 4.4 – Concentração de sólidos para sedimentação a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C.

Fonte: o autor.

Os resultados da concentração volumétrica de sólidos (ϵ_s) confirmam que o leito formado durante a sedimentação a 70 °C apresenta-se expandido. Sabendo que $z = 0$ representa a base da proveta, observa-se que, nas camadas inferiores, a concentração de sólidos a 70 °C é menor em comparação à sedimentação a 25 °C. Por outro lado, nas camadas superiores, a concentração de sólidos a 70 °C é maior. Esses resultados indicam uma redistribuição dos sólidos, com redução da concentração na base e aumento na superfície do leito sedimentar para sedimentação a 70 °C.

O modelo utilizado para ajuste dos dados experimentais foi um modelo de três parâmetros, proposto inicialmente por Arouca (2003) e aplicado em vários outros trabalhos da área. O modelo é representado pela (Eq. 4.1).

$$\varepsilon_s(z) = \frac{(\varepsilon_{sm} + bz)}{(1 + cz)} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Os parâmetros da (Eq. 4.1) foram ajustados aos dados experimentais, e a Figura 4.4 demonstra que o modelo representa adequadamente a concentração de sólidos no leito. Os valores dos parâmetros estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação em provetas a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento.

| Parâmetro | 25 °C | 70 °C | Resfriamento 70 °C para 25 °C |
|----------------------|---------|--------|----------------------------------|
| ε_{s_m} | 0,468 | 0,455 | 0,466 |
| b | -5,422 | -4,872 | -5,539 |
| c | -10,930 | -9,972 | -11,337 |

* $R^2 = 0,999$ para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

Verifica-se que a concentração volumétrica máxima de sólidos (ε_{s_m}) foi menor a 70 °C, indicando que a expansão do leito afeta tanto a altura quanto a concentração de sólidos no sedimento. Por outro lado, nas condições de 25 °C e após o resfriamento, os valores de ε_{s_m} , b e c foram muito próximos, evidenciando uma reorganização das partículas para um estado equivalente ao que seria alcançado caso a sedimentação tivesse ocorrido integralmente a 25 °C.

A distribuição de concentração, com a altura z normalizada (adimensionalizada) variando entre 0 (base da proveta) e 1 (altura total do sedimento), é apresentada na Figura 4.5.

Como esperado para um leito expandido, a concentração de sólidos é menor para a sedimentação a 70 °C em quase todo o perfil de altura adimensional. A diferença é mais pronunciada na base do sedimento, devido à expansão; já próximo à superfície, as concentrações se aproximam, uma vez que, em um leito sedimentar, a superfície naturalmente apresenta menor concentração de sólidos (Arouca, 2007).

Com base na (Eq. 4.1) e utilizando os parâmetros da Tabela 4.1, foi possível calcular a pressão nos sólidos por meio da (Eq. 4.2).

$$P_s = (\rho_s - \rho_s)g \int_z^H \varepsilon_s dz \quad (\text{Eq. 4.2})$$

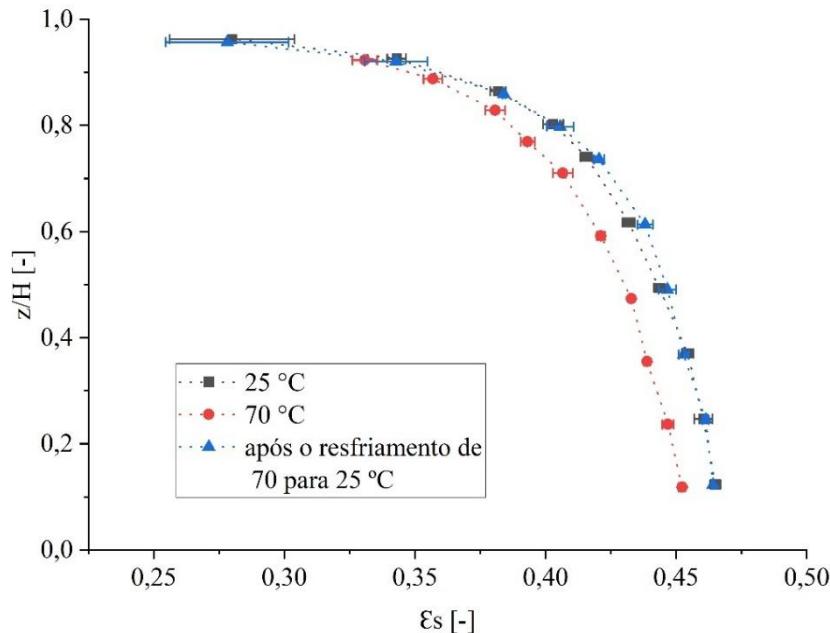


Figura 4.5 - Concentração de sólidos para sedimentação a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C para altura adimensional.

Fonte: o autor.

Para o sedimento formado, considerou-se H como a altura final do sedimento da Figura 4.3. Os resultados foram expressos como pressão nos sólidos (P_s) em função da altura do sedimento (z), com o objetivo de verificar possíveis variações ao longo da profundidade do leito. A pressão nos sólidos é definida como a força exercida pelo peso das camadas superiores sobre uma determinada posição z no sedimento.

Essa análise é importante para o entendimento da perfuração de poços, nos quais os leitos sedimentares também podem se apresentar expandidos devido à influência da temperatura geotérmica (Adams e Maceachran, 1994). Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

Observa-se que, em todas as condições, a pressão nos sólidos diminui com o aumento da altura do sedimento, o que é esperado devido à menor sobrecarga de partículas nas camadas superiores do leito.

Verifica-se que a pressão nos sólidos é muito próxima em todas as condições analisadas. Esses resultados indicam que a pressão ao longo do leito é pouco afetada pela expansão térmica, uma vez que o volume de sólidos permanece constante, havendo apenas uma redistribuição espacial das partículas no leito.

Como a altura final do sedimento formado a 70 °C é maior, regiões superiores que não continham sólidos na sedimentação a 25 °C passam a apresentar material sedimentado.

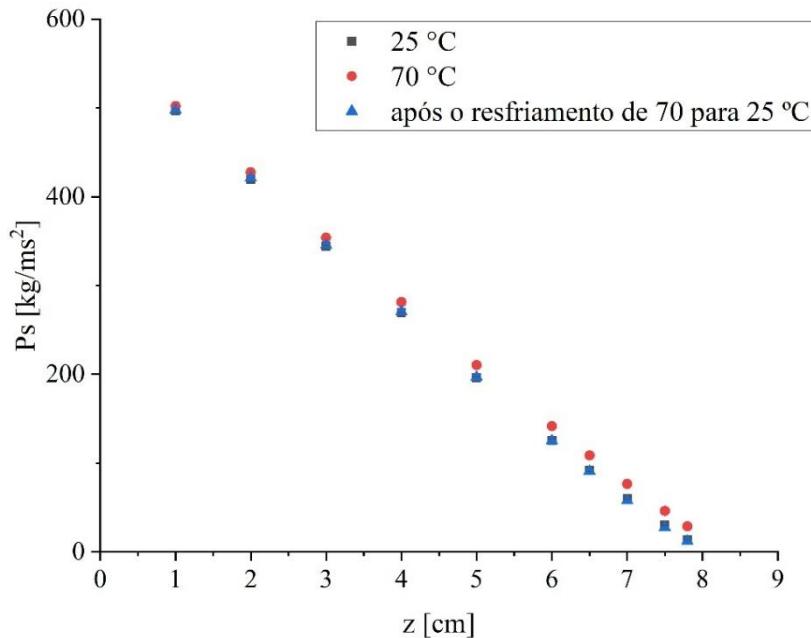


Figura 4.6 – Pressão nos sólidos ao longo do sedimento formado em provetas a 25 °C, 70 °C e após o resfriamento.

Fonte: o autor.

Esses sólidos presentes nas camadas superiores a 70 °C resultam da redução na concentração de sólidos das camadas inferiores, mantendo a pressão nos sólidos sem grandes variações durante a expansão do leito.

Após o resfriamento do leito sedimentado a 70 °C, observou-se uma nova acomodação dos sólidos, ajustando o leito a valores de concentração muito próximos aos verificados na sedimentação a 25 °C (Figura 4.4). Logo, a pressão nos sólidos para a sedimentação a 25 °C e após o resfriamento de 70 °C para 25 °C são praticamente idênticas ao longo de toda a profundidade do leito. Esse comportamento reforça que, após o resfriamento, o leito retorna a um estado de compactação muito semelhante ao observado na sedimentação isotérmica a 25 °C.

4.2 Sedimentação com gradiente de temperatura horizontal

Nesta seção, são apresentados os resultados do processo de sedimentação realizado no recipiente de teste ilustrado na Figura 3.15 , considerando as condições de temperatura para os testes A, B e C, conforme descrito na Tabela 3.6.

Um aspecto importante a ser destacado nestes testes é que os resultados foram obtidos após a estabilização do sedimento no fundo do recipiente de teste e seu completo resfriamento.

Assim, em toda a seção Sedimentação com gradiente de temperatura , termos como “parede aquecida” e “lado aquecido” devem ser interpretados no passado, referindo-se à “parede que estava aquecida” ou “lado que estava aquecido”.

4.2.1 Monitoramento do gradiente de temperatura

Imagens térmicas (Figura 4.7 e Figura 4.8) foram capturadas em diferentes momentos ao longo do processo de sedimentação. Ao lado de cada imagem térmica, encontra-se uma imagem real do exato momento da captura da imagem térmica.

O óleo térmico permaneceu aquecido a 70 °C desde o início do experimento até a estabilização do sedimento (fim da sedimentação), transferindo calor para a suspensão, que inicialmente estava a uma temperatura de 25 °C. A concentração volumétrica de sólidos inicial foi de 15%.

Observa-se que a temperatura avança gradualmente da parede aquecida para o interior do recipiente à medida que a sedimentação ocorre. O comportamento térmico está diretamente relacionado à distribuição das partículas em suspensão nas regiões de sedimentação livre e de líquido clarificado.

Na região de sedimentação livre, onde há alta concentração de partículas, o calor avança predominantemente por condução térmica. Isso ocorre devido à presença de sólidos que conduzem calor entre partículas vizinhas. Nessa região, o empacotamento das partículas cria um meio que conduz o calor de maneira semelhante a um sólido.

Por outro lado, na região de líquido clarificado, onde praticamente não há partículas em suspensão, o calor é transferido principalmente por convecção. O processo de convecção natural transporta calor para a superfície, aquecendo inicialmente a água na camada superior e avançando gradativamente em direção ao fundo do recipiente.

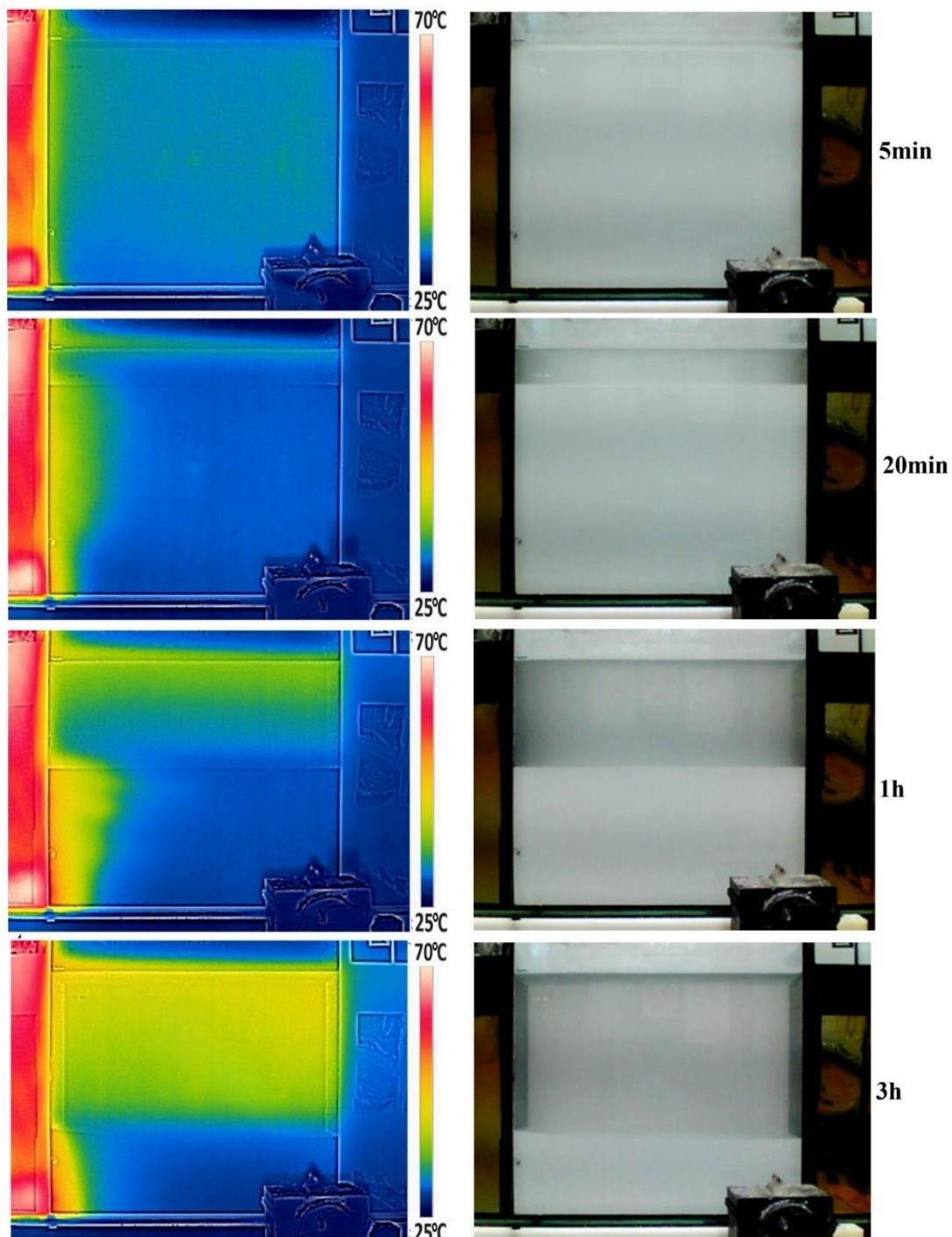


Figura 4.7 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação para o teste B (aquecimento unilateral).

Fonte: o autor.

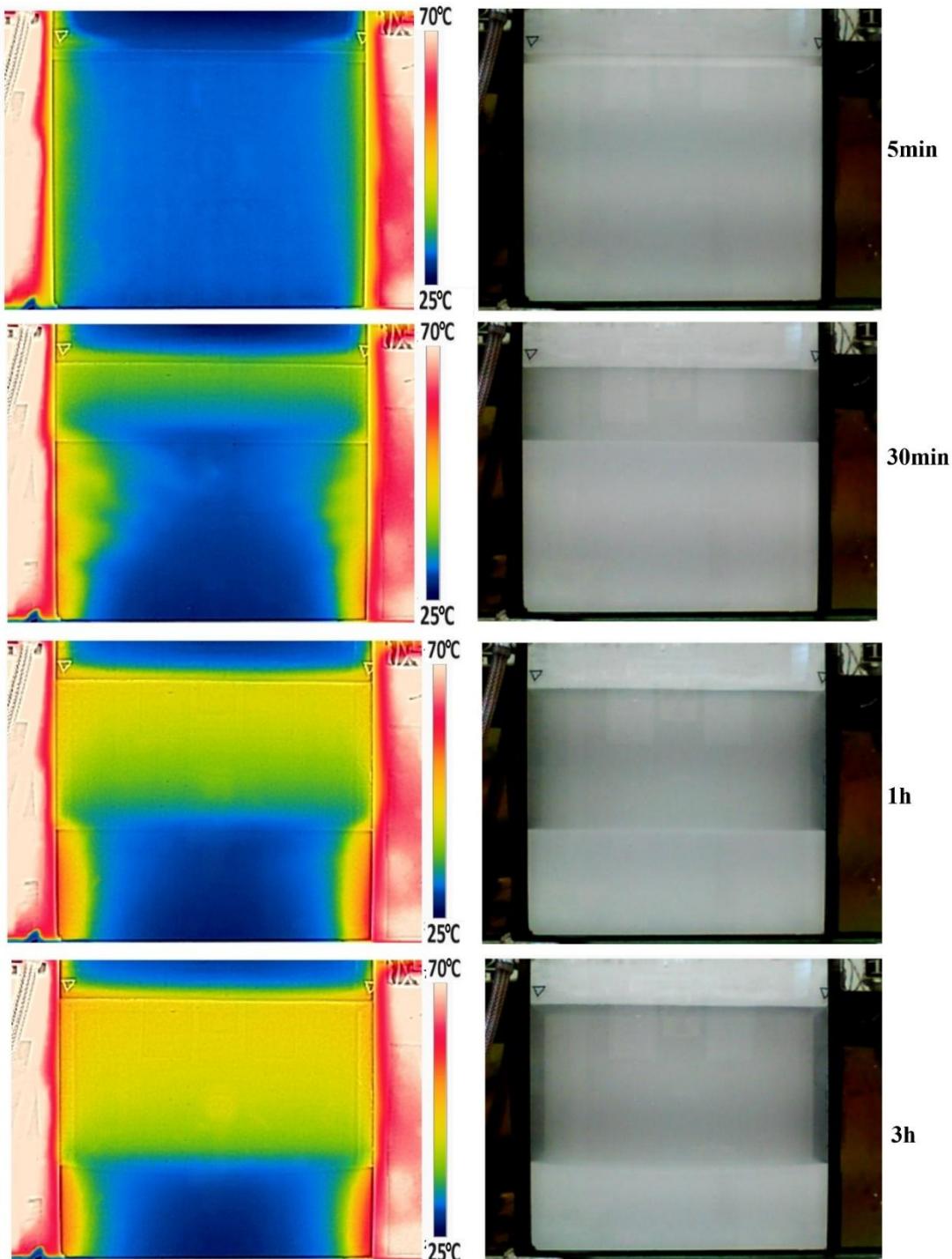


Figura 4.8 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação para o teste C (aquecimento bilateral).

Fonte: o autor.

Esse comportamento diferencial na transferência de calor influencia a taxa de sedimentação, pois altera as propriedades reológicas do fluido e modifica as forças atuantes sobre as partículas em suspensão.

Após 3 horas, o sedimento já estava estabilizado no fundo do recipiente de teste. Após o completo resfriamento do sistema para 25 °C, foi medida a altura final do leito. Verificou-se que a altura do sedimento não é uniforme ao longo da extensão do reservatório, apresentando maiores valores nas regiões próximas às paredes aquecidas.

4.2.2 Altura do Sedimento no reservatório de teste

A Figura 4.9 apresenta a altura final do sedimento após 3 horas de sedimentação e posterior resfriamento para 25 °C para as três condições: teste A, realizado sem aquecimento; teste B, com aquecimento em uma das laterais; e teste C, com aquecimento em ambas as laterais. Todas as leituras da altura foram efetuadas após a estabilização e o resfriamento do recipiente de teste.

No teste A, realizado sem aquecimento do óleo térmico, a altura do sedimento permaneceu constante ao longo de toda a extensão do compartimento. Entretanto, nos testes B e C, observou-se um aumento na altura do sedimento de CaCO₃ nas regiões próximas às paredes aquecidas.

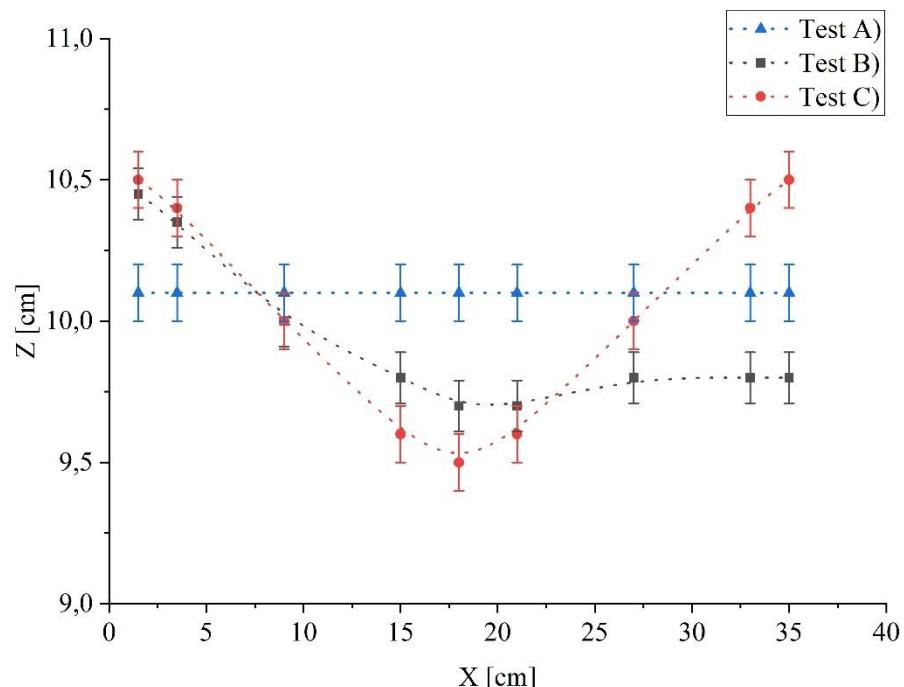


Figura 4.9 – Altura do sedimento após resfriamento para os testes A, B e C.
Fonte: o autor.

Testes realizados em provetas sob condições isotérmicas, verificou-se que, após o resfriamento, o sedimento retorna a um estado semelhante ao observado na sedimentação a frio, indicando que a expansão térmica é praticamente reversível. No entanto, no experimento com gradiente de temperatura, mesmo após o resfriamento, a altura do sedimento permanece maior nas regiões próximas às áreas anteriormente aquecidas. Isso ocorre porque, houve migração de partículas em direção às regiões aquecidas durante a sedimentação, resultando em uma redistribuição permanente de sólidos no leito.

No teste B, em que apenas a lateral esquerda foi aquecida a 70 °C, a altura do sedimento nas proximidades da parede aquecida foi 7,73% maior em comparação à região não aquecida. Ainda no teste B, observou-se que a posição $x = 21$ cm é o ponto de menor altura do sedimento, indicando que o gradiente de temperatura exerce maior influência na região central do recipiente do que na outra extremidade não aquecida. Isso demonstra uma maior migração de partículas partindo do centro em direção à lateral aquecida. A Figura 4.10 mostra a altura final do sedimento para o teste B.



Figura 4.10 – Imagem do sedimento para o teste B (aquecimento unilateral) após o resfriamento.

Fonte: o autor.

No teste C, com ambos os compartimentos laterais aquecidos, a altura do sedimento nas regiões próximas às paredes aquecidas foi 10,52% maior em relação à região central do reservatório (não aquecida). A Figura 4.11 mostra a altura final do sedimento para o teste C.

Observou-se uma redução ainda mais acentuada na altura do sedimento na região central do recipiente no teste C, em comparação com o teste B. Isso ocorre porque, no teste C, as partículas migram em direção às duas laterais aquecidas, resultando em um maior deslocamento de sólidos do centro para as extremidades.



Figura 4.11 – Imagem do sedimento para o teste C (aquecimento bilateral) após o resfriamento.

Fonte: o autor.

4.2.3 Concentração de sólidos do sedimento para o teste B (aquecimento unilateral)

A concentração volumétrica de sólidos, determinada por meio da TARG, foi avaliada em diferentes alturas e posições horizontais (x) e verticais (z) do reservatório para o teste B. Os gráficos apresentados mostram a concentração de sólidos ao longo do eixo x para diferentes valores de z . Os resultados foram organizados em três regiões do sedimento, sendo: i – camadas profundas; ii – camadas intermediárias; iii – camadas superficiais, conforme ilustrado na Figura 4.12. Todas as leituras de concentração foram efetuadas após a estabilização e o resfriamento do recipiente de teste.

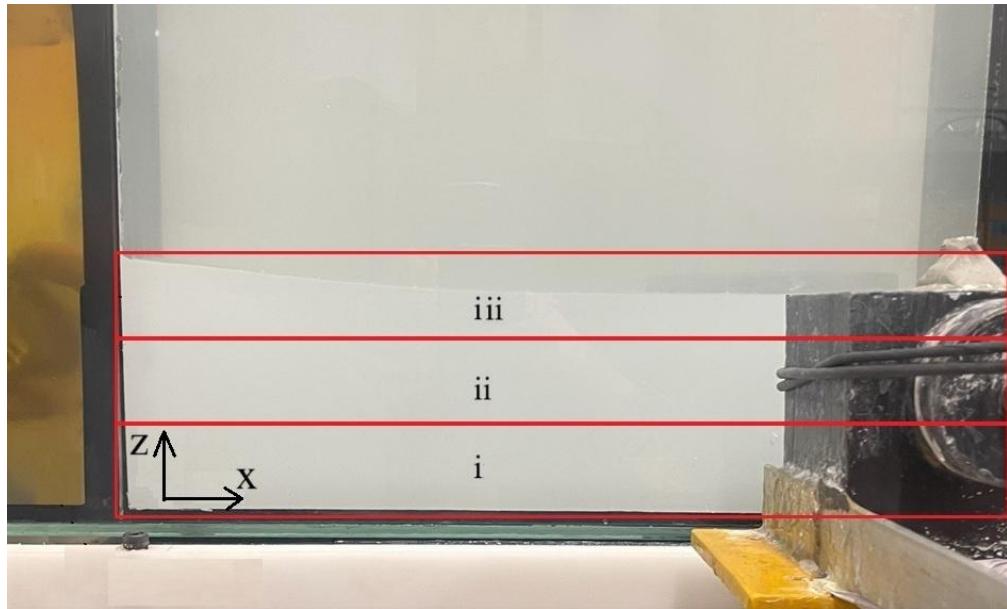


Figura 4.12 – Regiões de estudo da concentração de sólidos, i – camadas profundas; ii – camadas intermediarias; iii – camadas superficiais do sedimento.

Fonte: o autor.

A Figura 4.13 apresenta a concentração volumétrica de sólidos (ε_s) nas camadas inferiores (i) do sedimento formado no teste B, em que ocorreu aquecimento unilaterial. Considera-se $x = 0$ cm a parede que foi aquecida a 70°C e $x = 36,5$ cm a parede mantida a 25°C .

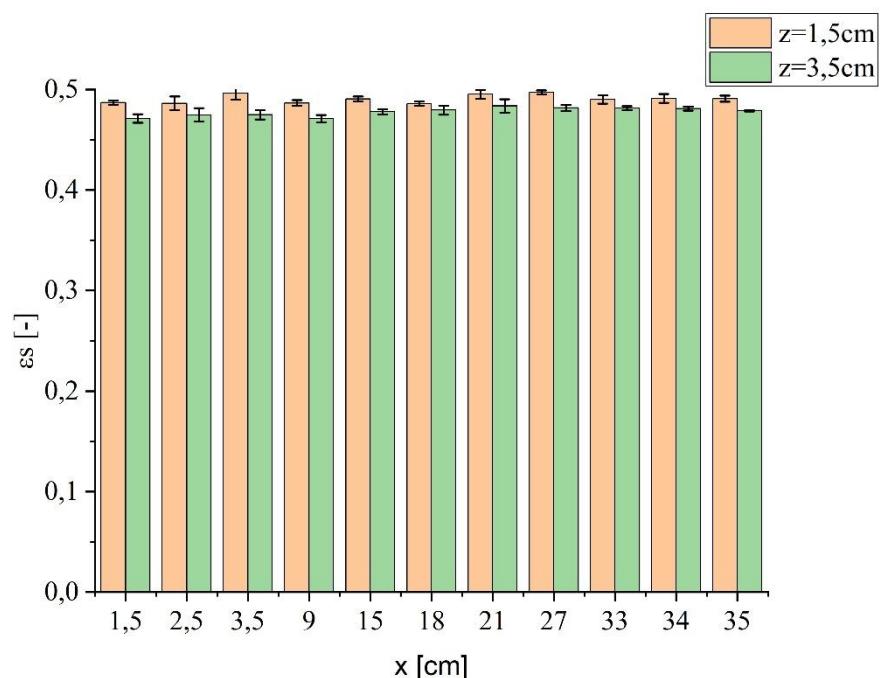


Figura 4.13 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 1,5$ e $3,5$ cm.
Fonte: o autor.

Como esperado, a concentração de sólidos é maior em $z = 1,5$ cm em comparação a $z = 3,5$ cm para todas as posições ao longo do eixo x. Isso ocorre porque $z = 1,5$ cm corresponde a uma camada mais profunda do sedimento, considerando que $z = 0$ cm é a base do recipiente (Arouca, 2007).

Observa-se que a concentração de sólidos apresenta pouca variação ao longo do eixo x, indicando que o aquecimento lateral influencia minimamente as camadas mais profundas do sedimento. Assim, a concentração de sólidos em $x = 1,5$ cm (próximo à parede aquecida) é semelhante à observada em $x = 35$ cm (próximo à parede não aquecida). Portanto, o gradiente de temperatura não promoveu expansão ou acúmulo de sólidos significativo nas camadas inferiores do sedimento.

A Figura 4.14 mostra os valores de ε_s ao longo do eixo x para as camadas intermediárias do sedimento (ii), sendo analisadas as posições $z = 6$ cm e $8,5$ cm.

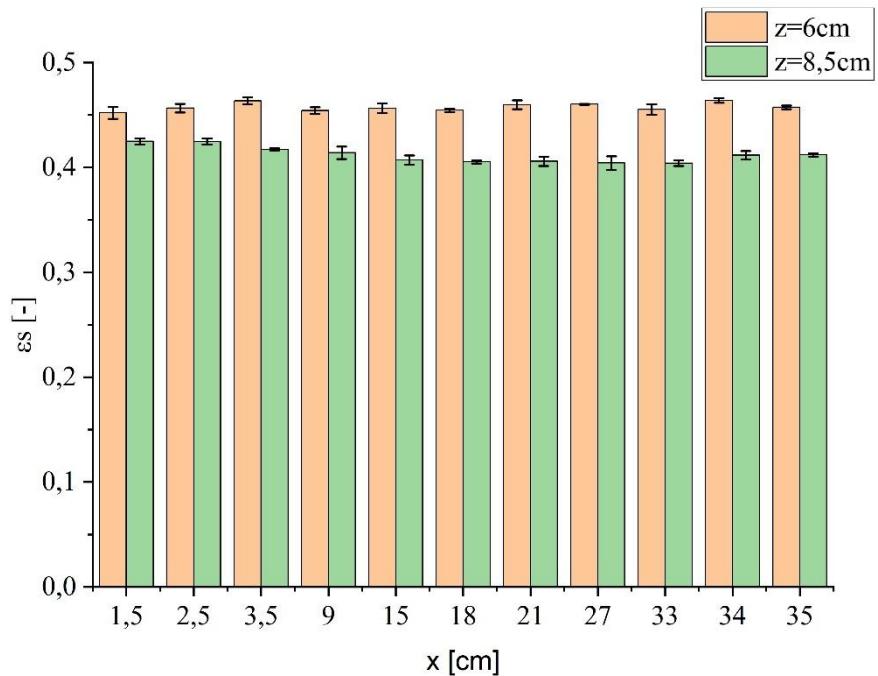


Figura 4.14 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 6$ e $8,5$ cm.
Fonte: o autor.

Nas camadas intermediárias, o comportamento é semelhante ao das camadas inferiores (Figura 4.13). Contudo, nota-se uma diferença na região próxima à parede aquecida: para $x = 1,5$ cm e $x = 2,5$ cm, a concentração de sólidos é ligeiramente maior em comparação com o lado não aquecido. Esse aumento ocorre em $z = 8,5$ cm, que está acima de $z = 6$ cm. Para $z = 6$ cm, a concentração de sólidos permanece praticamente estável ao longo do eixo x, indicando

ausência de influência térmica nessa profundidade. Esse comportamento evidencia uma tendência de maior concentração de sólidos nas camadas superiores do sedimento, próximo à parede aquecida, favorecida pelo gradiente de temperatura.

A Figura 4.15 apresenta a concentração de sólidos para as camadas superiores do sedimento (iii), para as posições $z = 9,5$ cm e 10 cm, mostrando os valores de ε_s ao longo do eixo x.

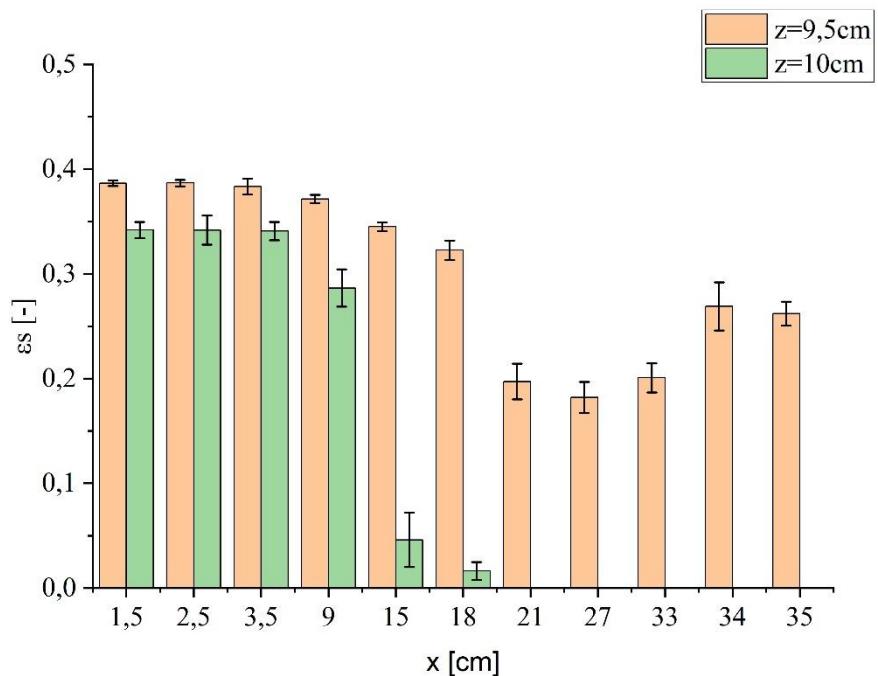


Figura 4.15 – Concentração de sólidos do teste B para posições $z = 9,5$ cm e 10 cm.
Fonte: o autor.

Nas camadas superiores, a diferença na concentração de sólidos entre o lado aquecido e o lado não aquecido é mais acentuada, confirmando a tendência de maior acúmulo de sólidos próximo à parede que estava aquecida. Em $z = 9,5$ cm, a maior concentração foi $\varepsilon_s = 0,39$ em $x = 1,5$ cm (parede aquecida), enquanto a menor concentração foi $\varepsilon_s = 0,18$ em $x = 27$ cm (parede mantida a 25 °C). Já em $z = 10$ cm, a maior concentração registrada foi $\varepsilon_s = 0,34$ em $x = 1,5$ cm; a partir de $x = 18$ cm, a concentração de sólidos é nula, caracterizando a região de líquido clarificado (Figura 4.10).

Observa-se, portanto, que a menor concentração de sólidos em todas as camadas analisadas (i, ii e iii) ocorreu em $x = 27$ cm, enquanto a maior foi registrada em $x = 1,5$ cm, evidenciando a migração de partículas em direção ao gradiente de temperatura. Essa migração

impacta significativamente a distribuição de sólidos, principalmente na região entre o centro e o lado não aquecido ($x = 18 \text{ cm}$ a 35 cm), a qual “perde” sólidos para a lateral aquecida.

A Figura 4.16 mostra a concentração de sólidos ao longo do eixo z para as posições $x = 1,5 \text{ cm}$, 21 cm e 35 cm . A posição $x = 1,5 \text{ cm}$ está próxima à lateral aquecida, $x = 21 \text{ cm}$ corresponde ao ponto de menor altura do sedimento (próximo ao centro), e $x = 35 \text{ cm}$ está localizada junto à parede mantida a 25°C .

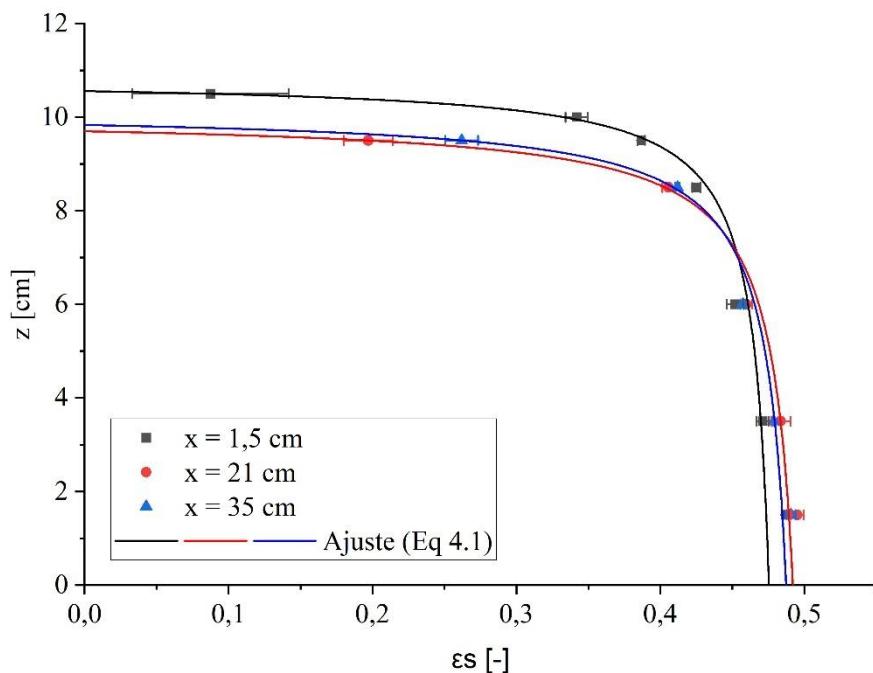


Figura 4.16 – Concentração de sólidos do teste B para posições $x = 1,5$ e 21 e 35 cm .

Fonte: o autor.

Nota-se que, para $x = 1,5 \text{ cm}$, a concentração de sólidos é menor na base e maior na superfície do sedimento. Já para $x = 21 \text{ cm}$ e 35 cm , os perfis de concentração são bastante semelhantes, mostrando que o efeito do gradiente térmico é mais evidente próximo à parede aquecida.

Os dados experimentais foram ajustados pela (Eq. 4.1), e a Figura 4.16 mostra que o modelo representa bem os resultados. Os parâmetros extraídos desse ajuste foram utilizados para o cálculo da pressão nos sólidos, apresentados na Tabela 4.2.

Os valores dos parâmetros para $x = 1,5 \text{ cm}$ são ligeiramente menores em comparação com as demais posições, indicando alteração no perfil de concentração e, consequentemente, na pressão nos sólidos, apresentada na Figura 4.17. O cálculo de P_s em função da altura z foi

realizado utilizando a (Eq. 4.1), considerando $H = 10,45$ cm, 9,7 cm e 9,8 cm para as posições $x = 1,5$ cm, 21 cm e 35 cm, respectivamente.

Tabela 4.2 - Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação para o teste B.

| Parâmetro | $x = 1,5$ cm | $x = 21$ cm | $x = 35$ cm |
|----------------------|--------------|-------------|-------------|
| ε_{s_m} | 0,486 | 0,498 | 0,493 |
| b | -4,424 | -4,991 | -4,825 |
| c | -8,662 | -9,516 | -9,295 |

* $R^2 = 0,999$ para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

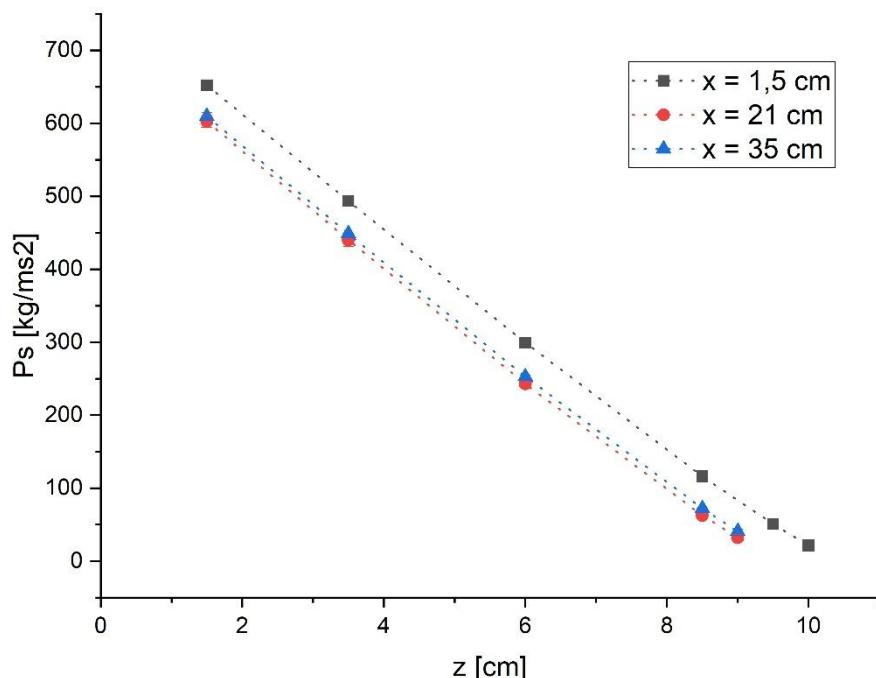


Figura 4.17 – Pressão nos sólidos do teste B para as posições $x = 1,5$ e 21 e 35 cm.

Fonte: o autor.

A pressão nos sólidos foi maior ao longo de toda a profundidade do sedimento para $x = 1,5$ cm (parede aquecida). Sendo a pressão nos sólidos a força exercida pelo peso das camadas superiores sobre uma posição z no leito sedimentar, a maior pressão em $x = 1,5$ cm indica um maior acúmulo de partículas nessa região, resultado da migração de sólidos em direção ao gradiente térmico. Esse comportamento difere do observado em um processo de simples expansão do leito, no qual a pressão nos sólidos apresenta pouca variação (Figura 4.6).

Para melhor visualizar os efeitos da expansão, foi plotada a distribuição de concentração com a altura z normalizada (adimensionalizada), variando entre 0 (base da proveta) e 1 (altura total do sedimento), apresentada na Figura 4.18.

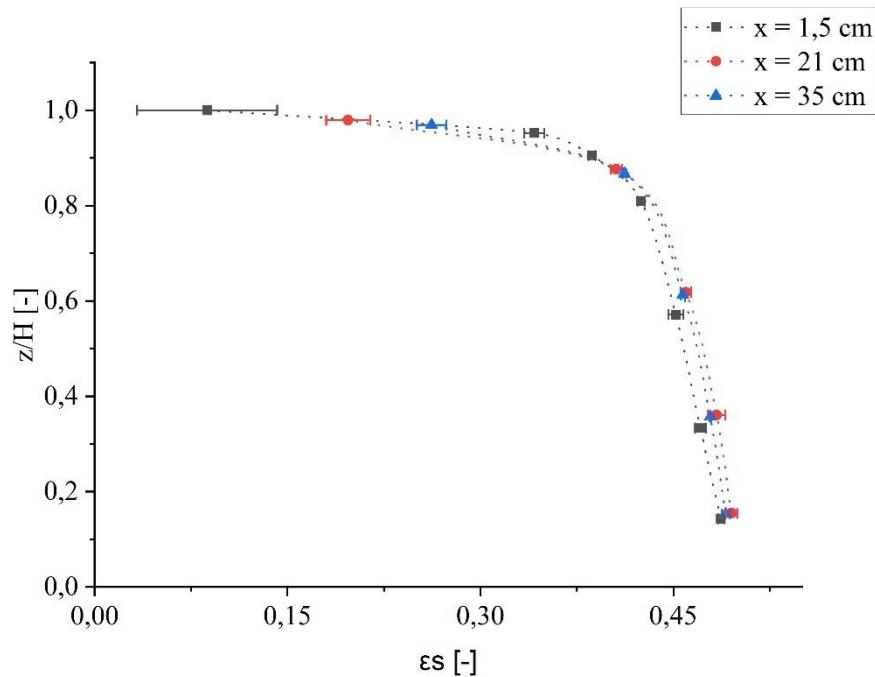


Figura 4.18 - Concentração de sólidos para sedimentação no teste B para $x = 1,5; 21$ e 35 cm sendo altura adimensional.

Fonte: o autor.

Observa-se que os perfis de concentração adimensionalizados são semelhantes entre si; porém, para $x = 1,5\text{ cm}$, ocorre uma leve redução da concentração na base do sedimento, característica de uma expansão pouco pronunciada, inferior à observada na sedimentação isotérmica (Figura 4.5). Assim, o aumento de concentração na superfície não pode ser explicado apenas por uma redistribuição interna do leito.

Nota-se que a expansão do leito é limitada nessa condição, pois a redução da concentração na base é pequena, enquanto o aumento na superfície é mais expressivo em comparação à sedimentação isotérmica em provetas (Figura 4.4). Esse comportamento, maior concentração de sólidos na superfície mesmo após o resfriamento, indica a migração de partículas para o gradiente de temperatura, reforçando o efeito do aquecimento na redistribuição dos sólidos no leito sedimentar.

Em sistemas de sedimentação bidimensionais isotérmicos, a velocidade de sedimentação das partículas ($v_{m(z)}$) é constante ao longo de x (Kynch, 1952), resultando em uma componente de velocidade horizontal ($v_{m(x)}$) nula, como mostra a Figura 4.19(a).

A água, como a maioria dos fluidos, apresenta diminuição de viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura, o que eleva a velocidade de sedimentação das partículas (Mkpenie et al., 2007; Goula et al., 2008; Xu et al., 2020).

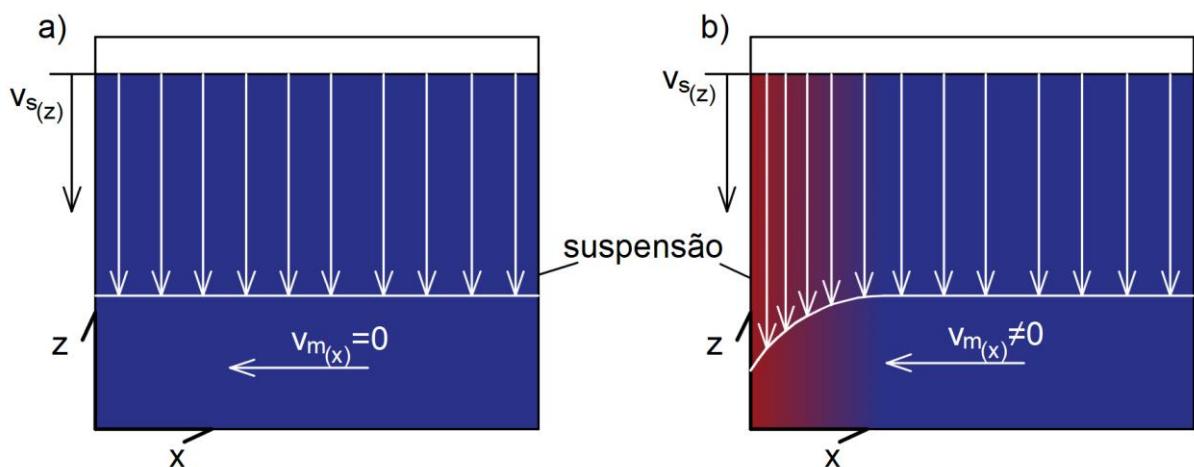


Figura 4.19 - Velocidade de sedimentação em um recipiente bidimensional, a) em condição isotérmica, b) em condição de gradiente térmico.

Fonte: o autor.

Em um sistema bidimensional submetido a um gradiente térmico (Figura 4.19(b)), observa-se que, próximo às paredes aquecidas, a viscosidade dinâmica da água é menor, aumentando a velocidade de sedimentação ($v_{s(z)}$) nessas regiões. Esse comportamento cria um gradiente de velocidade ao longo de x , gerando uma componente de velocidade horizontal ($v_{m(x)}$) direcionada para as zonas aquecidas, promovendo o transporte lateral de partículas.

Além disso, correntes convectivas próximas à parede aquecida também contribuem para a migração de partículas. Nessa região, a água aquecida junto à parede diminui sua densidade e tende a subir, enquanto a água mais fria e densa desloca-se para baixo, estabelecendo um fluxo convectivo. Esse movimento induz o transporte de partículas para as zonas aquecidas, como ilustrado na Figura 4.20.

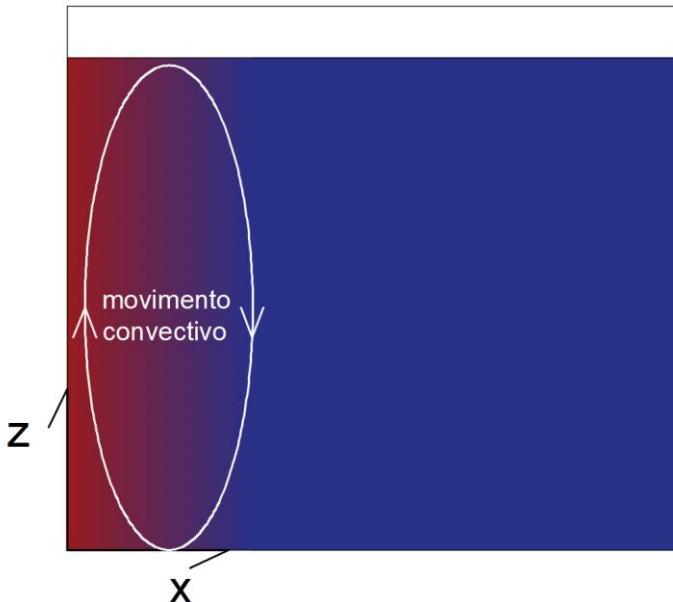


Figura 4.20 – Movimento convectivo em um recipiente bidimensional em condição de gradiente térmico.

Fonte: o autor.

4.2.4 Concentração de sólidos do sedimento para o teste C (aquecimento bilateral)

A concentração volumétrica de sólidos, determinada por meio da TARG, foi avaliada em diferentes alturas e posições horizontais (x) e verticais (z) do reservatório para o teste C. Os gráficos apresentados mostram a concentração de sólidos ao longo do eixo x para diferentes valores de z . Os resultados foram divididos em três regiões do sedimento, sendo: i – camadas profundas; ii – camadas intermediárias; iii – camadas superficiais, conforme ilustrado na Figura 4.12. Todas as leituras de concentração foram efetuadas após a estabilização e o resfriamento do recipiente de teste.

A Figura 4.21 apresenta a concentração volumétrica de sólidos (ε_s) nas camadas inferiores (i) do sedimento formado no teste C, em que ocorreu aquecimento bilateral. Considera-se $x = 0$ cm a parede esquerda aquecida a 70°C , $x = 18$ cm o centro não aquecido e $x = 36,5$ cm a parede direita aquecida a 70°C .

Assim como observado no teste B (aquecimento unilateral), a concentração de sólidos apresenta pouca variação nas camadas mais profundas do sedimento, considerando que $z = 0$ corresponde ao fundo do recipiente. Dessa forma, não se verifica interferência significativa do gradiente de temperatura nas concentrações de sólidos nessas camadas.

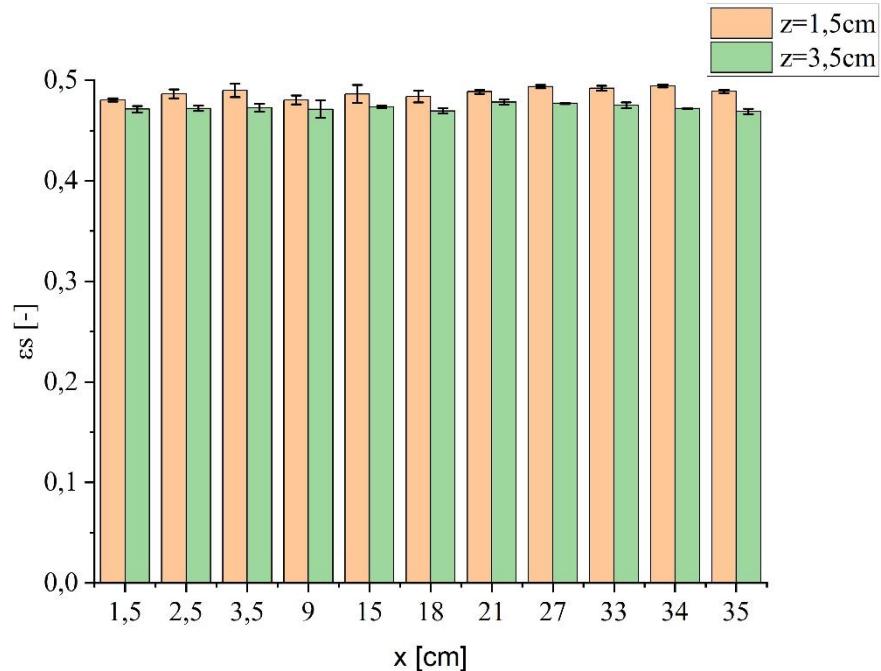


Figura 4.21 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 1,5\text{ cm}$ e $3,5\text{ cm}$.
Fonte: o autor.

A Figura 4.22 mostra os valores de concentração de sólidos ao longo do eixo x para as camadas intermediárias do sedimento (ii), sendo analisadas as posições $z = 6\text{ cm}$ e $8,5\text{ cm}$.

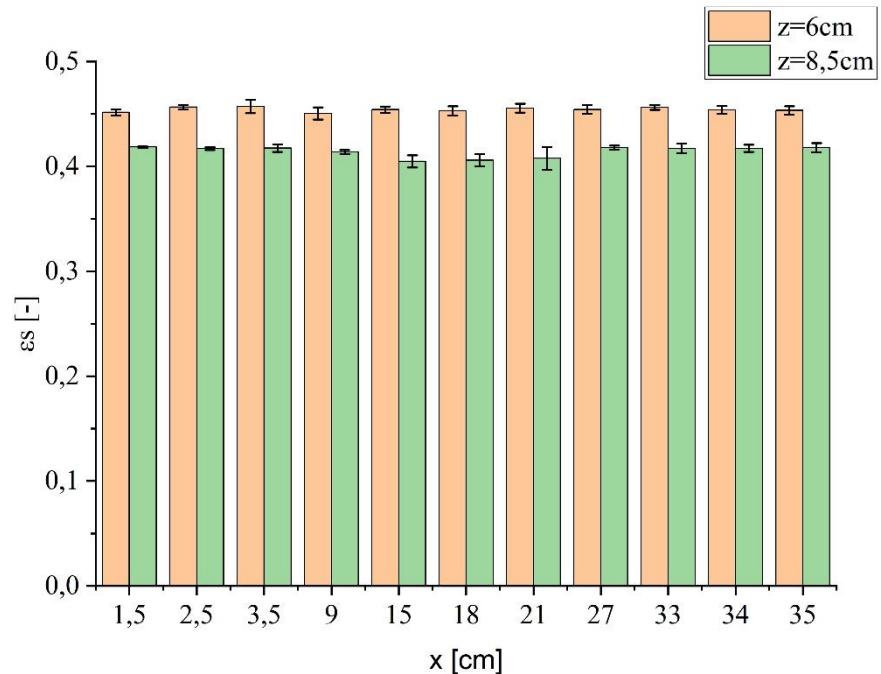


Figura 4.22 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 6\text{ cm}$ e $8,5\text{ cm}$.
Fonte: o autor.

Nessas camadas, o comportamento é semelhante ao observado nas camadas inferiores (Figura 4.21). No entanto, nota-se uma diferença na região próxima à posição central ($x = 18$ cm, não aquecido), onde a concentração de sólidos é ligeiramente menor em comparação com as laterais aquecidas. Essa redução na concentração ocorre em $z = 8,5$ cm, enquanto em $z = 6$ cm a concentração de sólidos permanece praticamente constante ao longo do eixo x, indicando que a influência da temperatura nessa profundidade é mínima. Esse comportamento sugere uma tendência de maior concentração de sólidos próximo às paredes aquecidas em comparação com a região central do sedimento, resultado da migração de partículas em direção ao gradiente de temperatura.

Essa migração de sólidos da região central para as laterais é mais evidente na Figura 4.23, que apresenta a concentração de sólidos nas camadas superficiais do sedimento.

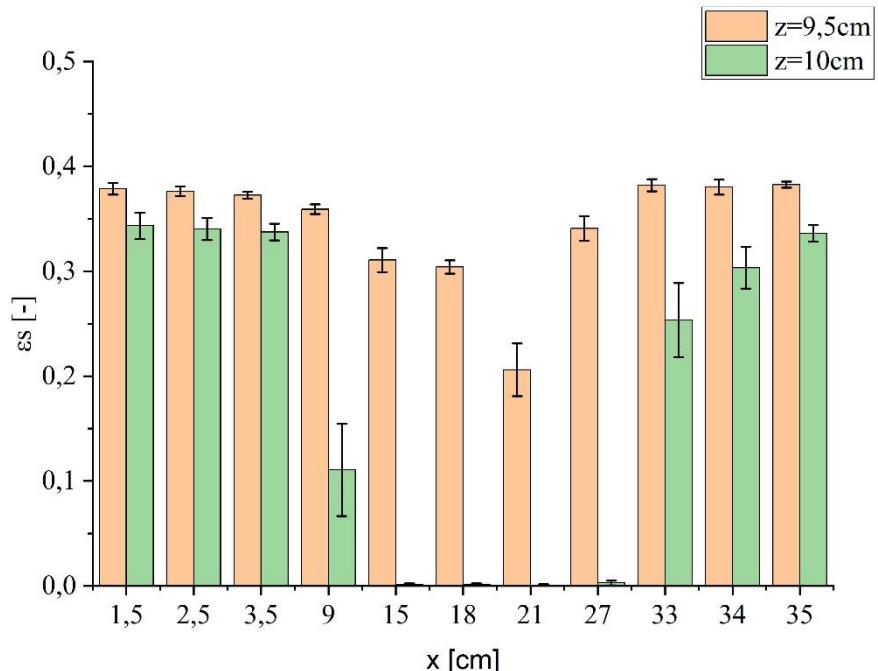


Figura 4.23 - Concentração de sólidos do teste C para posições $z = 9,5$ cm e 10 cm.
Fonte: o autor.

Nessa região, a diferença na concentração de sólidos entre os lados aquecidos e a posição central é mais pronunciada, confirmando a tendência de maior acúmulo de sólidos próximo às paredes que estavam aquecidas. Em $z = 9,5$ cm, a maior concentração foi $\epsilon_s = 0,38$ para $x = 1,5$ cm e $x = 35$ cm (paredes aquecidas), enquanto a menor concentração foi $\epsilon_s = 0,20$ em $x = 21$ cm (próximo ao centro). Já em $z = 10$ cm, a maior concentração registrada foi $\epsilon_s =$

0,34 para $x = 1,5$ cm e $x = 35$ cm, enquanto, entre $x = 9$ cm e $x = 33$ cm, a concentração de sólidos é zero, caracterizando a região de líquido clarificado (Figura 4.11).

Assim, observa-se que a menor concentração de sólidos, considerando todas as camadas analisadas (i, ii e iii), ocorreu na posição $x = 21$ cm, enquanto as maiores concentrações foram registradas em $x = 1,5$ cm e $x = 35$ cm. Esses resultados evidenciam a migração de partículas em direção ao gradiente de temperatura, resultando em uma redistribuição de sólidos. Esse efeito é mais intenso na região central do recipiente, que “perde” partículas para as laterais aquecidas.

A Figura 4.24 apresenta a concentração de sólidos ao longo do eixo z para as posições $x = 1,5$ cm, 18 cm e 35 cm. A posição $x = 1,5$ cm está próxima à lateral esquerda aquecida, $x = 18$ cm corresponde ao centro, e $x = 35$ cm está próxima à lateral direita aquecida.

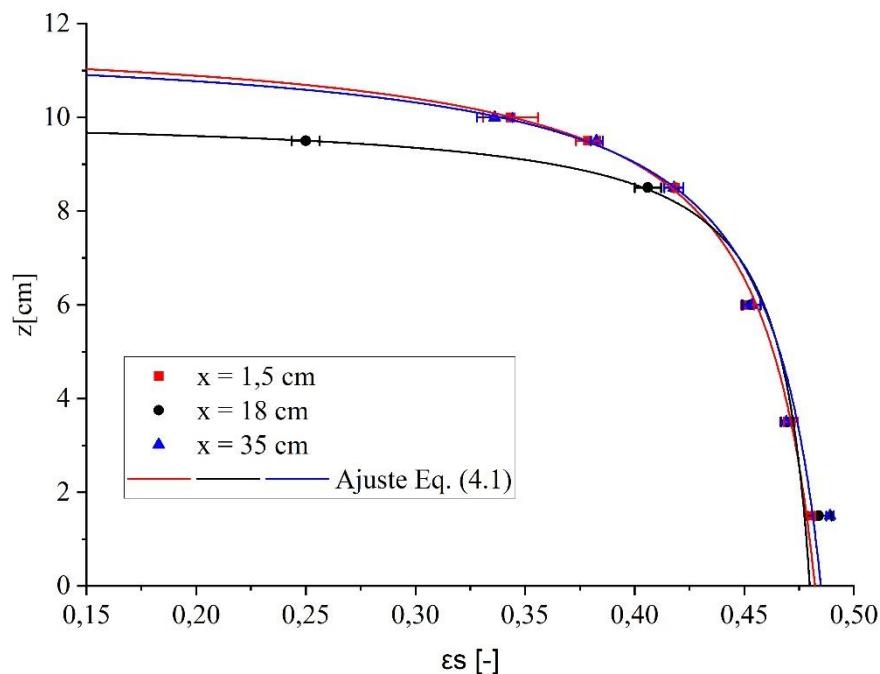


Figura 4.24 - Concentração de sólidos do teste C para posições $x = 1,5$, 18 e 35 cm.

Fonte: o autor.

Observa-se que a concentração de sólidos na base do sedimento é praticamente uniforme em todas as posições ao longo do eixo x. No entanto, nas camadas superficiais, acima de $z = 7$

cm, a concentração de sólidos é mais elevada nas regiões laterais aquecidas em comparação ao centro.

Os perfis de concentração próximos às laterais aquecidas ($x = 1,5$ cm e $x = 35$ cm) apresentam grande semelhança, embora a simetria não seja perfeita, uma vez que a transferência de calor não foi exatamente igual para os dois lados do recipiente de teste (Figura 4.8).

Os resultados sugerem um acúmulo de material particulado nas proximidades das paredes aquecidas, evidenciado pelo aumento da concentração de sólidos na superfície do sedimento nessas posições, sem que haja uma redução correspondente da concentração na base.

Os dados experimentais foram ajustados pela (Eq. 4.1), e a Figura 4.24 demonstra que o modelo proposto representa adequadamente os resultados experimentais. A Tabela 4.3 apresenta os valores estimados dos parâmetros ajustados.

Tabela 4.3 - Parâmetros ajustados aos dados experimentais da sedimentação para o teste C.

| Parâmetro | $x = 1,5$ cm | $x = 18$ cm | $x = 35$ cm |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|
| ϵ_{s_m} | 0,484 | 0,486 | 0,491 |
| b | -4,157 | -4,620 | -4,056 |
| c | -8,037 | -9,001 | -7,570 |

* $R^2 = 0,999$ para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

O cálculo da pressão nos sólidos (P_s) em função da altura z , apresentado na Figura 4.25 foi realizado utilizando os dados da Tabela 4.3 na (Eq. 4.1), considerando a altura ($H = 10,5$; 9,5 e 10,5 cm) para as posições $x = 1,5$; 18 e 35 cm, respectivamente.

A pressão nos sólidos foi maior ao longo de toda a extensão do sedimento para $x = 1,5$ cm e $x = 35$ cm (paredes aquecidas). Assim, a maior pressão indica um maior acúmulo de sólidos nessas regiões, resultado da migração de partículas em direção ao gradiente de temperatura. Esse resultado é similar ao observado no teste B (Figura 4.17).

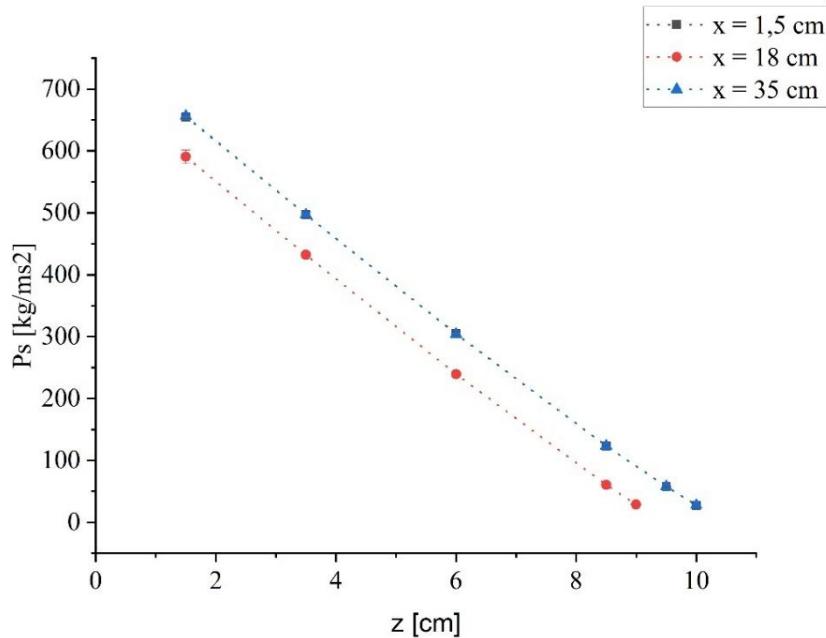


Figura 4.25 - Pressão nos sólidos do teste C para as posições $x = 1,5$ e 18 e 35 cm.
Fonte: o autor.

Para melhor visualização dos efeitos de expansão, foi plotada a distribuição de concentração, com a altura z normalizada, variando entre 0 (base da proveta) e 1 (altura total do sedimento), apresentada na Figura 4.26.

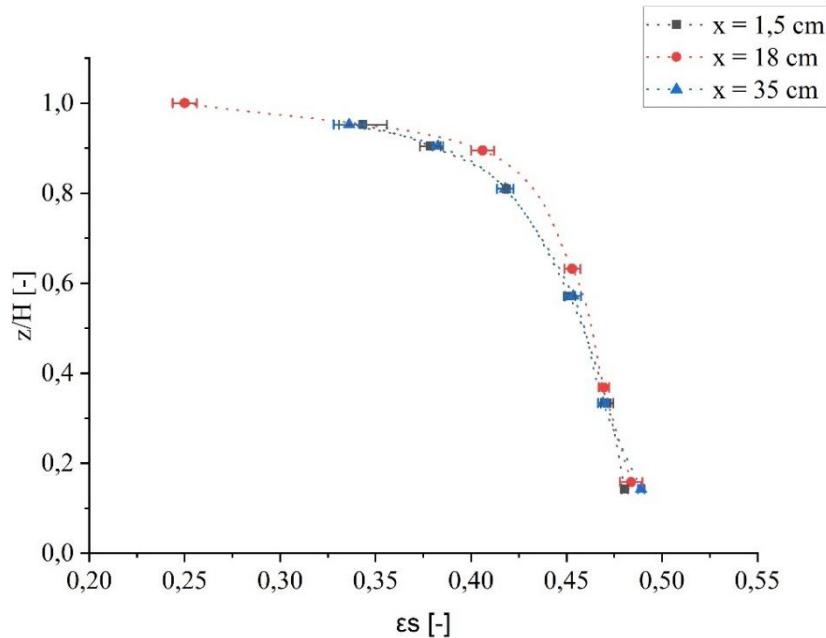


Figura 4.26 - Concentração de sólidos para sedimentação no teste C para $x = 1,5$; 18 e 35 cm sendo altura adimensional.
Fonte: o autor.

Os perfis de concentração em função de z adimensional apresentam comportamento semelhante, sem indicar efeitos de expansão do leito. O fenômeno da expansão é normalmente caracterizado pela redução da concentração na base do sedimento, o que não é evidenciado nos resultados do teste C. Na Figura 4.5, por exemplo, observa-se exclusivamente a expansão do leito para a sedimentação a 70 °C.

Dessa forma, conclui-se que o aumento da concentração de sólidos nas proximidades das paredes aquecidas resulta da migração de partículas para essas regiões, e não de uma simples expansão térmica do leito.

4.3 Sedimentação com gradiente de temperatura vertical

Nesta seção, são apresentados os resultados do processo de sedimentação realizado no recipiente de teste ilustrado na Figura 3.20, considerando o aquecimento da base do sistema, responsável por estabelecer um gradiente térmico vertical durante os ensaios de sedimentação.

É importante destacar que todos os resultados de concentração de sólidos e altura do sedimento foram obtidos após a completa estabilização do sedimento no fundo do recipiente e o total resfriamento do sistema.

Os primeiros resultados da sedimentação com gradiente de temperatura vertical referem-se ao desenvolvimento do perfil térmico ao longo do tempo. A Figura 4.27 apresenta imagens térmicas e fotográficas do recipiente de teste, registradas em diferentes instantes, evidenciando a formação do gradiente térmico na direção vertical.

Verificou-se que a sedimentação se iniciou com a base do recipiente já estabilizada a 70 °C, condição que estabeleceu o gradiente de temperatura vertical logo nos primeiros minutos de ensaio. Nas imagens apresentadas (Figura 4.27), a linha branca indica a posição da interface entre a suspensão e o líquido clarificado, permitindo acompanhar a evolução da sedimentação, enquanto a tarja na cor preta representa a base de aquecimento por onde circula o óleo térmico.

Observou-se que o avanço do gradiente térmico na direção vertical ocorreu de forma mais lenta quando comparado ao gradiente lateral obtido em testes anteriores. Essa diferença foi atribuída à formação de uma camada de sólidos depositados no fundo do recipiente, que atuou como uma barreira à condução de calor, restringindo a propagação do calor fornecido pela base.

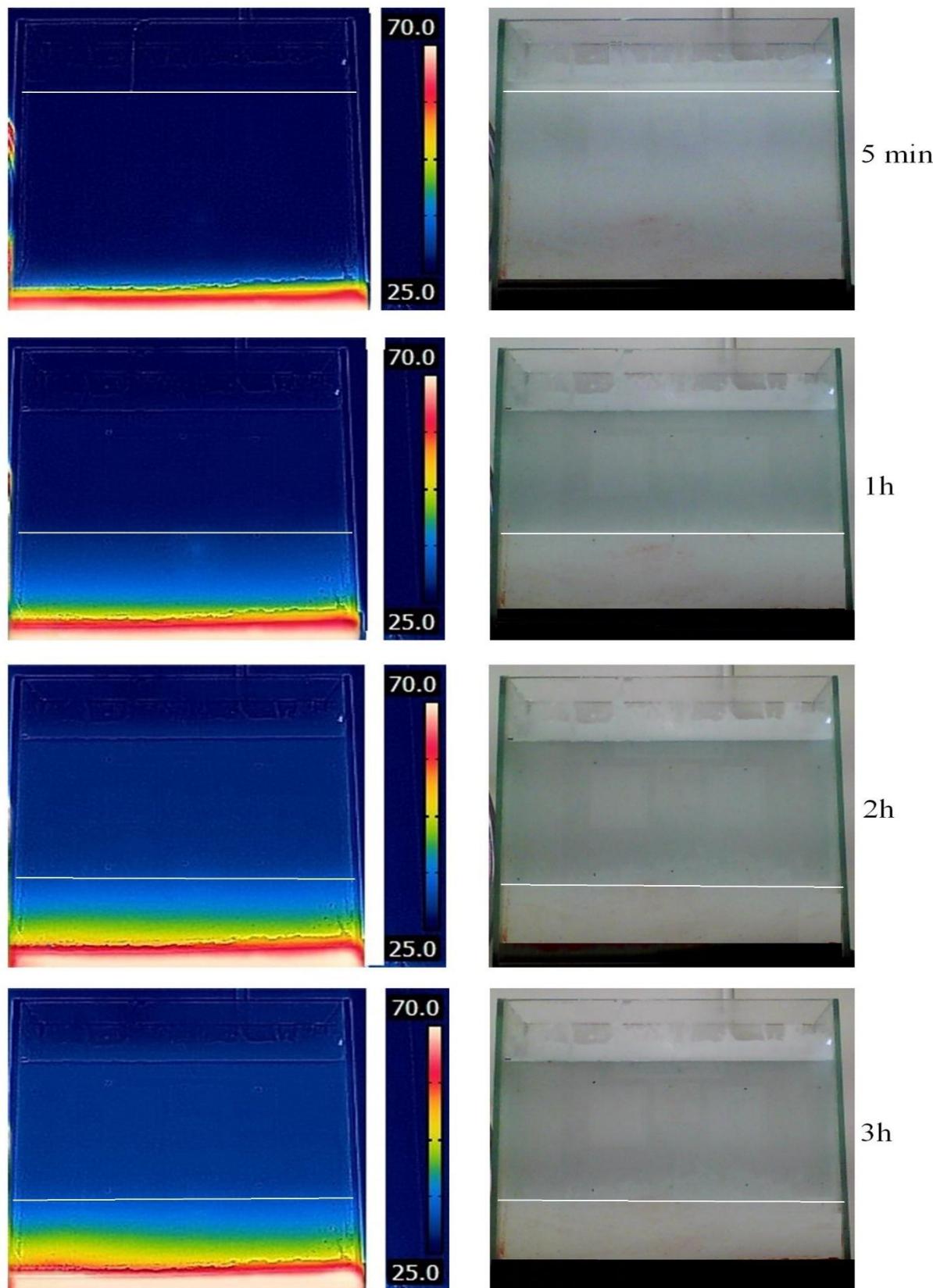


Figura 4.27 – Imagens das condições térmicas durante a sedimentação com gradiente de temperatura vertical (aquecimento na base).

Fonte: o autor.

Cabe ressaltar que, embora no gradiente lateral também houvesse presença de partículas em suspensão, a concentração de sólidos era menor entre a fonte de calor e o restante da suspensão. Isso se deve ao fato de que, no arranjo vertical, os sólidos se compactam rapidamente na base, elevando a concentração de sólidos no fundo já nos primeiros minutos do processo. Em contrapartida, no caso do gradiente lateral, grande parte do gradiente térmico se desenvolveu predominantemente na região de sedimentação livre, onde a concentração de sólidos permaneceu próxima à concentração inicial da suspensão (15% v/v).

Verificou-se ainda que a transferência de calor não ocorreu de forma uniforme ao longo da base do recipiente de teste. Observou-se que, na lateral esquerda, houve maior transferência de calor em comparação à lateral direita. Essa diferença tornou-se mais evidente na imagem correspondente a 3 h de sedimentação, na qual se constatou uma região ligeiramente mais aquecida próxima à lateral esquerda.

Essa maior transferência de calor pode estar relacionada, possivelmente, à diferença de perda de carga entre a entrada e a saída do óleo térmico no circuito de aquecimento. O fluido térmico foi admitido pelo lado direito do sistema e escoou para fora pelo lado esquerdo. Na entrada, ocorreu uma expansão do fluxo, uma vez que o óleo adentrou uma câmara de maior volume. Por outro lado, na saída, houve um estrangulamento, pois o fluido deixou a câmara para adentrar diretamente no tubo de retorno, o que implicou uma perda de carga mais significativa na extremidade esquerda em comparação à direita.

Após as 3 h de sedimentação e o completo resfriamento do sistema, foi medida a altura do sedimento formado no fundo do recipiente. A Figura 4.28 apresenta os resultados obtidos da altura final do leito sedimentado nos ensaios realizados com e sem a aplicação do gradiente térmico vertical. Vale ressaltar que todos os testes foram conduzidos em triplicata, de modo a assegurar a reproduzibilidade dos dados experimentais.

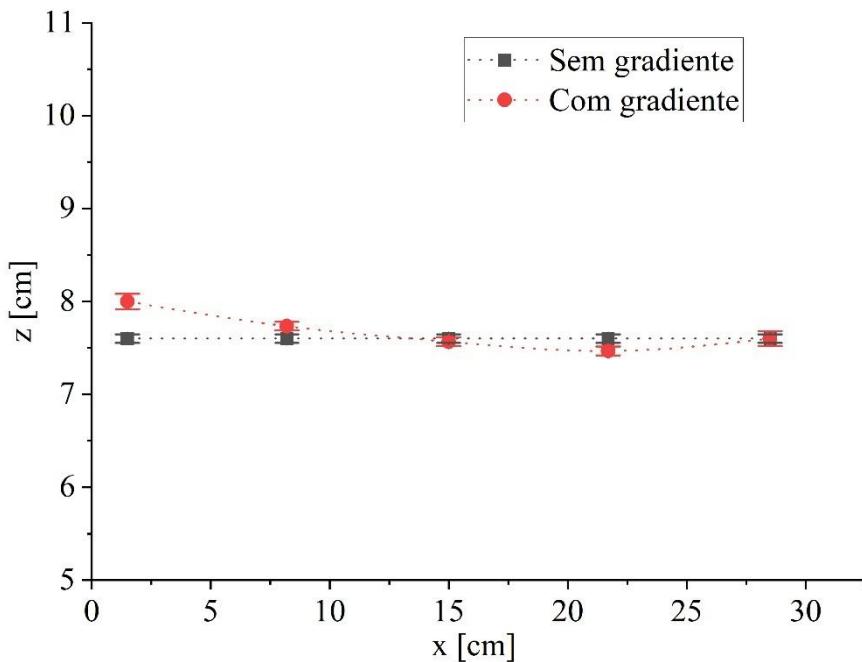


Figura 4.28 – Altura do sedimento formado com e sem gradiente de temperatura vertical.
Fonte: o autor.

Observou-se que, na lateral esquerda do recipiente, a altura final do sedimento foi maior nos ensaios realizados com gradiente térmico, quando comparada à altura obtida na condição sem aquecimento. Essa diferença evidenciou que a variação na altura do leito sedimentado foi exclusivamente decorrente do efeito térmico, uma vez que, na ausência de aquecimento, não se verificou alteração significativa da altura ao longo da extensão do recipiente. A maior altura na esquerda do recipiente foi atribuída à maior intensidade de aquecimento observada nessa região, conforme discutido a partir das imagens térmicas.

Na lateral esquerda ($x = 1,5$ cm), verificou-se que a altura final do sedimento obtida com a aplicação do gradiente térmico vertical foi 5,26% superior àquela medida na condição sem aquecimento. Essa diferença decorreu da não uniformidade da transferência de calor na base do recipiente, que gerou, além do gradiente vertical pretendido, um gradiente térmico horizontal ao longo da base.

Como discutido anteriormente, gradientes de temperatura na direção horizontal induzem a migração de partículas em suspensão em direção às regiões mais aquecidas. Assim, durante o ensaio com gradiente vertical, a presença adicional do gradiente horizontal favoreceu o deslocamento de partículas para a lateral esquerda, onde a transferência de calor foi mais intensa. Entretanto, como o gradiente horizontal gerado incidentalmente neste ensaio de gradiente vertical apresentou intensidade menor do que aquele imposto intencionalmente no

teste com gradiente horizontal isolado, a variação na altura final do leito sedimentado foi também inferior. Neste caso, a diferença observada foi de 5,26%, ao passo que, no ensaio conduzido exclusivamente com gradiente lateral, a discrepância na altura chegou a 10,52%.

Nas Figura 4.29, Figura 4.30 e Figura 4.31 apresentam os perfis de concentração de sólidos para as posições $x = 1,5$ cm (lateral esquerda), $x = 15$ cm (região central) e $x = 28$ cm (lateral direita) do recipiente de teste (Figura 3.22). Esses resultados complementam a análise da distribuição espacial dos sólidos sedimentados, permitindo avaliar o efeito combinado do gradiente de temperatura vertical e da assimetria lateral observada anteriormente.

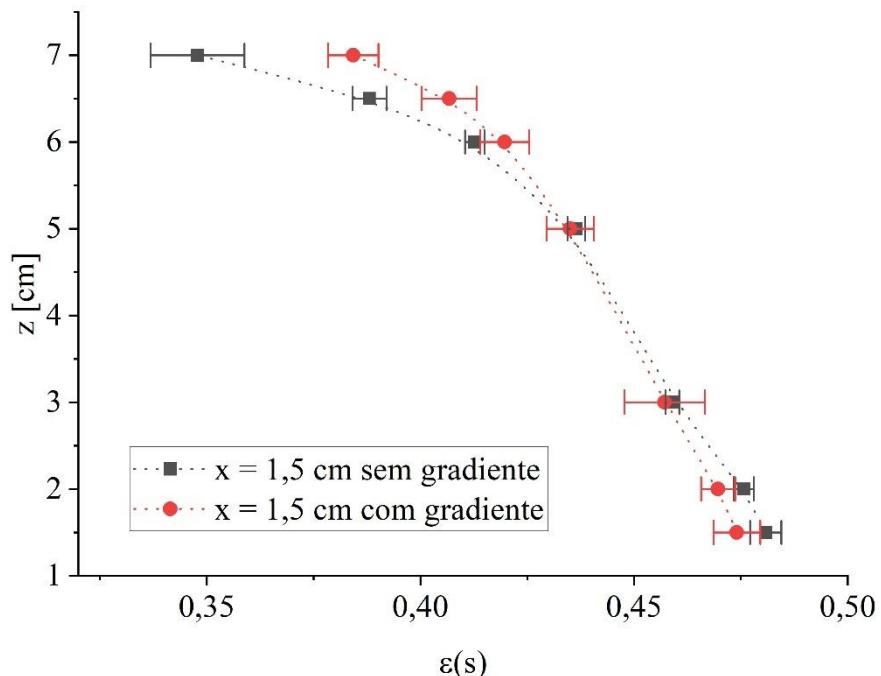


Figura 4.29 – Concentração de sólidos para $x = 1,5$ cm com e sem gradiente de temperatura vertical.

Fonte: o autor.

Para a posição $x = 1,5$ cm, observou-se que a concentração de sólidos no topo do leito sedimentado foi maior nos ensaios com gradiente térmico em comparação à condição sem aquecimento. Por outro lado, a concentração na base apresentou uma leve redução quando aplicado o gradiente de temperatura. Esse comportamento é característico do fenômeno de migração de partículas em direção à região mais aquecida, o que resulta em acúmulo de sólidos na parte superior do leito, mesmo após o resfriamento. Contudo, parte desse efeito também pode ser atribuída à leve expansão do leito sedimentado, uma vez que a diminuição da concentração na base sugere uma estrutura menos compacta em decorrência da influência

térmica. Vale ressaltar que, nesta região ($x = 1,5$ cm), a altura do sedimento foi maior com gradiente de temperatura em comparação à condição sem gradiente.

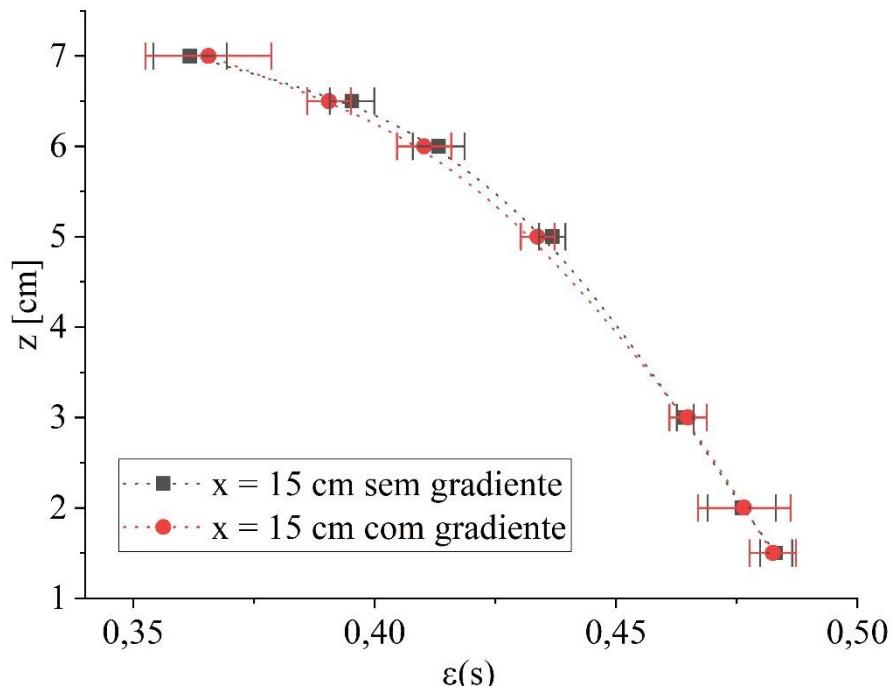


Figura 4.30 – Concentração de sólidos para $x = 15$ cm com e sem gradiente de temperatura vertical.

Fonte: o autor.

Para a posição $x = 15$ cm, localizada na região central do recipiente, verificou-se que a concentração de sólidos apresentou pouca variação entre as condições com e sem gradiente térmico. Os resultados obtidos situaram-se dentro da faixa de desvio experimental observada nos ensaios, indicando que o efeito do gradiente de temperatura foi pouco significativo nessa região. Corroborando essa tendência, constatou-se que a altura final do leito sedimentado na posição central permaneceu praticamente inalterada, apresentando o mesmo valor para ambos os casos.

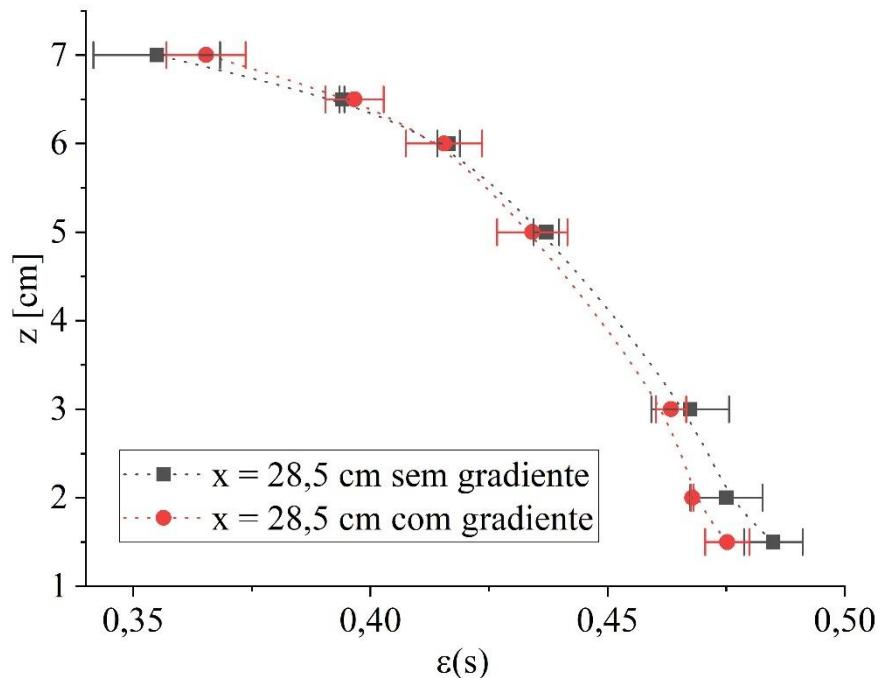


Figura 4.31 – Concentração de sólidos para $x = 28$ cm com e sem gradiente de temperatura vertical.

Fonte: o autor.

Na posição $x = 28$ cm, correspondente à lateral direita do recipiente, verificou-se que a concentração de sólidos na superfície do leito sedimentado foi pouco alterada pela presença do gradiente térmico. No entanto, observou-se uma redução na concentração de sólidos na base do sedimento para a condição com gradiente, quando comparada ao ensaio sem aquecimento. Apesar dessa diferença no perfil de concentração, a altura final do leito sedimentado nessa posição permaneceu praticamente a mesma para ambas as condições.

Observa-se que, embora as alturas finais tenham sido idênticas em $x = 15$ cm e $x = 28$ cm para os ensaios com e sem gradiente, a distribuição interna da concentração de sólidos variou. Este resultado evidencia que leitos sedimentados de um mesmo sólido podem apresentar a mesma altura final, porém com perfis de concentração diferentes, dependendo das condições térmicas e da dinâmica de migração de partículas durante o processo.

Os resultados obtidos evidenciaram a ocorrência de efeitos cruzados entre os gradientes térmicos vertical e horizontal, decorrentes das limitações práticas de controle da transferência de calor na base do recipiente de teste. Em um sistema bidimensional, torna-se particularmente desafiador obter um gradiente térmico estritamente uniforme na base, uma vez que variações locais de perda de carga e a geometria do circuito de aquecimento podem induzir assimetrias indesejadas. Considera-se que a realização de um ensaio com gradiente térmico unidimensional

na base, como o uso de uma proveta com diâmetro significativamente menor do que a dimensão da área de aquecimento, poderia contribuir para isolar o efeito do gradiente lateral, permitindo uma análise mais precisa do impacto exclusivo de um gradiente vertical. Essa proposta fica registrada como sugestão para estudos futuros que deem continuidade à investigação apresentada neste trabalho.

4.4 Sedimentação em fluidos de perfuração

Nesta seção, são apresentados os resultados dos testes de sedimentação realizados com os fluidos de perfuração BrCarb10 e BrCarb11. O estudo investigou a sedimentação em proveta para duas condições distintas: sedimentação isotérmica à temperatura ambiente e sedimentação isotérmica a 70 °C.

Inicialmente, apresentam-se os resultados reológicos dos fluidos de perfuração para as temperaturas de interesse, 25 °C (próxima à temperatura ambiente) e 70 °C. Esses dados são fundamentais para a devida compreensão do processo de sedimentação nessas condições térmicas.

4.4.1 Reologia dos fluidos

A caracterização reológica dos fluidos de perfuração teve como objetivo avaliar a influência da temperatura sobre a viscosidade aparente, tixotropia e viscoelasticidade dos fluidos. Esses parâmetros foram analisados para as temperaturas de 25 °C e 70 °C.

As Figura 4.32 e Figura 4.33 mostram a curva de fluxo dos fluidos em baixas taxas de cisalhamento, considerando diferentes tempos de coleta de dados. Foi utilizada uma rampa logarítmica na variação do tempo.

Para o fluido BrCarb10 (Figura 4.32), observa-se que a viscosidade aparente permanece praticamente inalterada para taxas de cisalhamento entre 10 s^{-1} e $0,1\text{ s}^{-1}$, independentemente do tempo de coleta adotado. No entanto, para taxas de cisalhamento inferiores a $0,1\text{ s}^{-1}$, a influência do tempo de coleta torna-se evidente.

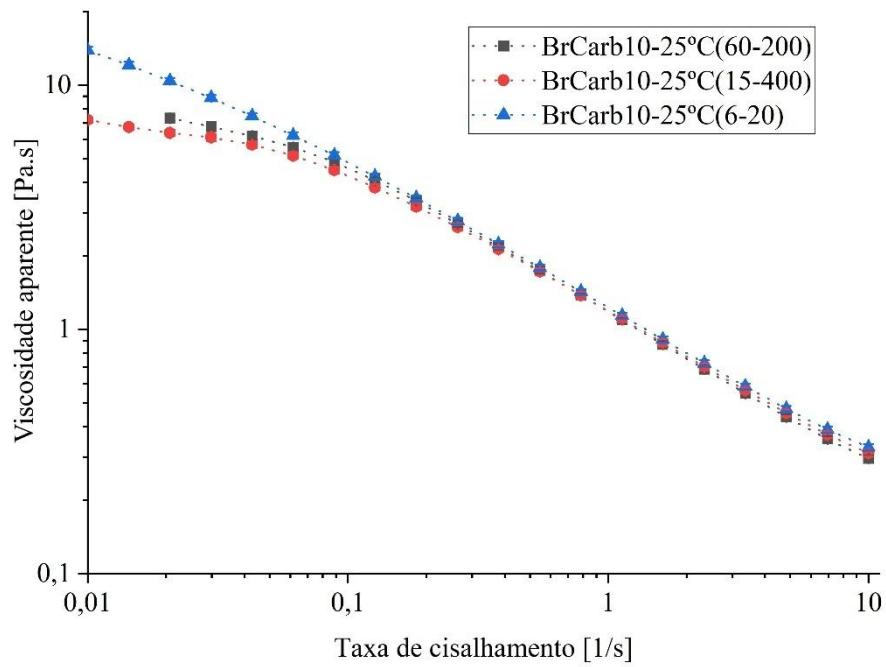


Figura 4.32 – Curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10.
Fonte: o autor.

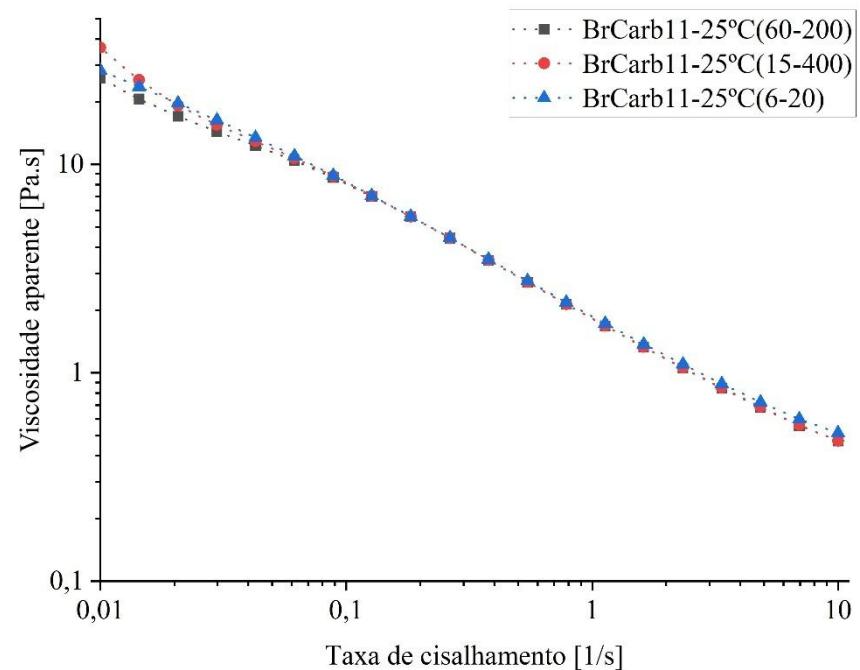


Figura 4.33 – Curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb11.
Fonte: o autor.

Fatores como o método de carregamento da amostra no reômetro, a tixotropia e o histórico de cisalhamento influência nos resultados, o que resulta em desvios das curvas para taxas abaixo de $0,1\text{ s}^{-1}$. Portanto, tais dados não devem ser utilizados para ajuste de modelos.

Esse comportamento sugere um efeito de relaxação estrutural, no qual a estrutura do fluido pode sofrer rearranjos ao longo do tempo, afetando sua resposta reológica em baixas taxas de cisalhamento.

Para o fluido BrCarb11 (Figura 4.33), a dependência da viscosidade aparente em relação ao tempo de coleta é menor em comparação com o BrCarb10. Nota-se que a viscosidade aparente se mantém praticamente constante para taxas de cisalhamento entre 10 s^{-1} e $0,01\text{ s}^{-1}$, independentemente do tempo de coleta. Isso indica que o BrCarb11 apresenta menor suscetibilidade a efeitos de relaxação e possível reestruturação da fase dispersa em baixas taxas de cisalhamento.

A comparação entre os fluidos evidencia que o BrCarb10 é mais sensível ao tempo de coleta em baixas taxas de cisalhamento, enquanto o BrCarb11 apresenta uma resposta mais estável. Essa diferença pode estar relacionada à maior concentração de carbonato de cálcio no BrCarb11, o que confere maior estabilidade estrutural ao fluido, reduzindo sua tendência à reestruturação ao longo do tempo de medição.

O modelo da Lei da Potência (Power-Law), representado pela (Eq. 4.3), foi utilizado para ajustar os resultados experimentais de viscosidade aparente (η) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) para ambos os fluidos, considerando apenas os dados entre $0,1\text{ s}^{-1}$ e 10 s^{-1} .

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

A Tabela 4.4 e a Figura 4.34 apresentam os resultados obtidos dos parâmetros reológicos.

Tabela 4.4 - Parâmetros reológicos dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11 para baixas taxas de cisalhamento (25 °C).

| Parâmetro | k [Pa.s ⁿ] | n |
|-----------|--------------------------|-------|
| BrCarb10 | 1,225 | 0,426 |
| BrCarb11 | 1,876 | 0,361 |

* $R^2 > 0,997$ para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

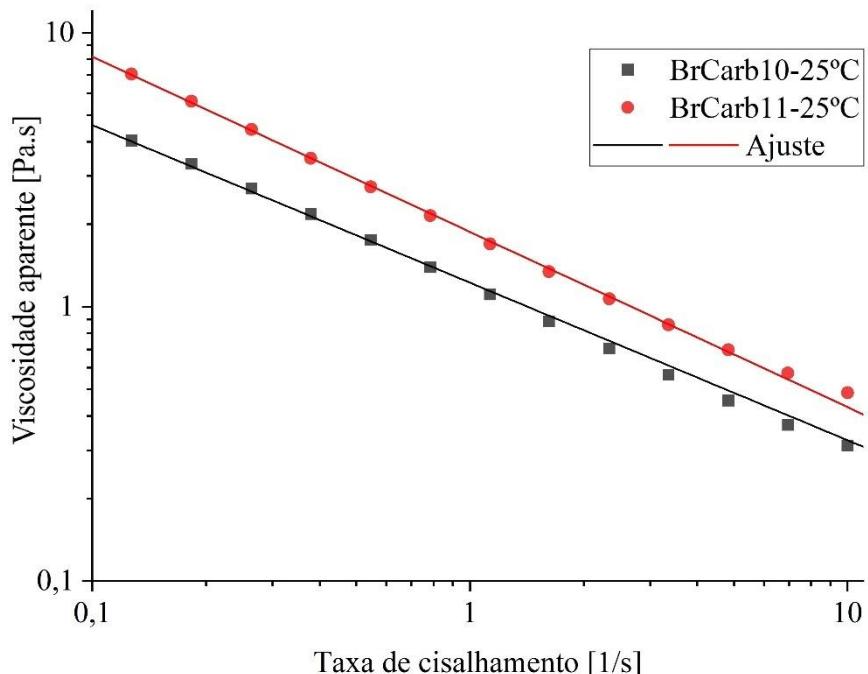


Figura 4.34 – Ajuste e curva de fluxo de baixa taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11.

Fonte: o autor.

O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) satisfatório, evidenciando um bom ajuste aos dados experimentais.

O parâmetro n é um indicador do comportamento newtoniano ou não-newtoniano de um fluido (Chhabra e Richardson, 2008), quando $n < 1$, o fluido é pseudoplástico, ou seja, apresenta escoamento com redução da viscosidade aparente à medida que a taxa de cisalhamento aumenta. Quanto menor o valor de n , maior a pseudoplasticidade e, portanto, maior o afastamento do comportamento de um fluido newtoniano.

Os resultados indicam que ambos os fluidos exibem comportamento pseudoplástico, sendo que o BrCarb11 apresenta maior pseudoplasticidade (menor n) em relação ao BrCarb10.

O índice de consistência k está diretamente relacionado à viscosidade aparente, representando a resistência ao escoamento sob uma força cisalhante (Chhabra e Richardson, 2008). Conforme esperado, o BrCarb11 apresenta maior viscosidade aparente e maior valor de k , resultado atribuído à sua maior concentração de carbonato de cálcio. Essa tendência reforça a influência da concentração de partículas sólidas na resistência ao escoamento.

A Figura 4.35 apresenta a curva de fluxo para altas taxas de cisalhamento para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11 em duas temperaturas, 25 °C e 70 °C. São apresentadas as curvas de ida e retorno para taxas de cisalhamento entre 10 s^{-1} e 1000 s^{-1} .

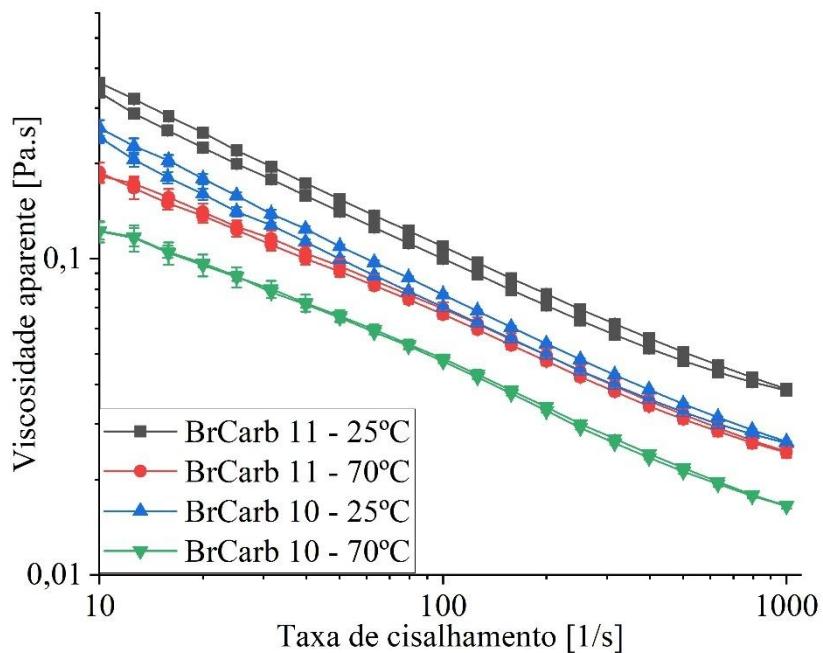


Figura 4.35 - Curva de fluxo de alta taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11 para 25 °C e 70 °C.

Fonte: o autor.

Como já mencionado anteriormente, nota-se que o BrCarb11 apresenta viscosidade aparente superior ao BrCarb10 em todas as condições testadas.

A influência da temperatura também é evidente na figura. Para ambos os fluidos, a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura, sendo essa redução um pouco mais acentuada no BrCarb10. A viscosidade aparente do BrCarb10 é mais sensível à temperatura do que a do BrCarb11; esse efeito pode estar relacionado à redução das interações entre as partículas suspensas e à menor viscosidade aparente da fase contínua em temperaturas elevadas.

A redução da viscosidade aparente com o aumento da temperatura de 25 °C para 70 °C foi maior na taxa de cisalhamento 10 s^{-1} e menor em 200 s^{-1} e 1000 s^{-1} . A Tabela 4.5 mostra a redução da viscosidade aparente em % para os fluidos nas taxas de cisalhamento 10, 200 e 1000 s^{-1}

Tabela 4.5 – Redução média da viscosidade aparente dos fluidos em porcentagem, após o aumento da temperatura de 25 °C para 70 °C para as taxas de cisalhamento 10, 200 e 1000 s⁻¹.

| Taxa de Cisalhamento [s ⁻¹] | Redução da viscosidade aparente [%] | |
|--|-------------------------------------|----------|
| | BrCarb10 | BrCarb11 |
| 10 | 53,0 | 49,2 |
| 200 | 36,9 | 36,0 |
| 1000 | 37,3 | 36,7 |

Fonte: o autor.

A redução da viscosidade aparente entre 25 °C e 70 °C é mais acentuada em baixas taxas de cisalhamento. Dessa forma, processos que operam sob baixas taxas de cisalhamento, como a sedimentação, serão mais sensíveis à variação de temperatura em comparação com aqueles que envolvem altas taxas de cisalhamento, nos quais o efeito térmico é menos pronunciado. Detalhes desse comportamento serão discutidos mais adiante.

Observa-se também que a diferença entre as curvas de ida (de 10 s⁻¹ para 1000 s⁻¹) e retorno (de 1000 s⁻¹ para 10 s⁻¹) na taxa de cisalhamento é relativamente pequena para ambos os fluidos, sugerindo um comportamento tixotrópico pouco pronunciado. Isso indica que, após a aplicação de altas taxas de cisalhamento, a estrutura do fluido se recupera rapidamente ou que a quebra estrutural é limitada dentro do intervalo de tempo do teste.

Além disso, a influência da temperatura na histerese é evidente. A 70 °C, a diferença entre as curvas de ida e volta é ainda menor em comparação com 25 °C, sugerindo uma redução da tixotropia com o aumento da temperatura. Esse efeito pode ser atribuído à diminuição das interações entre as partículas suspensas e à menor viscosidade aparente em temperaturas mais altas, tornando a recuperação estrutural menos significativa.

A Figura 4.36 mostra o ajuste do modelo Lei da Potência aos dados para ida na curva de fluxo (de 10 s⁻¹ para 1000 s⁻¹ – Figura 4.35); na Tabela 4.6 são apresentados os valores dos parâmetros reológicos.

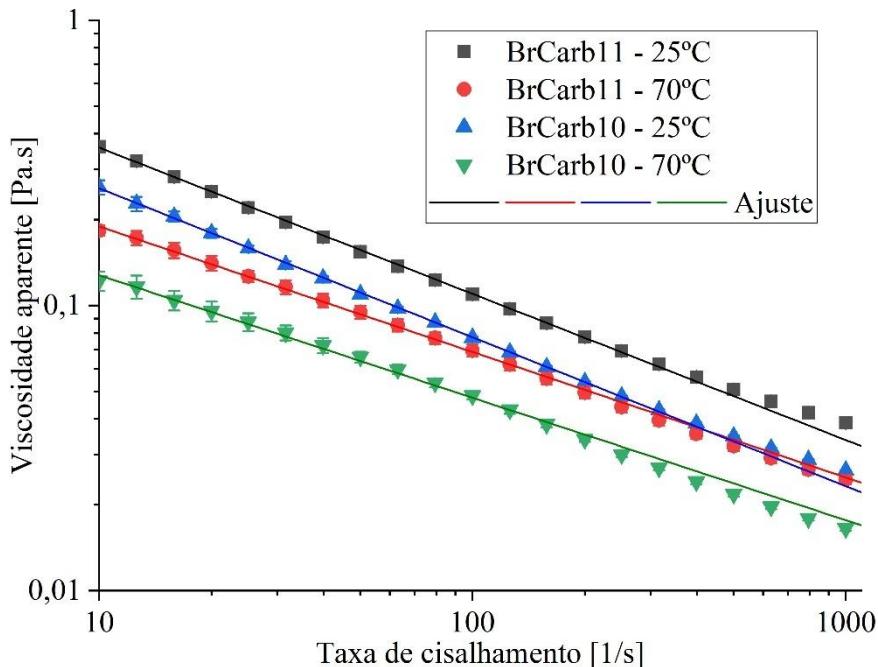


Figura 4.36 – Ajuste para curva de fluxo de alta taxa de cisalhamento do fluido BrCarb10 e BrCarb11 para 25 °C e 70 °C.

Fonte: o autor.

Tabela 4.6 - Parâmetros reológicos dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11 para altas taxas de cisalhamento (25 °C e 70 °C).

| Parâmetro | k [Pa.s ⁿ] | n |
|------------------|------------------------|-------|
| BrCarb10 (25 °C) | 0,857 | 0,477 |
| BrCarb10 (70 °C) | 0,342 | 0,571 |
| BrCarb11 (25 °C) | 1,164 | 0,487 |
| BrCarb11 (70 °C) | 0,521 | 0,560 |

* $R^2 = 0,998$ para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

Com base nos resultados da Tabela 4.6, podemos concluir que o aumento da temperatura reduz o comportamento pseudoplástico dos fluidos, uma vez que o valor de n aumenta com a temperatura.

Para uma melhor compreensão da variação da viscosidade aparente com a temperatura, foi construída a curva de varredura térmica no intervalo de 25 °C a 70 °C, sob diferentes taxas de cisalhamento (10, 50, 100, 300 e 600 s⁻¹). Os resultados obtidos para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11 são apresentados, respectivamente, nas Figura 4.37 e Figura 4.38. Nessas figuras, também é exibido o ajuste dos dados à equação de Arrhenius, aplicada para descrever a dependência da viscosidade aparente com a temperatura.

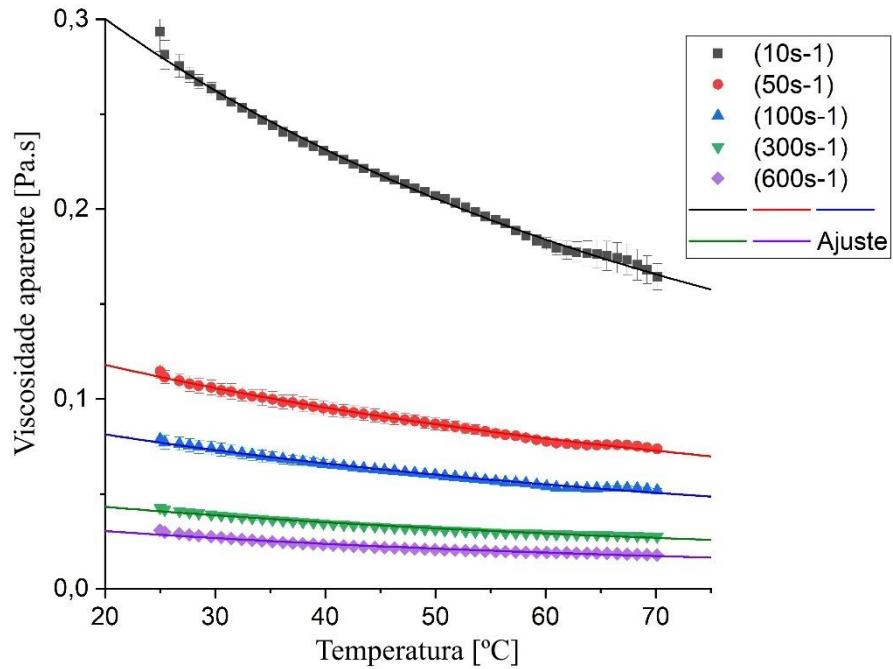


Figura 4.37 – Varredura de temperatura de 25 °C a 70 °C para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s⁻¹ do fluido BrCarb10 e ajuste da (Eq. 4.4).

Fonte: o autor.

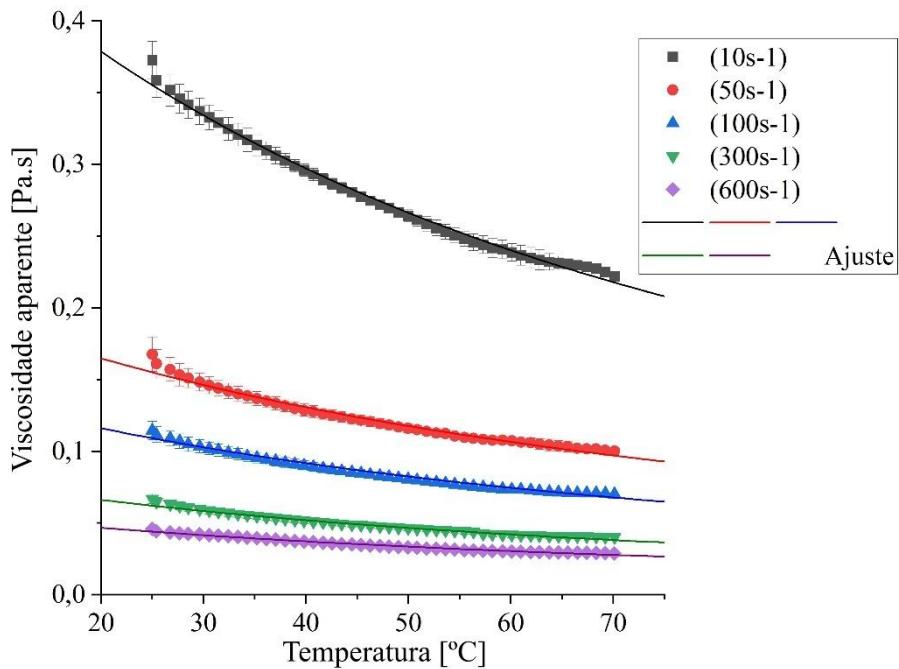


Figura 4.38 – Varredura de temperatura de 25 °C a 70 °C para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s⁻¹ do fluido BrCarb11 e ajuste da (Eq. 4.4).

Fonte: o autor.

Observou-se uma redução da viscosidade aparente com o aumento da temperatura para todas as taxas de cisalhamento analisadas, um comportamento característico dos fluidos. Além

disso, a variação da viscosidade aparente é mais acentuada em baixas taxas de cisalhamento, indicando uma maior sensibilidade térmica nessas condições. Em contrapartida, para taxas de cisalhamento mais elevadas, a viscosidade aparente apresenta menor variação, sugerindo que o efeito do cisalhamento tende a se sobrepor ao efeito térmico, o mesmo comportamento observado na Figura 4.35.

Esse efeito pode ser atribuído a três fatores principais:

1 - Comportamento pseudoplástico dos fluidos: Tanto BrCarb10 quanto BrCarb11 apresentam comportamento pseudoplástico ($n < 1$), ou seja, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Em taxas elevadas (1000 s^{-1}), as forças cisalhantes já promovem a orientação e a desagregação das estruturas do fluido, minimizando a influência da temperatura na redução adicional da viscosidade aparente. Isso explica por que a diferença de viscosidade aparente entre 25°C e 70°C é menos expressiva nessa faixa (Sato e Cunha, 2007).

2 - Influência da energia térmica e da energia mecânica: Em baixas taxas de cisalhamento, a temperatura tem um papel dominante na redução da viscosidade aparente, pois o fluido não está sujeito a intensas forças mecânicas que já induziriam a reorganização das partículas. Em contrapartida, em altas taxas de cisalhamento, a energia mecânica aplicada supera a influência da temperatura na quebra de estruturas internas, resultando em uma menor variação de viscosidade aparente com o aquecimento (Sato e Cunha, 2007).

3 - Efeito da concentração de partículas: Como os fluidos contêm carbonato de cálcio em suspensão, a temperatura pode afetar a dispersão e a estabilidade da fase sólida. Em baixas taxas de cisalhamento, agregados podem se romper mais facilmente com o aquecimento, reduzindo a viscosidade aparente de forma mais acentuada. Já em altas taxas de cisalhamento, esses agregados já estariam desfeitos independentemente da temperatura, tornando o efeito térmico menos relevante (Sato e Cunha, 2007).

Analisando os gráficos, percebe-se que o ajuste dos dados à equação de Arrhenius definida pela (Eq. 4.4) representa bem a dependência da viscosidade aparente com a temperatura,

$$\eta(T) = \eta_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde, η_0 (Fator Pré-exponencial) representa a viscosidade teórica em uma temperatura de referência. Está relacionado à estrutura molecular do fluido e à organização interna das suas partículas, E_a (Energia de ativação da viscosidade aparente) mede a sensibilidade da viscosidade aparente à temperatura. Quanto maior o E_a , maior é variação a viscosidade aparente

com a temperatura, R, (Constante dos Gases), 8,314 J/mol·K., T (Temperatura em Kelvin). Esse modelo é especialmente útil para fluidos não newtonianos, permitindo prever o comportamento reológico sob diferentes condições térmicas (Ashter, 2014).

As Tabela 4.7 e Tabela 4.8 apresentam os parâmetros do modelo de Arrhenius para os testes de varredura de temperatura dos fluidos.

Tabela 4.7 - Parâmetros da (Eq. 4.4) para varredura de temperatura de 25 °C e 70 °C do BrCarb10.

| Taxa de Cisalhamento [s ⁻¹] | E _a [J/mol] | η ₀ [Pa.s].10 ⁻³ |
|--|---------------------------|---|
| 10 | -9942,4 | 5,083 |
| 50 | -8095,2 | 4,265 |
| 100 | -7948,2 | 3,123 |
| 300 | -7941,2 | 1,667 |
| 600 | -9461,4 | 0,627 |

* R² > 0,992 para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

Tabela 4.8 - Parâmetros da (Eq. 4.4) para varredura de temperatura de 25 °C e 70 °C do BrCarb11.

| Taxa de Cisalhamento [s ⁻¹] | E _a [J/mol] | η ₀ [Pa.s].10 ⁻³ |
|--|---------------------------|---|
| 10 | -9238,5 | 8,558 |
| 50 | -8847,6 | 4,376 |
| 100 | -8984,6 | 2,913 |
| 300 | -9197,9 | 1,524 |
| 600 | -8694,9 | 1,325 |

* R² > 0,994 para todos os ajustes.

Fonte: o autor.

A partir dos dados apresentados nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8, observa-se que o fator pré-exponencial η₀ apresenta uma tendência clara de diminuição à medida que a taxa de cisalhamento aumenta. O fato de η₀ diminuir com o cisalhamento sugere que, em condições de fluxo mais intenso, o fluido já parte de uma viscosidade aparente inicial menor antes mesmo de considerar os efeitos térmicos. Isso reforça o comportamento não newtoniano do material e destaca a influência das interações estruturais na reologia do fluido.

Por outro lado, a energia de ativação (E_a) não apresenta uma tendência tão bem definida com a taxa de cisalhamento. Embora existam variações nos valores, não há um comportamento monotônico evidente, entre E_a e a taxa de cisalhamento. Dessa forma E_a pode estar sujeito a variações não lineares que demandam uma análise mais detalhada para compreender os mecanismos envolvidos.

A linearização do modelo de Arrhenius é uma técnica amplamente utilizada para determinar a energia de ativação de processos cujas taxas são influenciadas pela temperatura. A equação de Arrhenius, na forma exponencial, pode ser reescrita de maneira linear ao se aplicar o logaritmo natural em ambos os lados, resultando na (Eq. 4.5) (Fogler, 2009; Micha e Corradini, 2012).

$$\ln \eta = \ln \eta_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

As Figura 4.39 e Figura 4.40 mostra os dados linearizados para validação do modelo de Arrhenius para o BrCarb10 e BrCarb11.

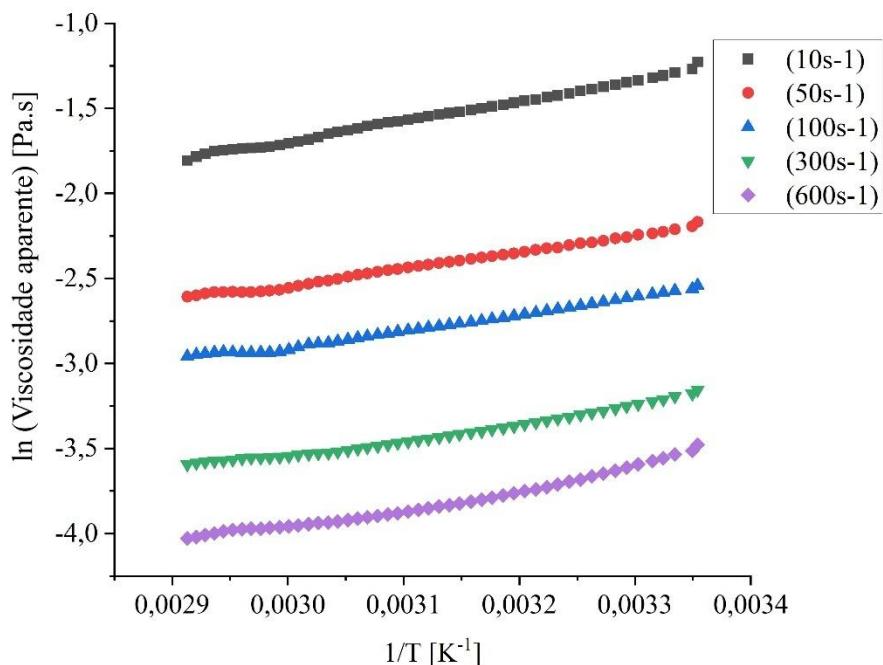


Figura 4.39 – Linearização dos dados de varredura de temperatura para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s⁻¹ do fluido BrCarb10.

Fonte: o autor.

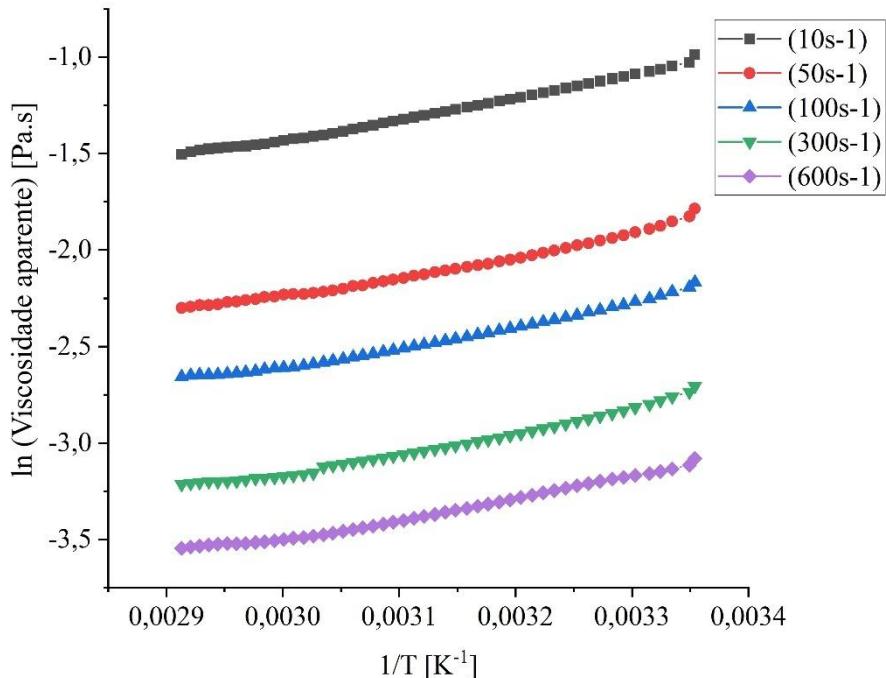


Figura 4.40 – Linearização dos dados de varredura de temperatura para taxas de cisalhamento 10, 50, 100, 300 e 600 s^{-1} do fluido BrCarb11.

Fonte: o autor

Essa transformação permite que os dados experimentais sejam ajustados a um modelo linear, facilitando a determinação dos parâmetros cinéticos a partir da inclinação da reta no gráfico de $\ln \eta$ em função de $1/T$. A linearização dos dados experimentais resultando em um comportamento aproximadamente linear nesse gráfico indica que o modelo de Arrhenius se ajusta adequadamente ao sistema estudado. As Figura 4.39 e Figura 4.40 confirmam a validade do modelo, uma vez que os dados apresentam um comportamento linear, evidenciando a coerência da relação entre a viscosidade aparente e a temperatura. A obtenção de uma reta sugere que a dependência exponencial da viscosidade aparente com a temperatura, previsto pelo modelo de Arrhenius, é válida para os dados experimentais, permitindo a determinação confiável da energia de ativação a partir da inclinação da linha ajustada (Micha e Corradini, 2012).

A caracterização da resposta viscoelástica dos fluidos é apresentada na Figura 4.41, que se refere a um teste de varredura de amplitude de tensão para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11, ilustrando o comportamento dos módulos de armazenamento (G') e perda (G'') em função da tensão de cisalhamento.

Esse tipo de análise é fundamental para caracterizar a resposta viscoelástica dos fluidos e identificar o limite de viscoelasticidade linear (LVE), que representa a faixa de tensão em que a estrutura interna do fluido se mantém intacta (Loïc, 2020).

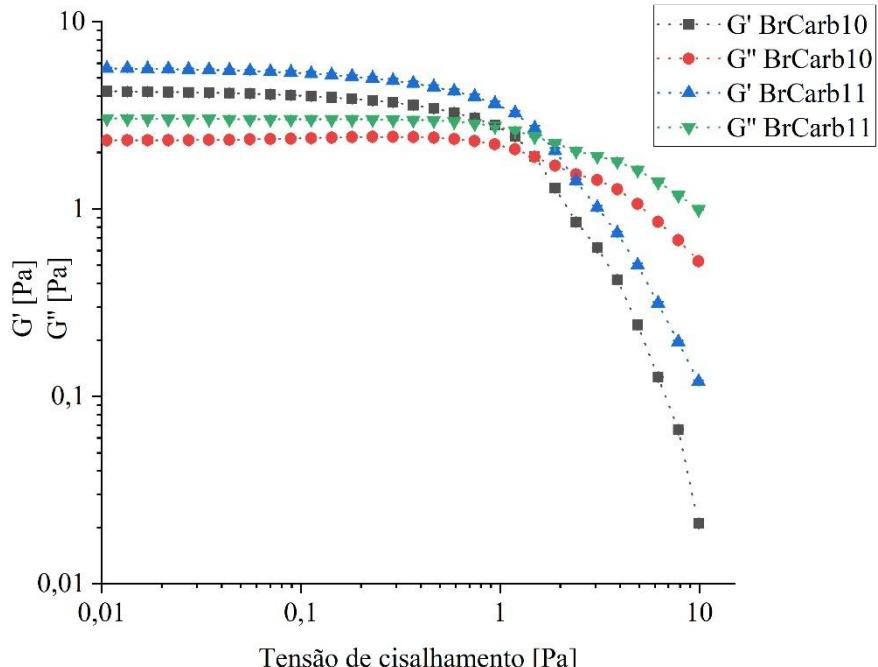


Figura 4.41 - Varredura de amplitude da tensão mostrando os módulos de armazenamento e perda dos fluidos BrCarb10 e BrCarb11.

Fonte: o autor.

Observa-se que, em baixas tensões, ambos os fluidos apresentam um regime predominantemente elástico, com G' maior que G'' , indicando uma estrutura bem-organizada e coesa. O fluido BrCarb11, com maior teor de carbonato de cálcio, exibe valores mais elevados de G' e G'' em relação ao BrCarb10, sugerindo uma maior resistência estrutural e uma interação mais forte entre as partículas suspensas.

À medida que a tensão de cisalhamento aumenta, ocorre uma transição para um comportamento mais viscoso, evidenciada pela queda do G' e pelo cruzamento entre G' e G'' . Esse ponto de cruzamento indica o limite da estruturação do fluido, a partir do qual as ligações internas se rompem e o material flui de maneira mais líquida.

A faixa de viscoelasticidade linear (LVE) se estende até aproximadamente 2 Pa para o BrCarb11 e 1 Pa para o BrCarb10. Logo o BrCarb11 mantém sua estrutura por um intervalo de tensão maior do que o BrCarb10, reforçando sua maior resistência mecânica embora essa diferença não seja tão expressiva.

Acima dos limites da LVE, os módulos começam a decair, evidenciando o início da degradação da microestrutura do fluido e a transição para um comportamento mais fluido. Esse comportamento é consistente com fluidos que apresentam uma microestrutura interna que resiste à deformação até certo limite de tensão (Loïc, 2020).

Os testes realizados no estudo de Werner *et al.*, 2017 apresentaram respostas similares aos obtidos neste trabalho, especialmente no que se refere ao comportamento viscoelástico dos fluidos sob diferentes tensões de cisalhamento.

A Figura 4.42 apresenta os resultados do teste de tixotropia de três intervalos (3ITT) para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11 a 25 °C.

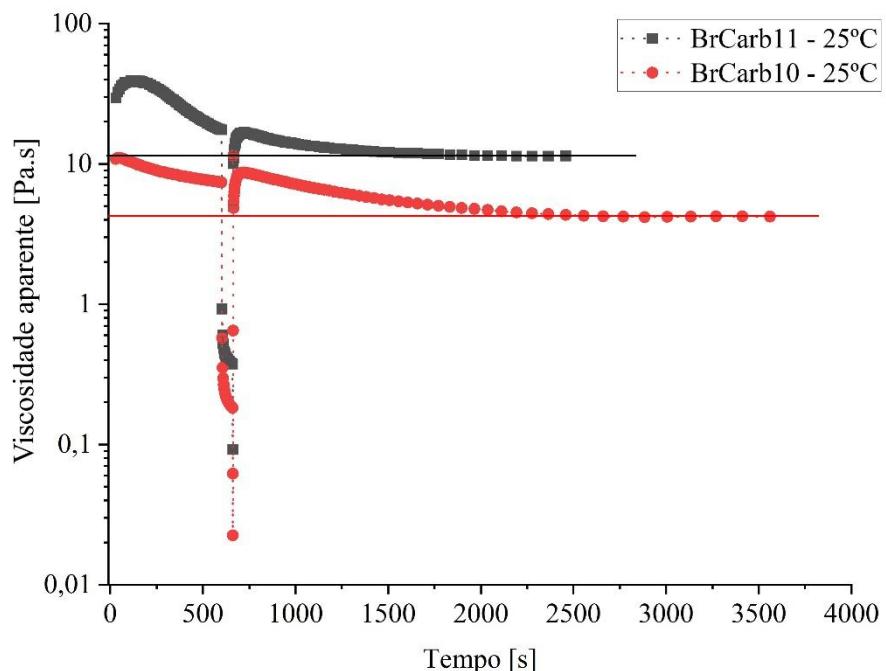


Figura 4.42 - Teste de tixotropia de 3 intervalos para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11.
Fonte: o autor.

No primeiro intervalo (até aproximadamente 600 s), ambos os fluidos mantêm uma queda da viscosidade aparente sob baixa tensão de cisalhamento (0,3 Pa). No segundo intervalo (entre 600 s e 660 s), ocorre uma forte redução na viscosidade aparente devido à aplicação de alta tensão de cisalhamento (4 Pa), desestruturando a rede fluida. Esse efeito é similar entre os dois fluidos pois ambos reduzem a viscosidade aparente em 98 % neste intervalo, revelando uma desagregação estrutural similares entre os fluidos.

Na fase final, ao retornar à tensão inicial (0,3 Pa), observa-se uma rápida recuperação da viscosidade aparente. O BrCarb11 apresenta uma recuperação mais rápida e eficiente, atingindo

98% da viscosidade aparente inicial em aproximadamente 62 s, enquanto o BrCarb10 leva cerca de 268 s. Isso sugere que o maior teor de carbonato de cálcio favorece a reconstrução estrutural do fluido, tornando-o mais resistente à degradação mecânica.

Observa-se também que na fase final o BrCarb10 atinge a estabilidade na viscosidade aparente por volta de 2500 s, enquanto o BrCarb11 estabiliza-se mais rapidamente, aproximadamente em 1500 s. Esse comportamento pode ser atribuído à diferença na concentração de carbonato de cálcio entre os dois fluidos. Os resultados reológicos indicam que o BrCarb11 possui uma estrutura interna que se recompõe mais rapidamente, tornando-o potencialmente mais adequado para aplicações onde a rápida recuperação da viscosidade aparente seja um fator crítico.

Uma explicação para este comportamento é que suspensões quando submetidas a forças de cisalhamento, a deformação é suportada pela fase líquida, e é nessa fase, em sua interface com as partículas, que ocorre a dissipação de energia devido ao fluxo. Portanto, a hidrodinâmica da fase líquida sempre desempenhará um papel na reologia de uma suspensão, mesmo em casos em que outros fenômenos, como forças interarticulares coloidais, também contribuem para as tensões (Mewis e Wagner, 2012).

Portanto, o fluido BrCarb10, por possuir uma maior fração volumétrica de líquido, exibirá um comportamento mais característico de um líquido tixotrópico e, consequentemente, apresentará uma maior tixotropia devido à maior quantidade de fase líquida em sua composição. Em contraste, o BrCarb11, com uma fração volumétrica menor de líquido e maior teor de sólidos, terá uma resposta reológica diferente, com menor tixotropia, uma vez que sua estrutura contém menos fluido disponível o que facilita a reestruturação após o cisalhamento.

4.4.2 Velocidade de sedimentação e concentração de sólidos.

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação realizados com os fluidos de perfuração, abrangendo o deslocamento da interface descendente, as velocidades médias de sedimentação e os perfis de concentração de sólidos. Os resultados foram organizados em quatro grupos de comparação: (i) BrCarb10 e BrCarb11 a temperatura ambiente, (ii) BrCarb10 e BrCarb11 a 70 °C, (iii) BrCarb10 a temperatura ambiente e BrCarb10 a 70 °C e (iv) BrCarb11 a temperatura ambiente e BrCarb11 a 70 °C. Essa estrutura possibilita uma análise comparativa detalhada dos efeitos da concentração de partículas e da temperatura no processo de sedimentação.

(i) BrCarb10 e BrCarb11 a temperatura ambiente.

Para o fluido BrCarb10, observou-se que, após 280 dias de monitoramento, a interface descendente deslocou-se 10 cm, resultando em uma velocidade média de sedimentação de 0,0149 mm/h. No caso do fluido BrCarb11, no mesmo período, a interface apresentou um deslocamento de 7 cm, correspondendo a uma velocidade média de 0,0104 mm/h.

Comparativamente, a velocidade de sedimentação do BrCarb10 foi aproximadamente 43% superior à do BrCarb11, indicando um processo de sedimentação mais eficiente. Esse comportamento está relacionado principalmente à menor viscosidade aparente do BrCarb10, confirmada pelos dados reológicos, além da sua menor concentração de sólidos, fatores que contribuem para a maior taxa de sedimentação.

Após 280 dias de sedimentação, verificou-se que a maior velocidade de sedimentação do BrCarb10 também se refletiu nos perfis de concentração de sólidos apresentados na Figura 4.43.

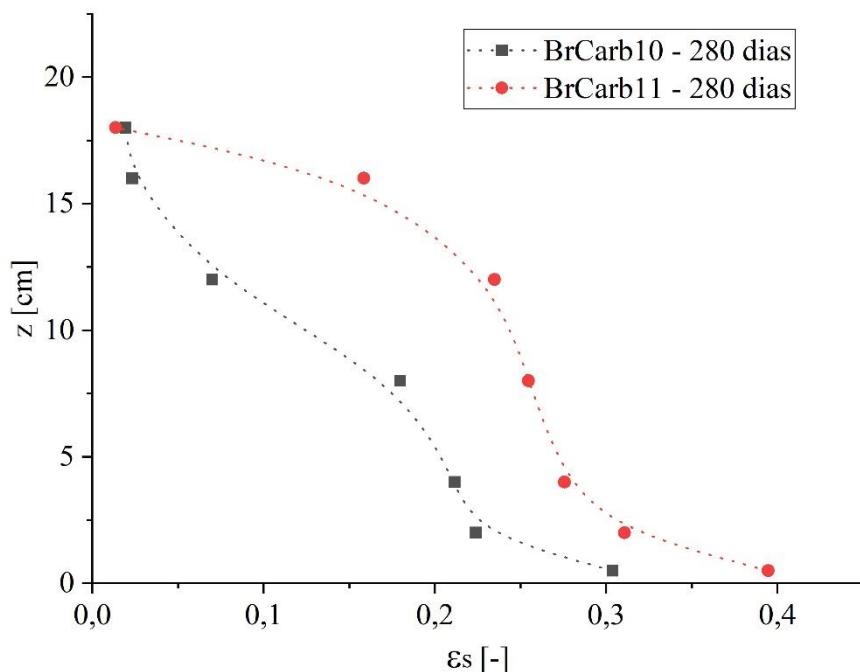


Figura 4.43 – Concentração de sólidos após 280 dias de sedimentação a temperatura ambiente para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11.

Fonte: o autor.

O fluido BrCarb10 transportou uma quantidade mais significativa de partículas para o fundo do recipiente, o que resultou em uma redução mais acentuada da concentração nas

camadas superiores quando comparado ao BrCarb11, no mesmo período. Por outro lado, o BrCarb11 apresentou concentrações de sólidos mais elevadas em todo o perfil vertical analisado, em função da sua maior concentração inicial de partículas. É importante ressaltar que a sedimentação ainda estava em curso, de modo que os valores obtidos não representam o sólido totalmente estabilizado no fundo da proveta.

(ii) BrCarb10 e BrCarb11 a 70 °C.

Em 24 horas de sedimentação a 70 °C, o BrCarb10 apresentou um deslocamento da interface descendente de $4,1\text{ cm} \pm 0,4$, resultando em uma velocidade média de sedimentação de 1,70 mm/h. No mesmo período, o BrCarb11 apresentou um deslocamento de $1,7\text{ cm} \pm 0,3$, com uma velocidade média de 0,7083 mm/h. Comparando-se as velocidades médias, a sedimentação do BrCarb10 foi aproximadamente 140% maior que a do BrCarb11 sob a condição aquecida.

Observou-se que a elevação da temperatura exerceu maior influência sobre o BrCarb10, aumentando significativamente sua velocidade de sedimentação em relação ao BrCarb11. Esse comportamento indica que o BrCarb10 é mais sensível à variação de temperatura, o que está em consonância com os resultados reológicos obtidos. Assim, a resposta do BrCarb10 à condição aquecida foi mais pronunciada do que para o BrCarb11.

Além disso, a Figura 4.44 apresenta os perfis de concentração de sólidos após 24 horas de sedimentação para ambos os fluidos, evidenciando as diferenças na distribuição de partículas ao longo do recipiente.

A sensibilidade do BrCarb10 à variação de temperatura também foi confirmada pelos perfis de concentração de sólidos. Enquanto o BrCarb11 apresentou pouca alteração em sua concentração de sólidos ao longo da suspensão, o BrCarb10 conduziu uma quantidade maior de partículas para as camadas inferiores, intensificando a formação do leito sedimentado. Comparando com a sedimentação a temperatura ambiente, esse comportamento foi mais acentuado a 70 °C, indicando que o aumento da temperatura intensificou o processo de sedimentação para o BrCarb10, ao passo que exerceu menor influência sobre o BrCarb11.

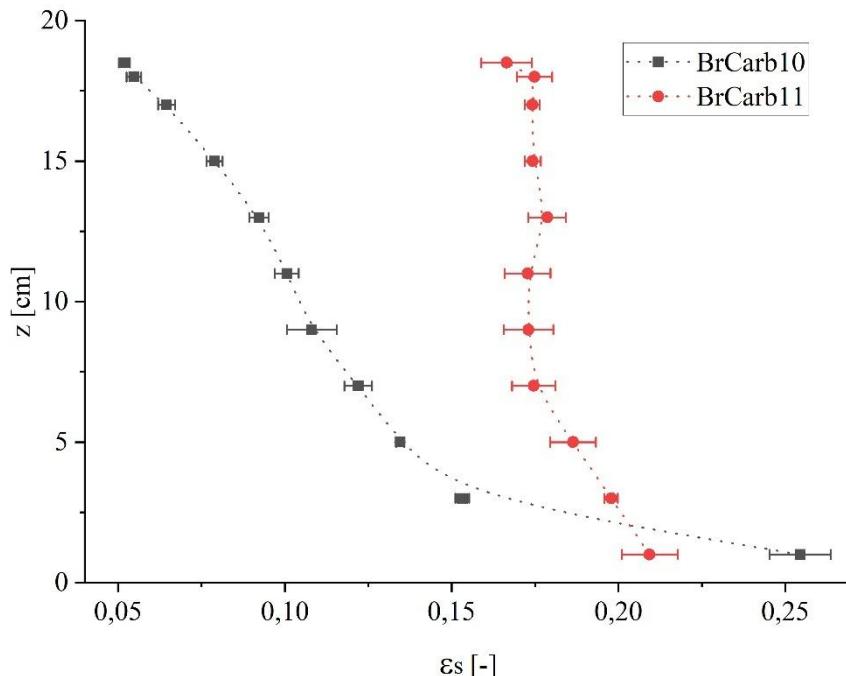


Figura 4.44 – Concentração de sólidos após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C para os fluidos BrCarb10 e BrCarb11.

Fonte: o autor.

(iii) BrCarb10 a temperatura ambiente e BrCarb10 a 70 °C.

Conforme mencionado anteriormente, o BrCarb10 obteve um deslocamento da interface descendente de cerca de 4 cm em 24 horas na temperatura de 70 °C, enquanto, na condição de temperatura ambiente, foi necessário um período de 2265 horas (equivalente a 94 dias) para ocorrer o mesmo deslocamento. Essa diferença resultou em uma velocidade da interface aproximadamente 94 vezes menor na condição de temperatura ambiente em relação à aquecida.

Esse resultado demonstra de forma clara a importância de considerar o efeito da temperatura no processo de sedimentação desses fluidos, evidenciando um impacto significativo sobre a eficiência de separação de sólidos em suspensão.

Na Figura 4.45, será apresentado a concentração de sólidos para as condições em análise. Com base no gráfico de concentração de sólidos apresentado, observa-se que, embora o deslocamento da interface descendente tenha sido o mesmo para o BrCarb10 após 94 dias à temperatura ambiente e após 24 horas a 70 °C, os perfis de concentração de sólidos não atingiram a mesma configuração. Os resultados indicam que, na condição de temperatura ambiente, ainda seria necessário um período adicional, superior aos 94 dias já transcorridos, para que os perfis de concentração se aproximasse dos observados na condição aquecida.

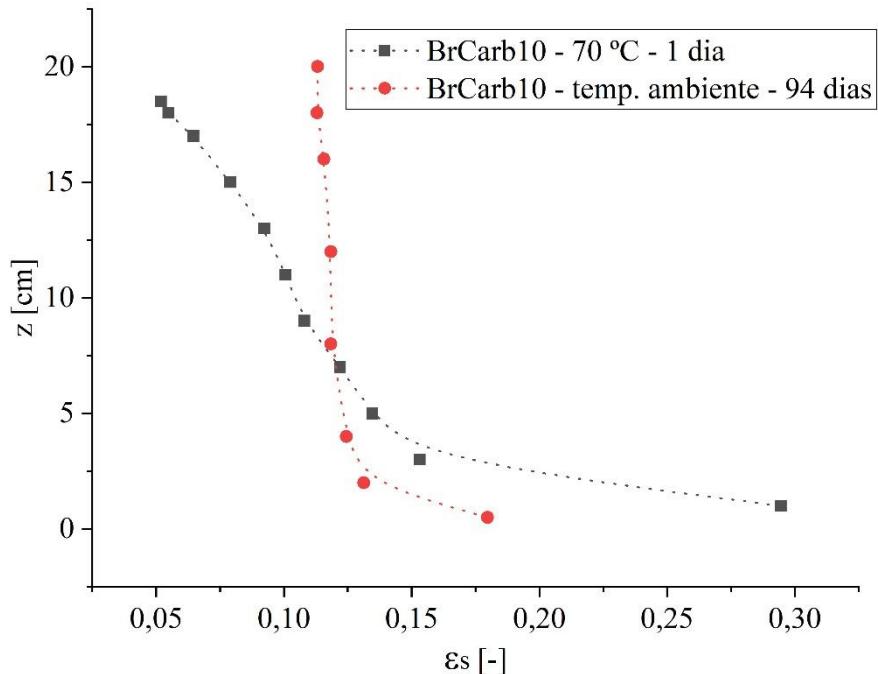


Figura 4.45 – Concentração de sólidos para o BrCarb10 após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C e após 94 dias de sedimentação a temperatura ambiente.

Fonte: o autor.

Esse comportamento evidencia que a altura da interface descendente não representa, isoladamente, a equivalência na distribuição de sólidos ao longo da suspensão. Portanto, o acompanhamento exclusivo do deslocamento da interface não é suficiente para descrever de forma completa o fenômeno de sedimentação em diferentes temperaturas. Nesse contexto, a aplicação da técnica TARG mostrou-se essencial para obter informações detalhadas sobre os perfis de concentração de sólidos, complementando as análises baseadas apenas no movimento da interface.

(iv) BrCarb11 a temperatura ambiente e BrCarb11 a 70 °C.

Para a amostra BrCarb11, observou-se que, em 24 horas, a interface descendente deslocou-se aproximadamente 2 cm quando submetida à temperatura de 70 °C. Em contrapartida, em condição ambiente, para atingir o mesmo deslocamento, foi necessário um período de 1472 horas (equivalente a 61 dias). Assim, a velocidade de sedimentação a 70 °C foi cerca de 61 vezes superior à observada à temperatura ambiente. No que se refere à concentração de sólidos, os resultados obtidos apresentaram tendência semelhante à verificada para o BrCarb10, indicando que, mesmo com interfaces descendentes de mesma magnitude, os

perfis de concentração podem diferir. Os resultados detalhados encontram-se ilustrados na Figura 4.46.

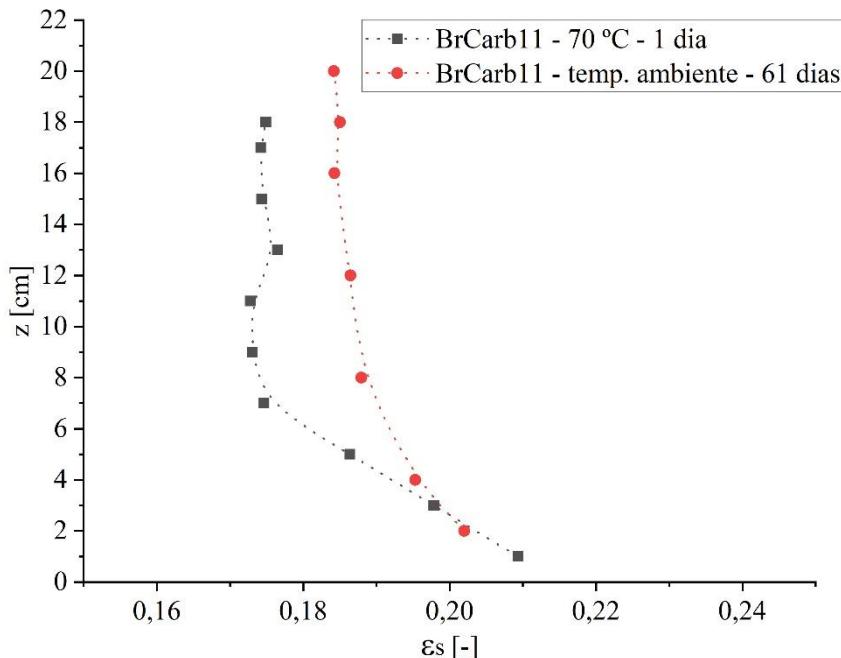


Figura 4.46 – Concentração de sólidos para o BrCarb11 após 24 h de sedimentação a temperatura de 70 °C e após 61 dias de sedimentação a temperatura ambiente.

Fonte: o autor.

Observa-se que, para a condição ambiente, o perfil de concentração de sólidos ainda requer um tempo superior aos 64 dias de monitoramento para alcançar valores comparáveis aos obtidos para a mesma amostra a 70 °C. Este comportamento evidencia que o deslocamento semelhante da interface descendente não garante, por si só, a equivalência no grau de compactação do sedimento, reforçando a necessidade de análises complementares de concentração ao longo da coluna para uma compreensão mais precisa do fenômeno de sedimentação sob diferentes condições térmicas.

Esses resultados reforçam que o deslocamento equivalente da interface descendente não implica necessariamente em perfis de concentração de sólidos equivalentes, ressaltando a importância da avaliação detalhada do gradiente de sólidos ao longo do tempo.

O Capítulo 5 sintetiza as principais conclusões extraídas a partir dos resultados discutidos, destacando as contribuições deste trabalho para o avanço do conhecimento na área, além de propor recomendações para investigações futuras.

5 CONCLUSÕES

Os experimentos conduzidos sob condições isotérmicos em água destilada e carbonato de cálcio revelaram uma relação direta entre o aumento da temperatura e o aumento da velocidade de sedimentação. A 70 °C, a velocidade de sedimentação livre foi 123% maior que a 25 °C, evidenciando o impacto da redução da viscosidade dinâmica do meio e do aumento da mobilidade das partículas. Ainda assim não foi observado mudanças na pressão nos sólidos evidenciando que a pressão nos sólidos não é dependente da velocidade de sedimentação.

A altura final do sedimento também foi afetada pela temperatura. A sedimentação a 70 °C resultou em um leito 4,3% mais alto do que o observado a 25 °C. Esse aumento está relacionado à expansão térmica do leito e à menor compactação promovida pela movimentação térmica da água como a convecção.

Após o resfriamento natural do sistema de 70 °C para 25 °C, foi observada uma reacomodação do leito, com a altura final do sedimento se aproximando àquela registrada na condição isotérmica mais fria, sugerindo a existência de mecanismos de rearranjo estrutural após o resfriamento.

Com relação à concentração de sólidos, verificou-se que a sedimentação a 70 °C produziu leitos com menor concentração volumétrica máxima ($\varepsilon_{sm} = 0,455$) comparada à sedimentação a 25 °C ($\varepsilon_{sm} = 0,468$), o que corrobora com a observação da expansão do leito. Após o resfriamento, a concentração retornou a valores similares àqueles obtidos a 25 °C, o que reforça o fenômeno de reacomodação das partículas.

Nos experimentos com gradiente térmico, observou-se uma clara redistribuição de calor ao longo do recipiente, influenciando a estrutura do sedimento formado. A difusão de calor pelas paredes aquecidas gerou um perfil assimétrico de concentração de sólidos: enquanto as paredes aquecidas apresentaram maiores concentrações ($\varepsilon_{sm} = 0,38$ a $z = 9,5$ cm), a região central permaneceu menos densa ($\varepsilon_{sm} = 0,20$), evidenciando a migração de partículas em direção às regiões com maior temperatura.

Este fenômeno pode ser explicado pela redução da viscosidade dinâmica nas proximidades das paredes aquecidas, decorrente do aquecimento lateral. Esse efeito resulta na aceleração das partículas nessas regiões, promovendo a formação de um gradiente lateral de velocidade, com valores mais elevados nas áreas de maior temperatura e menores nas regiões com temperatura mais baixa.

A migração de partículas para os extremos laterais resultou em sedimentos com maior acúmulo sólido próximo às paredes aquecidas, alterando o perfil de concentração e a distribuição da pressão nos sólidos. A maior pressão foi registrada nas regiões aquecidas, em função da maior sobrecarga de material particulado, enquanto a menor pressão foi observada nas regiões centrais, que perderam material para as laterais.

A altura final do sedimento também apresentou variações ao longo do eixo horizontal nos testes com gradiente de temperatura, sendo maior nas laterais aquecidas ($H = 10,45$ cm em $x = 1,5$ cm) e menor no centro ($H = 9,4$ cm em $x = 21$ cm), evidenciando novamente o impacto da temperatura na migração de partículas e na dinâmica da sedimentação.

Ao comparar os resultados entre os dois cenários isotérmico e com gradiente observa-se que a pressão nos sólidos se distribui de forma mais uniforme no primeiro caso, enquanto no segundo há uma clara assimetria associada ao transporte térmico e à migração de partículas. Tais conclusões destacam a importância de considerar os efeitos térmicos não apenas sobre a cinética da sedimentação, mas também sobre a formação estrutural do leito sedimentar e sua compactação final, especialmente em processos industriais sujeitos a variações térmicas significativas.

Na sedimentação com gradiente de temperatura vertical, os resultados mostraram que os sólidos de carbonato exercem considerável resistência à transferência de calor, limitando a propagação do gradiente térmico. Verificou-se também que a transferência de calor não ocorreu de forma totalmente uniforme na base do recipiente bidimensional, o que resultou na formação de um gradiente horizontal adicional, acoplado ao gradiente vertical originalmente imposto. Esse gradiente horizontal induziu a migração de partículas em direção à região com maior intensidade de calor, modificando localmente a distribuição dos sólidos sedimentados. Por outro lado, os testes conduzidos no mesmo recipiente, porém sem aplicação de aquecimento, confirmaram o comportamento unidimensional da sedimentação, uma vez que ao longo do eixo x não foram observadas variações significativas na altura do leito sedimentado nem no perfil de concentração de sólidos.

A análise reológica comparativa entre os fluidos BrCarb10 e BrCarb11 revelou que o BrCarb11 apresenta maior estabilidade estrutural em baixas taxas de cisalhamento, com menor suscetibilidade a efeitos de relaxação e menor dependência temporal (tixotropia). Essa estabilidade está associada à maior fração volumétrica de carbonato de cálcio, a qual confere resistência à reestruturação do sistema durante o repouso. Como o carbonato de cálcio não contribui diretamente para a viscosidade aparente nem para a tixotropia, sendo uma fase

estruturalmente inerte do ponto de vista reológico, a redução da tixotropia está relacionada à menor fração líquida disponível para interações hidrodinâmicas.

Embora o BrCarb11 apresente vantagens estruturais e menor sensibilidade às variações térmicas e ao repouso, sua elevada viscosidade aparente pode representar um entrave à eficiência operacional, em virtude do maior consumo energético necessário para seu bombeamento. Por outro lado, o BrCarb10, por conter uma maior fração líquida, revela-se mais suscetível à deformação estrutural e ao efeito do tempo, mas oferece menor resistência ao escoamento, favorecendo condições de operação com menor demanda energética.

Adicionalmente, os ensaios de varredura térmica e as curvas de fluxo obtidas em diferentes temperaturas evidenciaram que a sensibilidade térmica dos fluidos é mais acentuada em baixas taxas de cisalhamento, enquanto em altas taxas, a energia mecânica aplicada ao sistema se sobrepõe ao efeito da energia térmica.

Os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação com os fluidos de perfuração BrCarb10 e BrCarb11 confirmaram que o aumento da temperatura exerce forte influência na velocidade de sedimentação, reduzindo significativamente o tempo necessário para o deslocamento da interface descendente. No entanto, constatou-se que a equivalência na posição da interface não implica necessariamente em perfis de concentração de sólidos semelhantes ao longo da coluna. Observou-se também que fluidos de perfuração com menor concentração de sólidos, como o BrCarb10, apresentaram maior sensibilidade às variações térmicas, evidenciando diferenças mais pronunciadas no comportamento de sedimentação em função da temperatura. Esses achados ressaltam a importância de se adotar técnicas complementares de monitoramento, como a TARG, para avaliar com precisão a distribuição espacial de sólidos, evitando interpretações limitadas baseadas apenas no acompanhamento da interface.

REFERÊNCIAS

ADAMS, A. J.; MACEACHRAN, Angus. Impact on casing design of thermal expansion of fluids in confined annuli. **SPE Drilling and Completion**, v. 9, n. 03, p. 210–216, 1994.
<https://doi.org/10.2118/21911-PA>.

AHRENS, J. P. A fall-velocity equation. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 126, n. 2, p. 99–102, 2000.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2000\)126:2\(99\).](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:2(99).)

ALVES, Ana Gabriela. **Projeto de um sistema experimental para monitoramento da sedimentação de partículas em suspensões aquosas submetidas a gradientes de temperaturas**. Dissertação (Mestrado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2024. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/43536>

AROUCA, Fabio de Oliveira. **Obtenção experimental das equações constitutivas para o espessamento e filtração utilizando técnica de atenuação de radiações de altas energias**. Dissertação (Mestrado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

AROUCA, Fabio de Oliveira. **Uma contribuição ao estudo da sedimentação gravitacional em batelada**. Tese (Doutorado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15096>

ASHTER, Syed Ali. Mechanics of materials. In: **Thermoforming of single and multilayer laminates**. [S.l.]: William Andrew Publishing, 2014. p. 123–145.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3172-5.00006-2.>

BARNES, Howard A. The yield stress—a review or ‘παντα ρε’—everything flows? **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 81, n. 1–2, p. 133–178, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(98\)00094-9.](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(98)00094-9.)

BRADFORD, D. W. *et al.* Marlin failure analysis and redesign; Part 1, Description of failure. **Proceedings of the Drilling Conference**, p. 537–546, 2002.

<https://doi.org/10.2523/74528-MS>.

BUSCALL, R. The consolidation of concentrated suspensions. **J. Chem. SOC., Faraday Trans.**, v. 1, p. 873–891, 1987. <https://doi.org/10.1039/f19878300873>.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-newtonian fluid behaviour. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**, p. 1–55, 2008.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.00001-9>

Climate-data.org. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/info/sources/>>. Acesso em: 7 jun. 2025.

COE, H. S.; CLEVENGER, G. H. Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. **Trans. AIME**, v. 55, p. 356–384, 1916.

CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. Modification of the kynch theory of sedimentation. **AIChE Journal**, p. 312–315, 1987. <https://doi.org/10.1002/aic.690330219>.

COULSON, John; RICHARDSON, John Francis. Chapter 8 - Sedimentation. In: CHHABRA, Raj; BASAVARAJ, Madivala G. (Orgs.). **Coulson and Richardson's Chemical Engineering (Sixth Edition)**. 6. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2019. v. 2 p. 387–447.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101098-3.00009-3>

DAMASCENO, J. J. R. **Uma contribuição ao estudo do espessamento contínuo**. Tese (Doutorado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.

D'ÁVILA, J. S. **Um modelo matemático para a sedimentação**. Tese (Doutorado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1978.

FACCI, Marina *et al.* Sustainable reuse of oil and gas wells for geothermal energy production: Numerical analysis of deep closed loop solutions in Italy. **Energy Conversion and Management: X**, v. 24, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100743>.

FAGUNDES, F. M. **Estudo da estabilidade da suspensão constituinte do fluido Br-Mul / Petrobras.** Dissertação (Mestrado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2015. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21233>.

FAGUNDES, F. M. **Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da técnica de atenuação de raios gama.** Tese (Doutorado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

FAGUNDES, F. M. *et al.* Gravitational solid-liquid separation of water-based drilling fluids weighted with hematite through the gamma-ray attenuation technique. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 180, p. 406–412, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.054>.

FAGUNDES, F. M. *et al.* Gravitational settling of calcium carbonate in different non-Newtonian carboxymethyl cellulose concentrations using the gamma-ray attenuation technique. **Chemical Engineering Science**, v. 232, p. 116367, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116367>.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas.** 4th. ed. Shanghai, China: LCT, 2009. v. 1

GARDNER, Robin P.; ELY, Ralph L. **Radioisotope measurement applications in engineering.** University of California: Reinhold, 1967.

GOÑI, Christian; CELI, Diana; CONCHA, Fernando. Determination of the volumetric solids fraction of saturated polydisperse ore tailing sediments. **Powder Technology**, v. 305, p. 528–537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.001>.

GOULA, Athanasia M. *et al.* The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment—A computational fluid dynamics study. **Water Research**, v. 42, n. 13, p. 3405–3414, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.05.002>.

HALLERMEIER, R. J. Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. **Sedimentology**, v. 28, n. 6, p. 859–865, 1981.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1981.tb01948.x>,

HAMACHER, R. P. **Um estudo da sedimentação utilizando o método da atenuação de raios gama**. Dissertação (Mestrado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1978.

HAZEN, Allen. On sedimentation. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 53, n. 2, p. 45–71, 1904. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0001655>.

HECKEL, R. W. An analysis of powder compaction phenomena. **Trans. Metall. Soc. AIME**, v. 221, p. 1001–1008, 1961.

HERZHAFT, Benjamin *et al.* Influence of temperature and clays/emulsion microstructure on oil-based mud low shear rate rheology. **SPE Journal**, v. 8, n. 3, p. 211–217, 2003.
<https://doi.org/10.2118/86197-PA>.

JOUDAH, R. A. Effect of temperature on floc formation process efficiency and subsequent removal in sedimentation process. **Journal of Engineering and Development**, v. 18, n. 4, p. 176–187, 2014. <https://www.iasj.net/iasj/download/76eea03b001c9426>

KELISHAMI, Shervin Bahramali Asadi; REZAEI, Mohammadali; MOHEBIAN, Reza. A new approach to estimate and delineate the geothermal gradient of Iran. **Geothermics**, v. 103, p. 102428, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102428>.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. **Transactions of the Faraday Society**, v. 48, p. 166–176, 1952. <https://doi.org/10.1039/tf9524800166>

LAU, Y. L. Temperature effect on settling velocity and deposition of cohesive sediments. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 1, p. 41–51, 1994.
<https://doi.org/10.1080/00221689409498788>.

LOÏC, Hilliou. **Breviário de reologia e reometria rotacional prática.** 2. ed. Porto, Portugal: Universidade do Minho, 2020. v. 1

MACENIĆ, M.; KUREVIJA, T.; MEDVED, I. Novel geothermal gradient map of the Croatian part of the Pannonian Basin System based on data interpretation from 154 deep exploration wells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, p. 110069, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110069>.

MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Hydrodynamic effects, non-colloidal particles. In: CHRISTOPHER, Bowman *et al.* (Orgs.). **Colloidal Suspension Rheology.** [S.l.]: Cambridge University Press, 2012.

MICHA P.; CORRADINI, G. The Arrhenius Equation Revisited. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 52, n. 9, p. 830–851, 2012.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2012.667460>.

MKPENIE, Victor N.; EBONG, Goddy; ABASIEKONG, Beauty. Studies on the effect of temperature on the sedimentation of insoluble metal carbonates. **J. Appl. Sci. Environ. Manage**, v. 11, n. 4, p. 67–69, 2007. <https://bioline.org.br/request?ja07097>

MOREIRA, Bruno. **Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas.** Tese (Doutorado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2014. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15073>

MOTTA, Allan Barbosa Geoffroy *et al.* Modeling the impact of the temperature profile on the sedimentation process for shear thinning suspensions in the annulus of oil well. **Powder Technology**, v. 441, p. 119842, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119842>.

O'BRIEN, Thomas B. A case against cementing casing - casing annuli. **IADC/SPE Drilling Conference**, 1996. <https://doi.org/10.2118/35106-MS>.

OLIVEIRA JUNIOR, H. Cálculo da tensão nos sólidos para o espessamento e filtração de carbonato de cálcio em suspensões de fluidos newtonianos e pseudoplásticos. Dissertação (Mestrado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

ROBINSON, Clark D. Some factors influencing sedimentation. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 18, n. 8, p. 869–871, 1926. <https://doi.org/10.1021/ie50200a036>.

ROGERS, K. B. Effect of temperature on sedimentation-rate. **The Lancet**, v. 248, n. 6424, p. 520–522, 1946. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(46\)91800-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(46)91800-4).

SAASEN, A. Hole cleaning during deviated drilling - The effects of pump rate and rheology. **All Days**, 1998. <https://doi.org/10.2118/50582-MS>.

SANTOS, Nara Brandão Costa *et al.* 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>.

SARMIENTO, G.; URLHERR, P. H. T. The effect of temperature on the sedimentation parameters of flocculated suspensions. **Powder Technology**, v. 22, n. 1, p. 139–142, 1979. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(79\)85017-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(79)85017-2).

SATO, Ana Carla Kawazoe; CUNHA, Rosiane Lopes da. Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jabuticaba. **Food Science and Technology**, v. 27, n. 4, p. 890–896, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000400033>.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria - Fundamentos teóricos e práticos**. Tradução: Cheila G. Mothé. 2. ed. [S.l.]: Artliber Ed., 2006. v. 1

SILVA, K. C. *et al.* The effect of previous sedimentation on the filtration and mudcake properties of Newtonian and non-Newtonian fluids. **Powder Technology**, v. 346, p. 9–16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.038>.

SONNERGAARD, J. M. A critical evaluation of the Heckel equation. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 193, n. 1, p. 63–71, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(99\)00319-1](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(99)00319-1).

STEINOUR, Harold H. Rate of sedimentation. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 36, n. 9, p. 840–847, 1944. <https://doi.org/10.1021/ie50417a018>.

STOKES, George Gabriel. On the theories of internal friction of the fluids in motion. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 8, p. 287–319, 1845.

SUKHOBOKA, Olha. Drilling fluid rheology under high pressure high temperature conditions and its impact on the rate of penetration. **Society of Petroleum Engineers - SPE Bergen One Day Seminar 2017**, 2017. <https://doi.org/10.2118/185916-MS>.

SVAROVSKY, L. 5 - Gravity clarification and thickening. In: SVAROVSKY, Ladislav (Org.). **Solid-Liquid Separation (Fourth Edition)**. Fourth Edition ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 166–190. <https://doi.org/10.1016/B978-075064568-3/50030-4>.

TANG, Xiaoyu *et al.* Intensification of solid–liquid separation by thermal sedimentation in pressure oxidative leaching process of chromite. **Minerals Engineering**, v. 164, p. 106825, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106825>.

TORSVIK, A.; MYRSETH, V.; LINGA, H. Drilling fluid rheology at challenging drilling conditions an experimental study using a 1000 bar pressure cell. **Annual transactions of the nordic rheology society**, v. 23, 2015.

VIVAS, Cesar; SALEHI, Saeed. Rheological investigation of effect of high temperature on geothermal drilling fluids additives and lost circulation materials. **Geothermics**, v. 96, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102219>.

WANG, Jinsheng; QI, Haiying; YOU, Changfu. Experimental study of sedimentation characteristics of spheroidal particles. **Particuology**, v. 7, n. 4, p. 264–268, 1 ago. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.03.008>.

WERNER, Benjamin; MYRSETH, Velaug; SAASEN, Arild. Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 156, p. 845–851, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.063>.

WU, Jiang. Chapter Two - Casing string and design. In: LIU, Gefei (Org.). **Applied Well Cementing Engineering**. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2021. p. 17–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821956-0.00007-9>.

XU, Zhen *et al.* Kinetic determination of sedimentation for GMZ bentonite colloids in aqueous solution: Effect of pH, temperature and electrolyte concentration. **Applied Clay Science**, v. 184, p. 105393, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105393>.

ZHIYAO, Song *et al.* A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles. **Water Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 37–43, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1674-2370\(15\)30017-X](https://doi.org/10.1016/S1674-2370(15)30017-X).

APÊNDICE A

No apêndice A são apresentados dados e imagens referentes aos testes efetuados com a câmera térmica como o objetivo de definir a melhor configuração de uso para o equipamento.

Foi testado dois modos de uso de escala de temperatura da câmera térmica sendo:

1 – modo automático, que varia a escala de temperatura automaticamente baseado nas temperaturas médias encontradas no momento exato da captura da imagem térmica do ambiente (manual FLIR E8).

2 - modo manual, onde o usuário define o limite superior e inferior de temperatura em um valor fixo (manual FLIR E8).

Avaliou-se também qual a melhor distância que a câmera deve se afastar do objeto a ser estudado termicamente no momento do registro da imagem térmica.

O procedimento adotado foi o registro de imagens térmicas de um bêquer com capacidade de 2 litros preenchido com água destilada e aquecido até a ebulação da água. O aquecimento e a ebulação da água foram mantidos durante todo o teste a fim de manter a temperatura no interior do bêquer estável uma vez que toda substância pura em ebulação tende a manter sua temperatura constante.

No interior do bêquer foi colocado um termômetro de mercúrio com escala de 0 °C a 120 °C e graduação de 1 °C para comparação da temperatura lida no termômetro e a temperatura informada pela imagem térmica.

As Figuras A.1 a A.3 mostram imagens térmicas efetuadas no modo automático e manual de escala de temperatura a diferentes distâncias do bêquer.

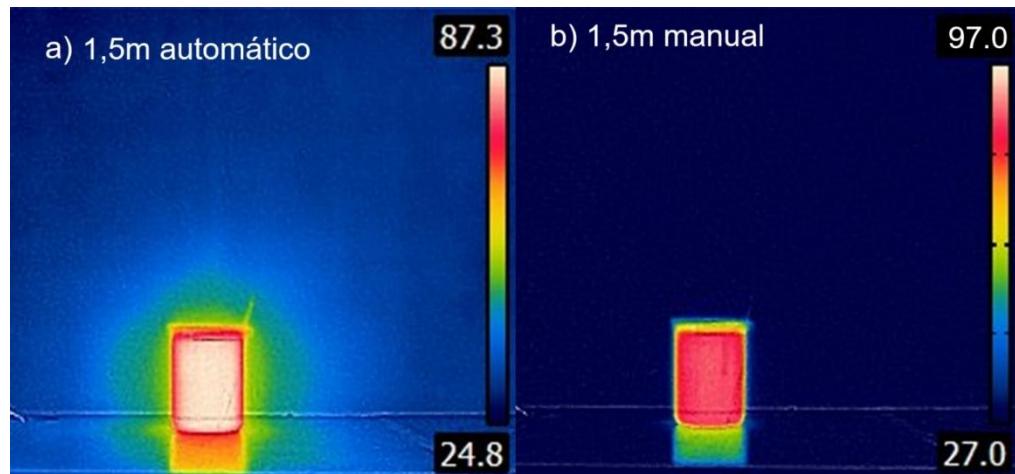


Figura A.1 – Imagem a 1,5 m de distância do bêquer, a) modo automático, b) modo manual.

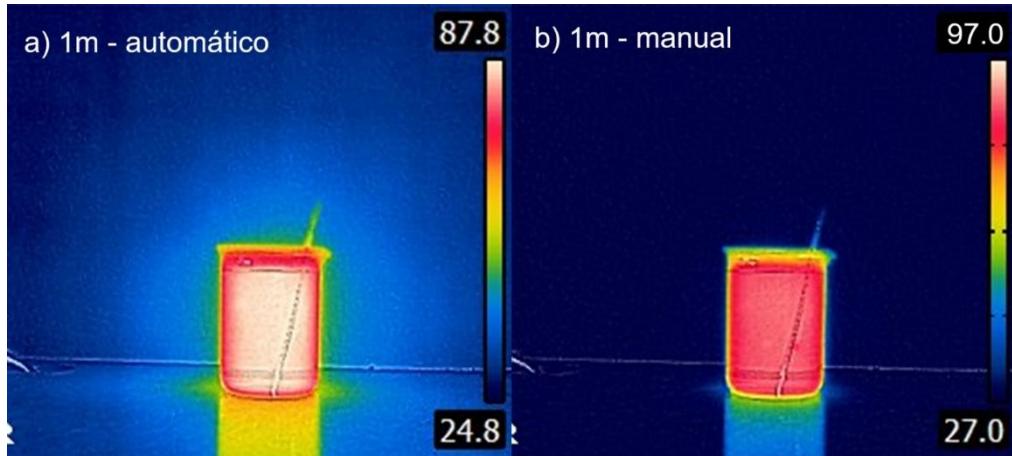


Figura A.2 – Imagem a 1 m de distância do béquer, a) modo automático, b) modo manual.

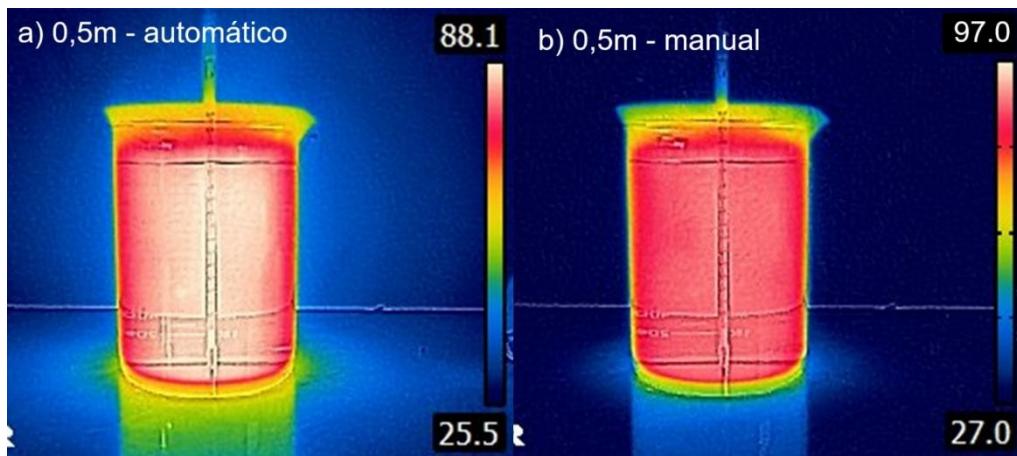


Figura A.3 – Imagem a 0,5 m de distância do béquer, a) modo automático, b) modo manual.

Observou-se que, no modo automático, a escala de temperatura das imagens térmicas sofre variações ao longo do tempo. Essa oscilação dificulta a visualização da evolução do gradiente térmico, uma vez que as mudanças nas cores da imagem podem não refletir exclusivamente o aumento real da temperatura, mas sim alterações na própria escala de mapeamento.

Dessa forma, torna-se mais difícil distinguir se a variação de cor foi causada por uma elevação na temperatura do meio ou por uma redefinição automática da escala térmica, portanto foi utilizado o modo de manual para escala de temperatura nos testes com gradiente térmico.

Em relação à distância de aquisição, observou-se que, quanto maior a distância entre a câmera térmica e o objeto, menor é o nível de detalhamento da imagem, especialmente nas regiões de fronteira do sistema em aquecimento. Assim, adotou-se como padrão a menor distância possível de posicionamento da câmera, de modo a evitar cortes na imagem causados por aproximação excessiva. Considerando as dimensões utilizadas nos testes, as distâncias entre

0,4 m e 0,5 m foram estabelecidas como ideais, resultando em imagens térmicas com bom nível de detalhamento.

O termômetro posicionado no interior do bêquer registrou uma temperatura de 96,5 °C. Considerando a última imagem capturada a uma distância de 0,5 m (Figura A.3), com a escala de temperatura configurada manualmente entre 27 °C e 97 °C, observa-se no interior do bêquer uma coloração predominantemente avermelhada, com a presença de diversos pixels brancos misturados ao vermelho. Essa coloração, de acordo com a escala utilizada, indica uma temperatura entre 93 °C e 95 °C. Dessa forma, a leitura da câmera térmica apresentou um desvio de aproximadamente 1,5 °C a 3,5 °C em relação ao valor do termômetro de mercúrio, correspondendo a um erro médio de 2,6%.

Considerando que os testes isotérmicos e com gradiente térmico foram conduzidos nas temperaturas de 25 °C e 70 °C, ou seja, com uma faixa de variação de 45 °C, desvios da ordem de 2,6% não representam erros significativos para a análise dos resultados. Ressalta-se, ainda, que os valores absolutos de temperatura não foram utilizados nos cálculos apresentados neste trabalho, sendo considerados apenas como variáveis que influenciam outros parâmetros, como a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos.