



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



Sedimentação de suspensões aquosas de carbonato de cálcio em condições não isotérmicas:
uma investigação experimental por atenuação de raios gama

GUSTAVO MARTINS DE ALMEIDA

UBERLÂNDIA - MG

2026

GUSTAVO MARTINS DE ALMEIDA

Sedimentação de suspensões aquosas de carbonato de cálcio em condições não isotérmicas:
uma investigação experimental por atenuação de raios gama

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Área de concentração: Sedimentação.

Orientador: Dr. Fábio de Oliveira Arouca.

Coorientadora: Dra. Flávia Marques Fagundes

UBERLÂNDIA - MG

2026

Dedico este trabalho aos meus pais e família, pelo estímulo, carinho e compreensão, minha namorada e futura esposa, quem sempre me apoiou e aos excelentes professores a quem devo toda a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade concedida, pelo suporte constante ao longo deste trabalho e, sobretudo, pela amizade construída durante essa trajetória. Seu incentivo, confiança e orientação foram determinantes não apenas para o desenvolvimento desta pesquisa, mas também para minha formação acadêmica e profissional.

Ao Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno, agradeço pelas valiosas conversas que transcendem o ambiente acadêmico e ampliam horizontes intelectuais e pessoais. Aos dois professores, registro minha admiração pelo exemplo de profissionalismo, ética e dedicação à Engenharia Química, referências que levo comigo e que norteiam o profissional que almejo me tornar.

À Universidade Federal de Uberlândia, agradeço pela formação sólida proporcionada ao longo da graduação e pela infraestrutura que viabilizou a realização desta pesquisa. Estendo meu reconhecimento aos demais professores da Faculdade de Engenharia Química, cujos ensinamentos contribuíram de maneira decisiva para minha formação técnica e científica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Petrobras, agradeço pelo apoio financeiro por meio das bolsas concedidas, fundamentais para a continuidade das atividades de pesquisa e para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório, agradeço pelo convívio diário e pela colaboração ao longo dos experimentos. Em especial, à Dra. Flávia Marques Fagundes e ao Thiago Royer Leão, pelo suporte técnico durante a execução experimental e na elaboração deste trabalho, bem como pela amizade e parceria construídas ao longo do percurso.

Aos meus pais, agradeço pelo amor incondicional, pelo suporte constante e, principalmente, pela oportunidade de cursar Engenharia Química. Sua dedicação e confiança tornaram possível cada etapa desta jornada. Estendo minha gratidão às minhas tias e à minha avó, pelo apoio, incentivo e presença ao longo dessa caminhada.

À minha namorada e futura esposa, Gilcimary Vitória Dias da Silva, expresso meu mais sincero agradecimento. Desde o início da graduação estive ao meu lado, compartilhando desafios, conquistas e aprendizados. Seu apoio, compreensão e incentivo foram fundamentais em todas as etapas desta trajetória acadêmica.

RESUMO

Este trabalho investigou o comportamento da sedimentação de partículas sólidas sob condição de aquecimento lateral, com ênfase na interação entre transporte de massa particulada e mecanismos de transferência de calor. O sistema experimental foi constituído por suspensão aquosa de carbonato de cálcio, sendo empregado óxido de sílica tingido como traçador previamente validado quanto à compatibilidade de densidade e distribuição granulométrica. A caracterização física dos materiais foi realizada por picnometria e difração a laser. A estrutura final do leito sedimentado foi determinada por meio da técnica de atenuação de raios gama, permitindo a obtenção de perfis verticais de concentração volumétrica local de sólidos. A análise térmica evidenciou a formação de gradiente lateral significativo nas proximidades dos reservatórios de óleo, estabelecendo condição não isotérmica ao longo da largura da célula experimental. Os perfis de concentração volumétrica indicaram leito consolidado com valores entre 0,52 e 0,55 na região inferior, associado a deslocamento sistemático da interface sólido-líquido nas regiões laterais. A hipótese de compactação diferenciada foi descartada, uma vez que não se verificaram variações significativas no grau de empacotamento ao longo da largura da célula. A análise visual com traçador revelou orientação inclinada das estruturas sedimentadas próximas às paredes, consistente com redistribuição transversal de partículas induzida por circulação natural decorrente do gradiente térmico. Conclui-se que a sedimentação sob aquecimento lateral apresenta comportamento multidimensional resultante do acoplamento entre transporte de massa e transferência de calor, não podendo ser adequadamente descrita por modelo isotérmico unidimensional.

Palavras-chave: sedimentação; Técnica De Atenuação De Raios Gama; concentração volumétrica de sólidos; gradiente térmico lateral; convecção natural; fenômenos de transporte.

ABSTRACT

This study investigated the sedimentation behavior of solid particles under lateral heating conditions, with emphasis on the coupling between particulate mass transport and heat transfer mechanisms. The experimental system consisted of an aqueous calcium carbonate suspension, and dyed silica oxide was employed as a tracer previously validated in terms of density and particle size distribution compatibility. Physical characterization was performed through pycnometry and laser diffraction analysis. The final structure of the sedimented bed was determined using the gamma-ray attenuation technique, enabling the determination of vertical profiles of local solid volume fraction. Thermal measurements revealed the development of a significant lateral temperature gradient near the oil reservoirs, establishing a non-isothermal condition along the width of the experimental cell. The solid volume fraction profiles indicated a consolidated bed with values ranging from approximately 0.52 to 0.55 in the lower region, accompanied by a systematic lateral displacement of the solid–liquid interface near the walls. The hypothesis of differential compaction was ruled out, as no significant variations in packing degree were observed across the cell width. Visual analysis using the tracer revealed inclined sedimented structures near the walls, consistent with transverse particle redistribution induced by natural convection arising from the imposed thermal gradient. The results demonstrate that sedimentation under lateral heating exhibits multi-dimensional behavior governed by the coupling between mass transport and heat transfer, and therefore cannot be adequately described by a simplified one-dimensional isothermal model.

Keywords: sedimentation; Gamma-Ray Attenuation Technique; solid concentration fraction; lateral thermal gradient; natural convection; transport phenomena.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Fluxograma da estrutura geral do trabalho	4
Figura 2.1 - Esquema do processo de sedimentação.	7
Figura 2.2 - Esquema de sedimentação ao longo do tempo.	8
Figura 2.3 - Esquema conceitual da técnica de atenuação de raios gama aplicada ao estudo da sedimentação em uma coluna sólido-líquido.....	12
Figura 2.4 - Representação esquemática da sedimentação em sistemas isotérmicos e sob gradientes térmicos.	15
Figura 3.1 - Moinho de bolas de escala laboratorial.	19
Figura 3.2 – Malvern Mastersizer 2000/Hydro 2000MU	20
Figura 3.3 - Agitador mecânico digital RDW20.	23
Figura 3.4 - Célula de sedimentação com aquecimento lateral. Fonte: o Autor.....	24
Figura 3.5 - Sistema de emissão de radiação gama e detecção.	26
Figura 3.6 - Câmera térmica E8 – FLIR.	27
Figura 3.7 - Esquema ilustrativo do ensaio com aquecimento bilateral, com os pontos de medida de concentração de sólidos descritos.	30
Figura 4.1 - Análise granulométrica do CaCO_3	38
Figura 4.2 - Análise granulométrica do Óxido de Sílica Tingido	39
Figura 4.3 - Comparação lado a lado da sedimentação em proveta.	41
Figura 4.4 - Evolução da altura do leito sedimentado em função do tempo.	42
Figura 4.5 - Imagem normal e termográfica no instante inicial	44
Figura 4.6 - Sequência temporal representativa de imagens normais e termográficas.....	45
Figura 4.7 - Imagem destacando a diferença lateral de altura do leito	48
Figura 4.8 - Perfis verticais de concentração volumétrica de sólidos	50
Figura 4.9 - (a) Imagem original do leito com traçador; (b) Imagem tratada com realce de contraste e indicação das linhas de tendência)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de picnometria.	37
Tabela 4.2 - Concentração volumétrica de sólidos em diferentes posições transversais e alturas	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

D[3,2]	Diâmetro médio de Sauter;
D[4,3]	Diâmetro médio volumétrico;
TARG	Técnica de Atenuação de Raios Gama;
d(0,1)	Diâmetro abaixo do qual 10% do volume de partículas está distribuído;
d(0,5)	Diâmetro mediano (50% do volume acumulado);
d(0,9)	Diâmetro abaixo do qual 90% do volume de partículas está distribuído.

LISTA DE SÍMBOLOS

v_s	Velocidade terminal de sedimentação da partícula;	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_s	Densidade da partícula sólida;	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_f	Densidade do fluido;	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
g	Aceleração da gravidade;	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
d_p	Diâmetro equivalente da partícula;	m
μ	Viscosidade dinâmica do fluido contínuo;	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
I	Intensidade da radiação gama transmitida após atravessar o meio;	s^{-1}
I_0	Intensidade inicial do feixe incidente;	s^{-1}
γ	Coeficiente de atenuação linear do meio;	m^{-1}
x	Espessura do material atravessado;	m
ε_s	Concentração volumétrica de sólidos;	Adimensional
γ_s	Coeficiente de atenuação linear da fase sólida;	m^{-1}
γ_f	Coeficiente de atenuação linear da fase fluida;	m^{-1}
N	Número de contagens;	Adimensional
Δt	Tempo de aquisição;	s
τ'	Tempo de resolução do sistema;	s
R	Intensidade de radiação corrigida pelo tempo de resolução do sistema;	s^{-1}
R_0	Intensidade de radiação corrigida pelo tempo de resolução do sistema com concentração volumétrica de sólidos igual a zero;	s^{-1}
β	Constante linear da equação;	Adimensional
R_{ref}	Intensidade de radiação corrigida pelo tempo de resolução do sistema com concentração volumétrica de sólidos conhecida.	s^{-1}

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos gerais.....	3
1.1.2	Objetivos Específicos	4
1.1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Sedimentação.....	5
2.1.1	Fundamentos físicos da sedimentação	5
2.1.2	Sedimentação em suspensões concentradas.....	6
2.2	Técnica de Atenuação de Raios Gama	9
2.2.1	Princípios físicos da TARG.....	9
2.2.2	Aplicação da TARG no estudo da sedimentação	10
2.3	Influência da Temperatura na Sedimentação	12
2.3.1	Efeitos da temperatura nas propriedades do fluido	12
2.3.2	Influência da temperatura na cinética de sedimentação	13
2.3.3	Sedimentação sob gradientes térmicos.....	14
2.4	Uso de traçadores e visualização do processo de sedimentação	15
2.4.1	Emprego de partículas traçadoras em estudos experimentais	15
2.4.2	Aplicação de traçadores sólidos na análise visual da sedimentação	15
2.4.3	Integração entre TARG, visualização óptica e análise térmica.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1	Materiais e caracterização física.....	18
3.1.1	Materiais particulados: sólido principal e traçador	18
3.1.2	Ensaio preliminares de sedimentação em provetas.....	20
3.1.3	Fluido.....	21
3.2	Preparo das suspensões	22

3.2.1	Concentração volumétrica e composição da suspensão	22
3.2.2	Procedimento de homogeneização	23
3.3	Aparato experimental	24
3.3.1	Célula de sedimentação com aquecimento lateral.....	24
3.3.2	Sistema de atenuação de raios gama (TARG).....	25
3.3.3	Sistema de visualização e análise térmica	26
3.4	Procedimento experimental.....	28
3.4.1	Ensaio de sedimentação sob aquecimento bilateral	28
3.4.2	Aquisição dos dados experimentais	29
3.5	Calibração da técnica de atenuação de raios gama.....	30
3.6	Uso de partículas traçadoras e visualização do processo	32
3.7	Tratamento e análise dos dados.....	33
3.7.1	Processamento dos dados de TARG	34
3.7.2	Construção e análise dos perfis de concentração	34
3.7.3	Declaração de uso de Inteligência Artificial	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Caracterização inicial do sistema	36
4.1.1	Propriedades físicas dos materiais.....	37
4.1.2	Ensaio preliminar de sedimentação em proveta	40
4.2	Evolução térmica do sistema durante a sedimentação	43
4.2.1	Distribuição espacial da temperatura	43
4.2.2	Estratificação térmica associada à formação do leito.....	44
4.2.3	Não uniformidade espacial do leito sedimentado.....	48
4.3	Análise da distribuição de concentração volumétrica de sólidos	49
4.3.1	Perfis verticais e posição da interface sólido-líquido.....	50
4.3.2	Análise quantitativa da compactação	51
4.3.3	Redistribuição transversal e implicações físicas	52

4.3.4	Evidência visual da orientação preferencial do traçador.....	53
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

A sedimentação constitui uma operação unitária fundamental nos processos de separação sólido-líquido, apresentando aplicações consolidadas em diversos setores da Engenharia Química e da indústria em geral. Desde a formulação da Lei de Stokes, no século XIX, o estudo do movimento de partículas em suspensão tem desempenhado papel central na compreensão da eficiência de operações industriais como a clarificação de efluentes, o tratamento de minérios e a formulação de fluidos complexos, sendo amplamente abordado em obras clássicas da Engenharia Química (COULSON; RICHARDSON, 2019). Embora os modelos clássicos tenham sido desenvolvidos considerando condições ideais, como escoamento laminar, partículas esféricas e fluidos newtonianos, a realidade industrial impõe desafios adicionais, uma vez que a sedimentação ocorre, em geral, em sistemas multifásicos, frequentemente não newtonianos, e submetidos a variações significativas de temperatura e pressão.

No contexto da perfuração de poços de petróleo, esse fenômeno assume relevância ainda mais crítica. Os fluidos de perfuração, também denominados lamas de perfuração, são projetados para desempenhar múltiplas funções simultâneas, incluindo a lubrificação e o resfriamento da broca, o transporte de cascalhos até a superfície, o controle da pressão de formação e a manutenção da estabilidade do poço. Para que essas funções sejam adequadamente cumpridas, tais fluidos apresentam comportamento reológico característico, geralmente pseudoplástico, e devem manter seus constituintes sólidos em suspensão mesmo sob condições operacionais adversas. No entanto, durante paradas de circulação, observa-se a tendência de deposição desses sólidos, o que pode comprometer a integridade da operação, resultando em obstruções, aprisionamento da coluna de perfuração ou elevação indesejada da pressão no anular (BRADFORD et al., 2002).

Entre os fatores que governam esse processo, destaca-se a influência da temperatura. Em poços profundos, devido à presença do gradiente geotérmico, ocorre um aumento contínuo da temperatura ao longo da profundidade, podendo variar entre 20 e 40°C/km (MACENÍĆ et al., 2020). Esse aquecimento promove alterações significativas nas propriedades físicas e reológicas dos fluidos de perfuração, especialmente pela redução da viscosidade aparente, o que tende a acelerar a sedimentação das partículas suspensas. Estudos experimentais têm demonstrado que a temperatura exerce influência expressiva sobre a cinética de sedimentação,

tanto em sistemas aquosos simples quanto em fluidos complexos, afetando não apenas a velocidade de deposição, mas também a estrutura do leito sedimentado formado, incluindo seu grau de compactação e a distribuição espacial dos sólidos (MKPENIE et al., 2007; GOULA et al., 2008; XU et al., 2020).

Apesar dos avanços reportados na literatura, grande parte das investigações ainda se concentra em sistemas isotérmicos, nos quais a suspensão é mantida a uma temperatura uniforme e constante ao longo de todo o experimento. Embora essa abordagem facilite a análise e permita a aplicação de modelos clássicos, ela não representa fielmente as condições operacionais presentes em processos industriais reais, nos quais predominam gradientes térmicos horizontais e verticais. Esses gradientes introduzem variações locais de viscosidade, assimetrias no escoamento e não uniformidades no processo de deposição, resultando frequentemente na formação de leitos sedimentados heterogêneos. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de estudos que incorporem explicitamente a variação espacial da temperatura para uma compreensão mais abrangente do fenômeno.

Entre as ferramentas experimentais disponíveis para a investigação da sedimentação, a técnica de atenuação de raios gama, TARG, destaca-se por sua capacidade de fornecer perfis locais de concentração de sólidos ao longo do tempo de forma não destrutiva, sem interferência física no sistema analisado. Trata-se de uma técnica consolidada e amplamente empregada em estudos de sistemas particulados, especialmente em processos de separação sólido-líquido.

No contexto nacional, a aplicação da TARG em estudos de sedimentação foi inicialmente desenvolvida por Damasceno, Souza e Massarani (1990) e posteriormente aprofundada por Damasceno (1992), em seu doutorado na COPPE/UFRJ. A partir dessa base, a técnica foi adaptada, aperfeiçoada e aplicada de forma sistemática por diversos pesquisadores, especialmente na Universidade Federal de Uberlândia, abrangendo investigações sobre perfis de concentração, curvas iso-concentração e modelagem matemática da sedimentação em batelada (RUIZ et al., 2000; AROUCA; LOPES; DAMASCENO, 2005; AROUCA, 2007; MOREIRA, 2014).

Nas últimas décadas, a TARG têm sido empregada na caracterização de suspensões concentradas, fluidos de perfuração base aquosa e sintética, sistemas ponderados com hematita e carbonato de cálcio, além de formulações poliméricas não newtonianas. Destacam-se, nesse contexto, os trabalhos de Fagundes et al. (2019), Santos et al. (2020), Marques Fagundes et al. (2021), Fagundes et al. (2022) e Schimicoski et al. (2025), que aplicaram a técnica para avaliação da cinética de sedimentação, análise da influência da reologia do fluido, estudo de partículas de baixa densidade e investigação de perfis de concentração em reservatórios

direcionais. Estudos complementares também avaliaram o efeito da granulometria e de misturas particuladas na estrutura do sedimento formado (FAGUNDES et al., 2019).

Adicionalmente, observa-se na literatura uma lacuna relacionada à integração entre análises quantitativas da sedimentação e a observação visual e térmica do processo. O emprego de câmeras térmicas, associado ao registro fotográfico e ao monitoramento por meio da TARG, permite uma abordagem mais abrangente, possibilitando correlacionar a distribuição espacial da temperatura com a dinâmica de formação e acomodação do leito sedimentado. Nesse contexto, a utilização do carbonato de cálcio como material modelo apresenta vantagens relevantes, uma vez que se trata de um sólido de baixo custo, amplamente disponível comercialmente e largamente empregado na indústria de perfuração como agente de obstrução e selamento dos poros da formação rochosa, além de contribuir para o controle das propriedades do fluido.

1.1 OBJETIVOS

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo central avaliar a influência da temperatura na sedimentação de suspensões aquosas de carbonato de cálcio, empregando a técnica de atenuação de raios gama em conjunto com análises visuais e térmicas do processo. Busca-se, assim, contribuir para o melhor entendimento dos mecanismos de sedimentação sob condições isotérmicas e na presença de gradientes térmicos, fornecendo subsídios relevantes para a modelagem e o controle de sistemas nos quais a variação de temperatura desempenha papel determinante, como ocorre na indústria do petróleo.

Para atingir esse objetivo, o estudo compreende a caracterização físico-química da solução preparada, a realização de ensaios de sedimentação, o monitoramento do processo por meio de câmeras térmicas e registros fotográficos, bem como a determinação dos perfis de concentração de sólidos utilizando a TARG. A análise dos resultados permitirá discutir a influência de gradiente de temperatura sobre a velocidade de sedimentação, a estrutura e o grau de compactação do leito formado, estabelecendo relações entre os parâmetros operacionais e as propriedades finais do sistema.

1.1.1 Objetivos gerais

Avaliar experimentalmente a influência da temperatura e de gradientes térmicos no processo de sedimentação de partículas sólidas, na estrutura do leito sedimentado e no

deslocamento espacial das partículas, por meio da técnica de atenuação de raios gama e do uso de um traçador sólido visual, em sistemas particulados.

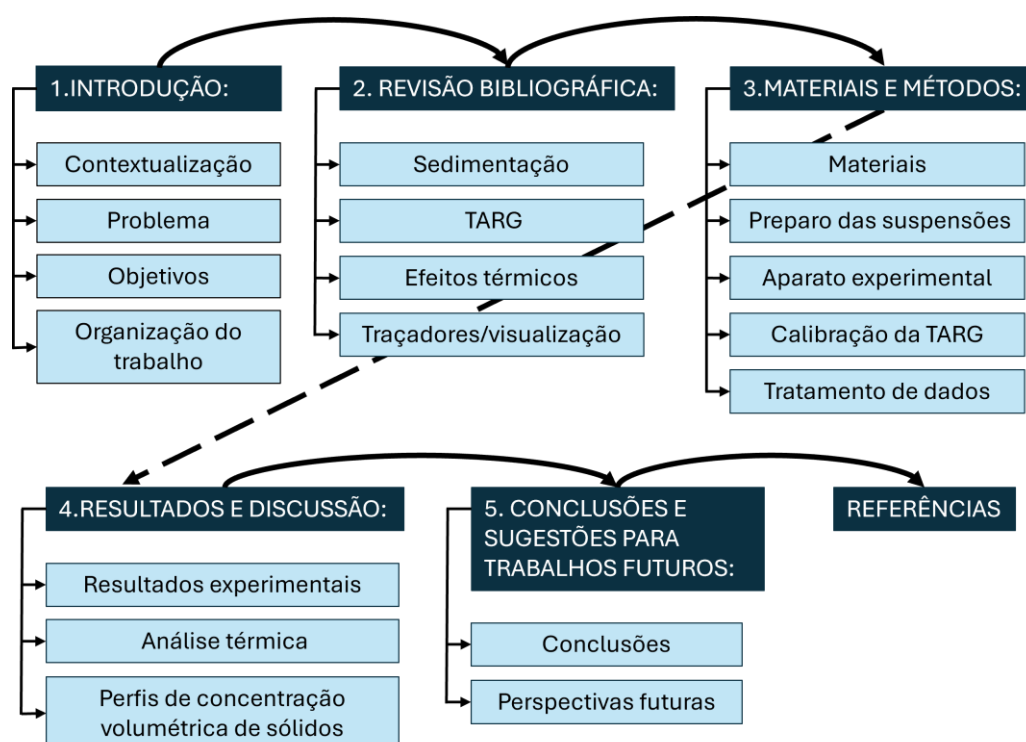
1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- i. Analisar a cinética da sedimentação de suspensões sólidas sob diferentes condições de temperatura em regime isotérmico;
- ii. Avaliar a influência da temperatura na formação, compactação e expansão do leito sedimentado, por meio da determinação dos perfis de concentração volumétrica de sólidos pela técnica de atenuação de raios gama;
- iii. Avaliar a influência dos gradientes térmicos no deslocamento espacial das partículas durante a sedimentação, por meio do acompanhamento visual do traçador sólido;
- iv. Interpretar as observações visuais do trajeto das partículas sob a luz dos perfis de concentração obtidos experimentalmente, visando uma interpretação física integrada do processo.

1.1.3 Estrutura do Trabalho

Figura 1.1 - Fluxograma da estrutura geral do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos fenômenos e das técnicas experimentais abordadas neste trabalho. Inicialmente, são discutidos os fundamentos físicos da sedimentação, com ênfase nos mecanismos que regem o movimento e a deposição de partículas sólidas em suspensões líquido-sólido. Em seguida, são apresentados os princípios da técnica de atenuação de raios gama aplicada ao estudo da sedimentação, bem como sua utilização na determinação de perfis de concentração de sólidos. Por fim, são discutidos os efeitos da temperatura sobre o processo de sedimentação e a importância da integração entre métodos quantitativos e técnicas de visualização na análise de sistemas não isotérmicos.

2.1 SEDIMENTAÇÃO

2.1.1 Fundamentos físicos da sedimentação

A sedimentação é um fenômeno físico associado ao movimento de partículas sólidas dispersas em um fluido sob a ação de um campo externo, usualmente o campo gravitacional. Em sistemas sólido-líquido, esse processo ocorre quando a densidade da fase sólida é superior à densidade do fluido contínuo, resultando no deslocamento descendente das partículas até a formação de um leito sedimentado. Trata-se de um mecanismo amplamente explorado em operações de separação e discutido de forma clássica na literatura de Engenharia Química, sendo fundamental para a compreensão do comportamento de suspensões em diferentes contextos industriais e laboratoriais (COULSON; RICHARDSON, 2019).

Do ponto de vista físico, o movimento de uma partícula em suspensão é governado pelo balanço entre as forças que atuam sobre ela, destacando-se o peso da partícula, o empuxo exercido pelo fluido e a força de arrasto, associada à resistência imposta pelo meio ao deslocamento relativo entre a partícula e o fluido. Considerando uma partícula rígida, esférica, isolada, em regime de escoamento laminar e imersa em um fluido newtoniano de viscosidade constante, a condição de equilíbrio dinâmico é atingida quando a soma dessas forças resulta em aceleração nula, estabelecendo-se uma velocidade terminal constante (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2007).

Nessas condições idealizadas, a força de arrasto pode ser descrita pela expressão proposta por Stokes, válida para números de Reynolds suficientemente baixos. A partir do balanço de forças, obtém-se a velocidade terminal de sedimentação, conhecida como velocidade de Stokes, expressa por:

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho_f) g d_p^2}{18 \mu} \quad (1)$$

em que v_s é a velocidade terminal de sedimentação da partícula, ρ_s é a densidade da partícula sólida, ρ_f é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, d_p é o diâmetro equivalente da partícula e μ é a viscosidade dinâmica do fluido contínuo (STOKES, 1851; COULSON; RICHARDSON, 2019).

Apesar de sua ampla utilização como referência teórica, a aplicação direta da equação de Stokes é restrita a sistemas diluídos e idealizados. Em suspensões reais, as partículas raramente se encontram isoladas, de modo que a presença de outras partículas na vizinhança altera o campo de escoamento local e modifica a força de arrasto atuante. Além disso, desvios da forma esférica, distribuições de tamanho de partículas e variações nas propriedades do fluido contribuem para o afastamento das hipóteses simplificadoras assumidas no modelo clássico. Por essa razão, a sedimentação em sistemas práticos deve ser analisada considerando regimes mais complexos, nos quais as interações entre partículas desempenham papel determinante (RICHARDSON; ZAKI, 1954; GUAZZELLI; HINCH, 2011).

A literatura distingue, de forma geral, dois regimes principais de sedimentação. A sedimentação livre ocorre em suspensões suficientemente diluídas, nas quais as partículas se movimentam de maneira praticamente independente, com velocidades próximas às aquelas previstas pela Lei de Stokes. Em contraste, a sedimentação dificultada é característica de suspensões concentradas, nas quais a proximidade entre partículas gera interações hidrodinâmicas significativas, resultando em uma redução da velocidade de sedimentação em relação ao regime livre (RICHARDSON; ZAKI, 1954).

2.1.2 Sedimentação em suspensões concentradas

Em suspensões concentradas, o aumento da concentração volumétrica de sólidos intensifica as interações partícula-partícula e altera substancialmente a dinâmica do processo de sedimentação. Nessas condições, o fluido deslocado pelo movimento descendente das partículas encontra maior dificuldade para escoar no sentido oposto, o que aumenta a resistência hidrodinâmica global do sistema. Como consequência, observa-se uma redução progressiva da

velocidade de sedimentação à medida que a concentração de sólidos aumenta, além do surgimento de gradientes de concentração ao longo da altura da coluna de sedimentação (COULSON; RICHARDSON, 2019; GUAZZELLI; HINCH, 2011).

A evolução temporal do processo em suspensões concentradas conduz à formação de um leito sedimentado na região inferior do sistema. Esse leito, em geral, não apresenta estrutura homogênea, sendo caracterizado por variações espaciais de porosidade e concentração de sólidos. A estrutura do leito sedimentado depende da concentração inicial da suspensão, das propriedades físicas das partículas e das condições hidrodinâmicas durante a deposição. Ao longo do tempo, ocorre uma reorganização progressiva das partículas, com redução da porosidade local e aumento da compactação, até que se atinja uma configuração mais estável (DAMASCENO, 1992; AROUCA, 2007).

Durante o processo de sedimentação, observa-se a formação de regiões bem definidas ao longo da altura do sistema, cuja configuração e extensão variam com o tempo. Inicialmente, a suspensão pode ser considerada aproximadamente homogênea, com distribuição uniforme de partículas. Com o avanço do tempo, estabelece-se na região superior do sistema a denominada zona clarificada, caracterizada por uma concentração de sólidos muito baixa, próxima de zero. A espessura dessa região aumenta progressivamente à medida que as partículas sedimentam, sendo delimitada por uma interface relativamente bem definida nos estágios iniciais do processo. A evolução dessas regiões ao longo do tempo pode ser representada de forma esquemática, conforme ilustrado na Figura 2.1, que apresenta as principais zonas formadas durante o processo de sedimentação em sistemas sólido-líquido.

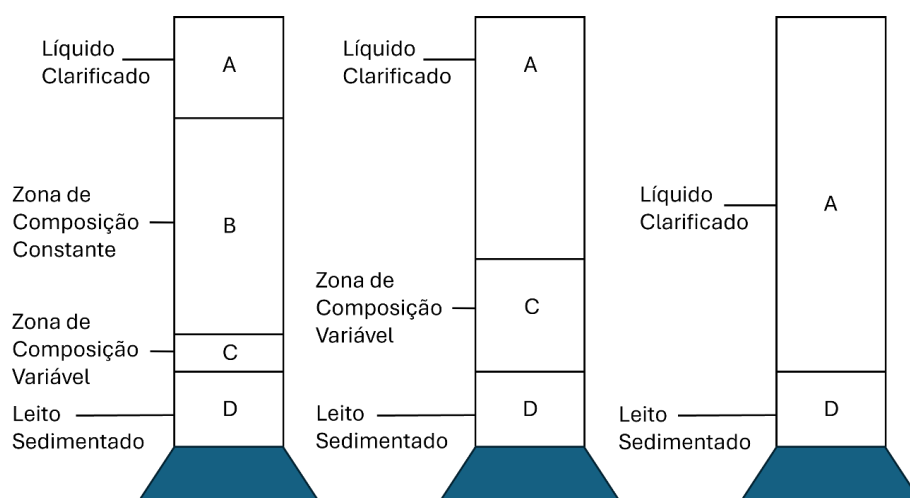


Figura 2.1 - Esquema do processo de sedimentação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Abaixo da zona clarificada encontra-se a zona de sedimentação, também referida como zona de suspensão, na qual as partículas ainda estão em movimento descendente e a concentração de sólidos permanece aproximadamente constante e próxima à concentração inicial da suspensão. Na região inferior do sistema forma-se o leito sedimentado, caracterizado por elevada concentração de sólidos e por uma estrutura porosa resultante do empacotamento das partículas. Entre essas regiões existe uma zona de transição, na qual ocorre um gradiente contínuo de concentração de sólidos, refletindo a complexidade do processo de deposição em suspensões concentradas (KYNCH, 1952; COULSON; RICHARDSON, 2019).

A evolução temporal dessas regiões ocorre por meio do deslocamento progressivo das interfaces que as delimitam. A interface superior, que separa a zona clarificada da zona de sedimentação, desloca-se para baixo ao longo do tempo, enquanto a interface inferior, associada ao crescimento do leito sedimentado, desloca-se para cima à medida que ocorre a deposição e acomodação das partículas. Esse comportamento evidencia que a sedimentação é um processo dinâmico e não uniforme ao longo da altura da coluna (KYNCH, 1952). A evolução temporal do processo de sedimentação e o deslocamento das interfaces entre as diferentes regiões podem ser representados de forma esquemática, conforme ilustrado na Figura 2.2, que apresenta a variação da distribuição de partículas e o crescimento do leito sedimentado ao longo do tempo.

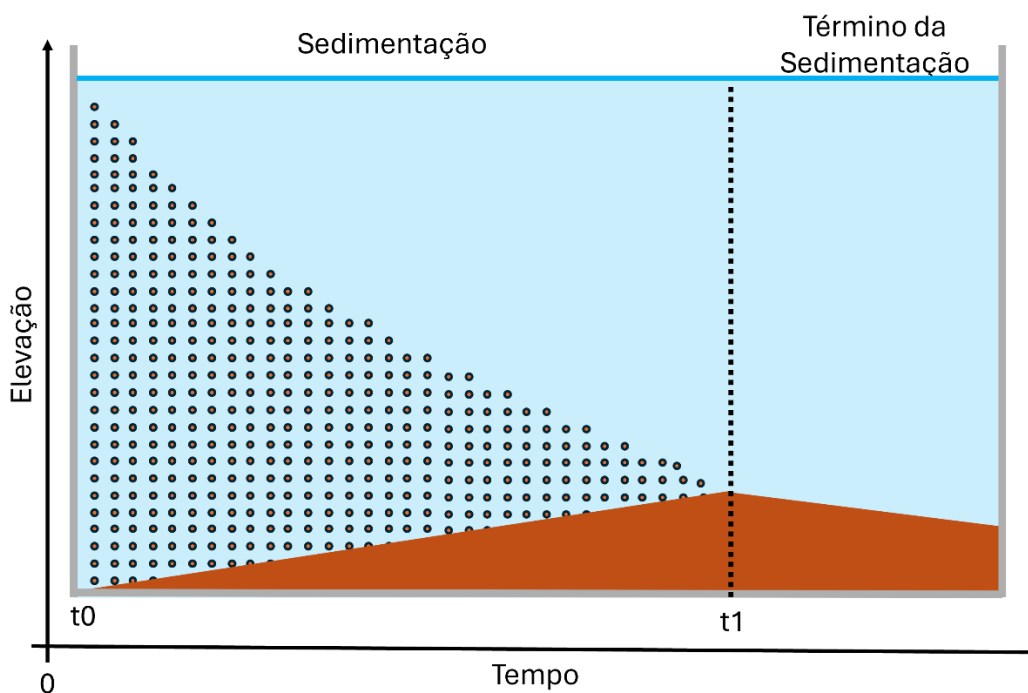


Figura 2.2 - Esquema de sedimentação ao longo do tempo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização dessas regiões e da evolução de suas interfaces ao longo do tempo é fundamental para a interpretação do processo de sedimentação em suspensões concentradas. Esse entendimento fornece a base conceitual necessária para o emprego de técnicas experimentais capazes de fornecer informações locais ao longo da altura do sistema, como aquelas discutidas na seção seguinte, permitindo a análise quantitativa da distribuição espacial de sólidos durante o processo.

2.2 TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

2.2.1 Princípios físicos da TARG

A técnica de atenuação de raios gama baseia-se na interação da radiação eletromagnética de alta energia com a matéria, sendo amplamente utilizada para a caracterização não invasiva de sistemas multifásicos. Quando um feixe colimado de radiação gama atravessa um meio material, parte dos fótons incidentes interage com os átomos presentes, resultando na redução da intensidade do feixe emergente. Esse processo de atenuação depende diretamente das propriedades físicas e da composição do meio percolado, o que permite correlacionar a intensidade medida à distribuição espacial das fases presentes no sistema (KNOLL, 2010).

A interação da radiação gama com a matéria ocorre, predominantemente, por meio de três mecanismos físicos principais: o efeito fotoelétrico¹, o espalhamento Compton² e a produção de pares³. A predominância de cada mecanismo depende da energia da radiação incidente e do número atômico dos elementos constituintes do meio. Em aplicações laboratoriais da técnica de atenuação de raios gama, como no estudo de suspensões sólido-

¹O efeito fotoelétrico é um mecanismo de interação entre a radiação gama e a matéria no qual o fóton incidente é completamente absorvido por um átomo, resultando na ejeção de um elétron ligado a uma de suas camadas eletrônicas. A energia do fóton é transferida ao elétron, superando sua energia de ligação e convertendo-se em energia cinética. Esse processo apresenta forte dependência do número atômico do material e é predominante para radiações gama de baixa energia, sendo mais relevante em meios constituídos por elementos de maior número atômico.

²O espalhamento Compton consiste em um processo de interação entre a radiação gama e elétrons fracamente ligados ao átomo, no qual o fóton incidente transfere parte de sua energia ao elétron, sendo desviado de sua trajetória original com energia reduzida. Esse mecanismo é predominante para energias intermediárias de radiação gama e apresenta dependência relativamente fraca do número atômico do material, razão pela qual é frequentemente o principal responsável pela atenuação da radiação em sistemas multifásicos utilizados em estudos de sedimentação.

³A produção de pares consiste em um processo de interação da radiação gama com o campo eletromagnético do núcleo atômico, no qual um fóton de alta energia é convertido em um par elétron-pósitron. Para que esse fenômeno ocorra, a energia do fóton deve ser superior a 1,022 MeV, valor correspondente ao dobro da energia de repouso do elétron. Esse mecanismo torna-se significativo apenas para energias elevadas de radiação gama e apresenta maior relevância em materiais de elevado número atômico, sendo pouco frequente nas condições experimentais típicas de estudos de sedimentação por atenuação de raios gama.

líquido, o espalhamento Compton costuma ser o mecanismo dominante, especialmente para as energias de radiação comumente utilizadas, o que confere previsibilidade e estabilidade às medições realizadas (KNOLL, 2010).

A relação quantitativa entre a intensidade da radiação gama incidente e a intensidade transmitida após a travessia de um meio homogêneo é descrita pela Lei de Beer–Lambert. Essa lei estabelece que a atenuação do feixe ocorre de forma exponencial com a espessura do material atravessado, sendo expressa por:

$$I = I_0 \exp(-\gamma x) \quad (2)$$

em que I é a intensidade da radiação gama transmitida após atravessar o meio, I_0 é a intensidade inicial do feixe incidente, γ é o coeficiente de atenuação linear do meio e x é a espessura do material atravessado pelo feixe (KNOLL, 2010; AROUCA, 2007).

O coeficiente de atenuação linear representa a probabilidade de interação da radiação com o meio por unidade de comprimento e depende tanto da densidade quanto da composição química do material. Em sistemas multifásicos, como suspensões sólido-líquido, esse coeficiente pode ser expresso como uma combinação ponderada das contribuições individuais de cada fase, considerando suas respectivas frações volumétricas e coeficientes de atenuação mássica. Dessa forma, variações locais na concentração de sólidos resultam em variações mensuráveis na intensidade da radiação transmitida, constituindo o princípio fundamental que permite a aplicação da TARG na análise de sistemas heterogêneos.

2.2.2 Aplicação da TARG no estudo da sedimentação

No estudo da sedimentação de suspensões sólido-líquido, a técnica de atenuação de raios gama é empregada como uma ferramenta não invasiva para a determinação de perfis locais de concentração de sólidos ao longo da altura da coluna de sedimentação. A partir da medição da intensidade da radiação gama transmitida em posições previamente definidas, torna-se possível reconstruir a distribuição espacial da fase sólida no sistema, permitindo a identificação das diferentes regiões características do processo de sedimentação, tais como a zona clarificada, a zona de sedimentação, a zona de transição e o leito sedimentado, conforme descrito na Seção 2.1 (DAMASCENO, 1992; AROUCA, 2007).

A aplicação da TARG baseia-se na relação entre a atenuação da intensidade da radiação e a composição local do meio atravessado pelo feixe. Em suspensões sólido-líquido, o coeficiente de atenuação linear efetivo do sistema depende da contribuição relativa das fases sólida e fluida, podendo ser expresso como uma combinação ponderada de seus respectivos

coeficientes de atenuação lineares em função da concentração volumétrica de sólidos. Essa relação pode ser representada por:

$$\gamma = \varepsilon_s \gamma_s + (1 - \varepsilon_s) \gamma_f \quad (3)$$

em que ε_s é a concentração volumétrica de sólidos, γ_s é o coeficiente de atenuação linear da fase sólida e γ_f é o coeficiente de atenuação linear da fase fluida (DAMASCENO, 1992; AROUCA, 2007).

A partir da Lei de Beer–Lambert, apresentada na Equação (2), e da relação expressa na Equação (3), é possível estabelecer uma correlação direta entre a intensidade da radiação medida pelo detector e a concentração volumétrica local de sólidos. Na prática, entretanto, essa conversão não é realizada exclusivamente de forma teórica, sendo necessária a utilização de procedimentos de calibração experimental para garantir a precisão das estimativas de concentração. Esses procedimentos consistem na obtenção de medições da intensidade da radiação para sistemas de referência com concentrações de sólidos previamente conhecidas, incluindo a condição correspondente ao fluido puro e suspensões com diferentes frações volumétricas (DAMASCENO, 1992; MOREIRA, 2014).

Uma vez estabelecida a curva de calibração, as medições de intensidade atenuada podem ser convertidas diretamente em valores de concentração volumétrica de sólidos ao longo da altura da coluna de sedimentação. Esse procedimento permite a obtenção de perfis locais de concentração em diferentes instantes de tempo, possibilitando o monitoramento temporal do processo de sedimentação e o acompanhamento do deslocamento das interfaces entre as regiões características do sistema. Dessa forma, a técnica fornece informações quantitativas sobre a cinética de sedimentação e sobre a evolução estrutural do leito sedimentado, sem a necessidade de intervenção física no meio analisado (AROUCA, 2007; MOREIRA, 2014).

Uma das principais vantagens da técnica de atenuação de raios gama em relação a métodos invasivos reside no fato de preservar as condições hidrodinâmicas e estruturais do sistema durante todo o experimento. Métodos baseados em amostragem ou inserção de sondas podem perturbar a suspensão, modificar o empacotamento das partículas ou alterar a dinâmica de sedimentação, especialmente em sistemas concentrados. Em contraste, a TARG permite a aquisição contínua de dados com elevada resolução espacial e temporal, apresentando boa reprodutibilidade e elevada sensibilidade a variações locais de concentração (DAMASCENO, 1992; AROUCA, 2007).

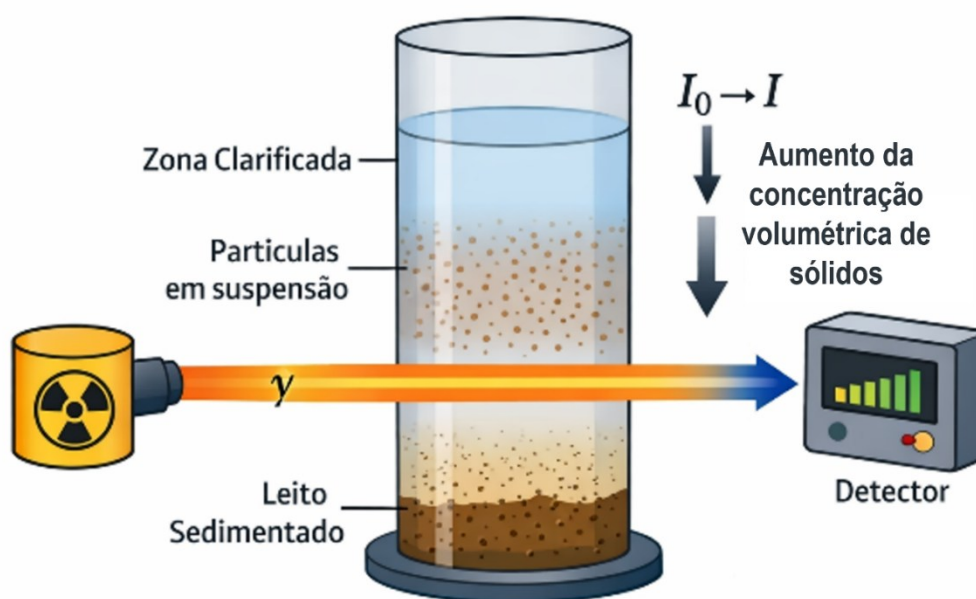


Figura 2.3 - Esquema conceitual da técnica de atenuação de raios gama aplicada ao estudo da sedimentação em uma coluna sólido-líquido.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, a aplicação da técnica de atenuação de raios gama no estudo da sedimentação de suspensões sólido-líquido configura-se como uma abordagem robusta e consolidada, amplamente validada nos trabalhos desenvolvidos. A capacidade de fornecer informações locais e temporalmente resolvidas sobre a distribuição de sólidos torna a TARG particularmente adequada para a investigação dos fenômenos de sedimentação analisados neste trabalho, fundamentando a interpretação dos resultados experimentais apresentados nas seções subsequentes.

2.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA SEDIMENTAÇÃO

2.3.1 Efeitos da temperatura nas propriedades do fluido

A principal propriedade do fluido contínuo afetada pela variação de temperatura é a viscosidade dinâmica. No caso da água, amplamente utilizada como fluido modelo em estudos de sedimentação, a viscosidade apresenta uma dependência inversa com a temperatura, diminuindo de forma significativa à medida que a temperatura aumenta. Esse comportamento é bem documentado na literatura e está associado ao aumento da energia cinética das moléculas, que reduz a resistência interna ao escoamento (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2007).

A redução da viscosidade do fluido com o aumento da temperatura implica alterações diretas no regime de escoamento e na força de arrasto exercida sobre as partículas em suspensão. Conforme evidenciado na Equação (1), a velocidade terminal de sedimentação é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do fluido. Assim, para um sistema mantido a temperaturas mais elevadas, espera-se um aumento da velocidade de sedimentação das partículas, desde que as demais propriedades do sistema permaneçam constantes (GOULA; ADAMOPOULOS, 2008; MKPENIE ET AL., 2007).

Além da viscosidade, a temperatura pode influenciar outras propriedades físicas do fluido, como a densidade, ainda que, no caso da água, essa variação seja relativamente menos pronunciada quando comparada ao efeito observado na viscosidade. Mesmo assim, em estudos que buscam elevada precisão na análise da sedimentação, essas variações devem ser consideradas, uma vez que pequenas alterações nas propriedades do fluido podem resultar em modificações perceptíveis no comportamento das partículas em suspensão (XU et al., 2020).

2.3.2 Influência da temperatura na cinética de sedimentação

As alterações nas propriedades do fluido decorrentes da variação de temperatura refletem-se diretamente na cinética do processo de sedimentação. Diversos estudos experimentais reportam que o aumento da temperatura promove um acréscimo na velocidade de sedimentação das partículas, principalmente em sistemas nos quais o fluido contínuo apresenta comportamento newtoniano, como suspensões aquosas de partículas sólidas (GOULA; ADAMOPOULOS, 2008; MKPENIE ET AL., 2007).

Em suspensões concentradas, entretanto, o efeito da temperatura sobre a sedimentação não se limita à variação da velocidade das partículas individuais. A redução da viscosidade do fluido também influencia as interações hidrodinâmicas entre partículas, podendo alterar a forma como o leito sedimentado se forma e se reorganiza ao longo do tempo. Em temperaturas mais elevadas, observa-se, em alguns casos, uma deposição mais rápida das partículas, seguida por processos de rearranjo estrutural mais intensos, que podem resultar em leitos com diferentes graus de compactação e porosidade (DAMASCENO, 1992; AROUCA, 2007).

Essas alterações na estrutura do leito sedimentado são particularmente relevantes em sistemas nos quais a compactação dos sólidos exerce influência direta sobre o desempenho do processo, como ocorre em operações de separação, filtração e manuseio de suspensões concentradas. A temperatura, portanto, não atua apenas como um fator cinético, mas também como uma variável capaz de modificar a estrutura final do sistema sedimentado.

2.3.3 Sedimentação sob gradientes térmicos

Grande parte dos estudos disponíveis na literatura sobre sedimentação considera sistemas isotérmicos, nos quais a temperatura é mantida uniforme ao longo de todo o domínio experimental. Essa abordagem, embora adequada para o desenvolvimento de modelos teóricos e para a interpretação de fenômenos fundamentais, não representa fielmente diversas situações práticas, nas quais a sedimentação ocorre sob a presença de gradientes térmicos horizontais ou verticais (MACENIĆ et al., 2020).

Em sistemas não isotérmicos, a presença de gradientes de temperatura pode gerar variações espaciais das propriedades do fluido, especialmente da viscosidade, resultando em assimetrias no campo de escoamento e no comportamento das partículas em suspensão. Nessas condições, diferentes regiões do sistema podem apresentar velocidades de sedimentação distintas, o que compromete a homogeneidade do processo e favorece a formação de leitos sedimentados heterogêneos, tanto em termos de concentração quanto de estrutura (XU et al., 2020).

Além disso, gradientes térmicos podem induzir movimentos convectivos no fluido, que interagem com o processo de sedimentação gravitacional e modificam a trajetória das partículas. Esses efeitos adicionais tornam o fenômeno mais complexo e dificultam a aplicação direta de modelos desenvolvidos para sistemas isotérmicos. Como consequência, a estabilidade do leito sedimentado e a previsibilidade da deposição de sólidos podem ser significativamente afetadas em sistemas submetidos a variações espaciais de temperatura.

Apesar de sua relevância prática, estudos que abordem de forma sistemática a sedimentação sob gradientes térmicos ainda são relativamente escassos, especialmente no que se refere à obtenção de informações locais e temporalmente resolvidas sobre a distribuição de sólidos. Observa-se, portanto, uma lacuna na literatura no que diz respeito à integração entre a análise da influência da temperatura, a presença de gradientes térmicos e o uso de técnicas experimentais não invasivas, como a atenuação de raios gama, para a caracterização detalhada do processo de sedimentação.

Essa lacuna evidencia a necessidade de investigações que considerem simultaneamente os efeitos térmicos e a dinâmica da sedimentação em suspensões sólido-líquido, fornecendo subsídios para uma compreensão mais abrangente do fenômeno e para o desenvolvimento de modelos e estratégias de controle mais representativos das condições reais de operação.

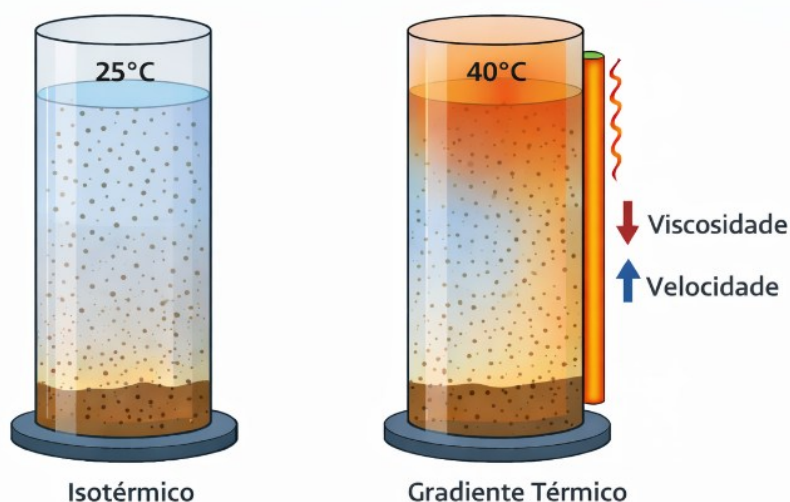


Figura 2.4 - Representação esquemática da sedimentação em sistemas isotérmicos e sob gradientes térmicos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 USO DE TRAÇADORES E VISUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO

2.4.1 Emprego de partículas traçadoras em estudos experimentais

A caracterização experimental do processo de sedimentação pode ser significativamente aprimorada por meio do emprego de técnicas de visualização, que permitem o acompanhamento direto da evolução do sistema ao longo do tempo. Embora métodos quantitativos, como a técnica de atenuação de raios gama, forneçam informações locais precisas sobre a distribuição de sólidos, a observação visual do processo constitui uma ferramenta complementar importante para a interpretação dos fenômenos envolvidos. Nesse contexto, o uso de partículas traçadoras destaca-se como uma estratégia eficaz para evidenciar a dinâmica de sedimentação, a formação de interfaces e o comportamento do leito sedimentado.

2.4.2 Aplicação de traçadores sólidos na análise visual da sedimentação

O conceito de traçador refere-se à utilização de uma fase ou material adicionado em pequena quantidade ao sistema, com o objetivo de permitir o acompanhamento visual ou instrumental de fenômenos físicos sem alterar de forma significativa o comportamento global do processo. Em estudos de sedimentação, partículas traçadoras sólidas são empregadas para destacar regiões específicas da suspensão, facilitar a identificação da interface sólido-líquido e

auxiliar na visualização do deslocamento das partículas ao longo do tempo (DAMASCENO, 1992).

Para que um material sólido possa ser utilizado como traçador em estudos experimentais de sedimentação, alguns critérios devem ser atendidos. O traçador deve apresentar propriedades físicas, especialmente densidade e tamanho de partícula, compatíveis com aquelas do sólido principal da suspensão, de modo a acompanhar o movimento do sistema sem introduzir efeitos significativos de segregação ou perturbações hidrodinâmicas. Além disso, o material traçador deve ser quimicamente inerte em relação ao fluido contínuo, não reagindo ou alterando suas propriedades físico-químicas ao longo do experimento, assegurando que a dinâmica observada seja representativa do comportamento do sistema como um todo (GUAZZELLI; HINCH, 2011).

Outro critério fundamental para a escolha do traçador é a sua capacidade de contraste visual em relação ao meio, permitindo sua identificação clara por meio de registros fotográficos ou videográficos. Materiais sólidos tingidos ou naturalmente pigmentados são frequentemente utilizados com essa finalidade, desde que o corante ou pigmento empregado não seja solúvel no fluido nem interfira no processo de sedimentação. A utilização de traçadores sólidos adequadamente selecionados possibilita, portanto, a obtenção de informações qualitativas relevantes sem comprometer a validade dos resultados experimentais.

2.4.3 Integração entre TARG, visualização óptica e análise térmica

A integração entre diferentes técnicas experimentais constitui uma estratégia poderosa para a investigação detalhada do processo de sedimentação. A técnica de atenuação de raios gama fornece informações quantitativas e localizadas sobre a distribuição de sólidos ao longo da altura da coluna, enquanto a visualização óptica, por meio do uso de traçadores sólidos, permite a observação direta da evolução das interfaces e da estrutura do leito sedimentado. De forma complementar, a análise térmica, realizada por meio de sensores ou câmeras térmicas, possibilita mapear a distribuição espacial da temperatura no sistema.

A utilização conjunta dessas técnicas permite correlacionar variações térmicas locais com alterações na cinética de sedimentação e na formação do leito sedimentado. Em sistemas submetidos a gradientes térmicos, por exemplo, a análise térmica pode evidenciar regiões de menor viscosidade do fluido, enquanto a TARG quantifica as diferenças na concentração de sólidos e a visualização óptica confirma a presença de assimetrias na deposição das partículas.

Essa abordagem integrada contribui significativamente para a interpretação e a validação dos resultados experimentais, uma vez que permite confrontar informações obtidas por métodos independentes. A concordância entre os dados fornecidos pela TARG, pela visualização óptica e pela análise térmica reforça a confiabilidade dos resultados, enquanto eventuais discrepâncias podem indicar a presença de fenômenos adicionais, como convecção térmica ou efeitos multidimensionais, que merecem investigação mais aprofundada.

Dessa forma, a integração entre técnicas quantitativas e qualitativas constitui um elemento fundamental para a compreensão abrangente do processo de sedimentação em sistemas complexos, fornecendo subsídios para a análise crítica dos resultados e para o avanço do conhecimento experimental na área.

À luz dos fundamentos teóricos discutidos, consolida-se um arcabouço conceitual consistente que integra os princípios da sedimentação, os efeitos termofísicos associados à variação de temperatura e as potencialidades da Técnica de Atenuação de Raios Gama como ferramenta de caracterização não invasiva. A articulação entre os regimes hidrodinâmicos de deposição, as propriedades reológicas do meio contínuo e a influência de gradientes térmicos evidencia que o fenômeno de sedimentação, especialmente em sistemas concentrados e termicamente não uniformes, demanda abordagem experimental criteriosa e modelagem fundamentada em parâmetros fisicamente significativos. Assim, a revisão bibliográfica não apenas delimita o estado da arte, mas também explicita as lacunas científicas relacionadas à caracterização espacial e temporal de suspensões sob condições não isotérmicas, justificando a proposta deste trabalho. Desse modo, estabelece-se a base teórica indispensável para a condução do estudo experimental, orientando a definição das variáveis investigadas, das técnicas de aquisição de dados e dos critérios de análise empregados nas etapas subsequentes da pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente seção descreve, de forma detalhada e sistemática, os materiais empregados e os procedimentos experimentais adotados para a investigação da influência da temperatura no processo de sedimentação de suspensões sólido-líquido. São apresentados os métodos de caracterização dos materiais particulados, a preparação das suspensões, a descrição do aparato experimental e dos sistemas de aquecimento, visualização e aquisição de dados, bem como os procedimentos utilizados para a realização dos ensaios, calibração da técnica de atenuação de raios gama e tratamento dos dados obtidos. A descrição rigorosa dessas etapas tem como objetivo assegurar a reprodutibilidade dos experimentos e fornecer subsídios suficientes para a correta interpretação dos resultados discutidos nas seções subsequentes.

3.1 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os materiais empregados neste trabalho foram selecionados de modo a garantir reprodutibilidade experimental, estabilidade físico-química do sistema e compatibilidade com as técnicas de análise adotadas. O sistema sólido-líquido estudado é constituído por carbonato de cálcio como material particulado principal, óxido de sílica tingido utilizado como traçador sólido e água como fluido contínuo. Com o objetivo de caracterizar adequadamente os materiais sólidos empregados, foram realizadas determinações de densidade e análises granulométricas, cujos procedimentos são descritos a seguir.

3.1.1 Materiais particulados: sólido principal e traçador

O carbonato de cálcio foi utilizado como material particulado principal da suspensão em razão de sua ampla aplicação em estudos de sedimentação, de sua disponibilidade comercial e de suas propriedades físicas adequadas à investigação proposta. Como material traçador, empregou-se óxido de sílica tingido de preto, com a finalidade de possibilitar a visualização direta do processo de sedimentação no interior da célula experimental, sem interferir de forma significativa no comportamento global da suspensão.

A utilização de um sólido traçador permite acompanhar qualitativamente a dinâmica do processo de sedimentação, incluindo o deslocamento das partículas, a formação da interface sólido-líquido e a acomodação do leito sedimentado. O óxido de sílica tingido foi selecionado

devido à sua estabilidade química em meio aquoso, ao elevado contraste visual em relação ao meio contínuo, à densidade semelhante à do sólido principal da suspensão e à possibilidade de ajuste de suas propriedades físicas, especialmente o diâmetro de partícula, de modo a torná-las compatíveis com aquelas do material particulado de interesse. Essa compatibilidade é fundamental para que o movimento observado para as partículas traçadoras seja representativo do comportamento hidrodinâmico do sistema como um todo.

Na forma comercial em que foi adquirido, o óxido de sílica tingido apresentava diâmetros de partícula significativamente superiores aos do carbonato de cálcio, o que inviabilizaria seu uso direto como traçador representativo. A presença de partículas com diâmetro muito maior poderia resultar em velocidades de sedimentação distintas e em trajetórias não compatíveis com o sólido principal, comprometendo a interpretação visual do fenômeno.

Dessa forma, previamente à preparação das suspensões, o material traçador foi submetido a um processo de redução de tamanho por moagem em moinho de bolas de escala laboratorial. A moagem foi conduzida por 60 horas para promover a redução do diâmetro médio das partículas, buscando-se uma distribuição granulométrica compatível com aquela do carbonato de cálcio empregado.

Figura 3.1 - Moinho de bolas de escala laboratorial.



Fonte: O autor.

A caracterização física de ambos os materiais incluiu a determinação da densidade real e a análise do perfil de diâmetros das partículas. A densidade do carbonato de cálcio e do óxido de sílica tingido foi determinada por meio de picnometria, utilizando-se um picnômetro de vidro. O procedimento consistiu na pesagem do picnômetro vazio, seguida da adição do sólido

seco e posterior preenchimento com água destilada até o volume de referência. Para cada material, o procedimento foi repetido cinco vezes, com o objetivo de garantir a confiabilidade estatística dos valores obtidos. As densidades dos sólidos foram calculadas a partir das massas medidas e do volume conhecido do picnômetro, considerando-se a densidade da água na temperatura de ensaio.

A análise granulométrica do carbonato de cálcio e do óxido de sílica tingido foi realizada por meio da técnica de difração a laser, utilizando o equipamento Malvern Mastersizer 2000⁴ acoplado à unidade de dispersão úmida Hydro 2000MU. Os materiais particulados foram dispersos em meio líquido adequado, sob condições controladas de agitação, de modo a promover a desaglomeração das partículas e assegurar uma distribuição representativa dos sistemas analisados. A partir das medições realizadas, foram obtidos os perfis de distribuição de diâmetros das partículas, permitindo a caracterização granulométrica de ambos os sólidos em termos de tamanho e distribuição volumétrica. A unidade de teste está ilustrada na Figura 3.1.



Figura 3.2 – Malvern Mastersizer 2000/Hydro 2000MU

Fonte: Malvern Panalytical (2026)

3.1.2 Ensaios preliminares de sedimentação em provetas

Com o objetivo de avaliar preliminarmente a influência da adição de um material traçador sólido sobre a dinâmica de sedimentação do carbonato de cálcio, bem como verificar a viabilidade de seu uso para fins de visualização do processo, foram realizados ensaios

⁴ O Mastersizer é um equipamento de análise granulométrica baseado na técnica de difração a laser, amplamente utilizado para a determinação da distribuição de tamanhos de partículas em suspensões e pós. O método consiste na medição do padrão de espalhamento da luz laser ao atravessar um conjunto de partículas dispersas em meio líquido ou gasoso, permitindo a obtenção de distribuições de diâmetro em função do volume, área ou número de partículas, com ampla faixa de medição e elevada reprodutibilidade.

exploratórios de sedimentação em provetas graduadas de 100 mL. Esses ensaios tiveram caráter qualitativo e comparativo e foram conduzidos previamente aos experimentos definitivos realizados na célula de sedimentação instrumentada, permitindo a observação direta da evolução do leito sedimentado em condições simplificadas.

No primeiro ensaio, foi preparada uma suspensão contendo exclusivamente carbonato de cálcio, com concentração volumétrica total de sólidos igual a 15%. A suspensão foi devidamente homogeneizada e, em seguida, transferida para uma proveta de 100 mL, estabelecendo-se o instante inicial do processo de sedimentação. O acompanhamento visual foi realizado por meio de registros fotográficos obtidos nos tempos de 0 s, 30 s, 1 min 30 s, 2 min 30 s, 3 min 30 s, 5 min, 6 min, 8 min, 10 min, 15 min, 25 min e 35 min após o início do ensaio. O tempo final de 35 minutos foi considerado suficiente para caracterizar a deposição completa do material particulado, conforme indicado pela estabilização da altura do leito sedimentado.

No segundo ensaio preliminar, foi avaliada a sedimentação de uma suspensão contendo carbonato de cálcio e material traçador sólido, também em uma proveta de 100 mL. A suspensão apresentava concentração volumétrica total de sólidos igual a 15%, sendo composta por 14,65% de carbonato de cálcio e 0,35% de óxido de sílica, utilizada como material traçador em razão do contraste visual proporcionado em relação ao carbonato de cálcio. Após a homogeneização da suspensão, o processo de sedimentação foi iniciado e acompanhado visualmente por meio de registros fotográficos obtidos nos mesmos instantes de tempo adotados no primeiro ensaio, ou seja, de 0 s até 35 min.

Esses ensaios preliminares forneceram subsídios experimentais importantes para a avaliação da viabilidade do uso do material traçador, demonstrando que, apesar da leve alteração na dinâmica de sedimentação, a proporção adotada permitiu a visualização adequada do processo sem comprometer de forma significativa o comportamento global do sistema. Essas observações fundamentaram a escolha do traçador e da sua concentração volumétrica nos ensaios definitivos descritos nas seções subsequentes.

3.1.3 Fluido

A água destilada foi utilizada como fluido contínuo da suspensão, por apresentar propriedades físicas bem conhecidas e ampla utilização como fluido modelo em estudos de sedimentação. Para os cálculos das concentrações volumétricas e para a determinação da densidade dos sólidos por picnometria, foi considerada a densidade da água correspondente à temperatura na qual a suspensão foi preparada.

A consideração da densidade da água na temperatura ambiente é particularmente importante para garantir a precisão dos cálculos volumétricos, uma vez que variações térmicas podem resultar em alterações mensuráveis dessa propriedade. Dessa forma, assegurou-se a coerência entre as propriedades físicas adotadas e as condições experimentais efetivamente empregadas.

3.2 PREPARO DAS SUSPENSÕES

O preparo das suspensões sólido-líquido foi realizada de forma controlada, com o objetivo de assegurar reprodutibilidade experimental e homogeneidade inicial do sistema antes do início dos ensaios de sedimentação. As etapas de preparo envolveram a definição da concentração volumétrica total de sólidos, o cálculo das quantidades de cada material particulado e o procedimento de homogeneização da suspensão.

3.2.1 Concentração volumétrica e composição da suspensão

As suspensões preparadas apresentaram concentração volumétrica total de sólidos igual a 15%. Essa fração foi composta por dois materiais sólidos distintos, sendo 75,7% do volume de sólidos correspondente ao carbonato de cálcio e 24,3% correspondente ao óxido de sílica tingido, utilizado como traçador. Dessa forma, a suspensão final continha 14,65% em volume de carbonato de cálcio e 0,35% em volume de óxido de sílica.

O cálculo das massas de cada sólido necessárias para a preparo da suspensão foi realizado a partir das densidades determinadas experimentalmente na Seção 3.1, considerando-se também a densidade da água na temperatura em que a suspensão foi preparada. Esse procedimento permitiu a conversão precisa das frações volumétricas desejadas em massas correspondentes, assegurando a correta proporção entre os componentes da suspensão.

A adoção de frações volumétricas, em detrimento de frações mássicas, mostrou-se adequada para o estudo da sedimentação, uma vez que o fenômeno é diretamente influenciado pela ocupação volumétrica dos sólidos no sistema e pela interação hidrodinâmica entre as partículas e o fluido contínuo.

3.2.2 Procedimento de homogeneização

Após a determinação das quantidades de cada material, a suspensão foi preparada pela adição sequencial dos sólidos à água, previamente medida, já na célula de sedimentação. O processo de homogeneização foi conduzido utilizando-se um agitador mecânico digital RDW20, operado por tempo suficiente para promover a completa dispersão dos sólidos no fluido contínuo e minimizar a ocorrência de aglomerados ou segregação inicial.



Figura 3.3 - Agitador mecânico digital RDW20.

Fonte: Remi (2023).

Durante a homogeneização, cuidados foram adotados para evitar a incorporação excessiva de ar ao sistema e a deposição prematura de partículas. O procedimento foi conduzido até a obtenção de uma suspensão visualmente homogênea, condição necessária para garantir que o início do ensaio de sedimentação correspondesse a um estado bem definido, com distribuição uniforme de sólidos em todo o volume da célula.

Ao término da homogeneização iniciou-se, em seguida, o procedimento experimental descrito na Seção 3.4. Esse procedimento assegurou que as condições iniciais dos ensaios fossem reproduzíveis e comparáveis entre si, permitindo a análise consistente da evolução do processo de sedimentação sob as condições térmicas investigadas.

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

3.3.1 Célula de sedimentação com aquecimento lateral

O sistema de testes utilizado neste trabalho consistia em uma célula de sedimentação acoplada a um sistema de aquecimento lateral, projetada de modo a permitir a geração controlada de gradientes térmicos durante o processo de sedimentação. O conjunto experimental era composto por um recipiente dividido em três compartimentos isolados, sendo dois compartimentos menores posicionados nas laterais e um compartimento central de maior volume, destinado à suspensão em estudo.

Os compartimentos laterais foram preenchidos com óleo térmico mineral do tipo ISO VG 32, classe HL, selecionado em função de suas adequadas propriedades de transferência de calor, estabilidade térmica e ampla faixa de operação, compreendida entre aproximadamente $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. O compartimento central foi preenchido com a suspensão sólido-líquido preparada conforme descrito na Seção 3.2, constituindo a região de interesse para o estudo do processo de sedimentação.

Os compartimentos laterais e o compartimento central foram separados por placas de alumínio com espessura de 2 mm. O uso do alumínio deveu-se à sua elevada condutividade térmica e à baixa resistência térmica associada, favorecendo a transferência de calor do óleo aquecido para a suspensão. O restante da estrutura da célula foi confeccionado em vidro com espessura de 6 mm, material escolhido por permitir a visualização direta do processo de sedimentação, além de apresentar resistência mecânica adequada às condições experimentais empregadas. A Figura 12 ilustra a célula de sedimentação com aquecimento lateral utilizada nos ensaios.

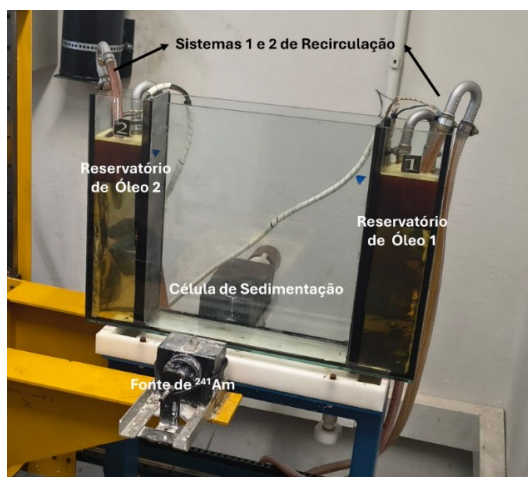


Figura 3.4 - Célula de sedimentação com aquecimento lateral.
Fonte: o Autor.

Nas laterais da célula, o óleo térmico era aquecido até a temperatura de 70 °C por meio de resistências elétricas com potência nominal de 500 W. O controle da temperatura foi realizado eletronicamente com o auxílio de termostatos e controladores do tipo PID, garantindo a manutenção da condição térmica desejada ao longo do ensaio. Para assegurar a homogeneidade da temperatura em cada compartimento lateral, bombas centrífugas foram empregadas para promover a recirculação contínua do óleo térmico. A recirculação contínua permitiu minimizar gradientes térmicos internos ao óleo, assegurando que a transferência de calor para a suspensão ocorresse de forma predominantemente uniforme ao longo de cada lateral da célula.

Os sensores de temperatura utilizados para o monitoramento e controle do sistema térmico foram posicionados no centro dos reservatórios de óleo, permanecendo submersos durante toda a operação. Essa configuração possibilitou a leitura direta da temperatura do óleo térmico, fornecendo um controle mais preciso das condições térmicas impostas à célula de sedimentação.

3.3.2 Sistema de atenuação de raios gama (TARG)

A determinação da distribuição espacial da concentração volumétrica de sólidos ao longo da célula de sedimentação foi realizada por meio da técnica de atenuação de raios gama (TARG). Essa técnica baseia-se na redução da intensidade de um feixe colimado de radiação gama ao atravessar um meio material, sendo essa atenuação diretamente relacionada à composição e à densidade do sistema interceptado pelo feixe. Dessa forma, a TARG permite a obtenção de perfis locais de concentração de sólidos de maneira não invasiva, sem interferir no processo de sedimentação.

A fonte radioativa utilizada nos ensaios foi o Amerício-241, do fabricante Amersham, de atividade⁵ 100 mCi, emissor de radiação gama de baixa energia, empregado em estudos envolvendo sistemas sólido-líquido devido à sua elevada sensibilidade a variações de densidade do meio atravessado. A fonte encontrava-se encapsulada e adequadamente colimada, de modo a produzir um feixe estreito e bem definido, reduzindo a influência de radiação espalhada e aumentando a resolução espacial das medições ao longo da célula.

⁵A atividade corresponde à taxa de desintegrações nucleares que ocorrem em uma amostra radioativa por unidade de tempo. Essa grandeza expressa a intensidade da emissão de radiação e está diretamente relacionada ao número de núcleos instáveis presentes no material. A atividade é comumente expressa em becquerel (Bq), no Sistema Internacional de Unidades, sendo 1 Bq equivalente a uma desintegração por segundo, ou, alternativamente, em curie (Ci), unidade ainda utilizada em algumas aplicações, na qual 1 Ci corresponde a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

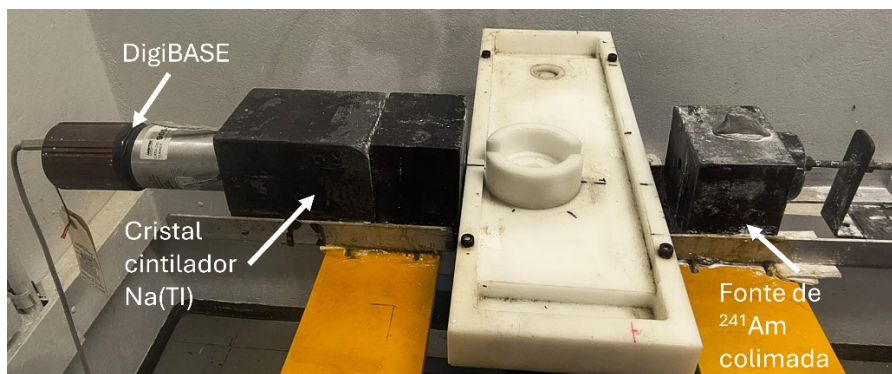


Figura 3.5 - Sistema de emissão de radiação gama e detecção.

Fonte: O autor.

O sistema de detecção consistiu em um detector de radiação gama acoplado (*DigiBASE All-in One* PMT Base, HV, Pré-amplificador, Amplificador e MCA Digital) a um conjunto eletrônico de aquisição de dados, responsável pela contagem dos fótons transmitidos após a passagem do feixe pela suspensão. Os sinais provenientes do detector foram processados por módulos eletrônicos apropriados, permitindo o registro contínuo da intensidade da radiação em função do tempo e da posição de medição. A aquisição dos dados foi realizada por meio do software *Maestro* dedicado, possibilitando o armazenamento das informações obtidas durante todo o ensaio para posterior tratamento e análise.

A configuração geométrica do sistema experimental foi estabelecida de modo que a fonte radioativa e o detector permanecessem alinhados e posicionados em lados opostos da célula de sedimentação. Nessa configuração fonte–célula–detector, o feixe de radiação atravessava perpendicularmente a região escolhida da suspensão, assegurando que a atenuação medida estivesse associada exclusivamente ao material presente no volume interceptado pelo feixe, minimizando efeitos geométricos e interferências externas.

3.3.3 Sistema de visualização e análise térmica

O acompanhamento visual do processo de sedimentação e o monitoramento da distribuição espacial da temperatura ao longo da célula foram realizados por meio de um sistema integrado de aquisição de imagens ópticas e análise térmica. Esse sistema teve como finalidade complementar as medições obtidas pela técnica de atenuação de raios gama, permitindo a observação direta da dinâmica do processo e a verificação das condições térmicas impostas ao sistema experimental.

A análise térmica foi conduzida utilizando uma câmera térmica posicionada de modo a registrar a distribuição de temperatura ao longo das faces externas da célula de sedimentação. A câmera permitiu a obtenção de mapas térmicos bidimensionais, possibilitando o acompanhamento da evolução temporal do campo de temperatura gerado pelo aquecimento lateral e a avaliação da homogeneidade térmica ao longo das paredes da célula. Esses registros foram utilizados para confirmar a estabilidade da condição térmica imposta durante os ensaios e para auxiliar na interpretação dos efeitos da temperatura sobre o comportamento da sedimentação.



Figura 3.6 - Câmera térmica E8 – FLIR.

Fonte: Teledyne FLIR.

O sistema de aquisição de imagens ópticas foi empregado para o registro visual do processo de sedimentação no compartimento central da célula. Foram realizados registros fotográficos e videográficos ao longo do tempo, possibilitando a observação da evolução da interface sólido-líquido, da deposição progressiva do material particulado e da acomodação do leito sedimentado. Esse sistema foi utilizado de forma particular para o acompanhamento do movimento das partículas traçadoras, permitindo a análise qualitativa da dinâmica de sedimentação da suspensão.

A utilização conjunta da visualização óptica e da análise térmica permitiu estabelecer uma correlação qualitativa entre a distribuição de temperatura ao longo da célula e o comportamento observado na sedimentação, contribuindo para uma interpretação mais consistente dos dados obtidos pela técnica de atenuação de raios gama. Dessa forma, o sistema de visualização e análise térmica atuou como ferramenta complementar fundamental na avaliação do processo estudado.

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram conduzidos com o objetivo de avaliar o comportamento da sedimentação da suspensão sólido-líquido sob a influência de um campo térmico imposto lateralmente à célula. Considerando o escopo do trabalho, foi realizado um único ensaio de sedimentação, no qual se buscou reproduzir condições semelhantes às empregadas em estudos anteriores do grupo, permitindo a comparação qualitativa e metodológica dos resultados.

3.4.1 Ensaio de sedimentação sob aquecimento bilateral

O procedimento experimental consistiu na realização de um único ensaio de sedimentação sob condição de aquecimento bilateral da célula. Após a preparação e homogeneização da suspensão, conforme descrito na Seção 3.2, o sistema foi transferido para a célula de sedimentação e mantido em repouso com temperatura inicial igual a ambiente, caracterizando o início do processo de sedimentação.

O aquecimento foi aplicado simultaneamente nas duas laterais da célula por meio do sistema de circulação de óleo térmico, previamente descrito na Seção 3.3. O óleo térmico foi aquecido e mantido à temperatura de 70 °C durante todo o ensaio, utilizando resistências elétricas e controladores de temperatura do tipo PID.

A aplicação do aquecimento bilateral teve como finalidade impor um gradiente térmico transversal à célula de sedimentação, promovendo variações locais de temperatura no interior da suspensão. Essas variações influenciam diretamente as propriedades físicas do fluido contínuo, em especial a viscosidade, e, conseqüentemente, o comportamento de sedimentação das partículas sólidas.

Durante todo o ensaio, o sistema permaneceu fechado e sem perturbações mecânicas, assegurando que o processo de sedimentação ocorresse exclusivamente em função da ação da gravidade e das condições térmicas impostas. Os registros visuais e térmicos, foram iniciados imediatamente após o início da sedimentação, as medidas de fração de sólidos foram realizadas 24 horas após o término da sedimentação. Os detalhes da metodologia experimental estão mais bem descritos na seção 3.4.2.

3.4.2 Aquisição dos dados experimentais

A aquisição dos dados experimentais foi conduzida de forma sequencial, de modo a separar claramente o monitoramento térmico do processo de sedimentação da determinação posterior da concentração volumétrica de sólidos por meio da técnica de atenuação de raios gama. O instante inicial do ensaio foi definido imediatamente após a completa homogeneização da suspensão e seu posicionamento na célula de sedimentação, condição na qual os sólidos se encontravam uniformemente distribuídos ao longo de todo o volume do sistema.

O acompanhamento do processo de sedimentação sob aquecimento bilateral foi realizado inicialmente por meio da aquisição de imagens térmicas em instantes de tempo previamente estabelecidos. Foram obtidos registros térmicos no início do processo, logo após a homogeneização total da suspensão, bem como após 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 1 hora e 30 minutos, 2 horas, 3 horas e 4 horas de ensaio. Esse último intervalo foi adotado por ser considerado suficiente para caracterizar a deposição completa do material particulado no interior da célula de sedimentação.

As imagens térmicas adquiridas permitiram acompanhar a evolução temporal da distribuição de temperatura ao longo das paredes da célula, bem como verificar a estabilidade das condições térmicas impostas pelo sistema de aquecimento lateral durante o processo de sedimentação. Esses registros foram utilizados para a análise qualitativa do campo térmico imposto ao sistema ao longo do tempo, sem interferir fisicamente na dinâmica da sedimentação.

Após a conclusão do período de sedimentação monitorado por análise térmica, o sistema experimental foi mantido em repouso por um período adicional de 24 horas, de modo a permitir que toda a suspensão atingisse a temperatura ambiente. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de eliminar a influência de gradientes térmicos residuais sobre as medições subsequentes de atenuação de raios gama, assegurando que a determinação da concentração volumétrica de sólidos fosse realizada em condições isotérmicas.

Somente após o completo equilíbrio térmico do sistema foram realizadas as medições por meio da técnica de atenuação de raios gama. A aquisição dos dados de TARG foi conduzida de forma pontual, em posições previamente definidas ao longo da altura da célula de sedimentação (descritas na Figura 3.11), permitindo a obtenção dos perfis finais de concentração volumétrica de sólidos após o processo de sedimentação sob aquecimento bilateral. Esses dados constituíram a base quantitativa para a análise da distribuição de sólidos apresentada nos capítulos subsequentes.

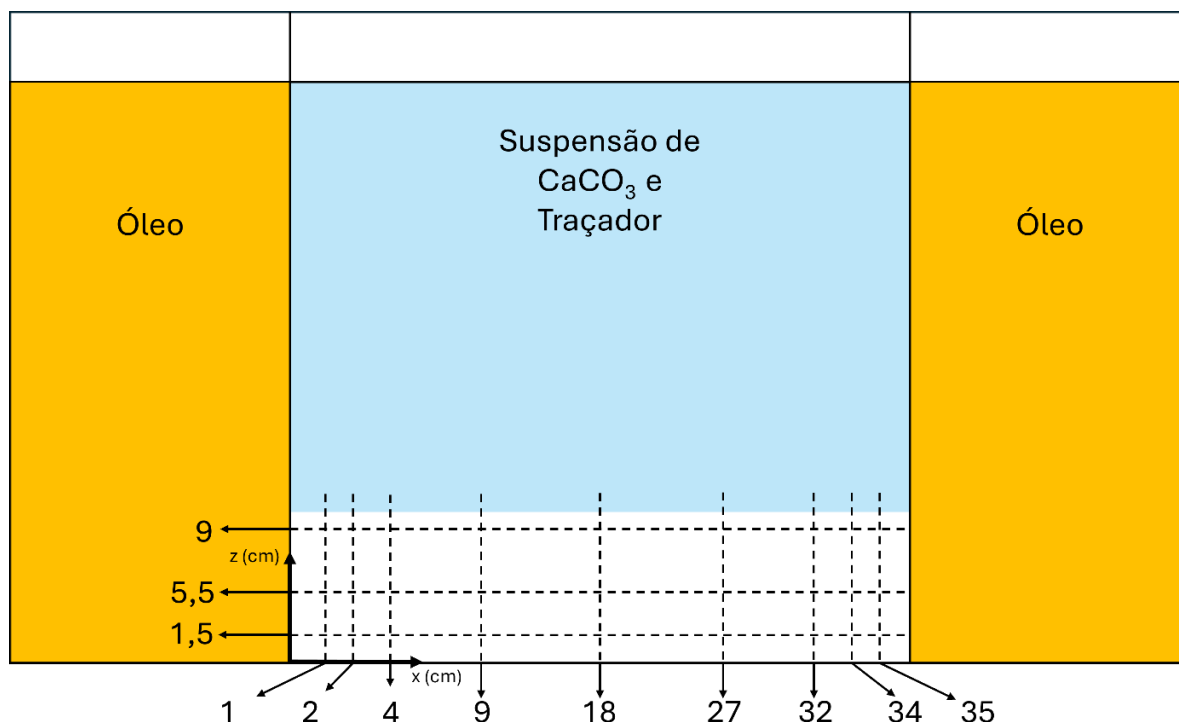


Figura 3.7 - Esquema ilustrativo do ensaio com aquecimento bilateral, com os pontos de medida de concentração de sólidos descritos.

Fonte: O autor.

3.5 CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

A calibração da técnica de atenuação de raios gama foi realizada com o objetivo de estabelecer a relação entre a intensidade da radiação medida pelo detector e a concentração volumétrica de sólidos presente no meio atravessado pelo feixe de radiação. Esse procedimento é fundamental para a conversão dos dados experimentais de intensidade atenuada em valores quantitativos de concentração de sólidos, assegurando a confiabilidade dos perfis obtidos ao longo da altura da célula de sedimentação.

O procedimento de calibração adotado baseou-se na metodologia descrita por Fagundes (2019), utilizando dois pontos de referência bem definidos, correspondentes a condições extremas e conhecidas de concentração volumétrica de sólidos. O primeiro ponto de calibração foi obtido no início do experimento, imediatamente após a homogeneização completa da suspensão, condição na qual os sólidos se encontravam uniformemente distribuídos no volume do sistema. Nessa situação, a concentração volumétrica de sólidos era conhecida e igual à concentração volumétrica total preparada, conforme definido na Seção 3.2.

O segundo ponto de calibração foi determinado ao final do processo de sedimentação, na região clarificada da célula, após o período de repouso de 24 horas necessário para o

completo retorno do sistema à temperatura ambiente. Nessa condição, considerou-se que a concentração volumétrica de sólidos na região clarificada era igual a zero, uma vez que todo o material particulado encontrava-se depositado no fundo da célula.

A partir das intensidades de radiação medidas nessas duas condições de referência, foi estabelecida a curva de calibração que relaciona a intensidade atenuada da radiação gama com a concentração volumétrica de sólidos. Essa curva foi posteriormente utilizada para a conversão das intensidades medidas nos diferentes pontos ao longo da altura da célula em valores de concentração volumétrica de sólidos, permitindo a construção dos perfis finais de concentração após o processo de sedimentação.

A adoção de um procedimento de calibração baseado em dois pontos extremos, com frações volumétricas conhecidas, mostrou-se adequada para o sistema estudado, uma vez que permite reduzir incertezas associadas à variabilidade do sistema experimental e assegurar consistência na análise quantitativa dos dados obtidos pela técnica de atenuação de raios gama.

A técnica de atenuação de raios gama (TARG) foi empregada para estimar a concentração volumétrica local de sólidos a partir das contagens registradas pelo sistema detector ao longo da célula. Para cada ponto de medição, realizou-se uma única aquisição com duração de 300 s, obtendo-se a contagem total N . A intensidade de radiação transmitida, expressa como taxa de contagem, foi então calculada por:

$$I = \frac{N}{\Delta t} \quad (4)$$

em que I é a intensidade (s^{-1}), N é a contagem total registrada e Δt é o tempo de aquisição, igual a 300 s.

Como sistemas de detecção podem apresentar perdas associadas a tempo morto, a intensidade foi corrigida utilizando o tempo morto efetivo do detector, τ' , obtendo-se a taxa de contagem corrigida R :

$$R = \frac{I}{1 - I\tau'} \quad (5)$$

em que R é a taxa de contagem corrigida (s^{-1}) e τ' é o tempo morto efetivo do sistema (s) que é igual a 0,0002056.

Para a conversão das medidas em concentração volumétrica de sólidos, adotou-se um ponto de referência correspondente à região clarificada do sistema, definida por concentração volumétrica nula de sólidos. A taxa de contagem corrigida nesse ponto foi indicada por R_0 . Para um ponto genérico do domínio, com taxa corrigida R , definiu-se o termo logarítmico associado à atenuação relativa:

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (6)$$

em que R_0 é a taxa de contagem corrigida na região de líquido clarificado (s^{-1}).

Esse termo é nulo no clarificado e aumenta à medida que a atenuação se intensifica, refletindo maior presença de sólidos no caminho do feixe.

A taxa de contagem corrigida correspondente a essa condição foi denotada por R_{ref} . Considerando comportamento exponencial da atenuação e geometria fixa do arranjo, adotou-se a relação linearizada:

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (7)$$

em que β é o coeficiente de atenuação efetivo do sistema, determinado por calibração, e ϕ é a concentração volumétrica local de sólidos.

Assim, utilizando o ponto clarificado ($\varepsilon_s = 0$) e o ponto de referência homogêneo ($\varepsilon_{s_{ref}} = 0,15$), obteve-se β por:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_{ref}}\right)}{\varepsilon_{s_{ref}}} = \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_{ref}}\right)}{0,15} \quad (8)$$

Uma vez determinado β , cada medida experimental foi convertida em concentração volumétrica local de sólidos por:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (9)$$

Esse procedimento permite transformar diretamente as contagens medidas pela TARG em estimativas quantitativas de concentração local de sólidos, mantendo coerência com o caráter exponencial do fenômeno de atenuação e assegurando rastreabilidade do tratamento aplicado a cada ponto de medição.

3.6 USO DE PARTÍCULAS TRAÇADORAS E VISUALIZAÇÃO DO PROCESSO

O acompanhamento visual do processo de sedimentação foi realizado por meio do emprego de partículas traçadoras sólidas, associadas a um sistema de aquisição de imagens ópticas. O uso de um material traçador teve como finalidade permitir a observação direta da dinâmica de sedimentação no interior da célula, sem interferir significativamente no comportamento global da suspensão.

O óxido de sílica tingido foi utilizado como partícula traçadora devido ao elevado contraste visual proporcionado em relação ao carbonato de cálcio e à sua estabilidade em meio

aquoso. A escolha desse material baseou-se na compatibilidade física entre os sólidos empregados, de modo que o movimento observado para as partículas traçadoras pudesse ser considerado representativo do comportamento hidrodinâmico do material particulado principal. Dessa forma, o deslocamento, a deposição e a acomodação das partículas traçadoras foram assumidos como indicativos qualitativos da dinâmica de sedimentação da suspensão como um todo.

O registro visual do processo foi realizado por meio de imagens fotográficas e videográficas obtidas ao longo do ensaio, utilizando uma câmera posicionada de forma a permitir a observação direta do compartimento central da célula de sedimentação. Foram empregadas aproximações adequadas para possibilitar o acompanhamento do movimento das partículas traçadoras, bem como da evolução da interface sólido-líquido e da formação do leito sedimentado.

Os registros visuais obtidos permitiram acompanhar qualitativamente a evolução temporal do processo de sedimentação, incluindo o deslocamento descendente das partículas, a deposição progressiva do material particulado e a acomodação final do leito sedimentado. Essas informações visuais foram utilizadas de forma complementar aos dados quantitativos obtidos pela técnica de atenuação de raios gama e aos registros térmicos, contribuindo para uma interpretação mais consistente do comportamento do sistema sob as condições experimentais estudadas.

A integração entre o uso de partículas traçadoras e o registro visual do processo de sedimentação possibilitou, portanto, uma análise qualitativa detalhada da dinâmica do sistema, auxiliando na validação e na interpretação dos resultados quantitativos apresentados nas seções subsequentes.

3.7 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O tratamento e a análise dos dados experimentais tiveram como objetivo converter as informações brutas obtidas por meio da técnica de atenuação de raios gama em perfis quantitativos de concentração volumétrica de sólidos ao longo da altura da célula de sedimentação, bem como organizar esses dados de forma a permitir a análise do estado final do sistema após o processo de sedimentação sob aquecimento bilateral.

3.7.1 Processamento dos dados de TARG

Os dados de intensidade da radiação gama transmitida através da célula de sedimentação foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas, utilizando o software Microsoft Excel. O processamento consistiu na conversão das intensidades medidas pelo detector em valores de concentração volumétrica de sólidos, a partir da curva de calibração estabelecida conforme descrito na Seção 3.5.

A conversão dos dados foi realizada com base na relação entre a intensidade atenuada da radiação e a concentração volumétrica de sólidos no meio atravessado pelo feixe, considerando os dois pontos de referência utilizados na calibração. As equações empregadas nesse procedimento foram aquelas apresentadas na Seção 2, sendo aplicadas diretamente nas planilhas por meio de fórmulas implementadas em células específicas, de modo a assegurar rastreabilidade e reprodutibilidade dos cálculos realizados.

Durante o processamento dos dados, foram adotados critérios consistentes de organização e verificação, incluindo a identificação de cada ponto de medição ao longo da altura da célula, a conferência das intensidades registradas e a validação dos valores obtidos para a concentração volumétrica de sólidos. Esse procedimento permitiu minimizar erros associados à manipulação dos dados e garantir coerência entre as medições realizadas em diferentes posições da célula.

3.7.2 Construção e análise dos perfis de concentração

A partir dos valores de concentração volumétrica de sólidos obtidos após o processamento dos dados de TARG, foram construídos os perfis de concentração ao longo da altura da célula de sedimentação. Esses perfis representam a distribuição espacial final dos sólidos após o processo de sedimentação sob aquecimento bilateral e após o período de repouso necessário para o retorno do sistema à temperatura ambiente.

Os perfis de concentração foram organizados de forma a permitir a visualização da variação da concentração volumétrica de sólidos em função da posição vertical na célula, evidenciando a formação do leito sedimentado e a região clarificada superior. A análise desses perfis possibilitou identificar a espessura do leito, a distribuição de sólidos na região depositada e a transição entre as diferentes regiões do sistema.

A análise dos perfis foi conduzida de maneira descritiva e comparativa, com base na forma e na distribuição dos valores de concentração volumétrica de sólidos ao longo da altura

da célula. Essa abordagem permitiu estabelecer relações entre o comportamento observado na sedimentação, o campo térmico imposto durante o ensaio e os registros visuais obtidos com o uso de partículas traçadoras, fornecendo uma base consistente para a interpretação dos resultados apresentada nos capítulos subsequentes.

Os procedimentos experimentais descritos neste capítulo permitiram estabelecer uma base metodológica consistente para a investigação da sedimentação de suspensões aquosas sob aquecimento bilateral. A caracterização dos materiais, a preparação das suspensões, a descrição do aparato experimental e dos sistemas de aquisição de dados, bem como os procedimentos de calibração e tratamento das informações, asseguram a confiabilidade dos dados obtidos. No capítulo seguinte, esses dados serão analisados e discutidos, com ênfase na influência do campo térmico sobre a dinâmica de sedimentação, na evolução dos perfis de concentração de sólidos e na interpretação dos resultados à luz dos fundamentos teóricos apresentados na revisão bibliográfica.

3.7.3 Declaração de uso de Inteligência Artificial

Este Trabalho de Conclusão de Curso utilizou ferramentas de inteligência artificial de forma restrita e controlada, exclusivamente para: (i) revisão da língua portuguesa e padronização de estilo textual; (ii) adequação da extensão do texto às exigências institucionais; e (iii) apoio à elaboração/edição de imagens e figuras empregadas como recurso de apresentação do conteúdo. O uso dessas ferramentas ocorreu de maneira ética e responsável, sem comprometimento da autoria intelectual, da originalidade do trabalho ou da fidedignidade das informações apresentadas. Ressalta-se que não houve utilização dessas ferramentas para geração de dados, resultados, análises técnico-científicas ou conclusões. Assim, todas as decisões acadêmicas e a validação final do texto e das figuras permanecem integralmente sob responsabilidade do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios de sedimentação realizados sob aquecimento bilateral. Inicialmente, é apresentada a caracterização inicial do sistema, com ênfase nas propriedades físicas dos materiais empregados e nas condições experimentais estabelecidas. Em seguida, analisa-se a evolução térmica do sistema ao longo do processo de sedimentação, incluindo a distribuição espacial da temperatura e sua variação temporal. A análise visual da sedimentação, realizada com o auxílio de partículas traçadoras, é então discutida de forma integrada ao campo térmico imposto. Posteriormente, são apresentados os perfis finais de concentração volumétrica de sólidos determinados por meio da técnica de atenuação de raios gama, bem como sua distribuição espacial após a sedimentação. Por fim, os resultados são discutidos de maneira integrada, considerando a influência do campo térmico, a comparação com dados da literatura e as limitações experimentais do estudo, culminando na síntese dos principais achados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO SISTEMA

Nesta etapa, foram apresentados os resultados referentes à caracterização inicial dos materiais e da suspensão estudada, com vistas a estabelecer as bases físico-químicas necessárias à interpretação dos fenômenos de sedimentação subsequentes. Inicialmente, foram discutidos os ensaios de picnometria, empregados para a determinação da densidade real das partículas sólidas, parâmetro essencial para a estimativa do diferencial de densidade sólido-fluido e para a análise do regime de sedimentação. Em seguida, foram apresentados os perfis granulométricos obtidos para cada material, permitindo a avaliação da distribuição de tamanhos de partículas e de sua influência na velocidade terminal e na interação hidrodinâmica entre os constituintes do sistema. Por fim, foi analisado o experimento preliminar conduzido para a determinação da fração ideal de traçador na suspensão, etapa fundamental para garantir adequada detecção e contraste experimental sem alterar significativamente o comportamento reológico e sedimentar do meio disperso.

4.1.1 Propriedades físicas dos materiais

A caracterização física dos materiais empregados neste estudo constitui etapa essencial para a correta interpretação dos fenômenos de sedimentação analisados ao longo do trabalho. Em sistemas particulados submetidos à ação gravitacional, a dinâmica de redistribuição espacial das partículas é governada fundamentalmente pelo diferencial de densidade entre sólido e fluido e pela distribuição de tamanhos das partículas. Dessa forma, foram determinadas experimentalmente as densidades reais por picnometria e as distribuições granulométricas por difração a laser, visando estabelecer base quantitativa para a análise comparativa entre o sólido principal e o material traçador.

4.1.1.1 Densidades

A densidade real das partículas foi determinada por meio de ensaios de picnometria, permitindo avaliar o parâmetro ($\rho_{\text{sólido}} - \rho_{\text{fluido}}$), diretamente associado à força motriz da sedimentação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de picnometria.

Carbonato de Cálcio		Óxido de Sílica tingido de preto	
Ensaio	Densidade (g/cm ³)	Ensaio	Densidade (g/cm ³)
1	2,6754	1	2,5861
2	2,6589	2	2,6019
3	2,6436	3	2,5742
4	2,6507	4	2,594
5	2,6627	5	2,6098
Média	2,6583	Média	2,5932
Desvio Padrão	0,0121	Desvio Padrão	0,0138

Fontes: dados experimentais do autor.

O carbonato de cálcio apresentou densidade média de $2,66 \pm 0,01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, enquanto o óxido de sílica tingido apresentou densidade média de $2,59 \pm 0,01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Os baixos desvios padrão observados indicam elevada repetibilidade experimental, reforçando a confiabilidade das medições realizadas.

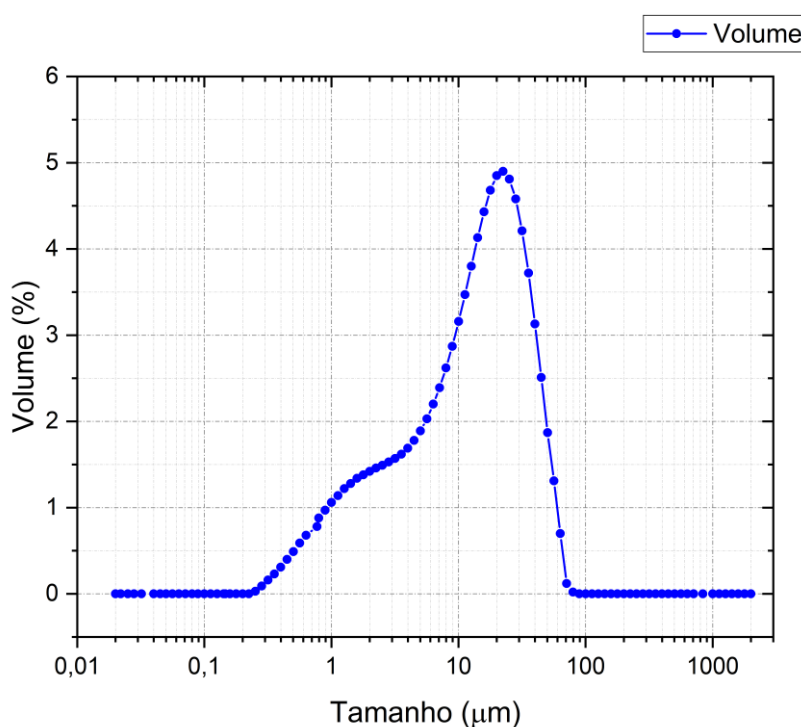
A diferença absoluta entre as densidades médias foi de aproximadamente $0,065 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, correspondendo a uma variação relativa próxima de 2,5%. Embora esse diferencial atue diretamente sobre a força gravitacional resultante aplicada às partículas, sua magnitude é relativamente reduzida quando comparada à densidade absoluta dos sólidos envolvidos. Sob mesmas condições de fluido e regime de escoamento, essa diferença tende a produzir variações discretas na velocidade terminal teórica, não sendo suficiente para induzir segregação significativa exclusivamente por massa específica.

Essa proximidade constitui elemento central na validação do óxido de sílica tingido como traçador. Caso houvesse discrepância elevada de densidade, o traçador poderia apresentar taxa de sedimentação sistematicamente distinta, comprometendo sua capacidade de representar o comportamento do sólido principal. No presente caso, os resultados indicam compatibilidade adequada do ponto de vista da força motriz gravitacional.

4.1.1.2 Distribuição granulométrica

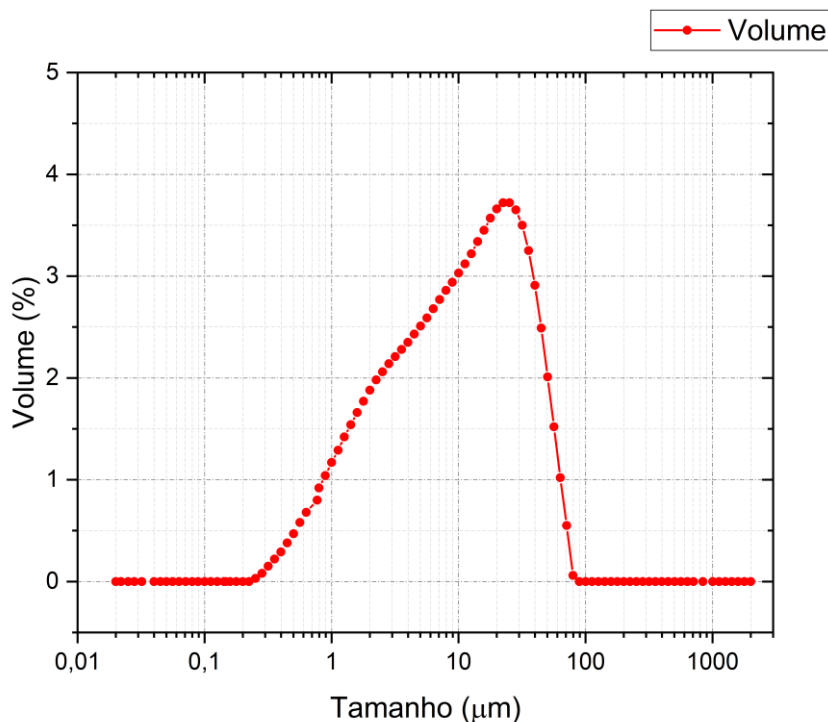
A distribuição granulométrica dos materiais foi determinada por difração a laser, utilizando analisador Mastersizer 2000. Os perfis obtidos estão apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 - Análise granulométrica do CaCO_3 .



Fonte: O autor.

Figura 4.2 - Análise granulométrica do Óxido de Sílica Tingido.



Fonte: Dados experimentais do autor.

Para o carbonato de cálcio, obteve-se $D[4,3]$ igual a $17,646 \mu\text{m}$ e $D[3,2]$ igual a $4,305 \mu\text{m}$, com valores característicos $d(0,1) = 1,544 \mu\text{m}$, $d(0,5) = 14,147 \mu\text{m}$ e $d(0,9) = 39,457 \mu\text{m}$. O span igual a 2,680 indica dispersão granulométrica moderada, evidenciando distribuição assimétrica com presença relevante de frações mais grossas.

Para o óxido de sílica tingido, os valores obtidos foram $D[4,3]$ igual a $16,517 \mu\text{m}$ e $D[3,2]$ igual a $3,926 \mu\text{m}$, com $d(0,1) = 1,470 \mu\text{m}$, $d(0,5) = 10,741 \mu\text{m}$ e $d(0,9) = 40,761 \mu\text{m}$. O span igual a 3,658 indica distribuição um pouco mais dispersa, embora mantendo significativa sobreposição com a faixa granulométrica do carbonato.

A proximidade entre os valores de $D[4,3]$ demonstra que, do ponto de vista volumétrico, ambos os materiais apresentam tamanho médio da mesma ordem de grandeza. A sobreposição observada nas regiões intermediárias da distribuição, especialmente entre 10 e $40 \mu\text{m}$, é particularmente relevante, pois essas frações representam parcela significativa do volume total de partículas e exercem contribuição dominante na dinâmica de sedimentação.

Em regime laminar, a velocidade terminal de sedimentação é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. Assim, pequenas variações de tamanho podem resultar em diferenças mais pronunciadas na taxa de sedimentação individual. Entretanto, como as distribuições

apresentam ampla interseção e valores médios próximos, não se espera comportamento hidrodinâmico substancialmente distinto entre o carbonato de cálcio e o traçador sob as mesmas condições operacionais.

Além disso, a presença de distribuição polidispersa em ambos os materiais implica que o processo de sedimentação não ocorre de maneira uniforme para todas as partículas, mas sim como resultado da interação entre diferentes classes de tamanho, favorecendo inicialmente a sedimentação das frações mais grossas e, posteriormente, a consolidação progressiva do leito por partículas mais finas. A similaridade entre os perfis granulométricos reforça a expectativa de que essa dinâmica ocorra de forma comparável para ambos os materiais.

4.1.1.3 Síntese da caracterização física

A análise integrada das densidades e das distribuições granulométricas demonstra que o óxido de sílica tingido apresenta compatibilidade física adequada para atuar como traçador do carbonato de cálcio. A diferença de densidade é reduzida e as distribuições de tamanho apresentam significativa sobreposição, não sendo identificadas discrepâncias capazes de comprometer a representatividade do traçador no sistema.

Esses resultados estabelecem base experimental consistente para as etapas subsequentes do trabalho. A partir dessa caracterização, torna-se possível interpretar os ensaios de sedimentação e as análises complementares, como a técnica de atenuação de raios gama, com maior segurança quanto à equivalência física entre o sólido principal e o material traçador.

4.1.2 Ensaio preliminar de sedimentação em proveta

Com o objetivo de avaliar preliminarmente a influência do material traçador sobre a dinâmica de sedimentação, foram realizados ensaios em proveta com duas formulações distintas: suspensão composta exclusivamente por carbonato de cálcio e suspensão contendo carbonato de cálcio com adição de óxido de sílica tingido.

Os registros fotográficos foram organizados de forma comparativa, com as imagens dispostas lado a lado para cada instante de tempo, permitindo a avaliação visual direta da evolução da interface sólido-líquido e da formação do leito sedimentado. A sequência completa dos registros está apresentada na Figura 4.3.

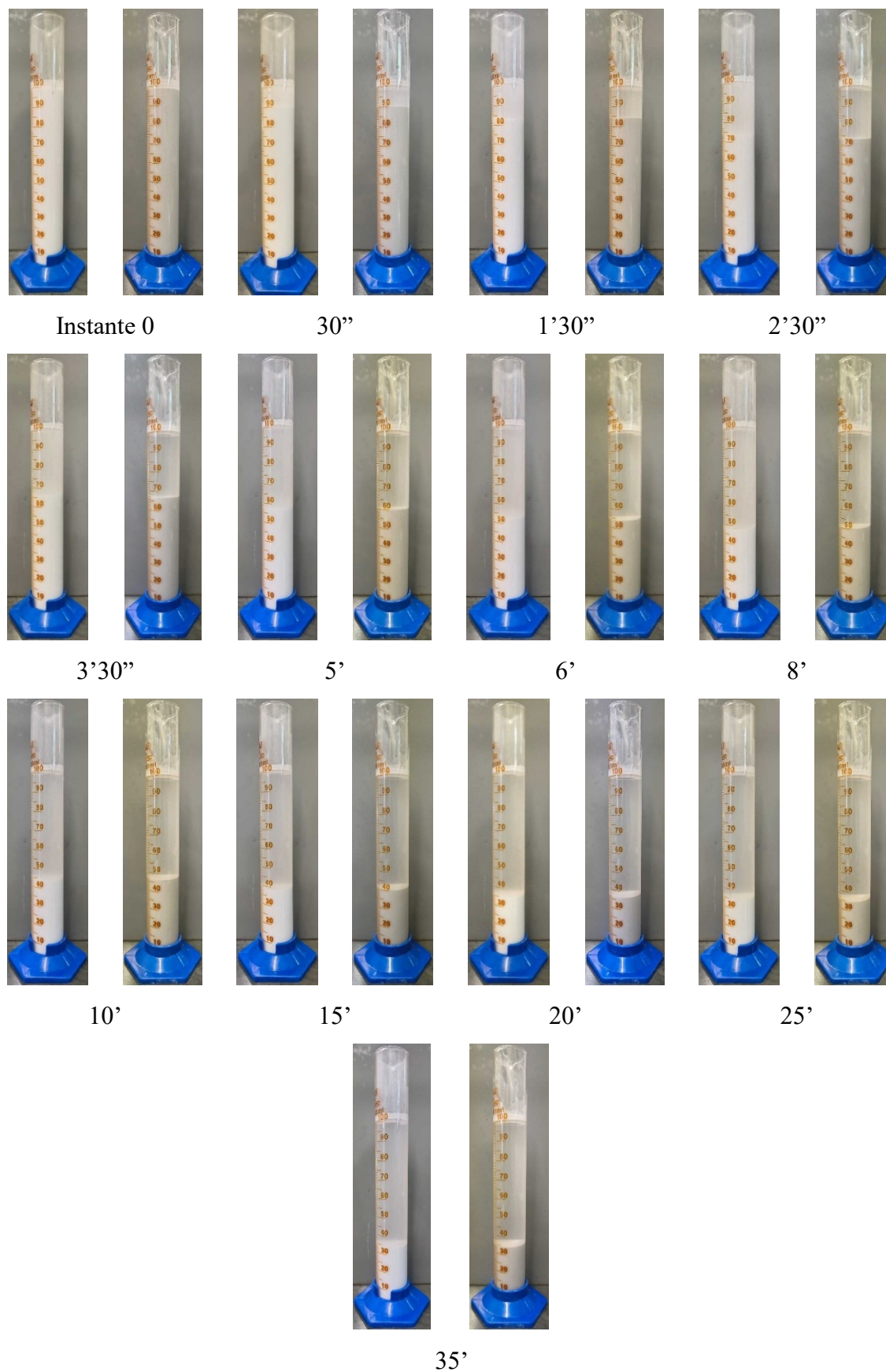


Figura 4.3 - Comparação lado a lado da sedimentação em proveta.

Fonte: o autor.

A análise sequencial das imagens evidencia que ambos os sistemas apresentaram comportamento temporal bastante semelhante. Em ambos os casos observa-se, nos instantes iniciais, suspensão visualmente homogênea, seguida pela formação progressiva de uma interface bem definida entre a fase clarificada e a região em sedimentação. Com o avanço do tempo ocorre a descida contínua dessa interface, acompanhada da compactação gradual do leito na região inferior da proveta.

A presença do óxido de sílica tingido promoveu apenas variações discretas na dinâmica do processo, perceptíveis principalmente nos instantes intermediários. Visualmente, a taxa de descida da interface apresentou leve redução no sistema contendo traçador; entretanto, essa diferença não se mostrou suficientemente pronunciada para caracterizar modificação relevante no mecanismo predominante de sedimentação. Não foram observados indícios de segregação preferencial ou formação de camadas distintas que indicassem comportamento diferencial significativo entre os sólidos.

Com base nos registros visuais, foi construído o gráfico da evolução da altura do leito sedimentado em função do tempo para ambos os sistemas, apresentado na Figura 4.4.

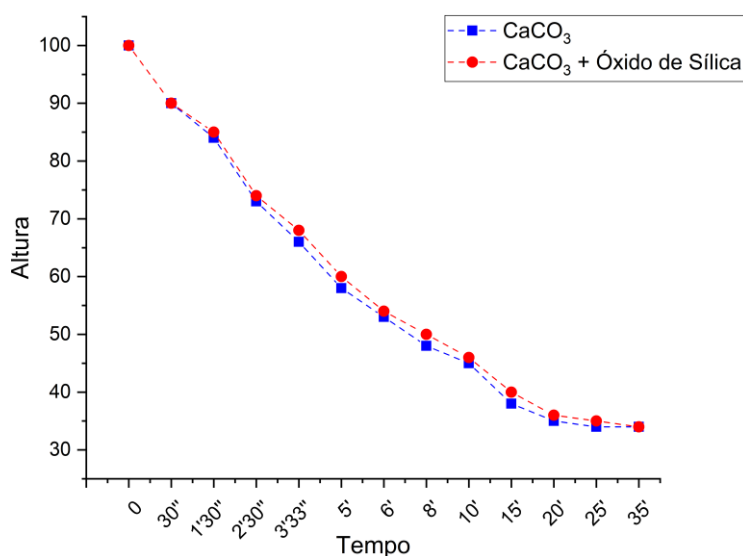


Figura 4.4 - Evolução da altura do leito sedimentado em função do tempo.

Fonte: o autor.

Conforme observado na Figura 4.4, as curvas obtidas para os dois sistemas praticamente se sobrepõem ao longo de todo o intervalo analisado. A inclinação inicial das curvas, associada à taxa de sedimentação predominante, mostrou-se equivalente, indicando que a adição do traçador não alterou de maneira relevante o regime hidrodinâmico do sistema. Nos instantes

finais, a altura estabilizada do leito apresentou valores muito próximos, sugerindo que o empacotamento final das partículas também não foi significativamente afetado.

Esses resultados são coerentes com a caracterização física previamente realizada. A compatibilidade de densidades determinada por picnometria, aliada à significativa sobreposição das distribuições granulométricas, contribuiu para que o óxido de sílica tingido acompanhasse a dinâmica do carbonato de cálcio sem promover segregação gravitacional relevante ou alteração estrutural do leito sedimentado.

Dessa forma, o ensaio preliminar validou experimentalmente a utilização do traçador no sistema estudado, demonstrando que a fração empregada é suficientemente baixa para preservar o comportamento global da suspensão. Essa validação é fundamental para assegurar que as análises subsequentes de sedimentação, bem como a aplicação da técnica de atenuação de raios gama, representem adequadamente a redistribuição espacial do sólido principal.

4.2 EVOLUÇÃO TÉRMICA DO SISTEMA DURANTE A SEDIMENTAÇÃO

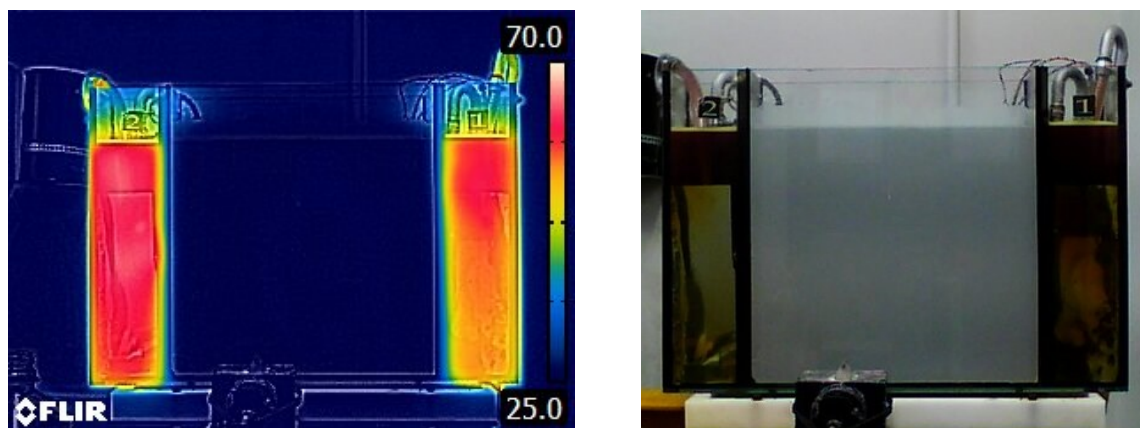
O processo de sedimentação foi acompanhado simultaneamente por registros visuais convencionais e por imagens termográficas, permitindo observar, de maneira integrada, a redistribuição espacial dos sólidos e a evolução do campo térmico no interior da célula experimental. Embora a quantificação da concentração volumétrica local de sólidos seja apresentada posteriormente, uma vez que as medições foram realizadas 24 horas após o retorno do sistema à temperatura ambiente, a análise aqui desenvolvida tem caráter fenomenológico e visa compreender como a reorganização interna da suspensão se reflete no comportamento térmico observado ao longo do ensaio.

A sedimentação e o transporte de calor ocorrem de forma concomitante. À medida que as partículas se redistribuem sob ação gravitacional, modificam-se localmente as propriedades efetivas do meio, alterando sua resposta térmica. Assim, a análise do campo de temperatura não é tratada como fenômeno isolado, mas como manifestação indireta da dinâmica estrutural da suspensão.

4.2.1 Distribuição espacial da temperatura

No instante inicial do ensaio, antes que a sedimentação produza variações significativas na concentração de sólidos ao longo da altura, o campo térmico apresenta configuração bem definida, determinada predominantemente pelo sistema de controle térmico lateral.

Figura 4.5 - Imagem normal e termográfica no instante inicial.



Fonte: O autor.

Conforme observado na Figura 4.5, as colunas laterais responsáveis pelo condicionamento térmico apresentam temperaturas superiores às da região central, estabelecendo gradiente térmico predominantemente lateral. A região central, correspondente ao volume ocupado pela suspensão, apresenta distribuição relativamente homogênea no plano horizontal, sem evidências de gradientes abruptos ou instabilidades térmicas.

Esse comportamento indica que o sistema inicia o ensaio sob condição térmica controlada, na qual o transporte de calor ocorre de maneira previsível, sem indução de movimentos convectivos significativos capazes de interferir na dinâmica gravitacional da sedimentação. Estabelecida essa condição inicial, torna-se possível avaliar de que forma o campo térmico evolui à medida que a estrutura interna da suspensão se modifica.

4.2.2 Estratificação térmica associada à formação do leito

À medida que a sedimentação se desenvolve, a redistribuição vertical das partículas passa a influenciar diretamente o comportamento térmico do sistema. Nos instantes iniciais, quando a suspensão ainda apresenta concentração de sólidos aproximadamente homogênea ao longo da altura, a região central da célula responde de maneira relativamente uniforme ao gradiente imposto pelas colunas laterais. No entanto, com a formação progressiva da interface sólido-líquido e o início da consolidação do leito na região inferior, observa-se diferenciação gradual na resposta térmica ao longo da altura da célula.

Figura 4.6 - Sequência temporal representativa de imagens normais e termográficas.



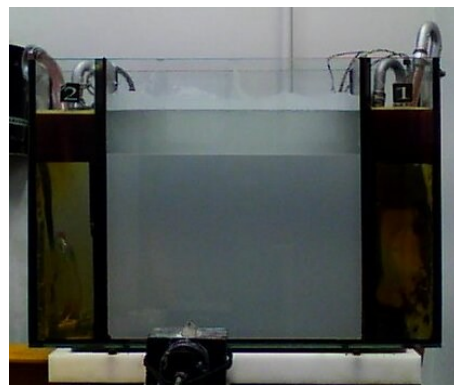
0



5 minutos



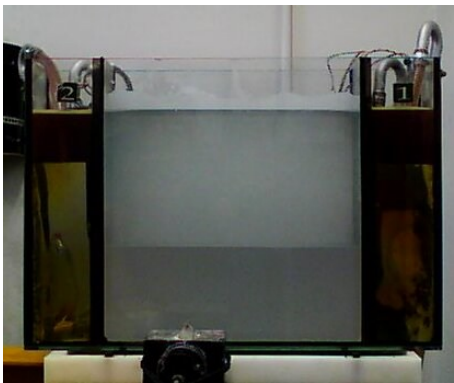
10 minutos



15 minutos



30 minutos



1 hora



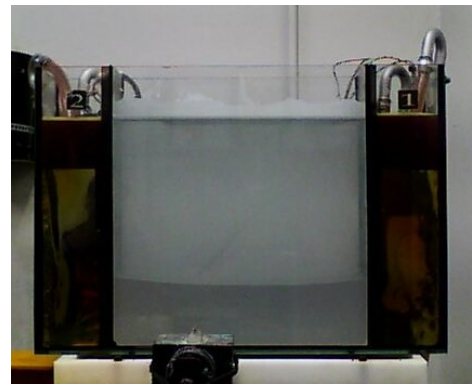
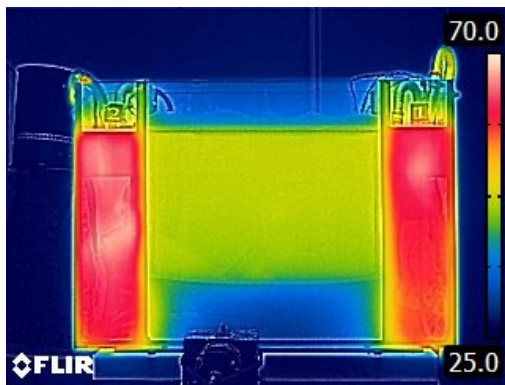
1 hora e 30 minutos



2 horas



3 horas



4 horas

Fonte: O autor.

A região superior, progressivamente clarificada, mantém elevada mobilidade do fluido, condição que favorece mecanismos de transporte térmico associados ao movimento do próprio fluido. Já na região inferior, à medida que o leito sedimentado se consolida, a mobilidade do fluido intersticial é reduzida, restringindo a contribuição convectiva para a transferência de calor.

Essa transição implica mudança no mecanismo predominante de transporte térmico ao longo da altura da célula. Enquanto a região clarificada apresenta resposta térmica mais

dinâmica, o leito sedimentado passa a comportar-se como meio particulado saturado, no qual o transporte ocorre predominantemente por condução através da matriz sólida e do fluido confinado entre as partículas. Como consequência, a região inferior tende a apresentar maior estabilidade térmica e menor sensibilidade a variações instantâneas do campo imposto lateralmente.

Dessa forma, a sedimentação não promove apenas estratificação da concentração de sólidos, mas também estratificação das propriedades térmicas efetivas do sistema. O leito consolidado passa a atuar como região de maior resistência térmica quando comparado à suspensão ainda móvel ou ao fluido clarificado, modificando o padrão global de distribuição de temperatura ao longo do tempo.

Contudo, além dessa diferenciação vertical, os registros revelam também modificação espacial ao longo da largura da célula, indicando que o processo não ocorreu de maneira perfeitamente uniforme em toda a seção transversal.

4.2.3 Não uniformidade espacial do leito sedimentado

A análise visual dos instantes finais do ensaio evidencia que a altura do leito sedimentado não se distribuiu uniformemente ao longo da largura da célula. Observou-se formação de colunas de sedimento com maior altura nas regiões próximas aos reservatórios laterais de óleo, enquanto a região central apresentou espessura inferior.

Figura 4.7 - Imagem destacando a diferença lateral de altura do leito.



Fonte: O autor.

Considerando que o equipamento encontrava-se devidamente nivelado, essa assimetria não pode ser atribuída a inclinação geométrica do aparato, caracterizando-se como

comportamento intrínseco ao sistema durante o processo de sedimentação. Em paralelo, os registros termográficos indicaram presença de gradiente térmico significativo nas proximidades das laterais ao longo do ensaio, o que sugere que as condições de contorno térmicas podem ter exercido influência sobre a dinâmica interna da suspensão.

Do ponto de vista fenomenológico, duas interpretações principais podem ser consideradas para explicar essa diferença de altura observada.

A primeira hipótese envolve variação no grau de compactação do leito. Nesse cenário, a massa total de sólidos depositada poderia ser semelhante ao longo da largura da célula, porém com estrutura interna menos densa nas regiões próximas às paredes, resultando em maior altura aparente do leito.

A segunda hipótese considera a possibilidade de redistribuição efetiva de partículas ao longo da seção transversal durante o ensaio. Diferenças locais nas condições de escoamento do fluido poderiam ter promovido transporte lateral de partículas antes de sua deposição definitiva, levando a acúmulo relativo nas regiões próximas aos reservatórios.

A distinção entre essas duas possibilidades não pode ser estabelecida apenas com base na inspeção visual. Por essa razão, a análise quantitativa das frações volumétricas de sólidos ao longo da seção transversal, apresentada em seção subsequente, será fundamental para verificar se a diferença observada decorre predominantemente de variação de compactação ou de redistribuição real de massa.

Assim, os registros térmicos e visuais indicam que a sedimentação no sistema estudado apresentou caráter multidimensional mais complexo do que o esperado para uma geometria idealizada, envolvendo não apenas estratificação vertical, mas também variação lateral associada às condições reais de contorno térmico.

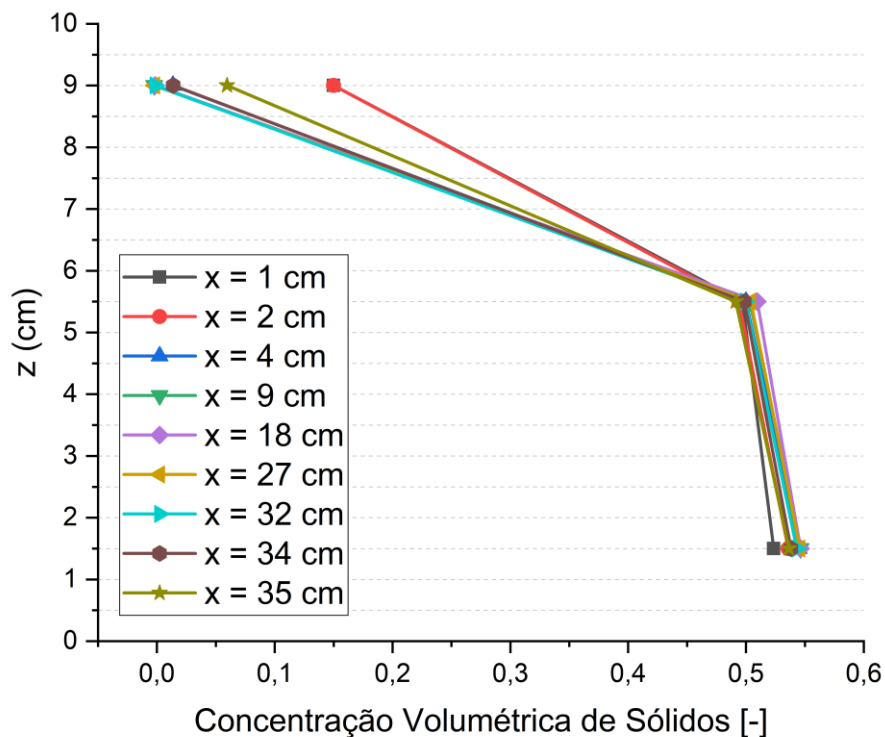
4.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS

A conversão das contagens obtidas pela técnica de atenuação de raios gama em concentração volumétrica local de sólidos permitiu a caracterização quantitativa da estrutura final do sistema após o processo de sedimentação. A partir desses dados, foram construídos perfis verticais de ε_s para diferentes posições transversais ao longo da largura da célula, permitindo avaliar simultaneamente a estratificação vertical do sistema e possíveis variações espaciais associadas ao campo térmico imposto lateralmente.

4.3.1 Perfis verticais e posição da interface sólido-líquido

A Figura 4.8 apresenta os perfis verticais de concentração volumétrica de sólidos em função da coordenada vertical z , obtidos para posições transversais distribuídas entre a região central e as proximidades das paredes. A análise desses perfis permite identificar a posição da interface sólido-líquido e avaliar a uniformidade do leito sedimentado ao longo da largura da célula.

Figura 4.8 - Perfis verticais de concentração volumétrica de sólidos.



Fonte: O autor.

Conforme observado na Figura 4.8, distinguem-se duas regiões bem definidas. Na porção superior da célula, correspondente ao fluido clarificado, os valores de ϕ aproximam-se de zero em todas as posições analisadas, indicando ausência significativa de partículas em suspensão ao final do ensaio. Na região inferior, correspondente ao leito consolidado, os valores situam-se aproximadamente entre 0,52 e 0,55 na base e entre 0,49 e 0,51 na região intermediária, evidenciando empacotamento denso e estruturalmente homogêneo.

A transição entre essas duas regiões ocorre de forma abrupta, caracterizando interface bem definida entre leito sedimentado e clarificado. A posição dessa interface foi determinada a

partir do ponto de maior gradiente vertical de ε_s , permitindo estimar a altura do leito sedimentado em cada posição transversal.

A comparação entre os perfis mostra que a interface não é horizontal ao longo da largura da célula. Nas regiões próximas às laterais observa-se deslocamento vertical positivo da interface quando comparado à região central. Embora a diferença seja da ordem de poucos milímetros, ela se repete de forma simétrica em ambas as extremidades, afastando a possibilidade de inclinação do equipamento ou erro geométrico.

Esse resultado demonstra que a sedimentação no sistema estudado não ocorreu de maneira puramente unidimensional, como seria esperado sob condições isotérmicas ideais e geometria simétrica.

4.3.2 Análise quantitativa da compactação

Para complementar a interpretação dos perfis verticais, a Tabela 4.2 apresenta os valores de concentração volumétrica de sólidos em três alturas representativas da célula: $z = 1,5$ cm, correspondente à região inferior do leito; $z = 5,5$ cm, região intermediária; e $z = 9$ cm, região próxima à interface sólido-líquido. Essa análise pontual permite verificar se a diferença de altura observada poderia ser atribuída exclusivamente a variações no grau de compactação do leito.

Tabela 4.2 - Concentração volumétrica de sólidos em diferentes posições transversais e alturas.

Posição (cm)	$z = 1,5$ cm	$z = 5,5$ cm	$z = 9$ cm
x = 1	0,52	0,50	0,15
x = 2	0,54	0,49	0,15
x = 4	0,54	0,50	0,01
x = 9	0,55	0,50	0,00
x = 18	0,55	0,51	0,00
x = 27	0,55	0,50	0,00
x = 32	0,54	0,50	0,00
x = 34	0,54	0,50	0,01
x = 35	0,54	0,49	0,06

Fonte: Dados experimentais do autor.

Os valores apresentados na Tabela 4.2 indicam que, na região inferior do leito ($z = 1,5$ cm), a concentração volumétrica varia entre 0,52 e 0,55, com amplitude inferior a 0,03 ao longo

da largura da célula. Na região intermediária ($z = 5,5$ cm), os valores permanecem entre 0,49 e 0,51. Essa baixa dispersão demonstra que o grau de compactação do leito consolidado é essencialmente uniforme entre centro e laterais.

Se a maior altura lateral decorresse exclusivamente de menor compactação estrutural, seria esperado que essas regiões apresentassem concentração volumétrica média inferior à do centro. No entanto, essa redução não é observada. Os valores no interior do leito mantêm-se praticamente constantes, indicando que a diferença de altura não pode ser explicada apenas por rearranjos estruturais após a deposição.

A evidência mais expressiva encontra-se na altura $z = 9$ cm. Nas posições centrais, a concentração volumétrica é nula, caracterizando presença apenas de fluido clarificado. Já nas proximidades das paredes, os valores atingem 0,15 em $x = 1$ cm e $x = 2$ cm, e ainda 0,06 em $x = 35$ cm. Esses dados confirmam que o leito sedimentado nas regiões laterais se estende verticalmente a alturas superiores às observadas no centro.

Portanto, os resultados quantitativos indicam que houve redistribuição efetiva de sólidos ao longo da largura da célula durante o processo de sedimentação.

4.3.3 Redistribuição transversal e implicações físicas

A assimetria espacial observada, caracterizada por maior altura lateral do leito e manutenção do grau de compactação interna, sugere que o fenômeno se estabeleceu durante a fase dinâmica da sedimentação.

Essa interpretação torna-se consistente quando associada aos resultados térmicos apresentados na Seção 4.2. O aquecimento lateral gerou gradiente térmico significativo nas proximidades dos reservatórios de óleo, promovendo elevação local da temperatura do fluido, redução da viscosidade e diminuição da densidade nessas regiões.

Diferenças de densidade podem induzir circulação natural do fluido. O fluido aquecido tende a ascender junto às paredes, enquanto o fluido relativamente mais frio na região central tende a descer, estabelecendo padrão convectivo transversal. Ainda que de baixa intensidade, esse movimento pode alterar a trajetória das partículas durante os estágios iniciais e intermediários da sedimentação.

O efeito tende a ser mais pronunciado para as frações granulométricas mais finas, cujas velocidades terminais são menores e que permanecem por mais tempo em suspensão, tornando-se mais suscetíveis ao arraste lateral. Como consequência, parte dessas partículas pode ter sido

transportada em direção às paredes antes da consolidação final, contribuindo para o maior acúmulo observado nessas regiões.

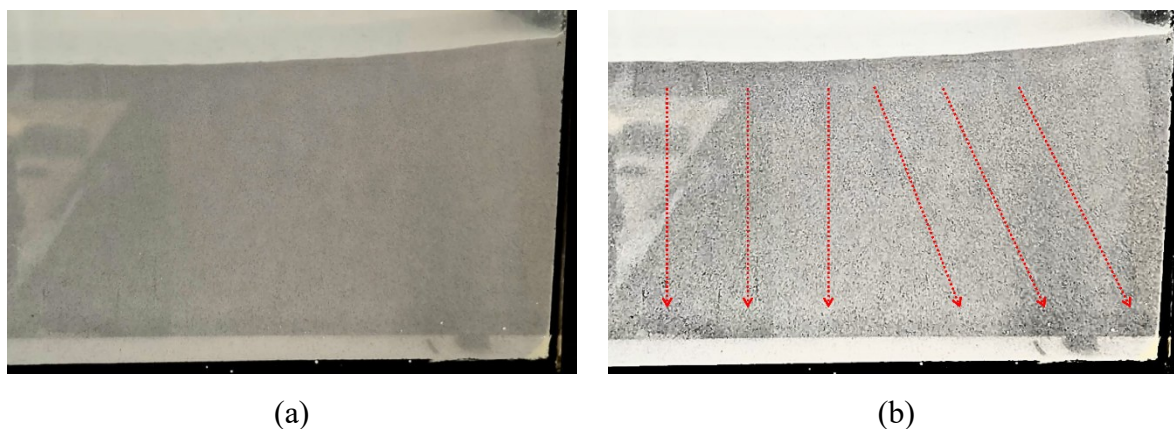
Assim, a análise integrada dos perfis de concentração volumétrica e do campo térmico indica que o processo observado não se limita à sedimentação gravitacional vertical. O sistema apresenta comportamento multidimensional resultante da superposição entre transporte particulado e gradiente térmico lateral, afastando o modelo simplificado de sedimentação isotérmica uniforme.

4.3.4 Evidência visual da orientação preferencial do traçador

Com o objetivo de complementar a análise quantitativa obtida por meio da técnica de atenuação de raios gama, foram examinados os registros visuais do sistema contendo traçador ao final do ensaio. Conforme discutido na Seção 4.1, o óxido de sílica tingido foi previamente validado quanto à compatibilidade de densidade e distribuição granulométrica com o carbonato de cálcio, assegurando que sua dinâmica represente adequadamente o comportamento do sólido principal.

A Figura 4.8 apresenta, lado a lado, a imagem original do leito sedimentado nas proximidades do reservatório 1 contendo o traçador e a mesma imagem após processamento digital aplicado exclusivamente para fins de visualização.

Figura 4.9 - (a) Imagem original do leito com traçador; (b) Imagem tratada com realce de contraste e indicação das linhas de tendência).



Fonte: O autor.

O processamento consistiu na conversão para escala de cinza, com realce de contraste e ajuste de nitidez, visando intensificar a distinção entre o carbonato de cálcio, de tonalidade clara, e o traçador, de tonalidade escura. Ressalta-se que não houve alteração estrutural do

conteúdo da imagem, mas apenas aprimoramento da legibilidade visual das estruturas formadas pelo traçador.

Conforme evidenciado na Figura 4.8(b), observa-se que, na região central da célula, as estruturas formadas pelo traçador apresentam orientação predominantemente vertical, compatível com sedimentação gravitacional sob regime aproximadamente unidimensional. Entretanto, nas regiões próximas às paredes laterais, essas estruturas passam a apresentar inclinação sistemática em direção às extremidades da célula.

Esse padrão não se manifesta de forma isolada ou pontual, mas de maneira progressiva à medida que se aproxima das laterais. A transição entre orientação vertical no centro e orientação inclinada nas proximidades das paredes sugere que as partículas, especialmente aquelas com menor velocidade terminal, não seguiram trajetória exclusivamente vertical durante todo o processo.

Essa observação visual corrobora diretamente os resultados apresentados na Seção 4.3.2. Naquela análise, demonstrou-se que o leito sedimentado apresenta maior altura nas regiões laterais, sem redução correspondente da concentração volumétrica no interior do depósito. A combinação entre maior altura lateral e manutenção do grau de compactação indica redistribuição efetiva de sólidos ao longo da largura da célula.

Adicionalmente, a interpretação visual apresentada nesta subseção é consistente com o campo térmico discutido na Seção 4.2. O gradiente térmico lateral imposto pelo aquecimento nas proximidades dos reservatórios de óleo implica redução local da viscosidade e da densidade do fluido, condições propícias ao estabelecimento de circulação natural. Ainda que de baixa intensidade, esse padrão convectivo pode atuar durante o intervalo em que parte das partículas permanece em suspensão, promovendo componente lateral de deslocamento antes da deposição final.

É importante enfatizar que a imagem tratada não representa diretamente o campo de velocidades do fluido, mas a orientação final das estruturas sedimentadas. Entretanto, a convergência entre evidência visual, assimetria de altura do leito e caracterização do campo térmico confere robustez à hipótese de interação entre sedimentação gravitacional e transporte convectivo induzido termicamente.

Dessa forma, a análise integrada das concentrações volumétricas de sólidos e dos registros visuais do traçador reforça a conclusão de que o sistema apresenta comportamento multidimensional influenciado pelo gradiente térmico lateral, afastando a descrição simplificada de sedimentação isotérmica puramente vertical.

Os resultados apresentados evidenciam, de maneira consistente e fundamentada em dados experimentais quantitativos, a natureza acoplada entre os fenômenos de sedimentação e transferência de calor no sistema submetido a aquecimento lateral. A presença de gradiente térmico transversal alterou localmente as propriedades termofísicas do fluido, estabelecendo condições propícias à circulação natural e promovendo redistribuição espacial de partículas durante a fase dinâmica da sedimentação. Os perfis verticais de concentração volumétrica de sólidos obtidos por TARG confirmaram a formação de leito consolidado com elevado grau de compactação e interface bem definida, ao mesmo tempo em que revelaram assimetria lateral sistemática na altura do leito, sem evidências de variação significativa no empacotamento médio. A análise visual com traçador e a consideração da distribuição granulométrica reforçaram a interpretação de que partículas finas permaneceram mais suscetíveis ao arraste lateral induzido por convecção natural de baixa intensidade. Ademais, a distinção entre regimes predominantes de convecção no fluido clarificado e condução no interior do leito consolidado corrobora a complexidade termo-hidrodinâmica do sistema. Conclui-se, portanto, que o comportamento observado não pode ser adequadamente descrito por abordagem isotérmica unidimensional, sendo imprescindível considerar a interação multidimensional entre campo térmico e transporte particulado para a correta representação física do processo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi desenvolvido com o propósito de investigar, sob abordagem experimental integrada, a influência da temperatura e da presença de gradientes térmicos no processo de sedimentação de partículas sólidas, na estrutura final do leito sedimentado e no deslocamento espacial das partículas ao longo do sistema. A estratégia metodológica adotada combinou caracterização físico-química dos materiais, análise térmica do domínio experimental e determinação quantitativa da concentração volumétrica de sólidos por meio da técnica de atenuação de raios gama, associada ao uso de traçador visual, mostrando-se tecnicamente consistente e adequada para a compreensão acoplada dos fenômenos de transporte envolvidos.

A caracterização inicial assegurou a representatividade do sistema particulado, confirmando a compatibilidade entre o carbonato de cálcio e o óxido de sílica tingido quanto à densidade e à distribuição granulométrica. A proximidade entre as propriedades físicas dos materiais garantiu que o traçador reproduzisse de forma fiel o comportamento sedimentar do sólido principal, conferindo robustez às análises cinéticas e estruturais realizadas e assegurando confiabilidade às interpretações subsequentes.

A análise térmica evidenciou a formação de gradiente lateral significativo nas proximidades dos reservatórios de óleo, estabelecendo condição não isotérmica ao longo da largura da célula. Esse gradiente promoveu variações locais de viscosidade e densidade do fluido contínuo, criando condições favoráveis à ocorrência de circulação natural de baixa intensidade. Verificou-se, portanto, que mesmo diferenças térmicas moderadas são capazes de modificar o campo hidrodinâmico do sistema, influenciando diretamente a dinâmica de sedimentação.

Os perfis verticais de concentração volumétrica de sólidos obtidos por TARG indicaram formação de interface sólido-líquido bem definida e leito consolidado com concentração volumétrica elevada e relativamente uniforme na região inferior do depósito. Apesar do deslocamento sistemático da interface nas regiões laterais, caracterizando leito mais elevado próximo às paredes, não se verificou redução significativa da concentração volumétrica média nessas áreas, o que permitiu descartar a hipótese de compactação diferenciada como mecanismo predominante. A assimetria observada foi interpretada como resultado de redistribuição efetiva de partículas durante a fase dinâmica da sedimentação.

A análise visual com traçador corroborou essa interpretação ao evidenciar orientação inclinada das estruturas nas proximidades das paredes, em contraste com o padrão predominantemente vertical na região central. A presença de componente lateral de deslocamento antes da consolidação final do leito revelou a atuação de mecanismos convectivos induzidos pelo gradiente térmico. A integração entre observações qualitativas e dados quantitativos permitiu uma interpretação física consistente, reforçando o caráter multidimensional do processo.

Os resultados indicaram ainda a coexistência de regimes distintos de transferência de calor ao longo do sistema, com predominância de convecção na região de fluido clarificado e comportamento compatível com condução no interior do leito sedimentado. Esse contraste evidencia o acoplamento entre sedimentação e transporte de energia, demonstrando que a descrição do fenômeno requer abordagem integrada entre transporte de massa, quantidade de movimento e calor.

Conclui-se, portanto, que a sedimentação sob aquecimento lateral não pode ser adequadamente descrita por modelo unidimensional. O sistema apresenta comportamento multidimensional decorrente da interação entre campo térmico imposto e transporte particulado, sendo a redistribuição lateral de sólidos consequência direta dessa interação. Os resultados obtidos confirmam a sensibilidade do processo às condições térmicas e reforçam a necessidade de considerar explicitamente os efeitos térmicos na modelagem e no controle de sistemas particulados submetidos a gradientes de temperatura.

Como perspectivas de continuidade, recomenda-se o aprimoramento da aquisição de imagens para acompanhamento do traçador sólido, mediante uso de sistemas ópticos de maior resolução espacial e técnicas avançadas de processamento digital, permitindo a quantificação mais precisa das linhas de tendência associadas ao deslocamento lateral das partículas. No âmbito térmico, ajustes mais refinados na escala de cores das imagens termográficas, com redução do intervalo dinâmico e aplicação de paletas mais sensíveis, poderão evidenciar de forma mais clara o gradiente interno da célula, especialmente nas regiões afastadas das fontes de aquecimento. A calibração sistemática da instrumentação e a validação com sensores distribuídos internamente tendem a aumentar a confiabilidade dos mapas térmicos.

Sugere-se, ainda, a aplicação de modelos matemáticos baseados nas equações de conservação de energia e massa para estimativa de propriedades termofísicas efetivas, como a condutividade térmica aparente do leito sedimentado, a partir dos campos térmicos medidos experimentalmente. Procedimentos inversos de identificação de parâmetros poderão correlacionar a estrutura do leito com seu comportamento térmico global, aprofundando a

análise acoplada entre sedimentação e transferência de calor. Por fim, a ampliação da malha de pontos experimentais no interior da célula, tanto para medições de concentração volumétrica quanto para monitoramento térmico, permitirá maior resolução espacial dos perfis, fortalecendo a base experimental necessária para validação de modelos físicos e numéricos mais abrangentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AROUCA, Fábio de Oliveira. **Estudo da sedimentação de suspensões concentradas por atenuação de raios gama**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

AROUCA, F. O.; LOPES, L. C. O.; DAMASCENO, João Jorge Ribeiro. Concentration profiles and iso-concentration curves for batch settling using gamma rays attenuation technique. In: INTERNATIONAL LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY, 5., 2005, Costa do Sauípe. Proceedings [...]. São Paulo: IPEN, 2005. CD-ROM.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. **Transport phenomena**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

BRADFORD, I. D. R. et al. The role of drilling fluids in wellbore stability. *SPE Drilling & Completion*, v. 17, n. 3, p. 129–136, 2002.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Chemical engineering: particle technology and separation processes**. 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.

DAMASCENO, João Jorge Ribeiro. **Uma contribuição ao estudo do espessamento contínuo**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

DAMASCENO, João Jorge Ribeiro; SOUZA, R.; MASSARANI, G. Determination of concentrations profile in a continuous thickener using gamma ray attenuation technique. *Fluid Particle Separation Journal*, Houston, v. 3, n. 4, p. 177–179, 1990.

FAGUNDES, Flávia. **Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da técnica de atenuação de raios gama**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

FAGUNDES, F. M.; SANTOS, N. B. C.; MARTINS, A. L.; DAMASCENO, J. J. R.; AROUCA, F. O. 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.

FAGUNDES, F. M.; SANTOS, N. B. C.; FAIM, J. G. P.; DAMASCENO, J. J. R.; AROUCA, F. O. Study of the effect of particle size and mixture on sediment formed in the solid-liquid separation process in polymeric aqueous fluid through the gamma ray attenuation technique. 2019. Resumo expandido.

FAGUNDES, F. M.; SANTOS, N. B. C.; BASILIO, A.; SOUZA, E. A.; DAMASCENO, J. J. R.; AROUCA, F. O. Evaluation of low-gravity-solids sedimentation in non-Newtonian synthetic-based drilling fluids monitored by gamma-ray attenuation technique. *Separation Science and Technology*, v. 57, p. 1–11, 2022.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Effect of temperature on sedimentation of food suspensions. *Journal of Food Engineering*, v. 89, n. 3, p. 269–276, 2008.

GUAZZELLI, Élisabeth; HINCH, John. Fluctuations and instability in sedimentation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 43, p. 97–116, 2011.

KNOLL, Glenn F. **Radiation detection and measurement**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, v. 48, p. 166–176, 1952.

MACENIĆ, M.; KOVAČEVIĆ, D.; JOVANOVIĆ, M. Geothermal gradient and its influence on wellbore conditions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 42, n. 9, p. 1085–1096, 2020.

MARQUES FAGUNDES, Flávia; GIL DE OLIVEIRA, Gabriela; BRANDÃO COSTA SANTOS, Nara; DAMASCENO, João Jorge Ribeiro; AROUCA, Fábio de Oliveira. 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.

MKPENIE, V. N.; ABIA, A. A.; EKPE, S. D. Influence of temperature on sedimentation of particles in suspension. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 2, n. 5, p. 124–130, 2007.

MOREIRA, Rodrigo Leite. **Aplicação da técnica de atenuação de raios gama no estudo da sedimentação de partículas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidisation: Part I. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v. 32, p. 35–53, 1954.

RUIZ, M. I.; AROUCA, F. O.; MURATA, V. V.; DAMASCENO, João Jorge Ribeiro. The use of gamma rays attenuation technique in the characterisation and mathematical modelling of batch sedimentation. In: WORLD FILTRATION CONGRESS, 8., 2000, Brighton. Proceedings [...]. Brighton: Elsevier Science, 2000. v. 1, p. 407–410.

SANTOS, N. B. C.; FAGUNDES, F. M.; FAIM, J. G. P.; SÁ, L. F. R.; SOUZA, E. A.; DAMASCENO, J. J. R.; AROUCA, F. O. Evaluation of the settling behavior of hematite in an olefin-based drilling fluid using gamma-ray attenuation technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 192, p. 107281, 2020.

SCHIMICOSKI, R. S.; SOUZA, E. A.; FAGUNDES, F. M.; DAMASCENO, João Jorge Ribeiro; AROUCA, F. O. Analysis of solid concentration profiles in particle sedimentation in directional reservoirs using the gamma-ray attenuation technique. *Geoenergy Science and Engineering*, v. 251, p. 213865, 2025.

STOKES, George Gabriel. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, v. 9, p. 8–106, 1851.

XU, Y.; ZHANG, J.; LI, X. Temperature-dependent sedimentation behavior of particle suspensions. *Powder Technology*, v. 370, p. 1–10, 2020.