



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química



RAQUEL STAVALE SCHIMICOSKI

ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE
PARTÍCULAS EM RESERVATÓRIOS
INCLINADOS UTILIZANDO A TÉCNICA
DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

Uberlândia – MG

2024

RAQUEL STAVALE SCHIMICOSKI

ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS EM
RESERVATÓRIOS INCLINADOS UTILIZANDO A TÉCNICA
DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

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

Área de concentração: Processos de separação

Orientadores: Fábio de Oliveira Arouca
João Jorge Ribeiro Damasceno

Uberlândia - MG

2024

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

S335 Schimicoscki, Raquel Stavale, 1994-
2024 Estudo Da Sedimentação De Partículas Em Reservatórios
Inclinados Utilizando A Técnica De Atenuação De Raios
Gama [recurso eletrônico] / Raquel Stavale Schimicoscki.
- 2024.

Orientador: Fábio de Oliveira Arouca.
Coorientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.59>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. Arouca, Fábio de Oliveira,
1977-, (Orient.). II. Damasceno, João Jorge Ribeiro,
1957-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

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



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 1/2024, PPGEQ				
Data:	26 de janeiro de 2024	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:50
Matrícula da Discente:	11923EQU006				
Nome da Discente:	Raquel Stavale Schimicoscki				
Título do Trabalho:	Estudo da Sedimentação de Partículas em Reservatórios Inclinados Utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás e modelagem e simulação numérica de escoamentos de fluidos em seções anulares				
ODS-ONU:	ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Doutora: Flávia Marques Fagundes - PPD/FEQUI/UFU e Professores Doutores: Bruno Arantes Moreira - FAEN/UFGD, Eduardo Hiromitsu Tanabe - DEQ/UFSM, Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU, Rafael Bruno Vieira - PPGEQ/UFU, João Jorge Ribeiro Damasceno - PPGEQ/UFU, coorientador, e Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

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

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

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos,

conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Jorge Ribeiro Damasceno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Arantes Moreira, Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Hiromitsu Tanabe, Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávia Marques Fagundes, Usuário Externo**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Bruno Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/01/2024, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5133726** e o código CRC **56ACD43B**.

“A persistência é o menor caminho para o êxito”. (Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, meu irmão Igor e minha mãe Regina. Minha mãe que sempre me apoiou em todos os sentidos e incentivou nos estudos. Agradeço também aos dois pelo carinho, amor, incentivo e apoio em todos os momentos. Amo vocês!

Ao meu namorado, Matheus, que esteve ao meu lado nessa reta final, oferecendo ajuda, carinho, incentivo e muito apoio, para toda e qualquer situação. Obrigada!

Aos amigos do laboratório Hélio, Gabriel e principalmente a Flávia e ao Adam que sempre me ajudaram, compartilharam seus conhecimentos e tornaram esse dia a dia no laboratório muito mais prazeroso. Obrigada pelo companheirismo!

Aos meus professores e orientadores, Prof. Dr. Fabio de Olivera Arouca e Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno, pelo apoio, incentivo e compreensão para que eu conseguisse concluir o doutorado. Sem vocês não teria sido possível!

Por fim, eu agradeço a todos que participaram dessa jornada pelas inúmeras vezes que acreditaram em mim.

RESUMO

A perfuração direcional de poços inclinados, em contraste com as técnicas tradicionais de perfuração vertical, possibilita o aumento da produtividade dos reservatórios, maximiza e viabiliza a exploração de campos petrolíferos em localizações de difícil acesso. Considerando que fluidos de perfuração estão sujeitos a sedimentação de partículas, e que a sua sedimentação não é desejada pela indústria petrolífera. Pouco se sabe sobre os efeitos do ângulo de inclinação do poço na sedimentação em tais reservatórios, não se tem estudos utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) em poços direcionais. Quando o fluxo de fluido de perfuração é cessado, esses sólidos naturalmente tendem a sedimentar, podendo comprometer a retomada do processo e causar danos aos equipamentos. Diante desse cenário, este trabalho busca avançar no entendimento da influência da inclinação do poço na sedimentação de sólidos no interior dele. Para tanto, foram preparadas suspensões, newtonianas (água com CaCO_3 e glicerina com microesferas de vidro) e não newtonianas (goma xantana com microesferas de vidro), e realizados os monitoramentos da concentração volumétrica local de sólidos ao longo do tempo, pela TARG, em diferentes posições do tubo de teste e em quatro diferentes inclinações em relação ao eixo vertical (0° , 30° , 45° e 60°). Observou-se que quanto maior o ângulo de inclinação, maior a velocidade de sedimentação dos sólidos e que o efeito conhecido como *Boycott* se torna evidente e importante durante a separação da suspensão. Além disso existe uma mudança na dinâmica da sedimentação relacionada à inclinação do recipiente e às características reológicas dos fluidos, associadas ao efeito *Boycott* e à gelificação das estruturas do biopolímero. Dessa forma, ao escolher os poços direcionais, deve-se escolher entre os benefícios que os poços inclinados oferecem, como maior produtividade e menor impacto ambiental, e o aumento da velocidade de sedimentação dos sólidos nos fluidos de perfuração que pode atrapalhar a etapa de perfuração.

Palavras-chave: Sedimentação, poços direcionais, efeito *Boycott*, atenuação de raios gama.

ABSTRACT

Directional drilling of inclined wells, as opposed to conventional vertical drilling methods, enhances reservoir productivity, allowing for exploration of oil fields in challenging locations. Although drilling fluids experience sedimentation due to solid particles in the fluid formulation and cuttings from rock formation, especially in inclined wells, our understanding of the influence of wellbore inclination on sedimentation in these reservoirs remains insufficient. When the drilling fluid flow ceases, these solids naturally settle, potentially impeding the resumption of the process and causing equipment damage. In response to this challenge, this study aims to advance the understanding of the influence of wellbore inclination on solid sedimentation within it. To achieve this, suspensions (both Newtonian and non-Newtonian) were prepared, and the local volumetric solids concentration was monitored over time using the Gamma Ray Attenuation Technique at various positions within the test tube and at four different inclinations relative to the vertical axis (0° , 30° , 45° , and 60°). It was observed that the greater the inclination angle, the faster the sedimentation rate of solids. The phenomenon known as the Boycott effect becomes evident and significant during the suspension separation. Additionally, there is a change in the sedimentation dynamics related to the inclination of the container and the rheological characteristics of the fluids, associated with the Boycott effect and the gelification of biopolymer structures. Therefore, when opting for directional drilling, a careful balance must be struck between the advantages offered by inclined wells, such as increased productivity and reduced environmental impact, and the higher rate of solids sedimentation in drilling fluids.

Key-words: Settling, inclined wells, *Boycott* effect, gamma ray attenuation.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABELAS	x
Capítulo 1	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estrutura da tese	3
Capítulo 2	5
2.1 Sedimentação	5
2.2 Modelo de Kynch para sedimentação	9
2.3. Fluidos de Perfuração	10
2.4 Reologia.....	15
2.5 Fluido de perfuração e sua reologia.....	18
2.6 Técnicas para estudo da sedimentação	19
2.6.1. Técnicas para o estudo da sedimentação em estado dinâmico.....	19
A. Loop De Escoamento.....	19
B. Viscosímetro VST (viscometer sag test) e VSST (viscometer sag shoe test)	21
2.6.2.Técnicas para o estudo da sedimentação em estado estático	22
A. Teste Estático De Sedimentação.....	22
2.6.3. Técnicas para o estudo da sedimentação tanto em estado dinâmico quanto em estático.....	23
A. Ultrassom.....	23
B. Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	25
C. Técnica de atenuação de raios- γ (TARG).....	26

2.7	Poços inclinados	29
2.8	Sedimentação em poços inclinados	33
Capítulo 3		40
3.1	Materiais Sólidos	41
3.1	Caracterização dos materiais sólidos	41
3.2	Análise granulométrica	42
3.3	Determinação esfericidade dos materiais sólidos	45
3.4	Fluidos newtonianos e não-newtonianos	47
3.5	Preparo das soluções de glicerol e de goma xantana	48
3.6	Comportamento reológico dos fluidos.....	49
a)	Reogramas (Viscosidade x Taxa de Deformação):.....	49
b)	Técnica de Histerese:	50
c)	Testes a Taxa de Deformação Constante (Pico de tensão):	50
3.7	Metodologia Experimental	51
3.7	TARG (Técnica de Atenuação de Raios Gama).....	54
3.8	Cálculo do tempo de resolução do sistema de detecção (τ).....	55
3.9	Curvas de calibração das suspensões estudadas e determinação do β	56
3.10	Sedimentação de suspensões em fluidos newtonianos e não-newtonianos	57
3.12.1	Monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo para diferentes posições da proveta de testes (testes dinâmicos).....	58
3.13.	Determinação das curvas de equiconcentração.....	59
3.14.	Determinação da velocidade de sedimentação de suspensões.....	59
Capítulo 4		62
4.1	Comportamento reológico das soluções usadas.....	62
4.1.1	As curvas de escoamento e de viscosidade	62
4.1.2	Histerese	65
4.1.3	Taxa de deformação constante (pico de tensão de deformação).....	66

4.2 Monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo para diferentes posições da proveta de testes	67
4.2.1 Carbonato de Cálcio (CaCO_3)	67
4.2.2 Microesfera de Vidro (ME).....	75
4.3. Comparação entre as suspensões sedimentando em GL e GX	88
4.4 As curvas de equiconcentração	96
4.4.1. Curvas de equiconcentração para as posições próximas a base e intermediárias	96
4.5. Velocidade de sedimentação das partículas.....	106
4.5.1. Velocidade de sedimentação das partículas constituintes das suspensões (v_s).....	107
4.5.1.1. Água e CaCO_3	107
4.5.1.2. GL 92% v/v + ME 20% v/v.....	107
4.5.1.3. GX 0,2% v/v + ME 20% v/v.....	109
4.5.2. Permeabilidade fluidos newtonianos.....	115
CAPÍTULO 5	114
Conclusões	114
Sugestões para trabalhos futuros.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A	126
ANEXO A	134

LISTA DE FIGURAS

Fig 1.1. Tipos de poços de petróleo.....	1
Fig. 1.1. Algumas aplicações dos poços direcionais.....	2
Fig 2.1. Zonas de sedimentação.....	6
Fig. 2.2. Curva sedimentação	7
Fig. 2.3. Classificação dos fluidos.....	16
Fig. 2.4. Perfis das curvas de tensão versus taxa de cisalhamento para os principais tipos de fluidos.	17
Fig. 2.5. Esquema da técnica de loop de escoamento.....	20
Fig. 2.6. Visão esquemática do copo do viscosímetro: (a) VST e (b) VSST.	21
Fig. 2.7. Sistema experimental usado para técnica de teste estático: (a) célula de aço e o protetor interno de Teflon e (b) suporte para o teste com inclinação.	23
Fig. 2.8. Esquema de uma unidade experimental utilizando ultrassom.	24
Fig. 2.9. Esquema da técnica de RMN.	25
Fig. 2.10. Esquema da fonte da TARG.	26
Fig. 2.11. Esquema poço direcional.....	30
Fig. 2.12. Visualização inclinação.....	31
Fig. 2.13. Pontos básicos trajetória direcional.....	31
Fig. 2.14. Trajetória dos poços a partir do raio de curvatura.....	33
Fig. 2.15. Representação efeito Boycott.....	34
Fig. 3.1. (a) Distribuição cumulativa dos pontos experimentais e o ajuste por RRB e (b) frequência em função do diâmetro da partícula do CaCO_3	43
Fig.3.2. (a) Distribuição cumulativa dos pontos experimentais e o ajuste por RRB e (b) frequência em função do diâmetro da partícula da Microesfera de vidro.	44
Fig. 3.3. Análise visual dos materiais sólidos utilizados neste estudo.....	46
Fig.3.4. (a) Unidade experimental completa com fonte, computador, suporte inclinado e plataforma e (b) detalhe do alinhamento dos cubos de chumbo com a fonte de radioisótopo e detector.....	52
Fig. 3.5. Estrutura para mudança de inclinação e referenciais usados nos testes.....	53
Fig. 3.6. Ilustração das alturas adimensionais monitoradas no tubo inclinado a 30°	54

Fig. 3.7. Curva calibração (a) suspensão de CaCO_3 e água, (b) ME e GL 92% v/v e (c) ME e GX 0,2% m/m.	57
Fig. 3.8. Agitador cilíndrico.	58
Fig. 3.9. Ilustração da obtenção dos dados das curvas de equiconcentração.	59
Fig. 3.10. Ilustração do monitoramento da interface descendente em um teste de sedimentação em batelada.	61
Fig. 4.1. Reogramas das soluções de GX e GL.	62
Fig.4.2. Reogramas das soluções de GX com ajuste.	63
Fig. 4.3. Viscosidade aparente em função da taxa de deformação obtidos para as soluções de GL e GX na temperatura de 25°C	64
Fig. 4. 4. Curva de Histerese do fluido de GX.	65
Fig. 4.5. Resposta da solução de GX, para uma taxa de deformação, após repouso de 10 s, 10 min e 30 min.	66
Fig. 4.6. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO_3 inclinação de 0°	68
Fig. 4.7. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO_3 inclinação de 30°	68
Fig. 4.8. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO_3 inclinação de 45°	69
Fig. 4.9. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO_3 inclinação de 60°	69
Fig. 4.10. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,036.	70
Fig. 4.11. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,14.	71
Fig. 4.12. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,21.	71
Fig. 4.13. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões do carbonato na posição 0,36.	72
Fig. 4.14. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões do carbonato de cálcio na posição 0,71.	73
Fig.4.15. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 0°	76

Fig. 4.16. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 30°.....	76
Fig.4.17. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 45°.....	77
Fig.4.18. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 60°.....	77
Fig. 4.19. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,1.....	78
Fig. 4.20. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,17.....	78
Fig. 4.21. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,27.....	80
Fig. 4.22. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,43.....	81
Fig. 4.23 Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,67.....	81
Fig. 4.24. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 0°.....	83
Fig. 4.25. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 30°.....	83
Fig. 4.26. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 45°.....	84
Fig. 4.27. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 60°.....	84
Fig.4.28. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,1.....	85
Fig. 4.29. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,17.....	85
Fig. 4.30. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,43.....	86
Fig. 4.31. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,5.....	87
Fig. 4.32. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,67.....	87

Fig. 4.33. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,10 e inclinação de 60°.....	88
Fig. 4.34. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,10 e inclinação de 30°.....	89
Fig. 4.35. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,27 e inclinação de 30°.....	90
Fig. 4.36. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,17 e inclinação de 30°.....	91
Fig. 4.37. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 60°.....	92
Fig. 4.38. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 30°.....	92
Fig. 4.39. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,50 e inclinação de 30°.....	88
Fig. 4.40. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,67 e inclinação de 30°.....	89
Fig. 4.41. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 45°.....	93
Fig. 4.42. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,50 e inclinação de 45°.....	94
Fig. 4.43. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,67 e inclinação de 0°.....	95
Fig. 4.44. Curvas de equiconcentração para o CaCO ₃ com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 0°.....	97
Fig. 4.45. Curvas de equiconcentração para o CaCO ₃ com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 30°.....	98
Fig. 4.46. Curvas de equiconcentração para o CaCO ₃ com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 45°.....	98
Fig. 4.47. Curvas de equiconcentração para o CaCO ₃ com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 60°.....	99
Fig. 4.48. Curvas de equiconcentração para Microesfera de vidro sedimentando em GL com concentração inicial de sólidos de $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 0°.100	
Fig. 4.49. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 30°.....	101

Fig. 4.50. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 45° .	101
Fig. 4.51. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 60° .	102
Fig.4.52. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com de $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 0° .	103
Fig. 4.53. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 30° .	104
Fig. 4.54. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 45° .	104
Fig. 4.55. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 60° .	105
Fig. 4.56. Passagem da interface superior descendente em função do tempo na suspensão água + CaCO_3 nas 4 inclinações (0° , 30° , 45° e 60°).	106
Fig. 4.57. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre de CaCO_3 em água.	107
Fig. 4.58. Curva de descida da frente superior difusa para as suspensões constituídas pela microesfera e GL 92%.	108
Fig. 4.59. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre ME em GL.	112
Fig. 4.60. Curva frente superior difusa para as suspensões de ME e GX.	113
Fig. 4.61. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre ME em GX.	111
Fig. 4.62. Fotografias dos tubos após 20 minutos do início da sedimentação (a) 0° , (b) 30° , (c) 45° e (d) 60° .	117
Fig. 4.63. Fotografia do momento em que ocorria o efeito <i>Boycott</i> .	118
Fig. Ap.1 Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras de água em CaCO_3 .	126
Fig. Ap.2 Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras de ME em GL nas posições 0,03; 0,10; 0,17 e 0,27	127
Fig.Ap.3. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras de ME em GL nas posições 0,43; 0,55 e 0,67	129
Fig. Ap.4. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras de ME em GX 0,2% v/v nas posições 0,03; 0,10; 0,17 e 0,27	131
Fig. Ap.5. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras de ME em GX 0,2% v/v nas posições 0,43; 0,55 e 0,67.	134

Fig. Ap.6. Curvas de equiconcentração para solução de água e CaCO_3 em 0°	134
Fig. Ap.7. Curvas de equiconcentração para solução de água e CaCO_3 em 30°	135
Fig. Ap.8. Curvas de equiconcentração para solução de água e CaCO_3 em 45°	136
Fig. Ap.9. Curvas de equiconcentração para solução de água e CaCO_3 em 60°	137
Fig. A.1. Tabela comparativa proposta por Rittenhouse (1943).	134

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1. Aditivos e suas funções no fluido de perfuração.....	12
Tab. 3.1- Materiais sólidos.	42
Tab. 3.2- Densidade dos sólidos.....	42
Tab. 3.3. Diâmetro volumétrico das partículas.....	45
Tab. 3.4. Parâmetros estimados para o modelo RRB e coeficiente de determinação. ...	45
Tab. 3.5. Esfericidade dos sólidos.	46
Tab. 3.6. Preparo das soluções de Glicerol 92% v/v.	48
Tab. 3.7. Preparo das soluções de Goma Xantana 0,2% m/m.	48
Tab. 3.8. Valores usados para o cálculo de tempo de resolução do sistema.	56
Tab. 4.1. Parâmetros reológicos da suspensão de Goma Xantana.	63
Tab. 4.2. Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do carbonato de cálcio decantando em água.	107
Tab. 4.3 Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do ME em GL.	108
Tab. 4.4. Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do ME em GX.....	110
Tab. 4.5. Velocidade de sedimentação prevista pelo modelo PNK.....	115
Tab. 4.6. Valores calculados para permeabilidade das suspensões de água e CaCO ₃ e das suspensões de ME e GL.....	116

CAPÍTULO 1

Introdução

A produção de petróleo é um processo complexo, composto por diversas etapas que demandam tecnologia de ponta e constantes aprimoramentos. Entre essas etapas, a perfuração é uma das mais relevantes e tem evoluído consideravelmente ao longo do tempo. Uma das inovações mais significativas nessa área foi o desenvolvimento de técnicas que permitiram a perfuração de poços direcionais, além dos tradicionais poços verticais (SOUZA, 2018). Na Fig 1.1, tem-se os três tipos de poços de petróleo que são: vertical (tradicional), direcional e horizontal.

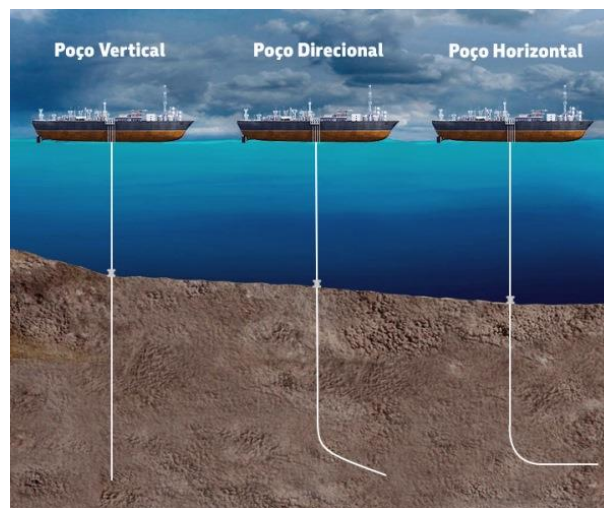


Fig. 1.1. Tipos de poços de petróleo.

Fonte: PETROBRAS S.A.

Os poços direcionais apresentam custos mais elevados do que os poços verticais, porém oferecem vantagens substanciais como o aumento da produtividade e a diminuição do impacto ambiental (SOUZA, 2011). Dessa forma estão cada vez mais sendo utilizados, por exemplo no Brasil, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), até 2019 foram perfurados mais de 5 mil poços usando a técnica de perfuração direcional, evidenciando sua relevância na indústria petrolífera.

Os poços direcionais apresentam diversas vantagens em comparação com os poços verticais, sendo amplamente adotados em diferentes cenários (VATH, 2011). Em campos *offshore*, localizados em águas profundas, esses poços permitem a perfuração de vários poços a partir de uma única plataforma, otimizando a exploração de reservas submarinas.

Essa flexibilidade é especialmente valiosa para contornar obstáculos geológicos, sendo crucial em áreas marinhas. Nos campos *onshore*, em terra firme, os poços direcionais são utilizados para superar desafios naturais, como rios, cidades, lagos e falhas geológicas, reduzindo o impacto ambiental e aumentando a produtividade (MACHADO, 2010). A Fig. 1.2 ilustra algumas aplicações dos poços direcionais, destacando sua versatilidade e importância na indústria petrolífera.

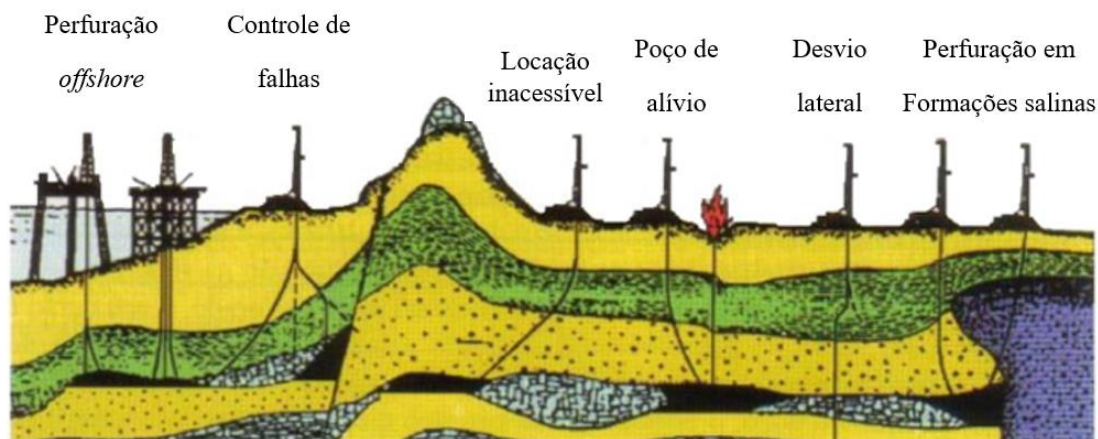


Fig. 1.2. Algumas aplicações dos poços direcionais.

Fonte: Adaptado de Thomas (2001).

A perfuração de poços, seja qual for a direção de sua construção, requer o uso de fluidos de perfuração formulados conforme as características da região e as condições específicas em que serão empregados (AMORIM, 2003). Além dos cascalhos resultantes do processo, os fluidos de perfuração incluem sólidos insolúveis, como agentes obturantes e adensantes, os quais podem sofrer sedimentação (CAENN, 2017).

O processo de sedimentação de partículas, normalmente um processo demorado, pode ser acelerado por meio de uma estratégia eficaz: inclinar o recipiente onde ocorre a sedimentação. Essa descoberta, conhecida como o efeito *Boycott* (BOYCOTT, 1920) revela que a taxa de produção de fluido clarificado é geralmente superior quando a inclinação é aplicada, em comparação com tubos não inclinados (BURGER et al., 2012). Essa técnica tem sido fundamental na indústria para aprimorar a eficiência dos processos de separação de sólidos e líquidos.

Essa influência da inclinação na sedimentação não é menos importante na perfuração de poços direcionais na indústria petrolífera, como destacado por Skalle et al. (1999). Poços inclinados apresentam comportamentos sedimentares distintos em comparação com poços verticais (REYES et al., 2019). A inclinação do poço pode impactar significativamente tanto na velocidade quanto no padrão de sedimentação das partículas.

Embora em muitas indústrias o objetivo seja diminuir o tempo de sedimentação, na indústria petrolífera, especialmente na etapa de perfuração, o interesse é manter as partículas insolúveis em suspensão no fluido (LUMMUS e AZAR, 1986), com um fluxo constante. Isso ajuda a evitar a sedimentação de cascalhos e detritos que podem danificar o equipamento (CAENN, 2017). Dessa forma, embora a inclinação possa acelerar a sedimentação em certos contextos, na indústria petrolífera, não é esse o interesse. Sendo mais interessante a manutenção de um fluxo estável e a prevenção de danos aos equipamentos, do que a aceleração do processo de sedimentação.

Portanto, entender como ocorre a sedimentação nesses fluidos em poços inclinados é essencial para garantir a eficiência e a segurança das operações de perfuração em poços inclinados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar o comportamento da sedimentação em poços inclinados, considerando diferentes ângulos de inclinação (0° , 30° , 45° e 60°). Para esta finalidade foi empregada a TARG, que está disponível no laboratório de Radioisótopos da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A TARG, já foi utilizada para diversos trabalhos como: Damasceno (1992), Arouca (2003), Arouca (2007), Moreira (2014), Fagundes (2015). No entanto, seu emprego inovador neste estudo reside na aplicação pela primeira vez ao monitoramento da sedimentação em tubos inclinados.

1.1. Objetivos

Com o crescente uso de poços direcionais de petróleo e os desafios encontrados durante sua perfuração e manutenção, objetivou-se investigar o comportamento da sedimentação em poços inclinados, considerando diferentes ângulos de inclinação (0° , 30° , 45° e 60°) por meio da Técnica de Atenuação de Raios Gama. Para tanto, os objetivos específicos desta tese foram:

- a) Caracterizar reologicamente os fluidos;

- b) Determinar as distribuições de concentração volumétrica de sólidos;
- c) Analisar a influência de diferentes inclinações na velocidade de sedimentação;
- d) Observar o comportamento da variação na concentração dos sólidos com a inclinação;
- e) Comparar o comportamento de um fluido newtonianos e um não newtoniano nas diferentes inclinações.

1.2. Estrutura da tese

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, resumidos a seguir, cada um com seu respectivo conteúdo. O Capítulo 2 engloba uma revisão bibliográfica que aborda tópicos relacionados à sedimentação, sedimentação em recipientes inclinados, reologia de fluidos, fluidos de perfuração, técnicas para estudo de sedimentação e analisa trabalhos anteriores relevantes no campo da sedimentação em poços inclinados. No Capítulo 3, os procedimentos experimentais, juntamente com detalhes sobre o material e equipamentos utilizados, são descritos. No Capítulo 4, apresenta-se e discute-se os resultados experimentais obtidos neste estudo. Por fim, o Capítulo 5 resume as principais conclusões derivadas deste trabalho e oferece algumas sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão abordados conceitos e estudos no campo da sedimentação e na compreensão das propriedades reológicas, com foco especial em sedimentação inclinada.

2.1 Sedimentação

Entender como ocorre o transporte da partícula ao longo de um recipiente é fundamental para o entendimento da operação de sedimentação. Nessa operação, a partícula sólida, que está em suspensão, é induzida pelas forças de gravidade, empuxo e resistência ao movimento (LUZ et al., 2002).

Ao colocar um fluido homogeneizado em um tubo e permitir que ele permaneça em repouso, observa-se que, ao longo do tempo, as partículas de maior diâmetro sedimentam no fundo da vidraria, enquanto as partículas mais finas permanecem em suspensão. As partículas intermediárias se distribuem em diferentes alturas, a depender de suas granulometrias (CHAVES, 2004).

A Fig. 2.1 representa a operação de sedimentação com quatro zonas distintas. A zona LC corresponde ao líquido clarificado, uma região livre de sólidos em que as partículas já estão sedimentadas. A zona SL é equivalente à suspensão com uma concentração uniforme, igual à concentração inicial do fluido e nesta região as partículas sedimentam sem interagir com a vizinhança. A zona ZT é a zona de transição, onde ocorre uma concentração não uniforme de partículas, aumentando de cima para baixo. E, por fim, a zona ZC conhecida como a zona de compressão, onde a altura do acúmulo (concentração) de partículas aumenta ao longo do tempo e força o líquido a se mover para cima.

Inicialmente o tubo está preenchido com uma suspensão homogênea, apresentando uma concentração uniforme de sólidos em todos os pontos do tubo. Com o decorrer do tempo, as partículas de maior granulometria começam a sedimentar-se em direção ao fundo do tubo, formando uma camada conhecida como a zona de compactação. Essa zona

é composta pelas partículas sólidas de maior diâmetro, que sedimentam em uma velocidade mais elevada devido à sua maior massa e tamanho (CONCHA, et al., 2002).

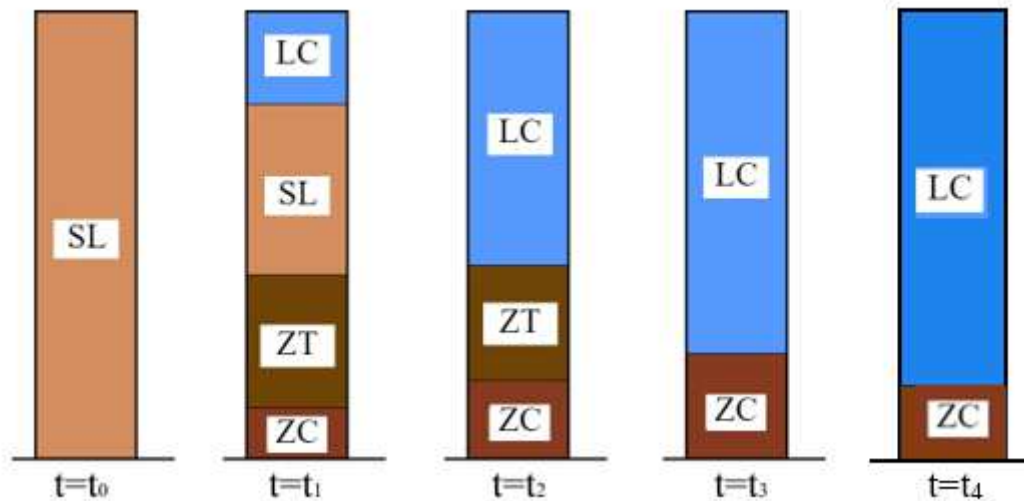


Fig 2.1. Zonas de sedimentação. SL = zona de sedimentação livre, LC = zona de líquido clarificado, ZT = zona de transição, ZC = zona de compressão.

Fonte: adaptado de Faust (1982).

Enquanto isso, as partículas com menor granulometria demoram mais para se sedimentar, o que resulta na formação da zona de transição, localizada entre a zona de compactação e a parte superior do tubo. Nessa zona intermediária, ocorre a interação entre as partículas de diferentes tamanhos, levando a uma concentração não uniforme de sólidos, com maior concentração próximo à camada de compactação.

Conforme a zona de transição se desenvolve, surge a zona de líquido clarificado na parte superior do tubo. Essa zona consiste em uma região livre de sólidos (CREMASCO, 2012).

No processo de sedimentação, a zona de transição passa por mudanças no seu tamanho ao longo do tempo. Conforme a sedimentação avança, tanto a zona de compactação, onde as partículas se acumulam no fundo do tubo, quanto a zona de líquido clarificado vão aumentando de tamanho progressivamente. À medida que essas duas

zonas se expandem, a zona de transição começa a diminuir em tamanho até desaparecer completamente.

Isso significa que, ao final do processo de sedimentação, restam apenas duas zonas bem definidas: a zona de compactação, onde se concentram as partículas sedimentadas, e a zona de líquido clarificado, onde o líquido está livre de sólidos (CREMASCO, 2012).

Os dados obtidos durante o teste de sedimentação, que incluem as alturas das interfaces de cada zona de sedimentação em diferentes momentos do processo, permitem a elaboração de uma curva de sedimentação. Essa curva é uma representação gráfica das mudanças na altura das interfaces das zonas ao longo do tempo.

A curva de sedimentação é uma ferramenta importante para analisar e entender o comportamento das partículas em suspensão durante o processo de sedimentação e pode fornecer informações valiosas sobre a taxa de sedimentação, a eficiência do processo e a separação das partículas com base em seus tamanhos e densidades.

Na Fig. 2.2, tem-se um esboço dessa curva de sedimentação, que mostra como as zonas de compactação e de líquido clarificado vão se desenvolvendo ao longo do tempo, enquanto a zona de transição diminui gradualmente.

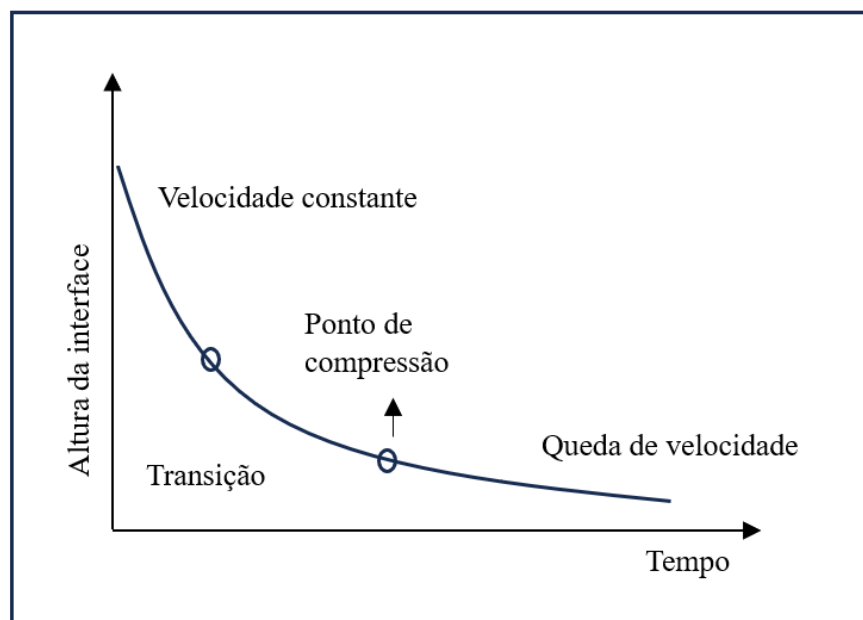


Fig. 2.2. Curva sedimentação

Fonte: adaptado de Andrade (2017).

As curvas de sedimentação fornecem informações cruciais sobre o processo de sedimentação. Na Fig. 2.2, observam-se três diferentes períodos: o período de velocidade constante, de transição e de queda na velocidade. Ao analisar a inclinação da curva no período de velocidade constante, é possível obter a velocidade de sedimentação das partículas, um valor importante para entender o comportamento das suspensões e otimizar processos industriais relacionados à sedimentação (VALADÃO, 2011).

O processo de sedimentação é influenciado por vários fatores, com destaque para as propriedades físico-químicas do fluido e os parâmetros utilizados durante as etapas de perfuração, completção e ao longo da vida produtiva do poço. Alguns fatores influenciam no processo da sedimentação sendo eles:

- As propriedades reológicas do fluido desempenham um papel fundamental no processo de sedimentação (TEHRANI et al., 2004). A reologia do fluido, incluindo sua viscosidade e tixotropia, afeta sua capacidade de manter as partículas em suspensão, o que tem um impacto direto na taxa de sedimentação.
- A velocidade de rotação na coluna de perfuração é outro fator importante que pode afetar a sedimentação (HEMPHIL e RAVI, 2006). A velocidade de rotação influencia o movimento das partículas no fluido e pode impactar a distribuição das partículas ao longo do poço.
- A inclinação do poço é um fator importante na sedimentação (SKALLE et al., 1999). Poços inclinados têm comportamentos distintos em relação à sedimentação em comparação com poços verticais, e a inclinação do poço pode afetar significativamente a taxa e o padrão de sedimentação das partículas.
- A velocidade de escoamento do fluido também é relevante para o processo de sedimentação (NGUYEN, 2009). Velocidades de escoamento mais altas podem influenciar a suspensão das partículas no fluido, afetando sua taxa de sedimentação.
- A morfologia e a concentração das partículas de adensantes também são fatores importantes na sedimentação (OMLAND et al., 2005). As características das partículas, como seu tamanho, forma e concentração, podem influenciar a velocidade e a eficiência da sedimentação.

Controlar esses fatores e compreender suas interações é essencial para otimizar o processo de sedimentação em poços de petróleo. Estudos e análises detalhadas desses parâmetros podem fornecer informações valiosas para o desenvolvimento e aprimoramento de fluidos de perfuração mais eficazes, garantindo a estabilidade das operações de perfuração e extração de petróleo.

2.2 Modelo de Kynch para sedimentação

A sedimentação de partículas em altas concentrações em sistemas batelada começou a ser estudada por Kynch (1952), devido à percepção de uma falta de informações relacionadas a essas condições. O autor observou que estudos anteriores haviam lidado com a sedimentação de partículas isoladas, levando ao Modelo de Stokes para sedimentação. No entanto, até então, nenhum estudo havia sido realizado para investigar os casos em que uma grande quantidade de sólidos estivesse presente em sistemas batelada (Kynch, 1952).

A Teoria de Kynch considera que:

1) a velocidade de sedimentação é função apenas da concentração local de partículas;

2) a sedimentação ocorre em várias camadas de concentração constante (Concha, et al., 2002).

O modelo consiste na solução das seguintes equações:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial f_{bk}\phi}{\partial z} = 0; \quad 0 \leq z \leq L; \quad t > 0 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Sendo as condições iniciais:

$$\phi(Z, 0) = \begin{cases} 0, & \text{para } z = L \\ \phi_0, & \text{para } 0 < z < L \\ \phi_{\max}, & \text{para } z = 0 \end{cases} \quad (\text{Eq.2.2})$$

Considerando que a função f_{bk} satisfaz:

$$f_{bk}(\phi) = \begin{cases} = 0, & \phi < 0 \text{ ou } \phi > \phi_{\max} \\ < 0, & \text{para } 0 \leq \phi \leq \phi_{\max} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

No modelo, f_{bk} é chamada de função de fluxo *em batelada de Kynch*, ϕ é a fração volumétrica de sólidos, z é a altura do fluido e t o tempo. A função f_{bk} é definida pela Eq. 2.4, em que v_s é a velocidade intersticial da fase sólida.

$$f_{bk} = \phi v_s \quad (\text{Eq. 2.4})$$

O modelo de Kynch foi pioneiro e fundamental para o estudo da sedimentação em batelada e ainda é bastante utilizado como base para diversos estudos (CONCHA, *et al.*, 2002). Ele se baseia na conservação de massa da fase sólida (FAGUNDES, 2019). Entretanto, ao longo do tempo, surgiram limitações evidentes em relação a esse modelo. Vários estudos na literatura destacam sua maneira inadequada de descrever a sedimentação de suspensões com sólidos que possuem uma baixa tendência à compressão, como aquelas compostas por microesferas de vidro e partículas minerais que não formam flocos (BUSTOS *et al.*, 1999).

Conforme apontado por Burger (2000), o modelo de Kynch prevê que as camadas de concentração constante se propagam linearmente, sem descontinuidades. No entanto, já se sabia, naquela época, que suspensões reais, como as encontradas na indústria de mineração, não se comportavam da mesma maneira. Essas suspensões formavam camadas de sedimentos compressíveis, caracterizadas por curvas de isoconcentração, que o modelo de Kynch não era capaz de prever.

Portanto, o fenômeno de compactação de um sedimento compressível em um ensaio de sedimentação em batelada não pode ser adequadamente descrito pela teoria de Kynch (1952). A acomodação dos materiais sólidos está intimamente relacionada às forças que atuam sobre as partículas, forças essas que não foram contempladas na modelagem matemática desenvolvida pelo autor em 1952.

2.3 Fluidos de Perfuração

A sedimentação desempenha um papel importante na indústria de petróleo, especialmente durante a perfuração de poços. Durante a referida operação são usados os fluidos de perfuração.

Os fluidos de perfuração são emulsões que desempenham múltiplas funções vitais no processo de perfuração de poços de petróleo (AMORIM, 2003). Suas principais funções incluem:

- Limpeza do fundo do poço: Os fluidos de perfuração têm a importante tarefa de transportar os cascalhos e detritos gerados pela broca para a superfície, mantendo o fundo do poço limpo e permitindo a continuidade do processo de perfuração.
- Prevenção de kick: Os fluidos de perfuração são projetados para evitar a ocorrência de "kicks", que são fluxos indesejáveis de fluidos provenientes do subsolo para dentro do poço. Isso ajuda a manter a pressão do poço controlada e minimiza riscos de acidentes e perdas durante a perfuração.
- Lubrificação e resfriamento: Os fluidos de perfuração atuam como lubrificantes para a coluna de perfuração e a broca, reduzindo o atrito e facilitando o processo de perfuração. Além disso, eles têm a função de resfriar a broca e as ferramentas utilizadas, prevenindo o superaquecimento e prolongando sua vida útil.

De acordo com Lummus e Azar (1986), os fluidos de perfuração são considerados indispensáveis para a indústria petrolífera e são um dos elementos mais importantes em todas as operações de perfuração. Eles desempenham um papel fundamental na garantia do sucesso e segurança das operações de perfuração de poços de petróleo, permitindo que as atividades de exploração e extração sejam realizadas de forma eficiente e eficaz.

Os fluidos de perfuração normalmente são compostos por duas fases: uma fase dispersante (que pode ser água, óleo ou gás) e uma fase dispersa contendo sólidos e outros componentes necessários para o processo de perfuração. Esses fluidos são classificados em três categorias principais: fluidos à base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de ar ou gás (CAENN et al., 2014).

A escolha do tipo de fluido de perfuração depende da complexidade da perfuração, que é influenciada pela natureza dos materiais dispersos, dos requisitos específicos da operação e das funções necessárias.

Em perfurações de baixa profundidade e de natureza mais simples, é apropriado utilizar fluidos à base de água contendo argila em baixa concentração. No entanto, em casos mais complexos, são necessários fluidos mais elaborados, com a adição de diversos aditivos para atender às demandas específicas (SANTANNA, 2012)

O desenvolvimento de formulações específicas de fluidos de perfuração é essencial para o sucesso das operações de perfuração, pois permite adaptar o fluido às condições geológicas, operacionais e ambientais específicas de cada poço, garantindo assim a segurança, eficiência e sucesso da perfuração.

A Tab. 2.1 apresenta alguns exemplos de aditivos e suas respectivas funções no fluido de perfuração, ilustrando como esses componentes adicionais podem melhorar o desempenho do fluido e atender às necessidades específicas de cada operação de perfuração.

Tab. 2.1. Aditivos e suas funções no fluido de perfuração.

Aditivos	Função
Argila ativada e polímeros	Viscosificantes e gelificantes
Lignosulfonatos e lignitos	Dispersantes e afinantes
Amidos e polímeros	Controladores de filtrado (parte líquida do fluido de perfuração que invade a parede do poço)
Hidróxido de sódio ou de potássio	Alcalinizantes
Sulfato de bário e hematita	Adensantes
Detergente	Remoção de argilominerais nas superfícies metálicas
Ésteres graxos	Lubrificantes
Poliacrilamina, cloreto de sódio ou potássio	Inibidores de hidratação de argilas
Bactericidas	Previnem/reduzem as ações de micro-organismos
Antiespumantes	Previnem/reduzem/eliminam a formação de espumas
Mica, fibra raspa de coco etc.	Controladores de perda de circulação

Fonte: Santanna (2012).

Considerando os diferentes tipos de fluido de perfuração, os fluidos à base de óleo são menos utilizados em comparação com os fluidos à base de água, devido ao seu alto custo inicial e ao grau de poluição associado. Os fluidos à base de água são considerados mais ambientalmente favoráveis. No entanto, avanços na pesquisa têm sido feitos para desenvolver novos sistemas de fluidos à base de óleo, como óleos minerais e sintéticos, que são menos poluentes em comparação ao óleo diesel (THOMAS et al., 2001). Já foram desenvolvidos fluidos a base de óleos vegetais como dendê, milho e arroz. (ISMAIL et

al., 2014). Além de fluidos desenvolvidos a partir de óleos e gorduras residuais que resultam em fluidos menos agressivos ao meio ambiente e atóxicos (LI et al, 2016).

Os fluidos sintéticos, por exemplo, são menos tóxicos em comparação aos fluidos de base oleosa e podem ser formulados à base de éter, éster, parafinas, olefinas ou aldeídos (CATARINA, 2007). Além disso, esses fluidos sintéticos são biodegradáveis, o que significa conseguem minimizar os impactos ambientais causados pelo seu descarte (GROWCOCK et al., 1994).

Independentemente do tipo de fluido de perfuração utilizado, eles são fundamentais durante o processo de perfuração de poços, devido às funções essenciais já mencionadas, que estão diretamente relacionadas às suas propriedades físicas e químicas. Algumas das propriedades físicas mais importantes incluem a densidade do fluido, seus parâmetros reológicos, como viscosidade plástica e viscosidade aparente, a força de géis, os parâmetros de filtração e o teor de sólidos. Essas propriedades são cuidadosamente controladas e ajustadas para atender aos requisitos específicos de cada operação de perfuração, garantindo a eficiência, segurança e sucesso do processo.

De acordo com Caenn et al. (2014), o fluido de perfuração deve possuir características essenciais para garantir um bom desempenho durante o processo de perfuração. Essas características incluem:

- O fluido deve ser quimicamente estável, mantendo suas propriedades e funcionalidades ao longo do tempo e das condições de operação.
- Estabilização das paredes do poço: O fluido deve ser capaz de estabilizar as paredes do poço, proporcionando suporte mecânico e evitando o desmoronamento das rochas circundantes.
- Separação dos cascalhos: O fluido deve auxiliar na separação e transporte eficiente dos cascalhos e detritos da perfuração até a superfície, facilitando a limpeza do poço.
- Suspensão dos sólidos: Em momentos de repouso, o fluido deve manter os sólidos em suspensão, evitando a sedimentação excessiva que possa comprometer o reinício da perfuração.
- Inerte em relação a danos nas rochas produtoras: O fluido não deve causar danos às rochas produtoras de petróleo, garantindo a integridade das formações e evitando prejuízos à produção futura.

- Tratamentos físicos e químicos: O fluido deve permitir a aplicação de tratamentos físicos e químicos, se necessário, para ajustar suas propriedades às condições específicas de cada operação.
- Bombeabilidade: O fluido deve ser facilmente bombeável, garantindo sua circulação eficiente pelo poço durante todo o processo de perfuração.
- Baixo grau de corrosão e abrasão: O fluido deve apresentar baixa corrosividade e abrasividade em relação à coluna de perfuração e outros equipamentos do sistema de circulação, prolongando sua vida útil.
- Facilitação de interpretações geológicas: O fluido deve permitir uma interpretação geológica clara e precisa das formações atravessadas durante a perfuração.
- Custo compatível com a operação: O custo do fluido deve ser compatível com as exigências e complexidade da operação de perfuração.

As características e funções dos fluidos de perfuração estão intimamente ligadas às suas propriedades, tornando a caracterização desses fluidos uma etapa essencial no processo de perfuração. A densidade do fluido é um dos fatores mais importantes, pois influencia diretamente na estabilidade das paredes do poço e na capacidade de controlar a pressão nas formações geológicas. Durante a perfuração de um poço, a densidade do fluido é monitorada constantemente e, se necessário, ajustada para garantir a estabilidade das formações e evitar problemas como desmoronamento.

Outro aspecto crítico é o comportamento do fluxo do fluido, que pode ser definido por seus parâmetros reológicos. Esses parâmetros são responsáveis pela remoção eficiente dos cascalhos e detritos gerados durante a perfuração. Além disso, os parâmetros reológicos também desempenham um papel importante na taxa de penetração da broca, influenciando diretamente na eficiência do processo de perfuração do poço.

Em suma, a caracterização adequada dos fluidos de perfuração, incluindo a medição da densidade e a análise dos parâmetros reológicos, é fundamental para garantir a estabilidade, eficiência e segurança durante a perfuração de poços de petróleo. Essas informações permitem aos operadores ajustar o fluido de acordo com as características das formações geológicas encontradas ao longo do poço, otimizando assim a operação de perfuração e minimizando riscos e impactos indesejados.

2.1 Reologia

A reologia pode ser definida como a área da física que estuda o escoamento (fluxo) e a deformação da matéria, englobando sólidos, líquidos e gases. Ela descreve como os materiais se deformam sob a influência de tensões e de certas condições termodinâmicas ao longo do tempo. As propriedades reológicas dos fluidos são de grande importância e interesse para a indústria, pois estão diretamente relacionadas a diversas operações unitárias e ao dimensionamento de equipamentos (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

As propriedades reológicas modelam o comportamento do fluido e a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, caracterizando-se por meio de leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função das forças ou tensões aplicadas (MACHADO, 2002). Essas propriedades incluem a viscosidade, plasticidade e elasticidade do fluido.

Em relação à deformação, os fluidos podem ser classificados em dois principais grupos:

- Fluidos elásticos (reversíveis): Esses sistemas não escoam e seguem a Lei de Hooke. Os corpos elásticos ideais têm a capacidade de retornar à sua forma e volume iniciais ao final da aplicação da tensão, podendo recuperar a energia de deformação.
- Fluidos viscosos (irreversíveis): Esses sistemas escoam e obedecem à Lei de Newton. São fluidos que passam por deformações contínuas e irreversíveis após a aplicação de uma tensão de cisalhamento. Quando ideais, a taxa de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento, mas quando isso não ocorre, seu comportamento é definido justamente pela relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, sendo classificados como fluidos newtonianos e não newtonianos, dependendo de suas características específicas.

É fundamental compreender as propriedades reológicas dos fluidos, pois elas têm um impacto significativo no comportamento do fluido durante o processo industrial, influenciando a eficiência e a segurança das operações.

Conforme mencionado anteriormente, os fluidos são classificados de acordo com seu comportamento reológico, que é determinado pela análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento em condições estabelecidas de temperatura e

pressão. Essa classificação é de grande importância na indústria, pois permite selecionar o tipo adequado de fluido para cada aplicação específica, considerando suas propriedades reológicas e comportamento sob diferentes circunstâncias.

Existem duas principais classificações:

- Fluidos Newtonianos: Nesse tipo de fluido, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é constante, o que significa que sua viscosidade é afetada pela temperatura e pressão, mas sua viscosidade não varia com a taxa ou tensão de cisalhamento. Os fluidos Newtonianos seguem a Lei de Newton e incluem todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos (STEFFE, 1996).
- Fluidos Não Newtonianos: Os fluidos Não Newtonianos apresentam uma relação não constante entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento. Sua viscosidade muda conforme o grau de deformação aplicado e suas propriedades reológicas podem não depender do tempo em que a tensão de cisalhamento foi aplicada. Dentro dessa categoria, existem várias subclassificações, que podem ser observadas na Fig. 2.3.

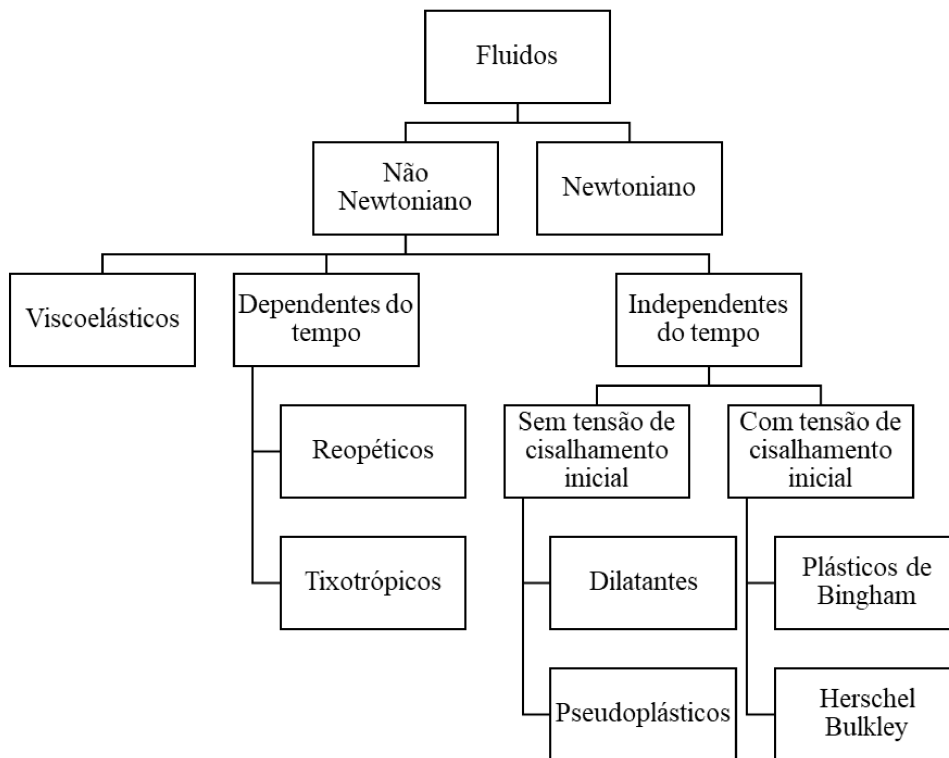


Fig. 2.3. Classificação dos fluidos.

Os fluidos não newtonianos são classificados com base em sua taxa de cisalhamento, ou seja, levando em consideração a curva de fluxo e a viscosidade do fluido. Conforme mostrado no esquema, esses fluidos podem ser agrupados em três categorias principais: viscoelásticos (que combinam propriedades de fluidos ideais e sólidos elásticos), dependentes do tempo (cujas propriedades reológicas variam ao longo do tempo de cisalhamento) e independentes do tempo (onde a viscosidade aparente não é afetada pelo tempo em que a taxa de deformação foi aplicada) (CHHABRA, 2008).

Os fluidos dependentes do tempo estão divididos em tixotrópicos (quando submetidos a um esforço de cisalhamento, reduzem sua viscosidade aparente) e reopéticos que possuem o comportamento inverso.

Dentro dos fluidos não newtonianos independentes do tempo, existem quatro subdivisões: pseudoplásticos, dilatantes, plástico de Bingham e Herschel-Bulkley. Cada grupo apresenta características reológicas distintas, influenciando o comportamento do fluido sob diferentes condições. A Fig. 2.4 ilustra os comportamentos reológicos do fluido newtoniano e dos fluidos não newtonianos independentes do tempo mencionados anteriormente.

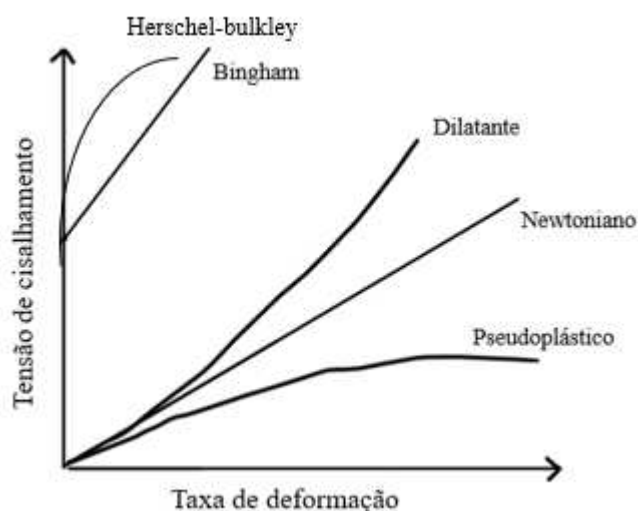


Fig. 2.4. Perfis das curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento para os principais tipos de fluidos.

Os fluidos independentes do tempo apresentam uma variedade de comportamentos reológicos, sendo os fluidos pseudoplásticos o subgrupo mais observado. Sua

característica distintiva é que, com o aumento da taxa de cisalhamento, o valor da viscosidade aparente diminui. Em outras palavras, eles se tornam menos viscosos à medida que são submetidos a maior força de cisalhamento.

Por outro lado, temos os fluidos dilatantes, que têm um comportamento oposto. Ao aumentar a taxa de cisalhamento, o valor da viscosidade aparente também aumenta, tornando-os mais viscosos quando submetidos a maior força de cisalhamento (CHHABRA, 2008).

Nos fluidos plásticos de Bingham e Herschel-Bulkley, observa-se uma tensão limite de escoamento, representada pela não passagem de suas curvas pela origem. Isso indica que esses fluidos apresentam uma resistência inicial à deformação, sendo necessário aplicar uma força mínima para que o escoamento se inicie (CHHABRA, 2008).

Na prática, a maioria dos fluidos reais é composta por uma combinação dessas características de fluidos não newtonianos. Essa combinação pode ser bastante complexa, influenciando diretamente o comportamento do fluido em diversas aplicações industriais.

2.2 Fluido de perfuração e sua reologia

A caracterização das propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração é de extrema importância, pois essas propriedades têm um impacto significativo em suas características e comportamento, o que está diretamente relacionado ao cálculo das perdas de carga (pressão) na tubulação e à velocidade de transporte de cascalhos, evitando seu acúmulo indesejado.

De acordo com Stefan (1966), a maioria dos fluidos de perfuração, com exceção dos fluidos à base de gás, apresenta características predominantes de fluidos não newtonianos do tipo plástico, refletindo o comportamento coloidal dos sólidos presentes no fluido (LUMMUS e AZAR, 1986).

O ideal para os fluidos de perfuração durante a operação é que escoem de forma contínua, evitando a sedimentação de cascalhos e detritos que poderiam danificar o equipamento. No entanto, sabe-se que em algumas situações podem ocorrer paradas na operação. Nesses casos, é necessário que o fluido apresente um comportamento que evite a sedimentação dos cascalhos e detritos, sendo indicado que os fluidos sejam do grupo dos tixotrópicos (LUCENA et al., 2012).

Os fluidos tixotrópicos possuem um comportamento bastante interessante pois, quando sujeitos a uma força de cisalhamento, diminuem sua viscosidade aparente, tornando-se mais fluidos e facilitando o fluxo. No entanto, quando o esforço de cisalhamento é removido, a viscosidade aparente aumenta novamente, evitando a sedimentação dos sólidos presentes no fluido.

Esse comportamento tixotrópico é vantajoso durante as paradas nas operações de perfuração, garantindo que os cascalhos e detritos permaneçam em suspensão e não causem problemas ao equipamento. Porém requer um controle preciso, pois se for excessiva, o fluido pode resultar em erosão nas paredes do poço devido à sua alta capacidade de arraste. (AMORIM, 2003).

A capacidade de entender e controlar as propriedades reológicas desses fluidos é fundamental para otimizar as operações de perfuração, pois influencia diretamente a taxa e o padrão de sedimentação das partículas.

2.3 Técnicas para estudo da sedimentação

Diversas técnicas são usadas com o intuito de estudar a sedimentação de partículas em fluidos. Algumas delas são utilizadas para o estudo da sedimentação dinâmica como a técnica de *loop* de escoamento, viscosímetro (*viscometer sag test*) VST e (*viscometer sag shoe test*) VSST. Outras são utilizadas na sedimentação estática como o teste estático de sedimentação, e temos técnicas também que permitem realizar o monitoramento em ambas as situações (estática e dinâmica) como a TARG e o ultrassom.

Utilizando uma ou mais técnicas é possível avaliar quantitativamente e qualitativamente a velocidade de sedimentação das partículas sólidas. A seguir, estão listadas as principais técnicas usadas para o monitoramento da sedimentação de sólidos em fluidos de perfuração e suas características principais.

2.6.1. Técnicas para o estudo da sedimentação em estado dinâmico

A. Loop De Escoamento

Esta técnica é usada para realizar testes dinâmicos e utiliza uma instrumentação mais cara e sofisticada e com maior necessidade de volume de fluido, porém ela é considerada a técnica que obtém os resultados mais próximos da realidade da sedimentação de sólidos

em fluidos de perfuração em condição de escoamento, mesmo que não consiga reproduzir as condições do fundo do poço (OHMLAND, 2009).

O equipamento é composto por vários componentes (bombas, manômetros, densímetros e o reservatório do fluido) sendo que a linha de teste pode ser formada tanto por tubos retos como por sessões anulares. Na Fig. 2.5, é apresentado um sistema simplificado usado para a técnica.

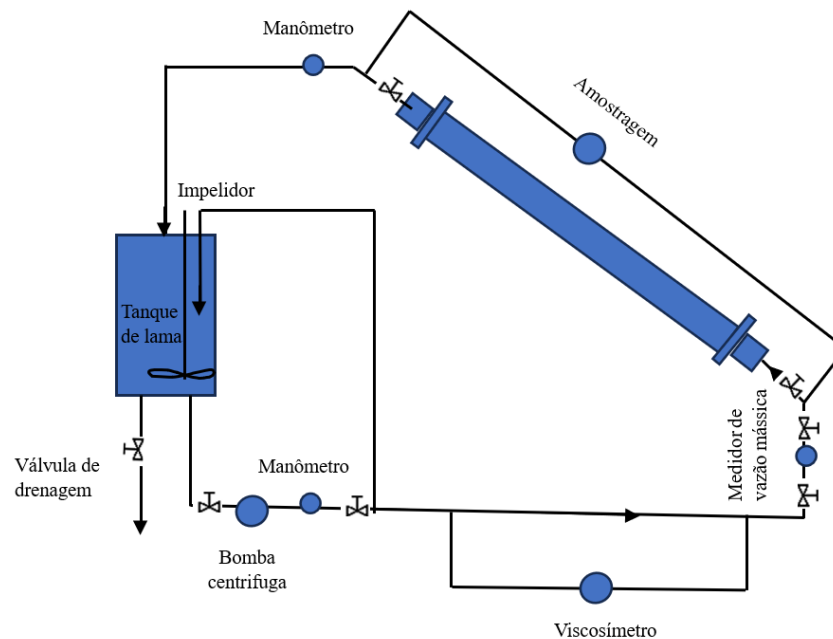


Fig. 2.5. Esquema da técnica de loop de escoamento.

Fonte: adaptado de Nguyen (2011).

Os primeiros estudos utilizando esta técnica foram realizados no início dos anos 1990, esses estudos identificaram que a sedimentação é um fenômeno dinâmico e não estático e confirmaram a importância do efeito *Boycott* (HANSON, 1990).

Nguyen (2011) utilizou a técnica de *loop* de escoamento para avaliar a sedimentação dinâmica da barita em fluidos de perfuração a base de óleo. Nesse estudo foi utilizada a linha de teste com uma sessão anular variando a excentricidade e a rotação da coluna, concluindo que a taxa de sedimentação é menor no caso excêntrico do que no concêntrico.

Zaker (2020) também usou desta técnica para estudar a sedimentação dinâmica da barita considerando o fluxo constante e a rotação do tubo de perfuração. Na própria estrutura do equipamento, o pesquisador conseguiu obter os valores da variação da

pressão ao longo do tubo e investigar experimentalmente o comportamento da sedimentação das partículas de barita. No estudo, o autor concluiu que as partículas de barita acumuladas no fundo do tubo podem ser reduzidas com o aumento da velocidade de rotação da coluna de perfuração e que a maior quantidade de acúmulo de partículas de barita ocorreu entre os ângulos 45° e 60°.

Com esta técnica é possível obter resultados quantitativos da sedimentação dinâmica.

B. Viscosímetro VST (*viscometer sag test*) e VSST (*viscometer sag shoe test*)

O viscosímetro VST, era empregado para reproduzir as condições dinâmicas, devido à sua acessibilidade. No entanto, não produzia resultados satisfatórios (ZAMORA, 2004).

Para melhorar a precisão dos resultados, uma abordagem sugerida foi incorporar uma sapata no fundo do copo do viscosímetro, dando origem ao VSST. Essa modificação se mostrou eficaz, uma vez que a sapata facilita o processo de sedimentação e aumenta a concentração do adensante na parte inferior do equipamento (ZAMORA, 2004). Na Fig. 2.6, apresentasse uma representação esquemática dos copos dos viscosímetros VST e VSST.

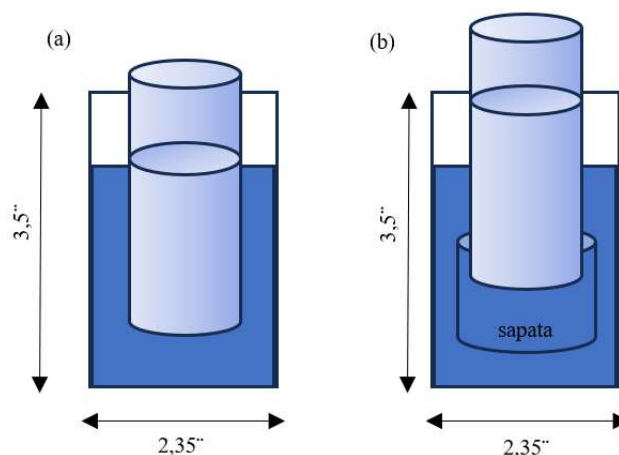


Fig. 2.6. Visão esquemática do copo do viscosímetro: (a) VST e (b) VSST.

Fonte: Adaptado de Eler (2012).

Os resultados obtidos com a sapata (VSST) por Zamora (2004) foram comparados com testes utilizando a técnica de *loop* de escoamento e forneceu resultados favoráveis,

gerando uma relação entre os valores obtidos nas duas técnicas. Dessa forma, na Eq. 2.5, temos a tendência de sedimentação relacionada para as duas técnicas:

$$S_R = \exp\left(-k \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

sendo S_R correspondente a tendência de sedimentação, k o parâmetro do equacionamento, ρ a densidade inicial do fluido e $\Delta\rho$ a variação de densidade. Sendo usado k igual a 10 para o viscosímetro VSST e k de 50 para os testes na técnica de *loop* de escoamento.

Eler (2012) avaliou fluidos a base de óleo e à base de água com o uso da técnica com o VSST, e conseguiu identificar que os fluidos de perfuração à base de óleo possuem uma maior facilidade para sofrer sedimentação, e que os fluidos à base de água têm uma maior tendência a ressuspender o leito do fluido.

A técnica usando os viscosímetros VST e VSST fornece resultados qualitativos, portanto, permite verificar somente qual fluido possui maior facilidade em sofrer sedimentação.

2.6.2. Técnicas para o estudo da sedimentação em estado estático

A. Teste Estático De Sedimentação

O teste estático de sedimentação é uma das abordagens mais comuns para analisar esse fenômeno. Nesse tipo de teste, células de aço são empregadas para medir a velocidade de sedimentação das partículas sólidas no fluido em estudo.

O procedimento envolve a escolha de uma temperatura específica, seguida pela introdução do fluido na célula de aço, onde ele é deixado em repouso por um período previamente determinado. Posteriormente, é calculado o fator de sedimentação (SF), conforme apresentado na Eq. 2.6:

$$SF = \left(\frac{\rho_{bottom}}{\rho_{bottom} + \rho_{top}}\right) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

sendo ρ_{top} e ρ_{bottom} a densidade do fluido no topo e no fundo da célula, respectivamente.

O valor numérico do SF reflete a tendência das partículas do fluido à sedimentação, sendo que valores entre 0,50 e 0,52 indicam que o fluido não tem facilidade para a

separação sólido-líquido e valores maiores do que 0,52 indicam que as fases do sistema tendem a se separarem. Caso isso ocorra, problemas operacionais podem ocorrer (OHMLAND, 2009).

Na Fig. 2.7 pode-se observar a célula de aço usada na técnica de teste estático e a Fig. 2.7 b apresenta o suporte usado para realizar o teste com inclinação.

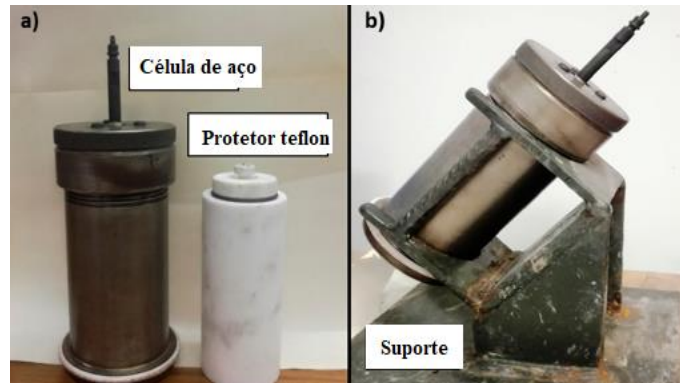


Fig. 2.7. Sistema experimental usado para técnica de teste estático: (a) célula de aço e o protetor interno de Teflon e (b) suporte para o teste com inclinação.

Fonte: Mohamed et al. (2019).

Mohamed et al. (2019) utilizou a técnica de teste estático para estudar o impacto da adição de ilmenita na tendência de sedimentação. Os testes foram realizados em condições vertical e inclinada a 350 °F e 500 psi com duração de 24 horas. Neste trabalho, o autor obteve um SF ligeiramente maior para a inclinação de 45° do que para a condição de 90°, vindo de encontro aos estudos feitos anteriormente por *Boycott* (1920).

Com esta técnica é possível obter resultados qualitativos. Mesmo sendo ainda usada em pesquisas, essa técnica não é considerada como um teste padrão para a indústria.

2.6.3. Técnicas para o estudo da sedimentação tanto em estado dinâmico quanto em estático

A. Ultrassom

O ultrassom é uma técnica mais recente, não destrutiva e não invasiva que permite realizar medidas em estado dinâmico e estático.

Na técnica de ultrassom ondas sonoras são usadas para obter os resultados. Um pulso ultrassônico é emitido no meio e este sinal é retroespalhado pelas partículas que estão

suspensas no fluido. O sinal é recebido pelo transdutor que extrai as informações sobre a velocidade e a concentração de sólidos em suspensão (ABDA *et al*, 2009).

Na Fig. 2.8 é apresentado um esquema ilustrativo da utilização da técnica de ultrassom. Nela pode-se observar o sistema de detecção de sinal composto por um transdutor, um equipamento que faz a aquisição do sinal e um computador. Além disso, em razão da ilustração ser do caso da sedimentação em condição dinâmica de fluido, há a representação de uma bomba para promover a circulação do material.

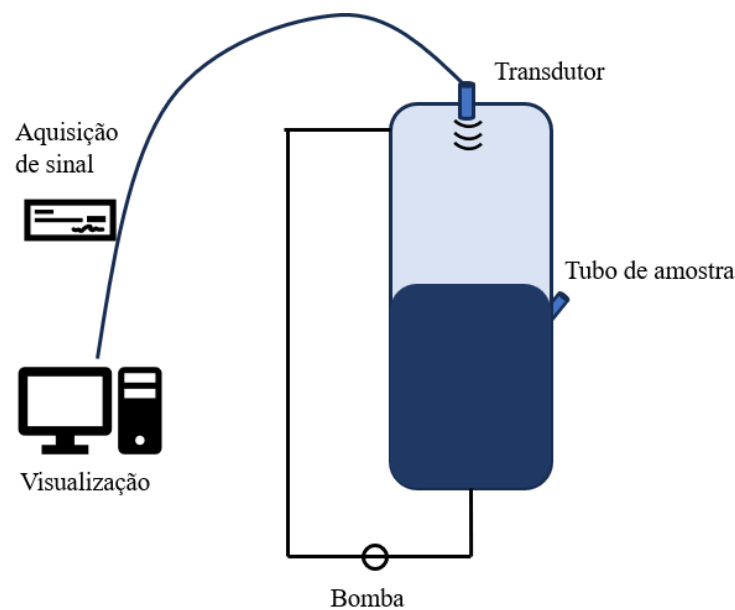


Fig. 2.8. Esquema de uma unidade experimental utilizando ultrassom.

Fonte: adaptado de Locatelli et al. (2015).

Abda et al. (2009) aplicaram a técnica de ultrassom para medir a velocidade de sedimentação e a concentração das partículas suspensas em tempo real de uma amostra de esgoto.

Locatelli et al. (2015) utilizaram o ultrassom com um transdutor instalado acima da coluna, realizando medições verticais para analisar o perfil de velocidade de sedimentação de uma amostra de lodo ativada. Os autores verificaram que foi possível medir a profundidade do lodo com alta resolução de espaço e tempo com 7 concentrações diferentes e conseguiram validar o potencial de uso da técnica para medir perfis de concentração de partículas durante a sedimentação.

Locatelli et al. (2015) fizeram uso da Eq. 2.7 para avaliar a velocidade de sedimentação na interface da manta de lodo.

$$v_s = \frac{C f_D}{2 f_c} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que C é a velocidade do som (m.s^{-1}), f_c a frequência obtida no sistema (Hz) e f_D é a frequência de deslocamento do doppler (Hz),

Esta técnica pode ser usada como alternativa para medir a velocidade de sedimentação e fornece dados quantitativos, porém foram encontradas dificuldades quando a suspensão continha altas concentrações de sólido (HIPP, 2002; BAMBERGER, 2004).

B. Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Esta técnica é fundamentada na interação dos núcleos em rotação em um forte campo magnético. Diferentemente do ultrassom, este método não tem dificuldade em analisar fluidos com altos teores de sólidos. No entanto, embora seja uma técnica não invasiva e versátil, ela é destrutiva, uma vez que é necessário recolher amostras e submetê-las a um processo de aquecimento antes da medição de RMN.

Na Fig. 2.9 é encontrado o esquema de um sistema para o uso da técnica de RMN.

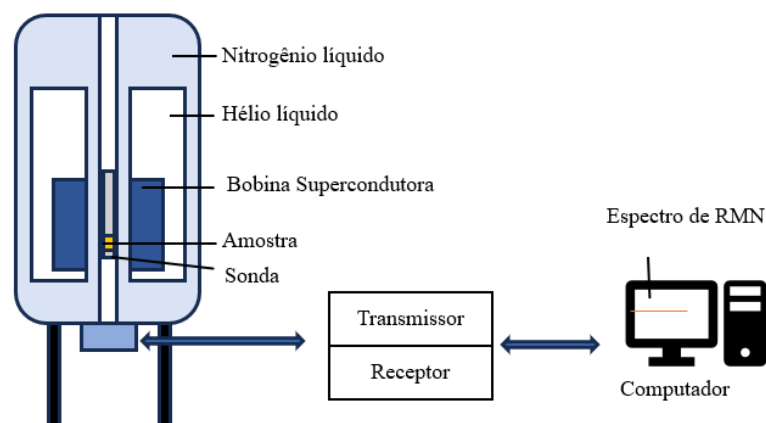


Fig. 2.9. Esquema da técnica de RMN.

Fonte: Adaptado de Colnago (2002).

Rismanto (2007) usou a técnica de RMN e com o uso de um núcleo de hidrogênio pôde identificar a concentração de sólidos em fluidos e caracterizar várias de suas propriedades, identificando que existe uma correlação entre a viscosidade e o acúmulo de barita, ou seja, amostras mais viscosas causam uma menor sedimentação.

O RMN fornece resultados quantitativos, mas é uma técnica destrutiva que impossibilita testes de batelada de longa duração.

C. Técnica de Atenuação de Raios- γ (TARG)

A Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) é uma abordagem de medição não-invasiva amplamente empregada para avaliar diversas propriedades do meio, incluindo a concentração de suspensões de sólidos. Essa técnica tem sido aplicada com sucesso em diferentes campos, como medicina, engenharia, geologia, agricultura, entre outros (PIRES, 2018). Sua característica não-destrutiva possibilita a obtenção de medidas consistentes e repetitivas de forma confiável.

O esquema básico de funcionamento da TARG é ilustrado na Fig. 2.10. Uma fonte radioativa é enclausurada em um recipiente de chumbo com um pequeno orifício, permitindo a passagem de um feixe de raios gama bem definido. Essa colimação do feixe é importante para garantir o controle da sua direção. Em frente à fonte radioativa, alinhada ao orifício, é posicionado um detector que permite a medição da intensidade do feixe de raios gama.

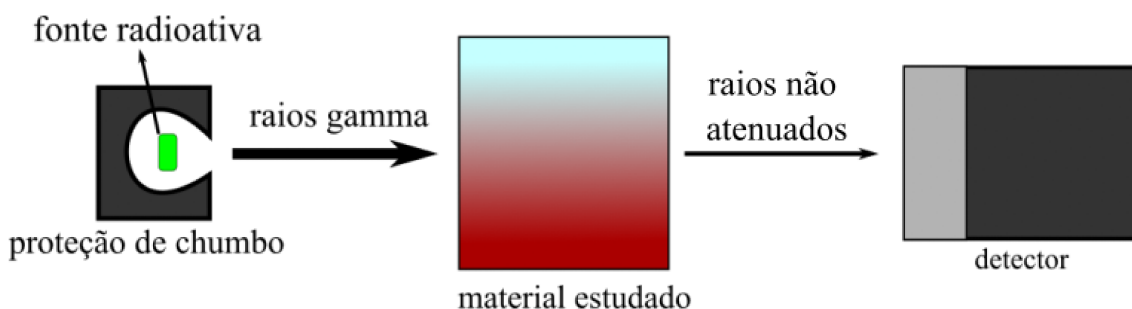


Fig. 2.10. Esquema da fonte da TARG.

O material que será analisado é posicionado entre a fonte e o detector. Quando o feixe de raios gama atravessa o material, parte dele é absorvida, desviada e refletida, porém uma fração consegue atravessá-lo. O feixe resultante, após interagir com o material, é

recebido pelo detector. A diferença entre as medidas com e sem o material é utilizada para determinar a quantidade de material presente e, conseqüentemente, a concentração de sólidos em suspensão no material estudado (DAMASCENO, 1992). Essa técnica é valiosa para obter informações sem perturbar o sistema, sendo útil em estudos e monitoramento de processos industriais e ambientais.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos de monitoramento da sedimentação de sólidos em fluidos de perfuração utilizando o Amerício-241 como fonte de raios-gama. Este material possui energia de 60 keV e, portanto, é parcialmente atenuado por carbonato de cálcio, hematita ou cascalhos. No entanto, em fluidos que possuem sólidos com maior coeficiente de atenuação, como no caso da barita, agente adensante comumente encontrado nas formulações de fluidos de perfuração de poços de petróleo, os feixes do Amerício-241 são totalmente atenuados, impedindo a utilização deste radioisótopo para o monitoramento da sedimentação deste sólido. Nesse caso, uma fonte de raios-gama mais energética, com o Césio-137 (660 keV) seria mais indicada. Além da energia emitida em cada feixe de radiação, considera-se também a atividade da fonte, ou seja, a quantidade de feixes de radiação emitidos.

Considerando a técnica da TARG, tem-se alguns estudos importantes. Ruiz (2000) conduziu um estudo pioneiro sobre o fenômeno da sedimentação em batelada, utilizando a técnica de atenuação de raios gama em suspensões aquosas com concentrações iniciais variando de 2% a 3% em volume. Através dessa técnica, o autor monitorou a variação da concentração de sólidos como função da posição e do tempo, $\varepsilon_s(z, t)$. A partir dos resultados experimentais de $\varepsilon_s(z, t)$ e utilizando técnicas numéricas para analisar as equações da continuidade e do movimento para o sólido, o autor também determinou a velocidade de sedimentação e a pressão nos sólidos no sedimento usando os resultados de concentração pelo tempo (RUIZ, 2000). Além disso, ele demonstrou que a pressão nos sólidos não pode ser relacionada, como afirmado na maioria dos trabalhos, apenas à concentração local de sólidos, sendo essa suposição aplicável somente para baixas concentrações volumétricas.

Arouca (2003), seguindo a metodologia proposta por Damasceno (1992), dedicou-se ao estudo das equações constitutivas para a pressão nos sólidos e a permeabilidade do meio poroso em suspensões constituídas por caulim. A TARG foi usada para monitorar a variação da concentração de sólidos em sedimentos por meio de ensaios estáticos. No

decorrer do trabalho, Arouca (2003) apresentou uma equação de dois parâmetros que relacionava a permeabilidade com a porosidade.

Essa equação proposta por Arouca (2003) foi considerada uma alternativa ao modelo de Tiller e Leu (1980) para a determinação empírica das equações constitutivas $p(\varepsilon S)$ e $k(\varepsilon S)$. Com esse avanço, foi possível descrever com maior precisão o comportamento da permeabilidade e da pressão nos sólidos em suspensões de caulim durante o processo de sedimentação.

Silva (2004) conduziu um estudo teórico-experimental sobre sedimentadores divergentes, desenvolvendo um modelo matemático baseado na Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo para simular a operação de espessadores contínuos convencionais e divergentes em estado estacionário. O autor considerou a compressibilidade do sedimento nas simulações, utilizando as equações constitutivas para pressão nos sólidos e permeabilidade do meio poroso determinadas por Arouca (2003). No entanto, os resultados simulados não se aproximaram dos resultados experimentais, e Silva atribuiu essa diferença à consideração exclusiva da pressão nos sólidos como função da concentração local de sólidos.

Em resposta a essas limitações, Arouca (2007) desenvolveu um novo modelo fenomenológico para a descrição teórica da sedimentação, que incluía a compressibilidade do sedimento e descrevia a sedimentação sem a necessidade de utilizar condições de salto nas fronteiras móveis. Para validar os resultados simulados, foram conduzidos ensaios experimentais com o uso da técnica de atenuação de raios gama, monitorando a concentração volumétrica de sólidos em função da posição e do tempo. Os resultados das simulações numéricas realizadas por Arouca mostraram que o modelo misto hiperbólico-parabólico proposto descreveu a sedimentação em campo gravitacional de maneira consistente com o fenômeno físico.

Azevedo (2009) adaptou o modelo de sedimentação em batelada desenvolvido por Arouca (2007) para o fenômeno de sedimentação contínua. As simulações realizadas em seu trabalho demonstraram que as equações constitutivas obtidas por meio de técnicas baseadas em sedimentação em batelada podem ser aplicadas com confiança na simulação da sedimentação contínua.

Moreira (2014) realizou um estudo utilizando o método da TARG em fluidos pseudoplásticos, que apresentam um comportamento reológico similar ao de fluidos de

perfuração de petróleo. O autor obteve informações sobre a interação e a dinâmica de um conjunto de partículas durante o processo de sedimentação e propôs equações constitutivas para pressão nos sólidos e permeabilidade do meio poroso para suspensões constituídas por materiais obturantes comumente adicionados nos fluidos de perfuração.

Por sua vez, Fagundes (2015) também empregou a TARG para monitorar o comportamento da estabilidade fluidodinâmica de um fluido real de perfuração de poços de petróleo (BR-Mul) ao longo de um ano. Utilizando esse monitoramento, a pesquisadora calculou a velocidade de sedimentação das partículas presentes no fluido. A partir desses dados, Fagundes propôs uma equação constitutiva para descrever a pressão nos sólidos do fluido. Essas pesquisas contribuem significativamente para uma melhor compreensão do comportamento dos fluidos de perfuração utilizados na indústria petrolífera, porém a TARG ainda não foi usada para analisar a sedimentação em recipientes inclinados.

2.4 Poços inclinados

Em poços de petróleo inclinados, a sedimentação de partículas apresenta desafios únicos devido à inclinação do poço. Essa inclinação, que caracteriza os poços direcionais, requer técnicas de monitoramento específicas. Os poços inclinados são perfurados com uma trajetória entre 90° (poço horizontal) e 0° (poço vertical) em relação à vertical, apresentando características distintas dos poços tradicionais. Antes de iniciar a perfuração de um poço direcional, é essencial saber a localização do alvo e da superfície. Essa abordagem traz vantagens significativas para a exploração de petróleo, especialmente em cenários cada vez mais desafiadores (SOUZA, 2011).

A inclinação do poço direcional traz como resultado o aumento da produtividade e a redução do impacto ambiental (SOUZA, 2011; MARBUN et al, 2021). As vantagens da perfuração direcional são diversas: ela permite que o início do poço seja em um ponto diferente do ponto a ser alcançado, o que amplia o raio de exploração e possibilita atingir diversos alvos a partir de um único poço. Além disso, a produtividade do poço é aprimorada, contribuindo para a otimização da exploração de recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais (SOUZA, 2011).

Os poços direcionais viabilizam economicamente a exploração de reservatórios que anteriormente eram inacessíveis devido à sua localização ou disposição no subsolo. Eles permitem a perfuração em falhas geológicas, alvos de difícil acesso (por exemplo, localizados abaixo de centros urbanos), a criação de ramificações secundárias, a multiperfuração a partir de uma única plataforma, a exploração em áreas de domos salinos e a perfuração de poços de alívio para solucionar situações de *blowout* (SOUZA, 2011).

Na Fig. 2.11, temos um esquema genérico de como é um poço direcional.

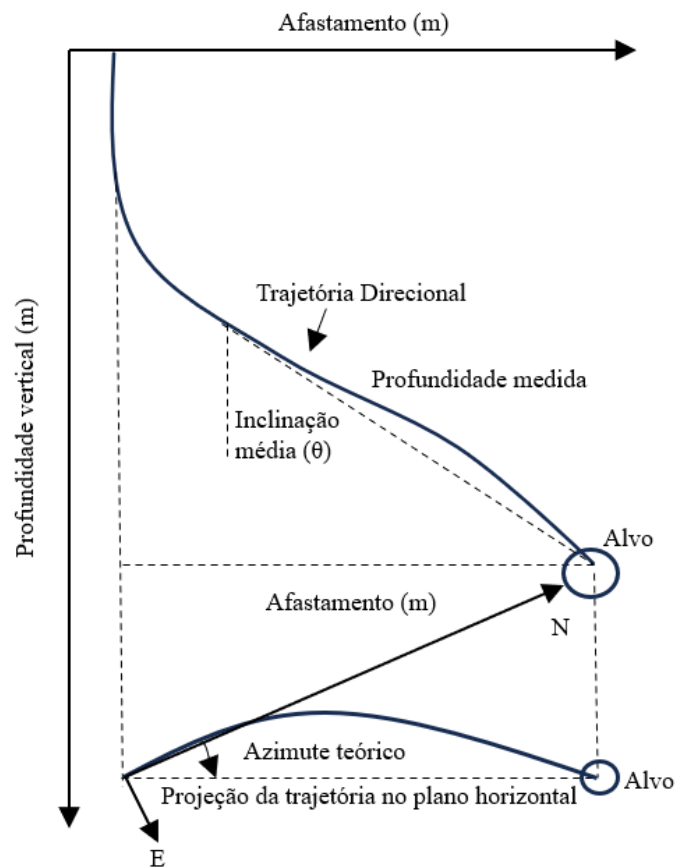


Fig. 2.11. Esquema poço direcional.
Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2008).

Observando a Fig. 2.11, destacam-se algumas definições importantes na perfuração de poços direcionais. O afastamento refere-se à distância entre o local da perfuração (cabeça do poço) e o reservatório (objetivo). A trajetória é o percurso que a broca deve percorrer para alcançar o alvo desejado. A inclinação é o ângulo formado entre o vetor local gravitacional e a tangente ao eixo do poço em um ponto específico.

Na Fig. 2.12, pode-se visualizar claramente a inclinação do poço, que é fundamental para o planejamento e execução de perfurações direcionais.

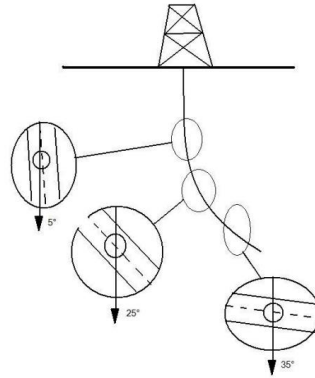


Fig. 2.12. Visualização inclinação.

Fonte: Adaptado de Souza (2011).

Dependendo das características dos seus pontos básicos, os poços direcionais podem ser classificados de maneiras distintas, permitindo adaptar a estratégia de perfuração às necessidades específicas de cada projeto. Essa flexibilidade torna os poços direcionais uma opção vantajosa para a exploração de reservatórios em diferentes cenários geológicos e ambientais.

Na Fig. 2.13, tem-se os pontos básicos da trajetória direcional.

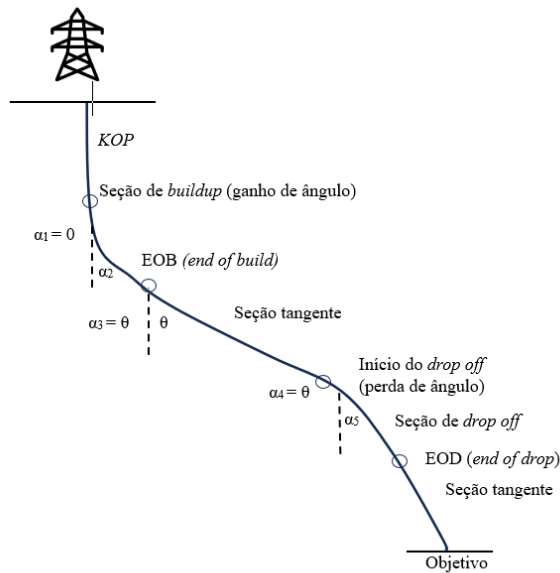


Fig. 2.13. Pontos básicos da trajetória direcional.

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2008).

O ponto de início da seção de ganho de ângulo, conhecido como KOP (*kickoff point*), marca o momento em que a inclinação do poço começa a ser desviada em relação à direção vertical. O ângulo varia com a profundidade do poço. A taxa de ganho de ângulo (*buildup rate - BUR*) geralmente é constante durante essa seção e é expressa em graus a cada 30 metros ($^{\circ}/30\text{m}$), indicando quantos metros devem ser perfurados para atingir a angulação necessária e alcançar o alvo. A expressão para a *BUR* é dada pela Eq. 2.8.

$$BUR = \frac{K \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{PM_2 - PM_1} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Em que α_1 é a inclinação do poço na estação 1, α_2 é a inclinação do poço na estação 2, PM_1 é a profundidade medida do poço na estação 1, PM_2 é a profundidade medida do poço na estação e que K é 30 para *BUR* (graus/30 m) e 100 para *BUR* (graus/ 100 pés).

Após a seção de ganho de ângulo, segue a seção tangente (*slant*), onde a inclinação é mantida constante até que seja necessário um novo ganho de ângulo (*buildup*) ou o início de uma seção de perda de ângulo (*drop-off*). A seção de perda de ângulo representa a redução do ângulo por meio de um *BUR* negativo.

Os poços direcionais são classificados de acordo com o raio de curvatura, que é o raio dos arcos de circunferência da seção de ganho de ângulo e perda de ângulo. Essas classificações incluem raio longo, curto, médio e intermediário. O cálculo do raio de curvatura é realizado com base na Eq. 2.9.

$$r = \frac{360 \times K}{2 \times \pi \times BUR} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Sendo que quando $K = 30$, as unidades de medida são r em metros e *BUR* em graus/30 m e quando $K = 100$, as unidades de medida são r em pés e *BUR* em graus/100 pés.

A partir do raio de curvatura, o poço segue trajetórias distintas, como ilustrado na Fig. 2.14, de acordo com sua classificação. Essas informações são cruciais para o planejamento preciso da perfuração direcional e para o alcance bem-sucedido dos alvos desejados.

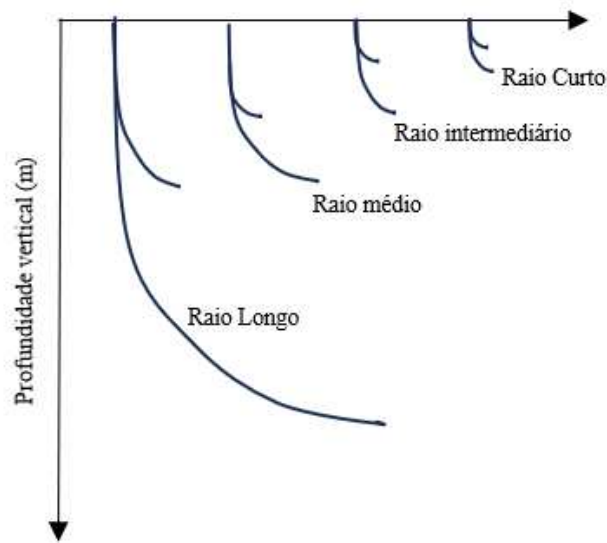


Fig. 2.14. Trajetória dos poços a partir do raio de curvatura.

Fonte: Adaptado de Souza (2011).

2.5 Sedimentação em poços inclinados

O processo de sedimentação de partículas pode ser bastante demorado, mas uma maneira eficiente de aumentar a velocidade desse processo é inclinar o recipiente onde ocorre a sedimentação. Esse fenômeno foi inicialmente relatado por *Boycott* em 1920 e ficou conhecido como "efeito *Boycott*". Ele observou que as partículas sanguíneas sedimentavam muito mais rapidamente em tubos inclinados do que em tubos verticais. Esse efeito é amplamente explorado em dispositivos da indústria para acelerar a sedimentação de partículas sólidas presentes em suspensões sólido-líquido, já que a taxa de produção de fluido clarificado é geralmente superior à obtida em tubos não inclinados (BURGER et al., 2012).

Durante a sedimentação em tubos inclinados, o efeito *Boycott* é caracterizado pela rápida aproximação das partículas na parede inclinada, formando uma área mais concentrada de sólidos perto dessa parede e uma área clarificada acima dela. Devido à maior densidade da parte mais concentrada, ela desliza até o fundo do recipiente. A intensidade do efeito *Boycott* aumenta à medida que o ângulo de inclinação em relação à vertical aumenta (NGUYAN, 2009).

Na Fig. 2.15, é apresentada a representação do efeito *Boycott* durante o processo de sedimentação. Consideramos uma altura inicial h_0 e a altura h , que representa o nível do fluido após um determinado tempo desde o início da sedimentação no tubo. A figura apresenta três regiões distintas:

- Região R1: Nesta região, localizada próxima à parede inclinada do tubo, ocorre o acúmulo mais concentrado de partículas sólidas. É a região onde a sedimentação é mais intensa, resultando em uma alta concentração de sólidos.
- Região R2: Essa é a região intermediária do tubo, onde a concentração de sólidos é menor do que na região R1. Aqui, as partículas ainda estão em suspensão, mas em uma quantidade menos densa do que na região R1.
- Região R3: Na região R3, próxima à superfície do fluido, temos o líquido clarificado, onde a concentração de sólidos é significativamente reduzida. Nessa área, as partículas mais leves permanecem suspensas, enquanto a parte mais densa do fluido, com os sólidos sedimentados, desliza em direção ao fundo do tubo.

O efeito *Boycott* é responsável por essa distribuição diferenciada de sólidos ao longo do tubo inclinado, acelerando a sedimentação e permitindo a separação mais eficiente das partículas sólidas do fluido.

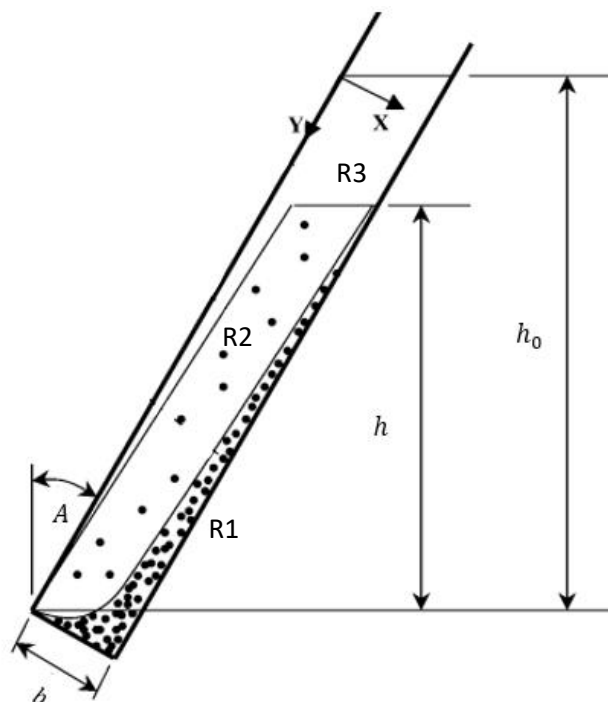


Fig. 2.15. Representação efeito *Boycott*.

Fonte: Adaptado de Zu-Jia Xu (2015).

Os primeiros pesquisadores que tentaram explicar o efeito *Boycott* foram Ponder (1925) e Nakamura e Kuroda (1937). Eles conseguiram propor um modelo simples baseado no aumento da área horizontal de assentamento do sólido devido à inclinação do tubo. O modelo, conhecido como teoria PNK, usa uma relação entre a velocidade em determinada inclinação do tubo e a sua velocidade no tubo vertical para prever a taxa de sedimentação em recipientes inclinados. A taxa é apresentada na Eq. 2.10:

$$\frac{dh}{dt} = -V_0 \left(1 + \frac{h}{b} \sin(A) \right) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Os parâmetros da Eq. 2.10 podem ser visualizados também na Fig. 2.15. O ângulo A representa a inclinação com a vertical em que se encontra o tubo, e V_0 é a velocidade de sedimentação em um tubo de iguais dimensões, mas na posição vertical. Pelo modelo apresentado, podemos inferir que para aumentar a velocidade de sedimentação, é necessário aumentar o ângulo de inclinação em relação à vertical, ou seja, quanto mais inclinado o tubo, maior a velocidade de sedimentação do fluido. Outra forma de aumentar a velocidade de sedimentação é aumentar a diferença entre o comprimento (b) e a altura do fluido no tubo (h).

Acrivos e Hebolzheimer (1981) foram responsáveis por mostrar que quando uma suspensão entra em contato com a parede inferior inclinada, é desenvolvida uma camada de fluido clarificado de espessura uniforme, que flui paralelamente à parede. Em um determinado tempo, a influência desse acúmulo na parte inferior é sentida e esse fluxo se estabiliza em um estado estacionário que está relacionado à distância até a parede. Em Acrivos (1982) foi constatado que, inicialmente, temos uma suspensão de concentração uniforme, e à medida que a sedimentação se desenvolve, as partículas que caem mais rápido se afastam das outras, criando duas regiões diferentes dentro da suspensão. A região inferior contém ambas as espécies da concentração inicial, e a região superior é composta das partículas de sedimentação mais lenta. Apontou-se também a dificuldade por não existir ainda uma teoria adequada para prover a velocidade de sedimentação de uma partícula na suspensão.

Acrivos et al. (1990) propuseram um modelo para descrever o fluxo da camada sedimentar formada como resultado da sedimentação constante em uma placa inclinada. Esse fluxo envolve o equilíbrio entre a convecção de partículas, a sedimentação gravitacional e a migração induzida por cisalhamento. Concluiu-se também que a

concentração de partículas muda de forma descontínua ao longo de uma interface nítida, separando a suspensão da fina camada de sedimentos próxima à parede. Observou-se que a maior fração volumétrica de partículas na camada de sedimentos, para um dado ângulo de inclinação, se aproxima do valor máximo possível, e se ultrapassado, o fluxo seria impedido.

Contudo, o modelo proposto possui limitações, pois prevê a espessura da camada de sedimentos se tornando grande em casos em que o esperado seria que ela desaparecesse. Essas limitações ressaltam a complexidade do comportamento do fluido em recipientes inclinados, e a necessidade contínua de aprimoramento dos modelos teóricos para uma melhor compreensão e descrição desse fenômeno (ACRIVOS et al. ,1990).

Os estudos anteriores não consideraram adequadamente a formação e o fluxo da camada de sedimentos na parede. Apenas Probstein et al. (1981) e Hang e Probstein (1983) levaram em conta o sedimento como um fluido newtoniano com uma composição específica, utilizando um parâmetro ajustável. No entanto, Acrivos (1990) superou essa deficiência dos estudos anteriores, eliminando a necessidade de usar um parâmetro ajustável, ao incluir uma equação para a distribuição da concentração de partículas.

Kapoor (1995), com o objetivo de avançar além das limitações do modelo anterior, realizou uma análise baseada no modelo de Acrivos (1990), incorporando a difusão induzida por cisalhamento. Essa difusão foi considerada devido a gradientes na tensão de cisalhamento e na velocidade de deslizamento ao longo da parede, devido ao tamanho finito das partículas. Utilizando a técnica de anemometria laser Doppler, Kapoor obteve medidas dos perfis de velocidade das partículas na camada de sedimento concentrada próxima à parede. Além disso, utilizou imagens de vídeo para obter dados experimentais e analisar o perfil de espessura da camada sedimentar.

Os resultados do estudo de Kapoor revelaram uma surpreendente concordância entre o modelo teórico e os resultados experimentais. Essa concordância fortalece a validade e a aplicabilidade do modelo proposto por Acrivos (1990) e demonstra a importância de considerar a difusão induzida por cisalhamento para uma descrição mais precisa do fluxo da camada de sedimentos em recipientes inclinados. Essas contribuições impulsionaram ainda mais o entendimento do efeito *Boycott* e da sedimentação em condições inclinadas, aprimorando o conhecimento fundamental e as aplicações práticas em processos industriais de separação e clarificação de suspensões sólido-líquido.

McCaffery et al. (1998) propuseram um modelo numérico bastante detalhado baseado no contínuo para descrever o efeito *Boycott*. Por meio de simulações, mostraram que a velocidade de sedimentação é aumentada pelo ângulo de inclinação, pela concentração inicial de partículas e pela razão entre o comprimento do tubo e a sua largura, corroborando as conclusões da teoria PNK proposta por Nakamura e Kuroda (1937).

Em outro estudo, Zu-Jia (2005) utilizou o método de Boltzmann em rede para simular o campo de velocidade induzido e o movimento de um conjunto de partículas durante a sedimentação em tubos inclinados. Essa abordagem permitiu observar as trajetórias e o comportamento das partículas individualmente, bem como as interações partícula-partícula e partícula-parede, incluindo a formação de aglomerados de partículas. Esse nível de detalhe não era possível em modelos contínuos.

Os resultados da simulação revelaram a presença de vórtices menores intermitentes, desempenhando um papel importante no processo de sedimentação e na distribuição final das partículas. Esses vórtices foram previamente observados por Kinoshita (1949), o qual também descobriu que algumas partículas dentro dos vórtices apresentam uma velocidade aumentada em até 100 vezes.

Burger et al. (2012) destacaram que o principal avanço no entendimento do efeito *Boycott* foi a resolução da fina camada de fluido que flui sob a parede inclinada, voltada para baixo. Essa camada é possivelmente a responsável pelo aumento das taxas de sedimentação em recipientes inclinados. Os pesquisadores investigaram o escoamento paralelo inicial para um fluido sob uma fronteira inclinada infinitamente longa, onde a interface de partículas no fluido se afasta da parede com uma certa velocidade. Eles obtiveram uma solução numérica do sistema acoplado por uma multirresolução adaptativa, que faz uma aproximação da velocidade, pressão e fração de volume de sólidos para uma geometria retangular simples.

Palma et al. (2018) realizaram um estudo em que resolveram numericamente as equações de momento e continuidade associadas à dinâmica da sedimentação de misturas sólido-fluido com alta concentração e baixo valor de número de Reynolds em tubos inclinados. Para isso, utilizaram duas equações de momento, uma para as partículas sólidas e outra para o fluido, e uma equação de continuidade para ambas as fases.

Assumiram que a transferência de massa entre as duas fases é nula. As Eqs. 2.11 e 2.12 são as equações de continuidade para a fase contínua e dispersa, respectivamente.

$$\partial_t(\rho_f \phi_f) + \nabla \cdot (\rho_f \phi_f u_f) = 0 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$\partial_t(\rho_s \phi_s) + \nabla \cdot (\rho_s \phi_s u_s) = 0 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Em que, ϕ é a concentração volumétrica, ρ é a densidade e u é a velocidade. Os sobescritos f é correspondente a fluido, s as partículas e t o tempo. Ambas as fases são consideradas incompressíveis, então pode-se simplificar e reescrever como as Eqs. 2.13 e 2.14.

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_f u_f) = 0 \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_s u_s) = 0 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Pode-se unir as duas equações, usando a condição de conservação de volume $\phi_s + \phi_f = 1$, e a Eq. 2.15 é equação da continuidade para mistura:

$$\nabla \cdot (\phi_s u_s + u_f (1 - \phi_s)) = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

As Eqs. 2.16 e 2.17 são as equações do momento, não conservativas, para as fases contínua e dispersa.

$$\rho_f \phi_f \left[\frac{\partial u_f}{\partial t} + (u_f \cdot \nabla) u_f \right] = -\phi_f \nabla p + \nabla \cdot (\phi_f \tau_f) + \phi_f \rho_f g + F_{m,f} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$$\rho_s \phi_s \left[\frac{\partial u_s}{\partial t} + (u_s \cdot \nabla) u_s \right] = -\phi_s \nabla p + \nabla \cdot (\phi_s \tau_s) + \phi_s \rho_s g + F_{m,s} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Onde, p é a pressão da mistura, considerada igual nas duas fases para simplificação, g é a aceleração da gravidade e τ tensor de viscosidade e F_m é a troca de momento entre as fases. Na Eq 2.18 foi ignorado a influência de partículas polidispersas, então:

$$\rho_s \phi_s \left[\frac{\partial u_s}{\partial t} + (u_s \cdot \nabla) u_s \right] = -\phi_s \nabla p + \nabla \cdot \tau_s - \nabla p_s + \phi_s \rho_s g + F_{m,s} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Considerando p_s a pressão de sólidos. Para o desenvolvimento da equação a fase continua foi considerada newtoniana, e dessa forma temos as Eqs. 2.19 e 2.20 que definem o tensor da tensão viscosa.

$$\tau_f = \eta_f \left[\nabla u_f + (\nabla u_f)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u_f) \mathbb{I} \right], \quad (\text{Eq. 2.19})$$

$$\tau_s = \eta_s \left[\nabla u_s + (\nabla u_s)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u_s) \mathbb{I} \right], \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Onde, η é a viscosidade dinâmica de cada uma das fases e \mathbb{I} é o tensor identidade. Existem uma diversidade de equações para modelar a viscosidade newtoniana associada a um conjunto de partículas. Porém nesse artigo os autores, decidiram utilizar o modelo proposto por Krieger (Eq. 2.21).

$$\eta_s = \eta_f \left(1 - \frac{\phi_s}{\phi_{s,max}} \right)^{-2,5\phi_{s,max}} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

As equações foram resolvidas simultaneamente e o modelo foi capaz de representar adequadamente o comportamento das partículas em processo de sedimentação em um tubo inclinado coincidindo com resultados experimentais realizados também pelos autores.

Reyes et al. (2019) realizaram estudos em decantadores lamelares, que utilizam o efeito *Boycott* para melhorar o processo de sedimentação em comparação com os decantadores verticais. O estudo investigou tanto o efeito da inclinação quanto o da temperatura. Eles adotaram um modelo para a suspensão, considerando-a como um processo contínuo bidimensional. Observaram que o efeito *Boycott* induz o acúmulo de partículas na parede oposta à inclinação, transportando os sedimentos para o fundo do decantador. Esse efeito foi potencializado pelo aumento da temperatura. Concluíram que o fenômeno não é um efeito *Boycott* simplificado, pois há uma vorticidade intensa gerando uma zona propensa a acelerar a migração de partículas em direção à parede, dificultando sua ressuspensão.

Os estudos conduzidos por Chang et al. (2019) utilizando um modelo Euleriano-Lagrangiano para simular colunas de água inclinadas em um teste numérico 3D trouxeram importantes conclusões sobre o comportamento das partículas em processo de sedimentação. Observou-se que a inércia das partículas desempenha um papel crucial na

ressuspensão, pois interage com os vórtices formados no escoamento, resultando em uma influência significativa na taxa de sedimentação.

Além disso, os pesquisadores destacaram que a força da pressão não pode ser negligenciada, pois a sua inclusão nos cálculos evita uma superestimação da sedimentação. Para uma compreensão mais completa do processo, o efeito *Boycott* foi considerado como uma convecção, e a sedimentação foi dividida em três fases distintas: desenvolvimento, convecção e deposição. Primeira fase é o início, seguido pela fase chamada de convecção quando ocorre o efeito *Boycott*, e a deposição ocorre quando as partículas sedimentam lentamente e se depositam no fundo do tubo (CHANG et al., 2019).

Dentre os resultados obtidos, constatou-se que o ângulo de inclinação do tubo exerce um papel relevante na taxa de sedimentação. A faixa de ângulos ótimos para sedimentação foi encontrada em diferentes estudos, variando entre 45° e 55°. Demir (1995) também identificou um ângulo de 50° como o mais adequado para a sedimentação em suas pesquisas. Por sua vez, Reyes (2022) estudou tubos fortemente inclinados e reforçou a faixa ótima de ângulos, indicando que o ângulo de 56° proporciona o assentamento mais rápido.

Esses resultados são de grande relevância para o projeto e otimização de sistemas industriais que envolvem a sedimentação de partículas, como decantadores e outros dispositivos de separação sólido-líquido. Os estudos de Chang et al. (2019), Demir (1995) e Reyes (2022) contribuem para o avanço da compreensão dos fenômenos envolvidos na sedimentação em tubos inclinados, oferecendo informações valiosas para acelerar ou retardar o processo de acordo com a necessidade da indústria.

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo compreende uma abordagem teórica, destacando os principais trabalhos que contribuem para a evolução desta tese. No próximo capítulo, serão descritos os procedimentos experimentais, fornecendo detalhes sobre o material e os equipamentos empregados.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo, são apresentados os métodos empregados na condução dos experimentos, juntamente com a descrição dos materiais e equipamentos utilizados neste estudo.

3.1 Materiais Sólidos

Neste estudo, foram realizados ensaios de sedimentação utilizando a TARG (testes dinâmicos) com três tipos de fluidos com características distintas: água (newtoniano), glicerina 92% v/v (newtoniano) e goma xantana 0,2% v/v (não newtoniano). As suspensões utilizadas nos experimentos foram compostas por carbonato de cálcio (10% v/v) e microesferas de vidro (20% v/v).

Para o Carbonato de cálcio (CaCO_3) 2-44 μm , as amostras foram utilizadas conforme enviado pela empresa Sinergia Científica – Comércio de Produtos para Laboratórios Ltda. (sem o uso de peneiramento). As microesferas de vidro (ME) foram obtidas da empresa Potters Industrial Ltda.

O CaCO_3 foi escolhido porque é empregado nos fluidos de perfuração como agente obturante. A inclusão de CaCO_3 resulta na formação de uma camada fina, conhecida como reboco, que reduz a invasão de fluidos nos reservatórios (MOREIRA, 2014).

A seleção da distribuição de tamanho de partículas, tanto do CaCO_3 como da ME, foi cuidadosamente realizada para garantir que a variação da concentração de sólidos ao longo do tempo nos fluidos utilizados ocorresse de maneira controlada, evitando tanto variações excessivamente rápidas quanto muito lentas. Permitindo uma análise clara e precisa do fenômeno de sedimentação.

3.1 Caracterização dos materiais sólidos

Para a determinação das densidades do CaCO_3 e da ME utilizou-se um picnômetro de gás hélio (Picnômetro AccuPyc 1330), os resultados obtidos estão na Tab. 3.1.

Tab. 3.1. Densidade dos sólidos

Sólido	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão (g/cm ³)
Carbonato de cálcio	2,690	0,002
Microesfera de vidro	2,460	0,001

3.2 Análise granulométrica

A Tab. 3.2 apresenta os materiais sólidos utilizados, juntamente com a nomenclatura utilizada no trabalho para referenciá-los.

Tab. 3.2. Materiais sólidos e granulometria.

Sólido	Granulometria
Microesfera de vidro (ME)	212 - 800 μm
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	2 - 44 μm

Utilizou-se o granulômetro Malvern Mastersizer Microplus MAF 5001® para realizar as análises granulométricas dos materiais sólidos. Os resultados experimentais de granulometria do CaCO₃ estão apresentados na Fig. 3.1, onde a Fig. 3.1(a) mostra a distribuição granulométrica cumulativa e a Fig. 3.1(b) representa a frequência de partículas em função do diâmetro para o CaCO₃ utilizado nos ensaios.

Observa-se na Fig. 3.1(b), que a distribuição do CaCO₃ é assimétrica deslocada para as partículas de maior diâmetro, com o tamanho variando entre 0,35 e 70,9 μm e a maior parte das partículas com tamanho entre 17 e 30 μm .

Os resultados experimentais de granulometria da microesfera estão apresentados na Fig. 3.2, onde a Fig. 3.2(a) traz a distribuição granulométrica cumulativa e a Fig. 3.2(b) representa a frequência de partículas em função do diâmetro para a ME usada nos ensaios.

Na Fig. 3.2(b) nota-se que a distribuição granulométrica da Microesfera é simétrica, com uma distribuição entre 126 e 1000 μm com a maior concentração de partículas entre 300 e 400 μm .

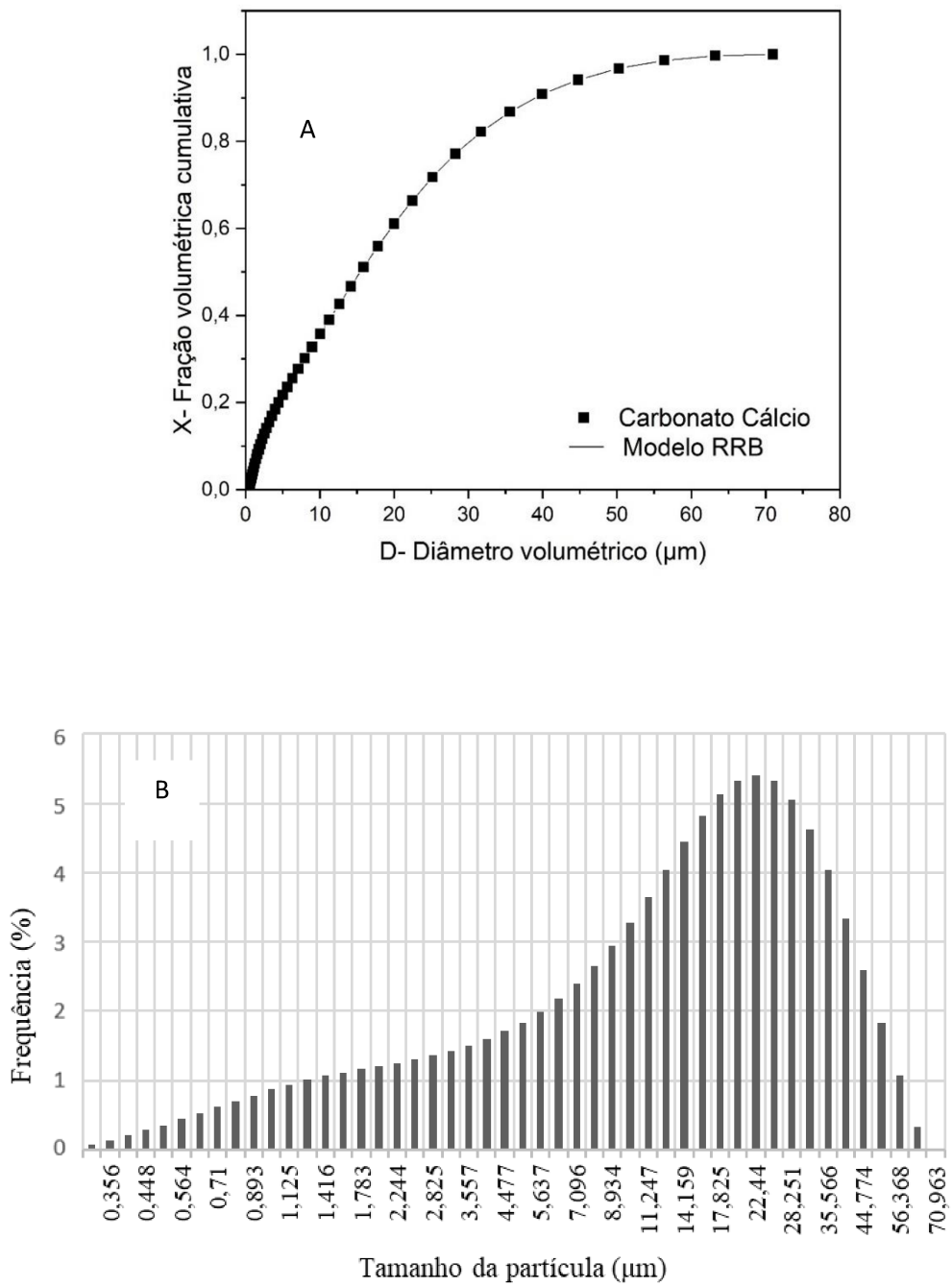


Fig. 3.1. (a) Distribuição cumulativa dos pontos experimentais e o ajuste e (b) frequência em função do diâmetro da partícula do CaCO₃.

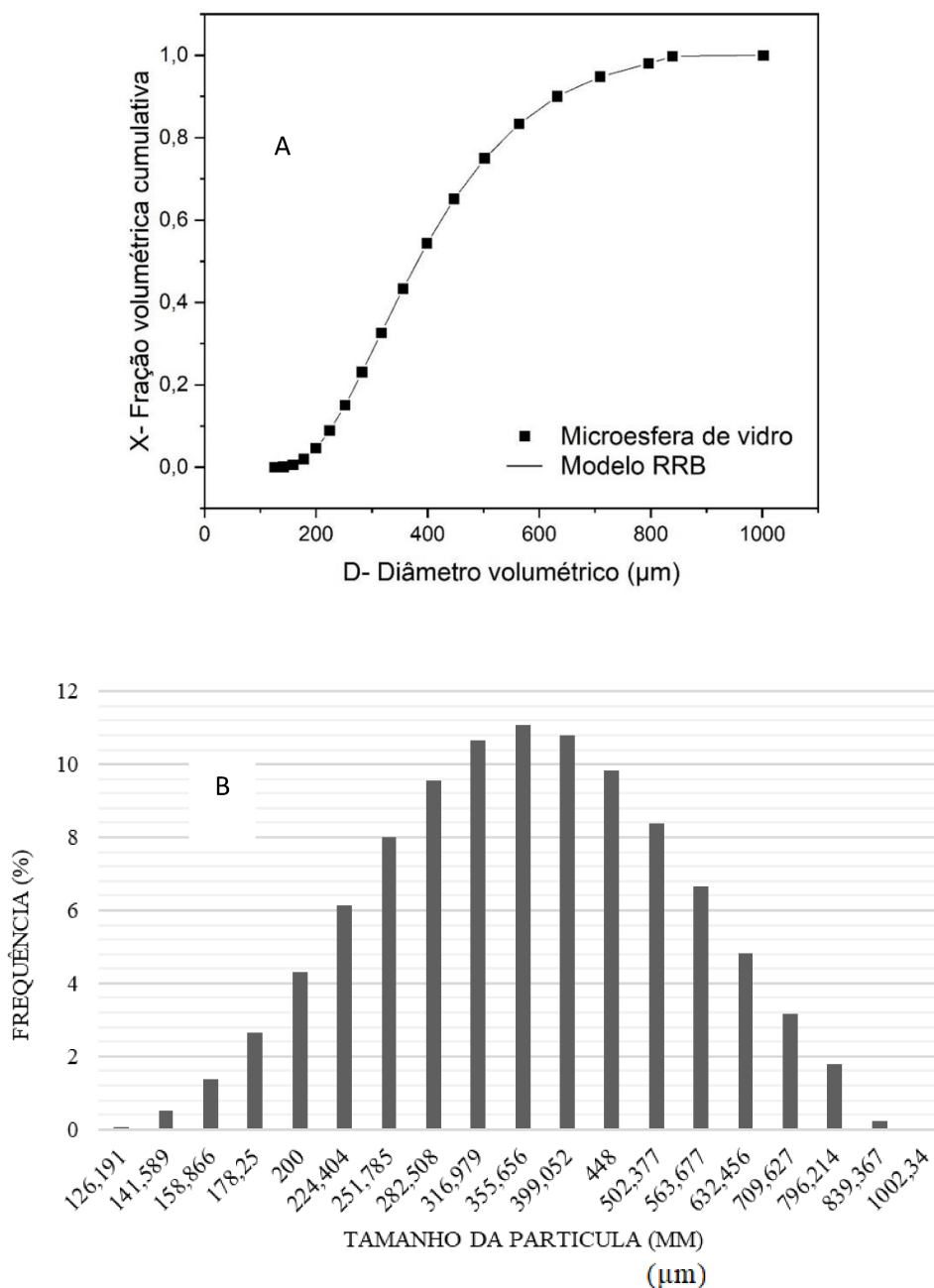


Fig.3.2. (a) Distribuição cumulativa dos pontos experimentais e o ajuste e (b) frequência em função do diâmetro da partícula da Microesfera de vidro.

Os diâmetros volumétricos das partículas correspondentes a 10% ($D_{0,1}$), 50% ($D_{0,5}$) e 90% ($D_{0,9}$) da distribuição cumulativa, juntamente com o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) estão dispostos na Tab. 3.3:

Tab. 3.2. Diâmetro volumétrico das partículas.

Sólido	$D_{0,1}$ (μm)	$D_{0,5}$ (μm)	$D_{0,9}$ (μm)	$D_{3,2}$ (μm)
CaCO ₃	1,9	15,4	38,9	5,131
ME	229,6	381,4	632,4	354,1

As Figs. 3.1(a) e 3.2(a) apresentam os pontos experimentais obtidos juntamente com o ajuste de Rosin-Rammler-Bennet (RRB), representado pela Eq. 3.1, que apontou o melhor ajuste para a distribuição granulométrica das partículas.

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{D}{D'}\right)^N\right) \quad (\text{Eq.3.1})$$

em que X é a fração volumétrica de partículas com diâmetro menor ou igual a D . Os parâmetros D' e N são estimados pelo modelo. De acordo com Peçanha (2014), o parâmetro N não possui significado estatístico e o parâmetro D' equivale ao diâmetro de partícula em que 63,2% da massa da amostra são correspondentes a partículas menores do que $D_{63,2}$.

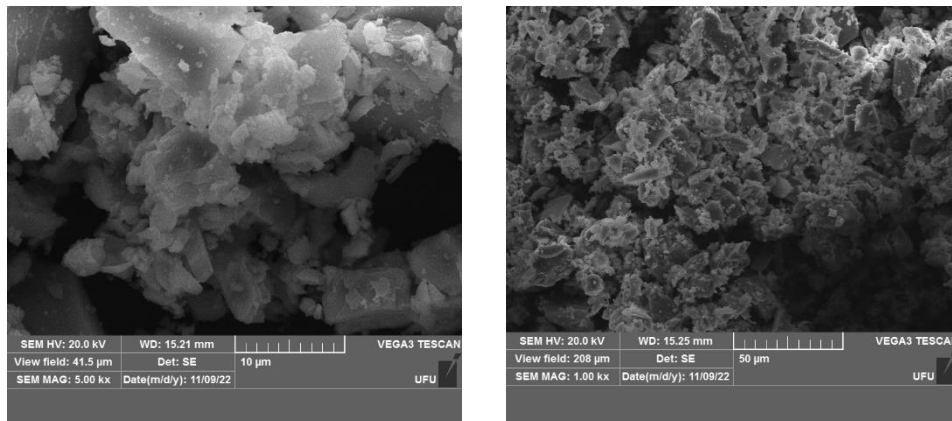
Os parâmetros estimados do modelo (D' e N), juntamente com o coeficiente de determinação (R^2) estão dispostos na Tab. 3.4.

Tab. 3.3. Parâmetros estimados para o modelo RRB e coeficiente de determinação.

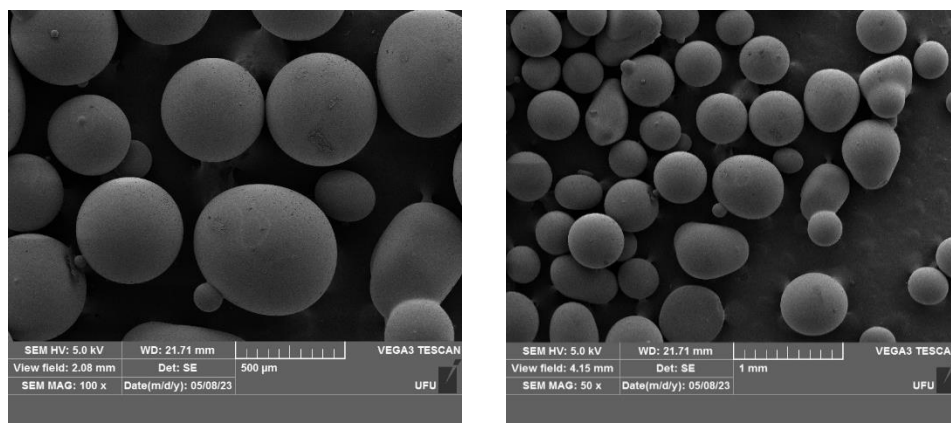
Sólido	Parâmetros do modelo		R^2
	D' (μm)	N (-)	
CaCO ₃	19,99	1,08	0,996
ME	140,7	2,89	0,999

3.3 Determinação da esfericidade dos materiais sólidos

As imagens de Micrografia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas com um microscópio Tescan, modelo VEGA 3 LMU (Fig. 3.3), na tensão de aceleração de 20 kV. As amostras foram dispersas em suportes de alumínio e cobertas por uma fina camada de ouro evaporado (metalização).



(A)MEV Carbonato de Cálcio



(B) MEV Microesfera de vidro.

Fig. 3.3. Análise dos materiais sólidos no microscópio eletrônico de varredura. (A) Carbonato de Cálcio e (B) Microesfera de vidro.

Com as imagens obtidas via MEV foi possível determinar a esfericidade próximas dos materiais, para isso foi utilizada a tabela comparativa proposta por Rittenhouse (1943), que está em anexo, e os valores considerados seguem na Tab. 3.5.

Tab. 3.4. Esfericidade dos sólidos.

Sólido	Esfericidade
Carbonato de cálcio	0,60
Microesfera de vidro	0,95

A esfericidade foi estimada por ser um dos fatores que influencia na velocidade de sedimentação das partículas. A ME possui uma maior esfericidade maior do que o CaCO_3 , e por este motivo foi escolhida para os testes com fluidos mais viscosos.

3.4 Fluidos newtonianos e não newtonianos

Neste estudo, os ensaios de sedimentação foram realizados com o uso de soluções aquosas de glicerina a 92% v/v (GL) e soluções aquosas de goma xantana a 0,2% m/m (GX).

- Glicerina

O glicerol, também conhecido como glicerina (propano-1,2,3-triol) de acordo com a denominação oficial da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), é um composto orgânico que se apresenta em estado líquido à temperatura ambiente. Ele é notável por sua elevada viscosidade e solubilidade tanto em água quanto em álcool (MENDES e SERRA, 2012).

Na indústria, os derivados do glicerol desempenham um papel importante em várias atividades, tendo aplicações significativas. Por exemplo, na indústria farmacêutica, é usado na composição de cápsulas. Além disso, atua como emoliente e umectante em produtos como cremes dentais e hidratantes para a pele. Sua capacidade de aumentar a flexibilidade das fibras é empregada em tecidos, e ele também é utilizado como lubrificante em máquinas de processamento de alimentos (LARSEN, 2009).

O composto de glicerol P.A. ACS ($C_3H_5(OH)_3$), fornecido pela Vetec Química Fina Ltda, foi empregado nos experimentos desta pesquisa. Informações fornecidas pelo fabricante indicaram uma densidade aproximada de $1,26 \text{ g/cm}^3$ para o composto, com pureza mínima de 99,5%.

Nos ensaios realizados, as amostras de glicerol foram diluídas em água para formar soluções aquosas de glicerina. Essa diluição foi necessária para reduzir a viscosidade do composto e permitir a obtenção de suspensões homogêneas durante a realização dos ensaios experimentais.

- Goma xantana

A goma xantana, um biopolímero de notável destaque comercial, é sintetizada eficientemente por bactérias fitopatogênicas do gênero *Xanthomonas* obtida da fermentação aeróbica de açúcares simples, como a glicose e a sacarose. Suas propriedades físico-químicas são notáveis e incluem características como alta solubilidade em meio aquoso, uma marcada pseudoplasticidade que resulta em soluções viscosas mesmo em concentrações baixas, e resistência frente a elevadas temperaturas e flutuações de pH (GARCÍA-OCHOA et al., 2000; LUVIELMO e SCAMPARINI, 2009).

Essas características conferem à goma xantana diversas aplicações vantajosas, como seu uso como espessante, estabilizante, agente dispersante e viscosificante, o que a torna um componente de grande utilidade em diversas indústrias. Segundo Born et al. (2002), aproximadamente 65% da produção de goma xantana encontra emprego na indústria alimentícia, 15% na indústria petrolífera e 20% em uma variedade de outras aplicações.

Na indústria petrolífera, a goma xantana assume o papel crucial de agente viscosificante na formulação de fluidos projetados especialmente para perfuração em formações de rochas reservatórias. Esses fluidos geralmente incorporam aditivos poliméricos e agentes obturantes em sua composição (WALDMANN, 2005; QUEIROZ NETO et al., 2007), evidenciando a relevância desse biopolímero na otimização dos processos de perfuração nesse contexto específico.

3.5 Preparo das soluções de glicerol e goma xantana

As soluções de glicerina foram preparadas com uma concentração volumétrica de 92%, e as soluções de goma xantana foram preparadas com concentração mássica de 0,2%. A goma xantana utilizada foi fornecida pela LABSYNTH produtos para laboratório e a glicerina usada fornecida pela Vetec Química Fina Ltda.

Para a preparação das soluções de glicerol e goma xantana, os componentes eram adicionados um a um, conforme a ordem e as quantidades indicadas nas Tab.s 3.4 e 3.5.

Tab. 3.5. Preparo das soluções de Glicerol 92% v/v.

Componente	Quantidade
Água destilada	80 mL
Glicerol	920 mL

Tab. 3.6. Preparo das soluções de Goma Xantana 0,2% m/m.

Componente	Quantidade
Água destilada	998 mL
Formaldeído 36,5 – 38% m/m	2,0 mL
Goma Xantana	2,0 g

O agitador de hélice modelo RW 20D2Mn, fabricado pela Ika Labortechnik, foi usado para garantir a dispersão da goma xantana e do glicerol em meio aquoso. No caso da Goma xantana a adição foi feita de maneira gradual para prevenir a formação de aglomerados, com agitação sendo progressivamente aumentada. Após a completa adição dos materiais, a agitação contínua foi mantida por 10 minutos para garantir a completa dissolução dos polímeros. Depois, o recipiente foi fechado com plástico insulfilme e deixado em repouso por 24 horas, promovendo a hidratação do polímero e a consequente estabilização da viscosidade aparente da solução.

A presença de formaldeído na composição da solução tem a justificativa de inibir a proliferação de microrganismos que poderiam degradar a goma xantana. Dessa forma, a adição deste agente biocida faz a manutenção das características reológicas da solução, assegurando sua estabilidade ao longo de um período prolongado.

3.6 Comportamento reológico dos fluidos

Os ensaios reológicos foram realizados no Laboratório de Processos de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, no reômetro Brookfield R/S Plus, com banho termostaticado também da marca Brookfield, modelo *programmable controller* TC-6021, e no viscosímetro Brookfield (DV2T) com o acoplamento para amostras pequenas, e spindle SC4-18 para a solução de goma xantana.

Este estudo empregou três técnicas distintas para a caracterização dos fluidos utilizados. Essas técnicas são as seguintes:

a) Reogramas (Viscosidade x Taxa de Deformação):

Essa técnica envolve a medição da viscosidade do fluido em diferentes taxas de deformação, permitindo traçar gráficos que mostram como a viscosidade do fluido varia com a taxa de deformação aplicada. Isso ajuda a compreender a resposta do fluido a diferentes forças de cisalhamento.

No caso de um fluido newtoniano, essas curvas são linhas retas que se iniciam na origem e têm uma inclinação definida como " μ ". Para fluidos não-newtonianos, as curvas de escoamento trazem uma tendência não linear e podem até mesmo seguir uma tendência linear, só que não passa pela origem.

Para fluidos não-newtonianos com viscosidade aparente dependente do tempo, os valores de viscosidade mudam ao longo do tempo após a aplicação de uma taxa de deformação constante, principalmente em fluidos previamente em repouso.

Para a solução de goma xantana a 0,2% m/m o reograma e diagrama de viscosidade foram obtidos para taxas de cisalhamento de 50, 25, 10, 5 e 1 s⁻¹, antecedidas por um pré-cisalhamento de 100 s⁻¹. O pré-cisalhamento foi realizado com o intuito de desfazer eventuais estruturas gelificadas que poderiam estar presentes nas soluções. O cisalhamento correspondeu ao tempo necessário para atingir o estado estacionário de tensão de deformação e viscosidade aparente para uma taxa de cisalhamento específica.

Para as soluções de glicerina a 92% v/v, devido a questões de sensibilidade do viscosímetro, foi necessário utilizar o reômetro. A viscosidade e tensão de cisalhamento foram obtidas para taxas de deformação no intervalo de 0,1 a 100 s⁻¹.

b) Técnica de Histerese:

A histerese é uma característica de materiais não-newtonianos que exibem diferentes comportamentos reológicos durante o aumento e a diminuição da taxa de deformação. Essa técnica analisa a diferença entre os resultados obtidos nos ciclos ascendente e descendente da taxa de deformação.

Para realizar os testes e obter a curva de histerese, aplicou-se inicialmente um pré-cisalhamento de 132 s⁻¹ por 2 minuto na amostra, mantendo a temperatura constante a 25°C. Após esse período, foi iniciado o aumento gradual da taxa de deformação de 1 s⁻¹ até 100 s⁻¹. Subsequentemente, a taxa de deformação era reduzida gradualmente até atingir de volta a taxa de 1 s⁻¹. Esse teste foi repetido três vezes, com uma nova amostra a cada repetição, e teve uma duração total de 24 minutos.

De acordo com Mewis e Wagner (2009), essa técnica de histerese é utilizada para identificar fluidos com propriedades tixotrópicas. Se houver diferença entre a curva de aumento e a curva de redução da taxa de deformação, com a curva de aumento mostrando valores mais altos de tensão cisalhante do que a curva de redução, isso sugere a presença de tixotropia nas propriedades do fluido. Em resumo, a análise da histerese permite verificar se há um ciclo na relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

c) Testes a Taxa de Deformação Constante (Pico de tensão):

É usado para avaliar a presença de tixotropia. Nessa técnica, o fluido é submetido a uma taxa de deformação constante por um período, permitindo a observação de como sua viscosidade evolui ao longo do tempo sob essa condição constante.

Em fluidos tixotrópicos, essa taxa de deformação aplicada causa um pico na tensão de cisalhamento, seguido por uma diminuição gradual até alcançar um estado estacionário (MEWIS e WAGNER, 2009).

Neste estudo as amostras foram inicialmente submetidas a um cisalhamento intenso com uma taxa de deformação de 100 s^{-1} durante 1 minuto. Em seguida, as amostras eram deixadas em repouso por 10 segundos. Após o período estático, o fluido era submetido a uma taxa de deformação constante de 1 s^{-1} por 1 minuto, medindo-se a tensão de cisalhamento. Esses testes foram repetidos para períodos de repouso de 10 minutos e 30 minutos. O cisalhamento intenso inicial (100 s^{-1}) tinha o propósito de romper qualquer estrutura gelificada presente no fluido.

O aumento abrupto na tensão de cisalhamento observado no início do escoamento era avaliado em relação ao tempo de repouso da amostra. Essa recuperação da viscosidade aparente em função do tempo de repouso era analisada a partir de um gráfico que relacionava os valores do pico de tensão com o tempo de repouso (MEWIS e WAGNER, 2009).

O uso dessas técnicas visa a identificar e compreender todas as características não-newtonianas presentes nos fluidos estudados neste trabalho.

3.7. Metodologia Experimental

Neste trabalho foi realizada a análise quantitativa da sedimentação, utilizando a técnica de atenuação de raios- γ , ou seja, pelo monitoramento da variação da concentração local de sólidos ao longo do tempo.

Neste estudo, usou-se uma unidade de radioisótopos para monitorar a concentração local de sólidos. A unidade continha uma fonte selada de raios gama do amerício-241 (^{241}Am), com atividade de 100 mCi em 22 de setembro de 1995, segundo a Amersham (atual GE Healthcare).

Essa fonte estava dentro de uma blindagem de chumbo, com dimensões externas de 10,0 cm x 9,0 cm x 7,0 cm. Um orifício central de cerca de 5 mm no bloco de chumbo da frente funcionava como colimador dos raios gama, permitindo que os feixes atravessassem com baixa divergência e fossem direcionados para outro bloco de chumbo que abrigava o módulo primário do sistema de detecção de radiação.

A colimação de raios gama, além de ser crucial para a técnica de atenuação de raios gama, também evitava a exposição do operador à radiação, uma vez que os feixes colimados iam diretamente para o sistema de detecção, enquanto os não colimados eram atenuados pela blindagem de chumbo.

A pequena espessura dos orifícios nos blocos de chumbo exigia um alinhamento preciso entre a fonte e o sistema de detecção, alcançado por ajustes na posição do bloco de chumbo que continha o radioisótopo. A unidade de radioisótopos consistia principalmente em uma fonte de ^{241}Am , um suporte de madeira que possibilitava mudar inclinação do tubo de vidro e um sistema de detecção de radiação. O conjunto, contendo a fonte e o módulo primário, era suportado por uma plataforma com movimentação tanto no eixo vertical como no horizontal que permitia medidas desde a base da proveta de testes ($z=0$) até o topo da coluna de suspensão. O equipamento também utiliza um computador para ler e registrar os valores obtidos pelo sistema. A estrutura pode ser vista na Fig. 3.4 (a e b).

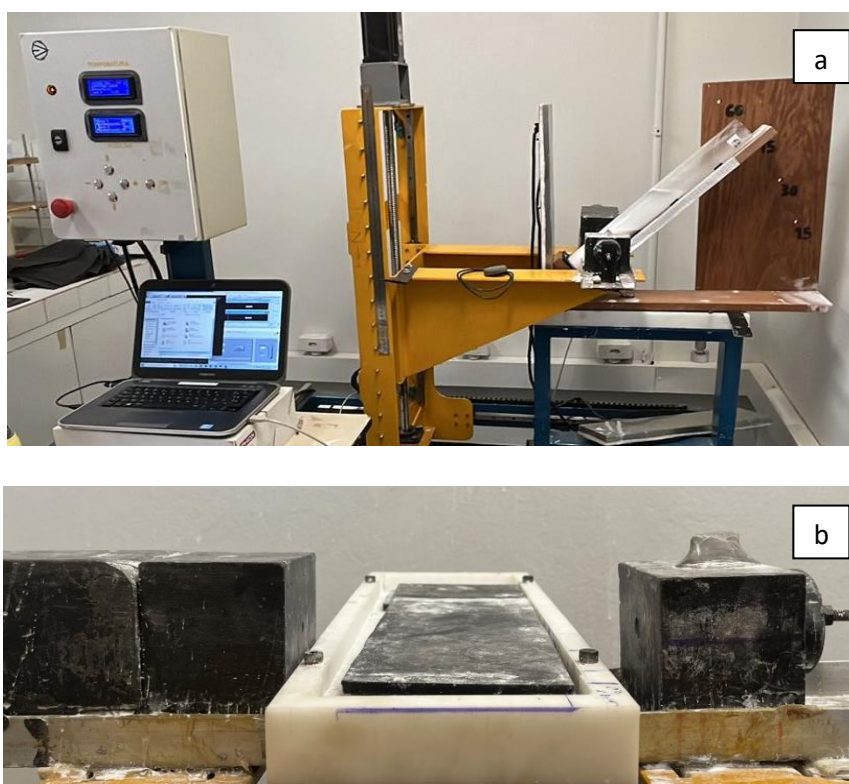


Fig.3.4. (a) Unidade experimental completa com fonte, computador, suporte inclinado e plataforma e (b) detalhe do alinhamento dos cubos de chumbo com a fonte de radioisótopo e detector.

O intuito era analisar a influência de 4 diferentes inclinações sendo elas: 0° (vertical); 30°; 45° e 60°, na sedimentação em diferentes tipos de fluido (newtoniano e não newtoniano) e a leitura dos pontos e foi realizada de forma paralela ao efeito *Boycott*.

Na Fig. 3.5, está apresentada a estrutura utilizada para obter as inclinações e as orientações de referência necessárias nos testes.



Fig. 3.5. Estrutura para mudança de inclinação e referenciais usados nos testes.

Para melhor entender e comparar os resultados fez-se uma adimensionalização na altura do tubo, para isso foi usada a Eq. 3.2.

$$AT = \frac{H}{H_T} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

em que AT representa a altura do tubo adimensionalizada, H é a altura do ponto que será estudado, H_T é a altura máxima que o fluido atinge. Por exemplo, em uma inclinação de 30° (θ) e sendo H_T igual a 28 cm, a altura AT de 0,21 é correspondente ao H de 6 cm. Na Fig. 3.6, tem-se um exemplo das alturas adimensionais usadas no tubo com inclinação de 30°.

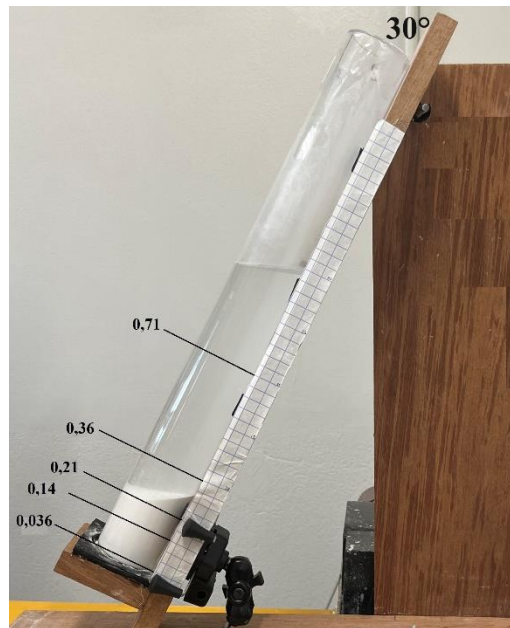


Fig. 3.6. Ilustração das alturas adimensionais monitoradas no tubo inclinado a 30°.

3.8.TARG

A equação de Lambert, representada pela Eq. 3.3, estabelece uma relação entre a variação na intensidade de um feixe monoenergético e colimado de raios gama (com energia E) ao atravessar um meio físico. Essa equação é expressa como:

$$I(E) = I_0 \exp(-\sigma(E)\rho y) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Nessa equação, I_0 e I representam, respectivamente, a intensidade do feixe antes e após sua passagem pelo meio físico. O coeficiente de atenuação mássico do meio é representado por σ , a densidade do meio por ρ , e a espessura do meio por y .

Quando se considera um cenário específico em que o meio alvo da radiação é uma suspensão sólido-líquido, e o estado de referência é uma solução sem sólidos suspensos, a equação de Lambert (Eq. 3.4) toma a seguinte forma (conforme GARDNEY e ELY-JR, (1967), apud FAGUNDES (2015):

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que, β é um parâmetro que precisa ser determinado por meio da curva de calibração.

Ao empregar um sistema de detecção de radiação, é esperado que o número de contagens registradas seja menor do que a quantidade real de fótons que alcançam o

detector. Para corrigir essa discrepância, é essencial ajustar as intensidades do feixe (I e I_0) pelo tempo de resolução do sistema, também chamado de tempo morto (τ). As equações corrigidas para as contagens são:

$$R = \frac{I}{1-\tau I} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$R_0 = \frac{I_0}{1-\tau I_0} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Assim, a equação de Lambert (Eq. 3.4) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Nesse novo formato, R representa o número de pulsos corrigidos que atravessam o meio físico, e R_0 representa o número de pulsos corrigidos de radiação que passam pela proveta sem a presença de sólidos suspensos (branco da proveta). Essa equação é usada para gerar uma curva, também conhecida como curva de calibração.

4. Cálculo do tempo de resolução do sistema de detecção (τ)

Antes do início da coleta de dados é necessário caracterizar o sistema quanto ao tempo morto, ou seja, o tempo de processamento do sistema. Que é o responsável pela correção da leitura indireta de concentração volumétrica de partículas obtidas pela TARG.

O procedimento realizado consiste em utilizar diferentes placas de acrílico para representar fontes radioativas distintas (A e B) e para tal cálculo, foi utilizada a Eq. 3.8 e realizado o procedimento experimental descrito por Gardner e Ely Jr (1967).

$$\tau = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_b}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que I_A é a taxa de contagem obtida com a fonte radioativa A, I_B é a taxa de contagem obtida com a fonte radioativa B, I_{AB} é a taxa de contagem obtida com as duas fontes radioativas juntas e I_b é a taxa de contagem do background, ou seja, a contagem obtida associada com a detecção de radiação oriunda de outras fontes que não seja o radioisótopo que está sendo usado.

A Tab. 3.8 apresenta os valores referentes aos termos I_{AB} , I_A , I_B e I_b .

Tab. 3.7. Valores usados para o cálculo de tempo de resolução do sistema.

	Taxa de contagem (s^{-1})
I_A	2898
I_B	2501
I_{AB}	2030
I_b	3,01

O valor encontrado para o tempo de resolução do sistema (τ) foi de 0,000173 s.

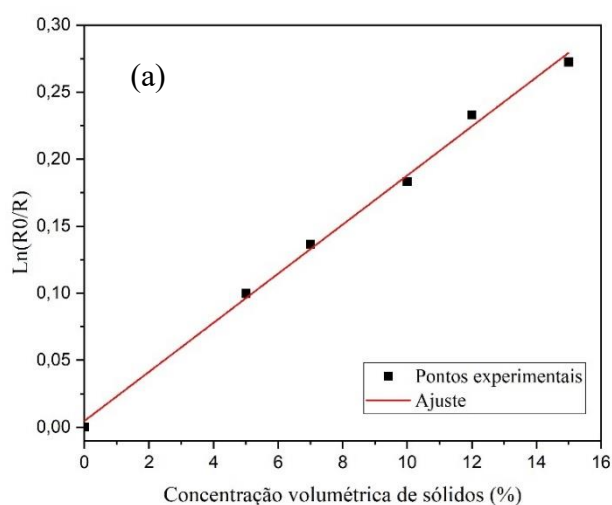
3.9. Curvas de calibração das suspensões estudadas e determinação do β .

O parâmetro β é obtido a partir da variação da concentração local de sólidos ao longo do tempo. Sendo que para cada suspensão, é indispensável uma curva de calibração específica.

Para a suspensão de água mais carbonato de cálcio, foram usadas as suspensões com as concentrações iniciais iguais a 0, 5, 8,10, 12 e 15 % (v/v).

Já para a suspensão de goma xantana ou glicerina mais ME, foram usadas as suspensões com as concentrações iniciais de 0 a 30% (v/v), com intervalos de 5%.

Os resultados obtidos foram utilizados para realizar um ajuste linear de acordo com a Equação Modificada de Lambert., sabendo que o coeficiente β é o coeficiente angular da reta ajustada. As curvas obtidas para as 3 suspensões usadas nos testes são apresentadas na Fig. 3.7 (a, b e c).



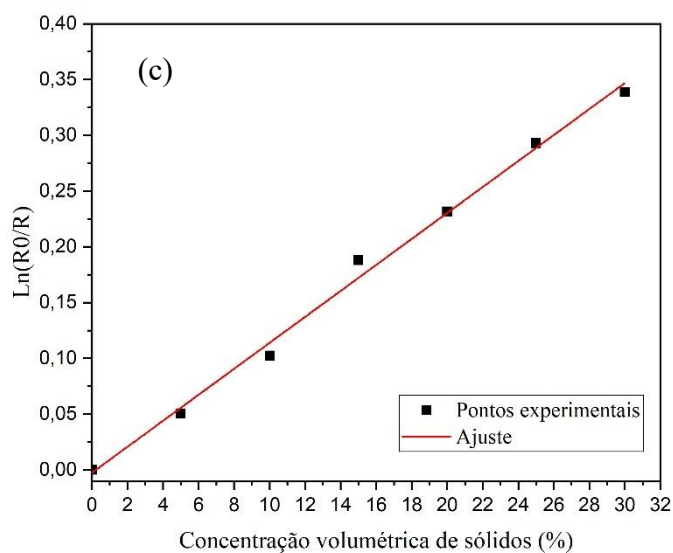
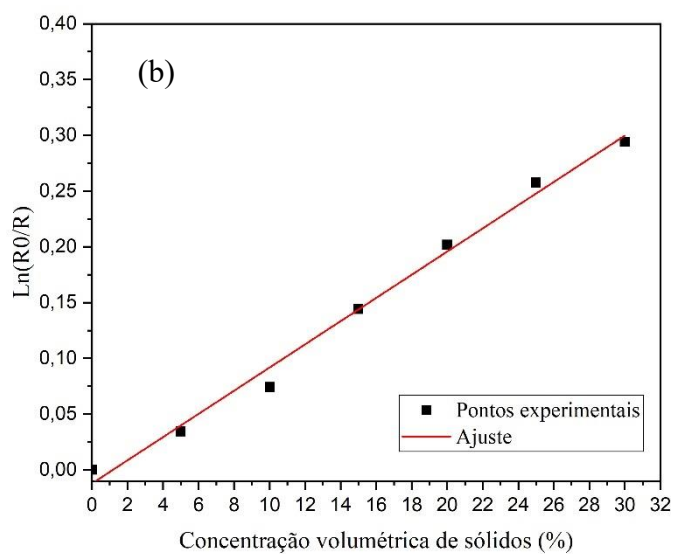


Fig. 3.7. Curva calibração (a) suspensão de CaCO_3 e água, (b) ME e GL 92% v/v e (c) ME e GX 0,2% m/m.

O valor do coeficiente β encontrado foi de 0,0178 com coeficiente R^2 de 0,998 para a suspensão de CaCO_3 e água. Para a suspensão de ME e goma xantana O β foi de 0,0116 com coeficiente R^2 de 0,995. E para a suspensão de ME e glicerina o valor encontrado para β foi de 0,0104 com coeficiente R^2 de 0,991.

3.10. Sedimentação de suspensões em fluidos newtonianos e não-newtonianos

3.10.1. Monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo para diferentes posições da proveta de testes

Neste trabalho, a análise quantitativa da sedimentação de suspensões em fluidos com características reológicas newtonianas (água e glicerina 92% v/v) e não newtonianas (GX 0,2% m/m) foi realizada por meio do monitoramento da variação da concentração local de sólidos ao longo do tempo (utilizando-se para isso a técnica de atenuação de raios- γ). Esses experimentos foram conduzidos visando uma melhor compreensão do comportamento dinâmico de suspensões em processo de sedimentação, tanto em fluidos newtonianos como em pseudoplásticos. A fim de realizar tais experimentos, empregou-se um recipiente de vidro específico, que será chamado como "tubo de teste".

Os fluidos utilizados foram soluções de GL 92% v/v (fluido newtoniano), água (fluido newtoniano) e soluções de GX 0,2% m/m (fluido pseudoplástico com efeitos tixotrópicos). Primeiramente a suspensão era preparada com a concentração volumétrica desejada e homogeneizada, no agitador de hélice modelo RW 20D2Mn.

Nesse contexto, primeiramente era ajustada a inclinação do teste, então o tubo de testes era inserido na unidade experimental de radioisótopos, dando início à adição controlada da suspensão preparada.

Quando necessário homogeneizar dentro do tubo de teste era usado um agitador cilíndrico, projetado por Moreira (2014) que pode ser visto na Fig. 3.8. A agitação era feita de forma axial, alternando entre movimentos ascendentes e descendentes. Durante o movimento ascendente de homogeneização, a altura do agitador era controlada para evitar que ultrapassasse a parte superior da coluna de suspensão. Isso era crucial para evitar a entrada indesejada de ar na suspensão.



Fig. 3.8. Agitador cilíndrico.

3.13. Determinação das curvas de equiconcentração

A partir das curvas de sedimentação dos fluidos estudados (newtonianos e não newtonianos), foram derivadas as curvas de equiconcentração em várias posições ao longo do recipiente de testes.

Essas curvas de equiconcentração foram obtidas por meio de análise gráfica. Para uma compreensão mais clara, a Fig. 3.9 ilustra um exemplo de como o parâmetro de 40% foi determinado para a altura adimensional de 0,03 no recipiente de teste com inclinação de 0°. Para o mesmo valor de concentração de 40%, foram encontrados os pontos para todas as alturas estudadas, e dessa forma foi feita uma curva de tempo versus altura adimensional, para cada uma das concentrações escolhidas.

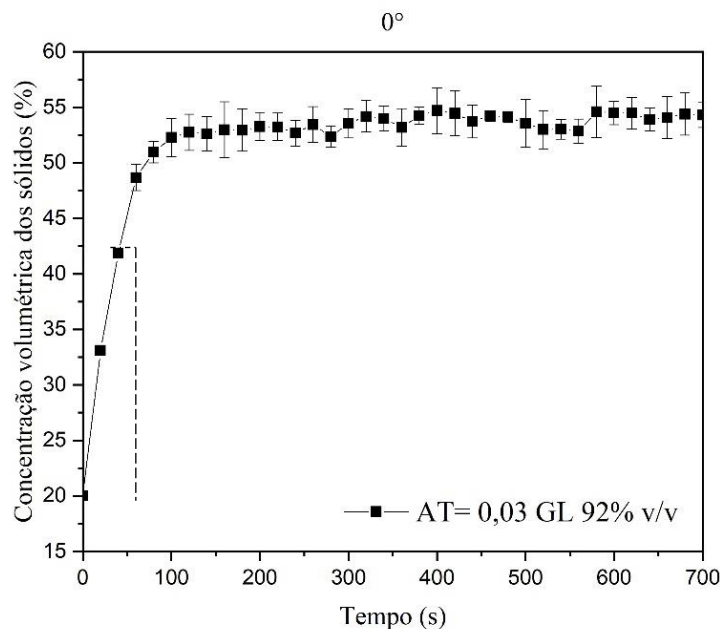


Fig. 3.9. Ilustração da obtenção dos dados das curvas de equiconcentração.

3.14. Determinação da velocidade de sedimentação de suspensões

A velocidade de sedimentação de suspensões pseudoplásticas foi determinada na região de sedimentação livre, onde a concentração volumétrica (ε_s) é igual a concentração volumétrica inicial (ε_{s0}). A formulação empregada para descrever a dinâmica dos fluidos em meios porosos neste estudo, baseou-se em trabalhos anteriores ((D'ÁVILA, 1978), SHEID e MASSARANI, 2002)), e foi apresentado no trabalho de Fagundes (2015).

Nesse contexto, várias hipóteses foram adotadas para simplificar o modelo, sendo elas:

- A sedimentação é um fenômeno unidimensional ao longo da direção vertical;
- As fases da mistura são consideradas incompressíveis;
- O tensor de tensão no constituinte sólido é função exclusiva da porosidade local;
- Os efeitos de parede são desprezíveis;

Com base nessas considerações, a equação do movimento para o constituinte sólido, com a força resistiva representada pela lei de Darcy, pode ser expressa da seguinte forma (D'ÁVILA, 1978):

$$\rho_s \varepsilon_s \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) = - \frac{dP_s}{dz} + \frac{\mu v_s}{\kappa(\varepsilon_s)} + (\rho_s - \rho_f) \varepsilon_s g \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Em que ρ_s é a densidade do constituinte sólido, ε_s é a concentração de sólidos, v_s é a velocidade do constituinte sólido ao longo do eixo z , P_s é a pressão no constituinte sólido, κ é a permeabilidade e μ é a viscosidade do fluido.

Ao considerar que a velocidade de queda da interface superior permanece constante nos estágios iniciais e que o efeito de pressão é negligenciável, a Eq. 3.9 foi simplificada para a Eq 3.10.

$$\kappa(\varepsilon_s) = \frac{\mu v_s}{(\rho_s - \rho_f) \varepsilon_s g} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Na região de sedimentação livre, que é caracterizada por uma interação relativamente fraca entre as partículas, é possível considerar que os materiais sólidos decantam livremente. Isso significa que eles mantêm uma velocidade constante, que é igual à velocidade inicial de sedimentação ($v_s = v_{s0}$). Assim, a velocidade de sedimentação das partículas em suspensão (v_s) pode ser determinada acompanhando o deslocamento da interface descendente que separa o fluido da suspensão. A velocidade de sedimentação das partículas suspensas foi calculada a partir da inclinação da reta linear obtida durante a monitorização da interface descendente entre o fluido e a suspensão, conforme exemplificado na Fig. 3.1.

Para as suspensões de água e CaCO_3 , foi possível observar a interface descendente e traçar uma curva. A partir da curva foram calculadas as velocidades de sedimentação livre (início).

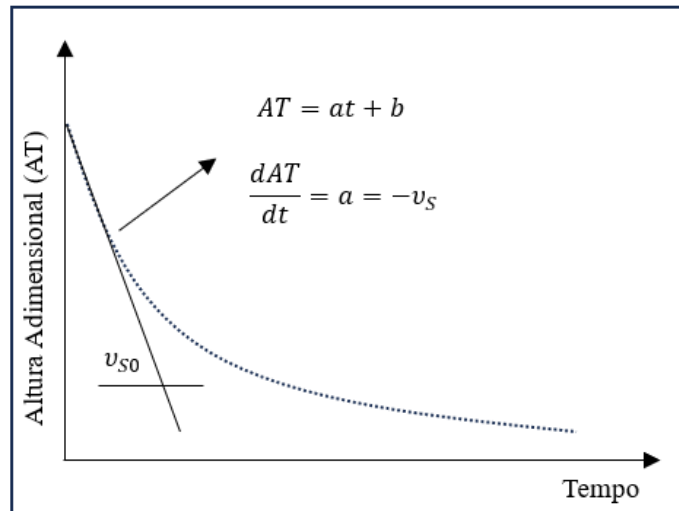


Fig. 3.10. Ilustração do monitoramento da interface descendente em um teste de sedimentação em batelada.

Para as suspensões de GL e GX, usou-se a TARG para obter o deslocamento da interface superior. A identificação da passagem da interface era realizada quando a região de concentração constante terminava e se iniciava a queda gradual da concentração de sólidos ao longo do tempo. Assim, foi possível estimar a velocidade de sedimentação das partículas para as duas suspensões na região de sedimentação livre.

Neste capítulo, foram expostos os materiais, métodos e equipamentos usados neste estudo. No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

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

4.1 Comportamento reológico das soluções usadas

Neste trabalho foram empregadas três técnicas para a caracterização reológica dos fluidos utilizados (GL e GX). Os resultados da caracterização e as discussões serão apresentados a seguir.

4.1.1 Curvas de escoamento e de viscosidade

Para as soluções de GX, foram obtidos reogramas e diagramas de viscosidade em um intervalo de taxas de deformação que variou de 1 a 50 s^{-1} . Para as soluções de GL 92% v/v, as medições de viscosidade e tensão de cisalhamento foram realizadas com taxas de deformação variando entre 0,1 e 100 s^{-1} . Na Fig. 4.1 é apresentado o reograma dos dois fluidos estudados.

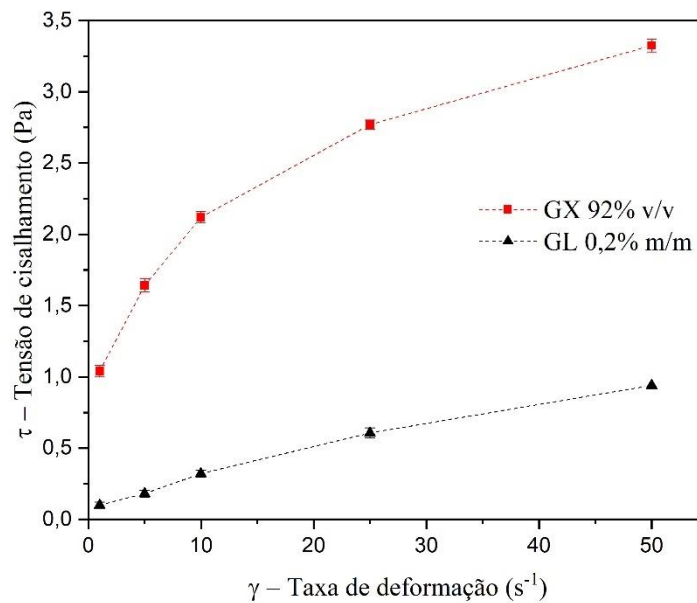


Fig. 4.1. Reogramas das soluções de GX e GL.

O modelo reológico de Power-Law, Eq. 4.1, foi usado como ajuste para os resultados experimentais de tensão de cisalhamento, τ , em função da taxa de deformação, $\dot{\gamma}$, para as suspensões de GX, os ajustes foram feitos no programa Origin.

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (x) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Segue a curva obtida com os dados experimentais (Fig. 4.2) e a Tab. 4.1, com os parâmetros reológicos.

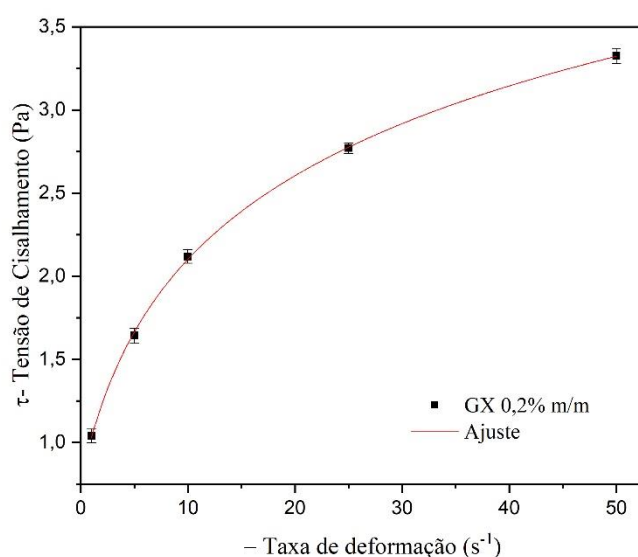


Fig.4.2. Reograma da solução de GX com ajuste.

Tab. 4.1. Parâmetros reológicos da suspensão de Goma Xantana.

Solução	m (Pa.s ⁿ)	n (-)	R^2 (-)
GX 0,2% m/m	1,086	0,317	0,998

Esse modelo foi escolhido por ter apresentado bom coeficiente de correlação, R^2 . De acordo com os parâmetros obtidos ($n = 0,317$ e $m = 1,086$) a solução de GX é considerada um fluido com comportamento reológico pseudoplástico. Segundo, Chhabra e Richardson (2008), em fluidos pseudoplásticos, os índices de comportamento (n) são inferiores a um, e quanto menor esse valor, maior é a pseudoplasticidade, ou seja, maior é o afastamento do comportamento de escoamento apresentado por fluidos newtonianos. O índice de consistência (m), por outro lado, representa a resistência do fluido ao escoamento quando submetido a uma força cisalhante.

Os resultados para os diagramas de viscosidade foram representados graficamente em escala log-log, com seis pontos por década. Essa representação gráfica é comumente adotada na literatura para avaliar a viscosidade aparente em relação à taxa de deformação, especialmente em situações de baixas deformações. A Fig. 4.3 apresenta os resultados obtidos para os dois tipos de fluidos estudados (GX e GL).

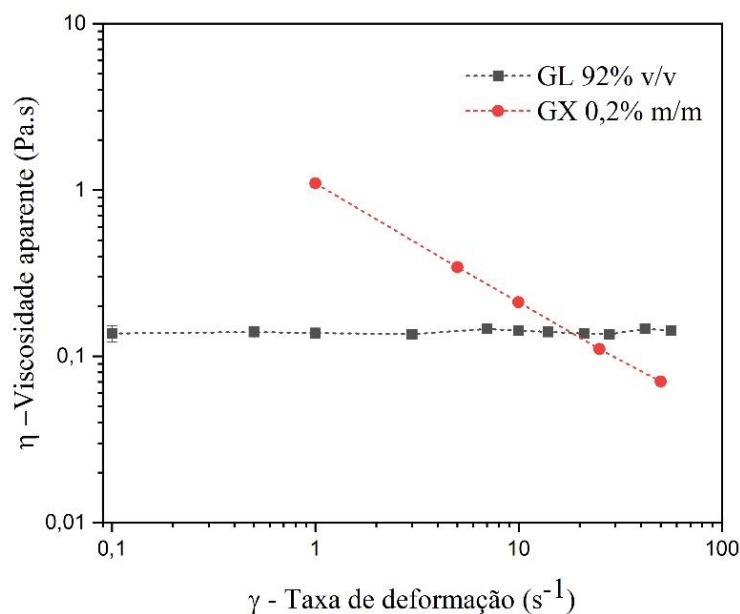


Fig. 4.3. Viscosidade aparente em função da taxa de deformação obtidos para as soluções de GL e GX na temperatura de 25°C.

No caso das soluções de GL (Fig. 4.3), a variação na taxa de deformação não exerceu impacto significativo na viscosidade do fluido. Portanto, assim como o esperado as soluções de glicerina exibiram um comportamento próximo ao newtoniano. A constante de proporcionalidade (μ) estimada a partir dos resultados foi de $\mu = 0,15$ Pa.s. Também na Fig. 4.3. Observou-se que o aumento na taxa de deformação resultou na diminuição da viscosidade aparente das soluções de GX, confirmando que esse fluido possui um comportamento pseudoplástico.

A escolha cuidadosa do comportamento reológico é fundamental para garantir a eficácia e a estabilidade dos fluidos de perfuração. Pois, é necessário que os sólidos insolúveis fiquem em suspensão e ao mesmo tempo que não haja obstrução evitando danos nos equipamentos, sendo mais indicados fluidos pseudoplásticos.

4.1.2 Histerese

Para investigar a presença de tixotropia no fluido pseudoplástico (GX), empregou-se a técnica de histerese. Este procedimento incluiu a aplicação inicial de uma taxa de deformação de 132 s^{-1} , seguido por um período de repouso de 5 minutos. Após esse intervalo, foram realizadas medidas da tensão de cisalhamento à medida que a taxa de deformação aplicada ao fluido era aumentada até atingir 100 s^{-1} . Posteriormente, a taxa de deformação foi reduzida até aproximadamente zero. Os resultados dessa análise são apresentados de forma gráfica na Fig. 4.4

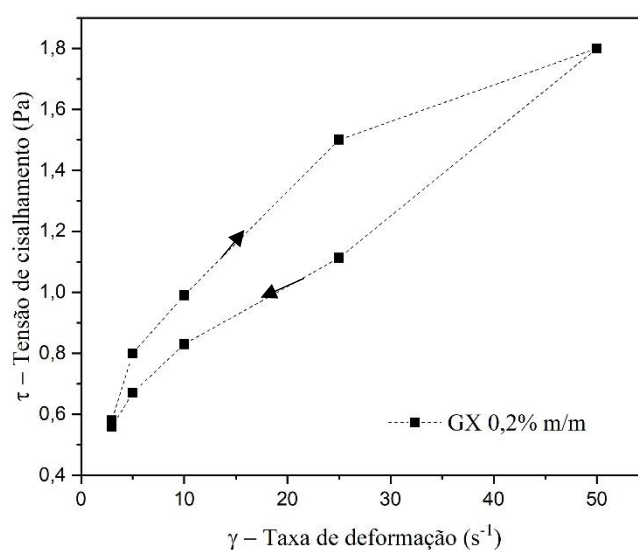


Fig. 4. 4. Curva de Histerese do fluido de GX.

Conforme ilustrado na Fig. 4.4 é possível observar a presença de um ciclo de histerese na solução de GX. A diferença entre as curvas de aumento e diminuição da taxa de deformação é considerável, o que indica a presença de tixotropia nas soluções de GX indo de encontro ao encontrado na literatura a cerca dessas soluções (MOREIRA, 2014).

Os fluidos tixotrópico são bastante usados para fluidos de perfuração, porque quando submetidos ao cisalhamento, sua viscosidade aparente diminui, tornando-se mais fluidos e facilitando o escoamento contínuo. Mas, ao remover o esforço de cisalhamento, a viscosidade aumenta novamente, dificultando a sedimentação de sólidos no fluido, e fazendo com que os cascalhos por exemplo continuem suspensos, evitando danos ao equipamento.

4.1.3 Taxa de deformação constante (pico de tensão de deformação)

Na Fig. 4.5 estão apresentados os resultados dos testes de taxa de deformação constante, os quais são amplamente utilizados na literatura para avaliar a presença de tixotropia em fluidos. Esses resultados representam a tensão de cisalhamento em função do tempo para os tempos de repouso de 10 segundos, 10 minutos e 30 minutos.

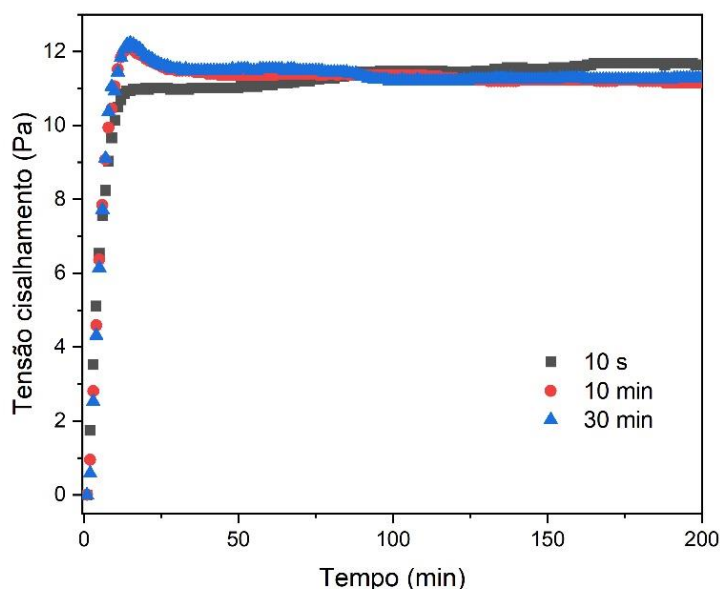


Fig. 4.5. Resposta da solução de GX, para uma taxa de deformação, após repouso de 10 s, 10 min e 30 min.

É importante observar que o tempo de repouso teve um impacto significativo nos picos de tensão. Vê-se que um período de repouso mais longo traz um valor inicial de tensão mais elevado. Isso ocorre porque o tempo de repouso permite o enovelamento das cadeias poliméricas de GX, aumentando seu grau de gelificação e, então, a resistência ao escoamento (CHABBRA E RICHARDSON, 2008)

É relevante destacar que, apesar das diferentes durações dos períodos de repouso terem afetado os valores iniciais de tensão, o valor de tensão no estado estacionário permaneceu constante. Sugerindo que, nesse estágio, as moléculas estavam alinhadas na direção do escoamento, reduzindo a resistência do fluido nesse ponto. Fluidos de perfuração passam por momentos de parada operacional e é importante que seus componentes continuem em suspensão durante este período.

Os fluidos de perfuração são usados para fazer com que o processo de perfuração do poço seja mais ágil e seguro. A escolha do fluido que será usado nesta etapa é importante tanto para os custos de perfuração quanto em todas as outras variáveis controláveis e combináveis dessa etapa, por esse motivo é tão importante avaliar reologicamente o fluido.

4.2 Monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo para diferentes posições da proveta (testes dinâmicos)

Foram realizados testes dinâmicos para o monitoramento da concentração de sólidos ao longo do tempo em diferentes posições da vidraria de teste. Esses resultados foram corrigidos considerando o tempo de resolução do sistema (Eq. 3.8) e transformados em concentração volumétrica de sólidos com o uso da constante de calibração e da Eq. 3.7.

As suspensões estudadas foram: água e CaCO_3 10 % v/v, suspensão de GL 92% v/v com ME 20% v/v e suspensão de GX 0,2% m/m com ME 20% v/v. Os resultados foram separados de acordo com o sólido usado na suspensão, CaCO_3 e ME.

4.2.1 Carbonato de Cálcio (CaCO_3)

Os resultados obtidos na TARG para todas as 4 inclinações testadas (0° , 30° , 45° e 60°) são apresentadas na Figs. 4.6 a 4.9, em que se tem todas as posições do tubo de teste que foram estudadas para a suspensão de água e CaCO_3 .

Observando os resultados obtidos para cada inclinação do tubo de teste, é possível verificar diferentes tipos de curvas, que foram separadas em três regiões diferentes. A primeira região, denominada região I, corresponde às curvas obtidas para as posições próximas ao topo do tubo. Nessa região, inicialmente a concentração de sólidos se mantém constante e, após certo tempo, a concentração de sólidos tende a zero.

A região II foi observada apenas nas inclinações diferentes de 0° , e nelas as concentrações de sólidos aumentam inicialmente e depois diminuem, seguindo o padrão da região anterior. É importante ressaltar que nessas duas regiões o tempo para alcançar o líquido clarificado foi bem maior no tubo que está na inclinação zero em comparação com os tubos inclinados.

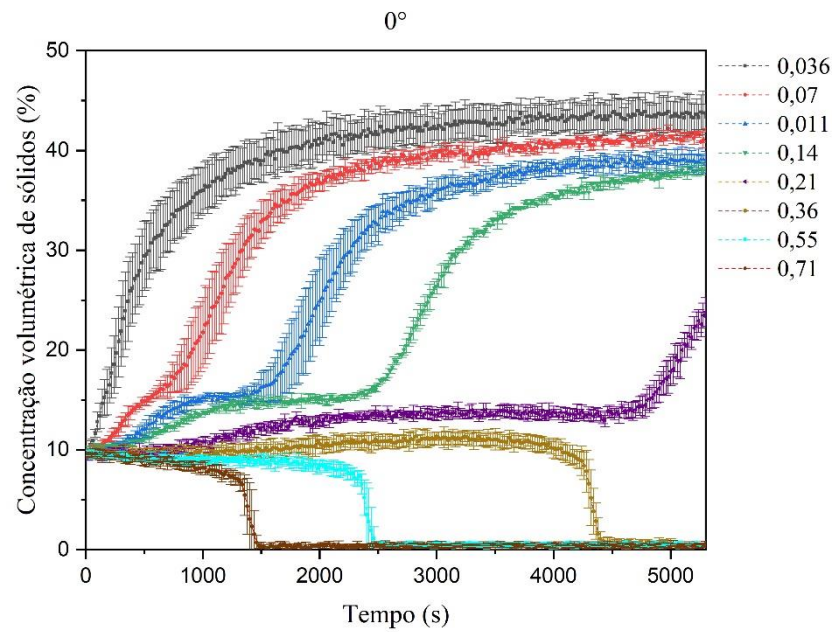


Fig. 4.6. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO₃ na inclinação de 0°.

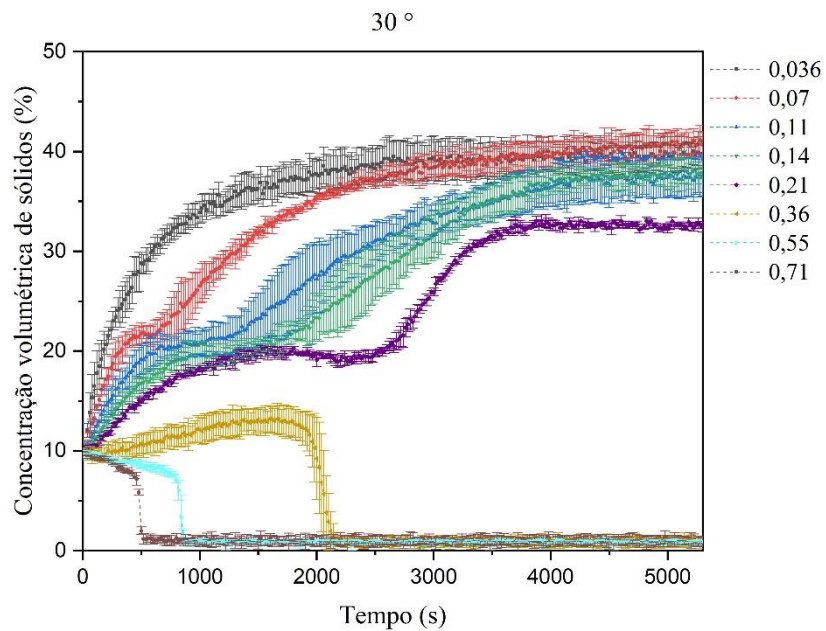


Fig. 4.7. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO₃ na inclinação de 30°.

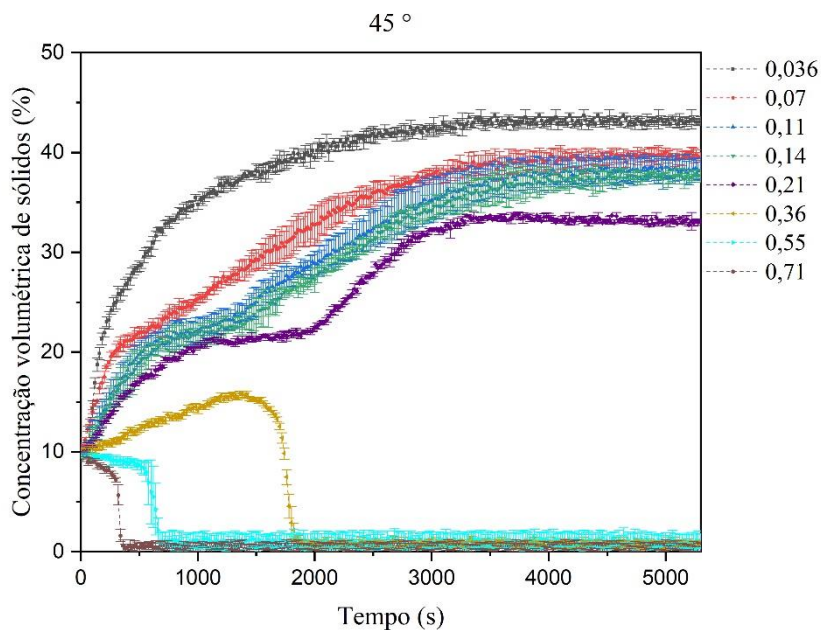


Fig. 4.8. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO₃ na inclinação de 45°.

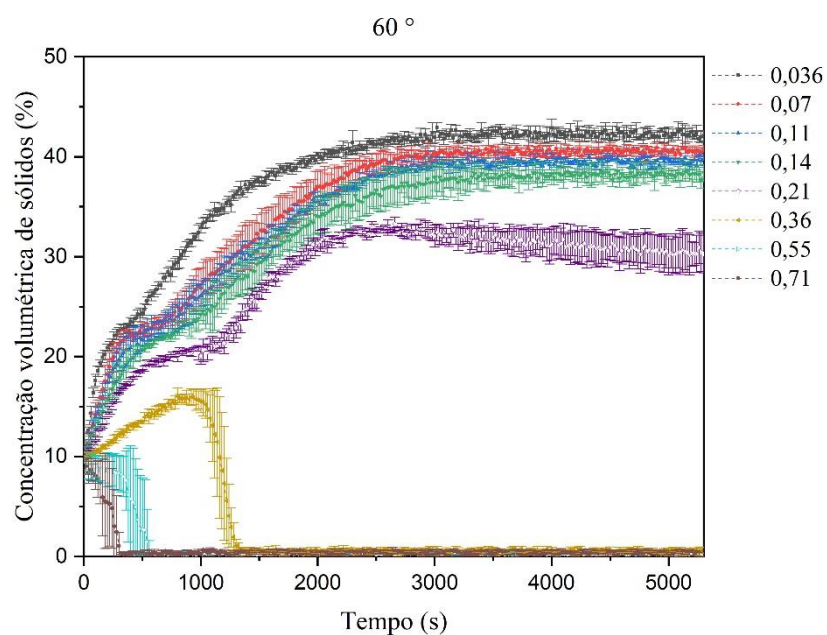


Fig. 4.9. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de Água + CaCO₃ na inclinação de 60°.

A região III correspondente às posições próximas à base do tubo, onde a concentração de sólidos apresenta um aumento inicial, seguido da estabilização, e por fim, a concentração aumenta novamente devido à compactação do sedimento.

No entanto ao realizar uma comparação entre as curvas das diferentes inclinações, constatou-se que não houve alterações relevantes no comportamento delas. Para facilitar a comparação, os resultados correspondentes à região III foram agrupados e estão apresentados nas Figs. 4.10 a 4.12, as curvas referentes as posições que não se encontram no corpo do texto estão em anexo.

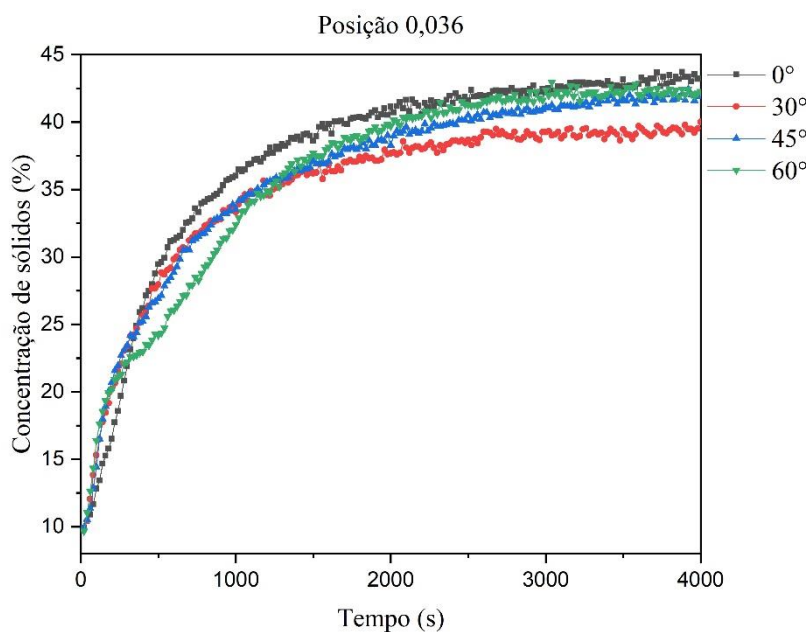


Fig. 4.10. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,036.

Na Fig. 4.10, tem-se a posição mais próxima à base do tubo (0,036), onde foi observada uma região com aumento quase que imediato da concentração de sólidos após a homogeneização.

Observou-se nas outras posições da região III (Figs. 4.11 e 4.12) que a concentração de sólidos aumentou rapidamente em um primeiro momento, seguido por um curto período no qual houve diminuição da velocidade de sedimentação e, por fim, novamente pelo aumento acentuado da concentração de sólidos. Uma possível explicação é a distribuição granulométrica do CaCO_3 que é assimétrica.

Este comportamento evidencia a transição da interface ascendente, que corresponde à chegada de um sedimento compactado à altura de leitura dos pontos, lembrando que o tubo do teste fica entre a fonte radioativa e o detector, na posição desejada para leitura do ponto. Observa-se também que, à medida que aumenta a inclinação em relação à vertical, a velocidade de passagem da interface aumenta. Esse aumento era esperado devido ao

efeito *Boycott*, que ocorre durante a sedimentação em tubos inclinados. (MCCAFFERY et al., 1998)

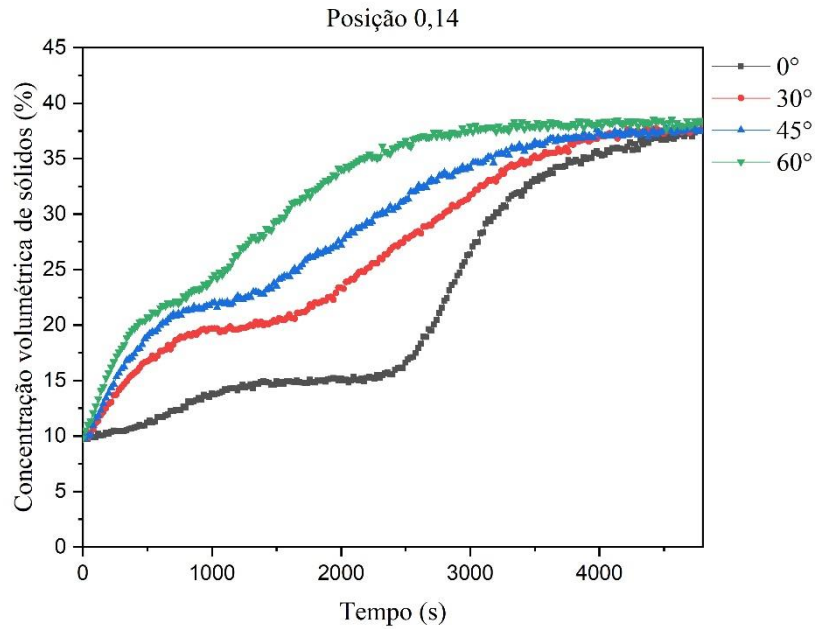


Fig. 4.11. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,14.

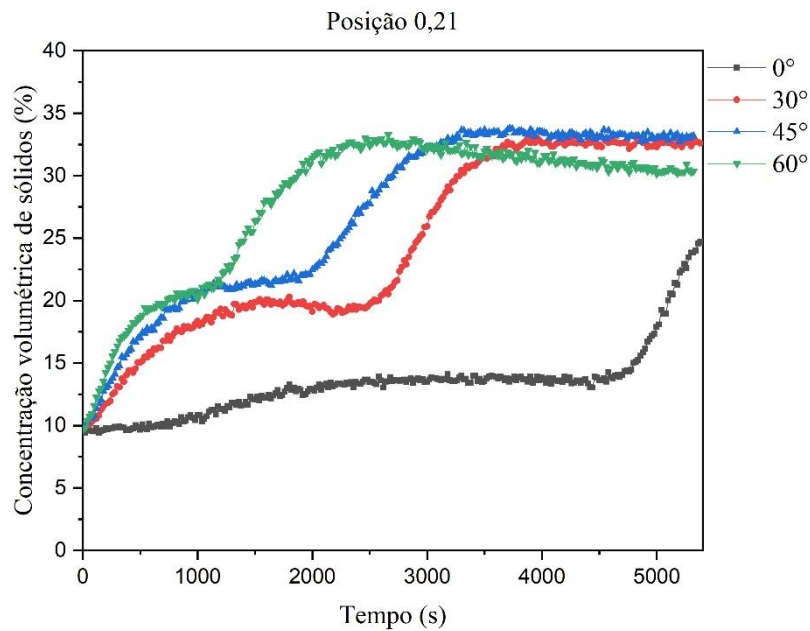


Fig. 4.12. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões aquosas do carbonato na posição 0,21.

O efeito *Boycott* é caracterizado pela rápida aproximação das partículas na parede inclinada do tubo, formando uma região mais concentrada de sólidos próxima a essa parede e uma região de líquido mais clarificado acima dela. Como a região mais concentrada é mais densa do que a parte de líquido mais clarificado, ela desliza até o fundo do recipiente.

Também foi observado que nas curvas de inclinação de 60° , a maior inclinação em relação à vertical testada, o sedimento atingiu a estabilização em um tempo menor. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que indica que o efeito *Boycott* aumenta à medida que o ângulo de inclinação em relação à vertical aumenta (NGUYAN, 2009). Embora esse efeito seja explorado em diversas indústrias com o intuito de aumentar a velocidade de sedimentação de partículas sólidas, ele não é almejado pelas indústrias petrolíferas. Pois precisam manter as partículas presentes nos fluidos de perfuração em suspensão para evitar prejuízos principalmente em paradas programadas ou emergenciais.

Nas Figs. 4.13 e 4.14 são apresentadas as curvas referentes às regiões I e II (região em que a concentração de sólidos tende a zero após certo período).

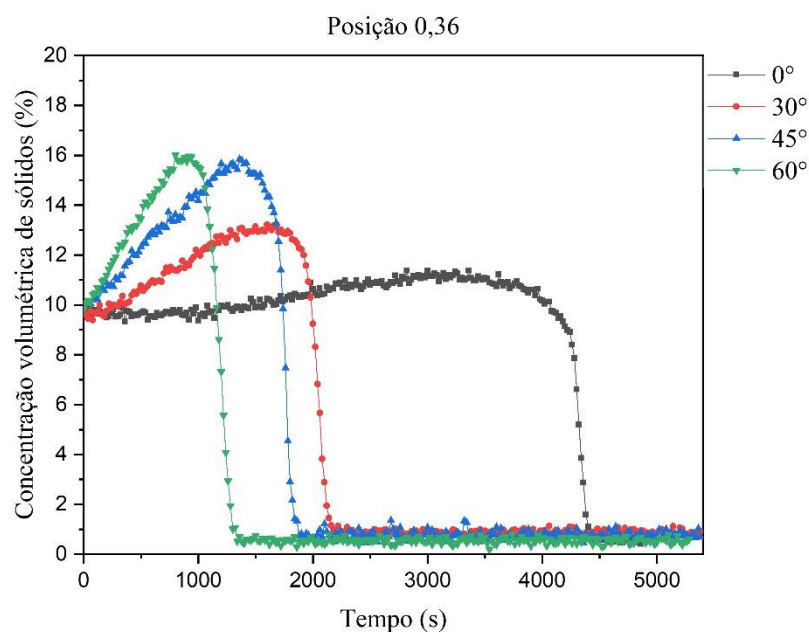


Fig. 4.13. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para Suspensões do carbonato na posição 0,36

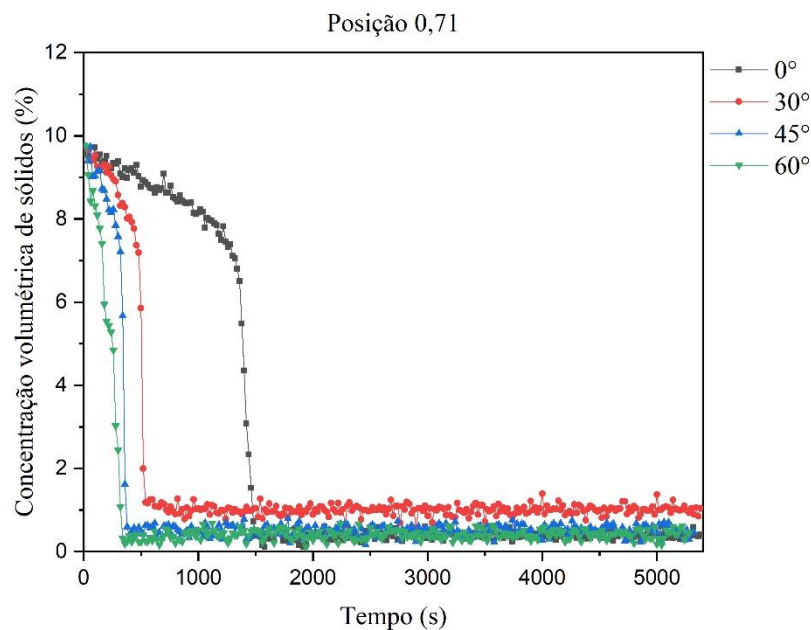


Fig. 4.14. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensões do carbonato de cálcio na posição 0,71.

Ao analisar as Figs. 4.13 e 4.14, foi possível observar que, para as diferentes posições no tubo, depois de certo tempo, ocorreu a redução na concentração de sólidos, chegando a um valor próximo de zero.

Na posição 0,36, para as inclinações diferentes da vertical (0°), foi observado um aumento inicial mais acentuado na concentração de sólidos antes da diminuição, que sugere a presença da região II, representando uma posição intermediária. E pode ser explicado pela distribuição assimétrica das partículas verificada na Fig. 3.1e pelo efeito *Boycott* pois ocorreu de forma mais acentuada nos tubos inclinados.

Além disso, conforme observado na região I, foi identificado que quanto mais inclinado o tubo, mais rápida aconteceu a passagem da interface descendente, possivelmente devido ao efeito *Boycott*.

4.2.2. Imagens fotográficas dos testes

Para melhor visualização da sedimentação em tubos inclinados tem-se aqui imagens realizadas durante os testes. Na Fig. 4.15 (a, b, c e d) é possível visualizar nas diferentes

inclinações estudadas, os tubos com a suspensão de CaCO_3 e água após 20 minutos do início da sedimentação.



Fig. 4.15. Fotografias dos tubos após 20 minutos do início da sedimentação (a) 0°, (b) 30°, (c) 45° e (d) 60°.

As imagens evidenciam que, ao longo do período de sedimentação de 20 minutos, a zona de compactação em cada inclinação apresenta posições distintas. Notavelmente, a altura diminui à medida que o ângulo de inclinação aumenta. Observou-se que a superfície do sedimento não permanecia plana à medida que a inclinação da vidraria de testes aumentava. Uma película fina de sedimentos começou a se depositar no lado inferior da parede da vidraria, e à medida que a inclinação aumentava, notou-se que a

extensão dessa camada mais fina na parede também se ampliava. Na Fig. 4.16 tem-se uma fotografia do momento em que ocorria o efeito *Boycott*.



Fig. 4.16. Fotografia do momento em que ocorria o efeito *Boycott*.

Observa-se na Fig. 4.16 o momento em que a maior concentração do fluido (densidade) provoca o deslizamento das partículas pela parede inclinada até o fundo do recipiente e proporciona um fluxo de líquido clarificado pela parede oposta (bolhas na imagem), ou seja, o efeito *Boycott*.

Neste capítulo, foram delineados e discutidos de forma abrangente os principais resultados relacionados à caracterização reológica dos fluidos empregados (água, GX e GL), além de uma análise do fenômeno de sedimentação em suspensões, tanto em fluidos newtonianos quanto em fluidos pseudoplásticos, em diferentes inclinações (0° , 30° , 45° e 60°). No próximo capítulo tem-se a conclusão e a sugestão para trabalhos futuros.

4.2.2 Microesfera de Vidro (ME)

A. GL 92% v/v + ME 20% v/v

Os resultados do monitoramento da concentração local de sólidos como função da posição e do tempo para suspensão de GL para todas as 4 inclinações testadas (0° , 30° , 45° e 60°) são apresentadas nas Figs. 4.17 a 4.20, em que estão presentes todas as posições do tubo de teste que foram testadas.

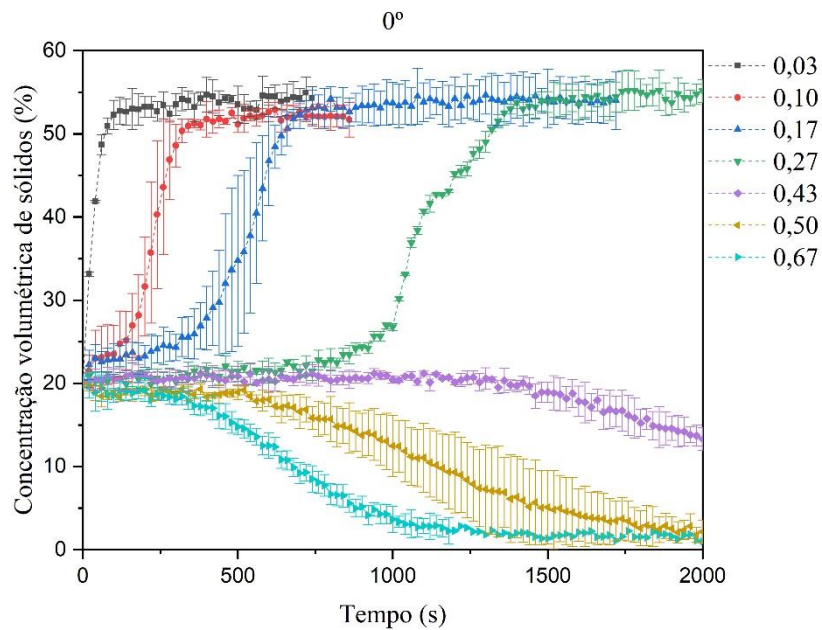


Fig.4.15. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 0°.

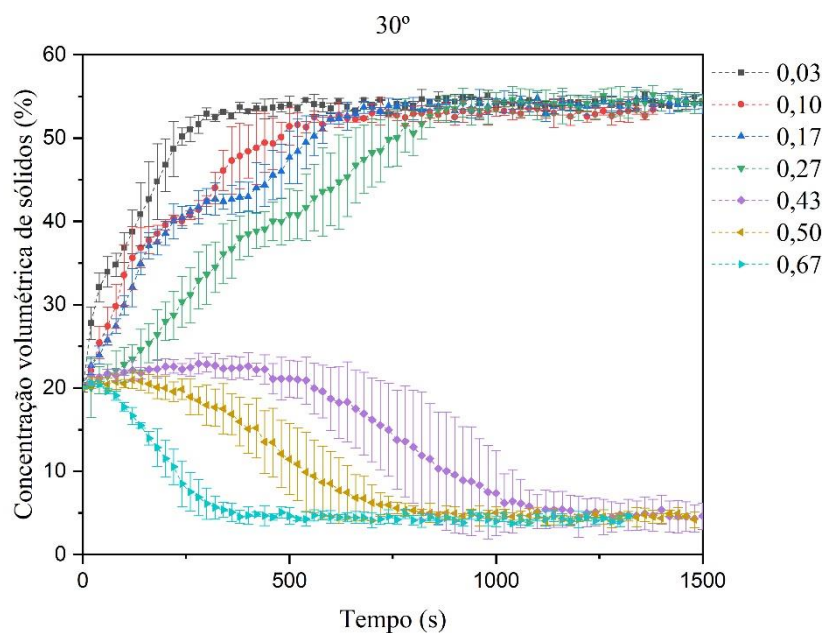


Fig. 4.18. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 30°.

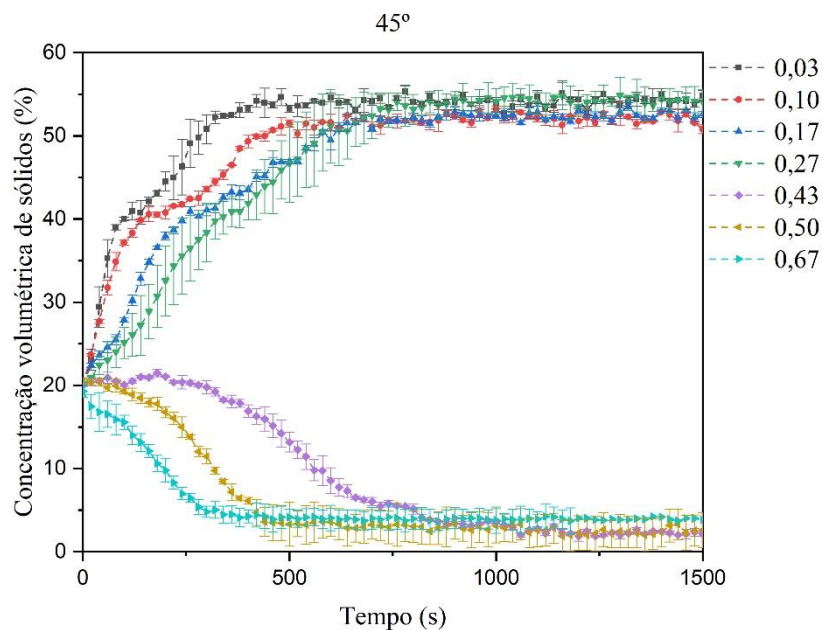


Fig.4.19. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 45°.

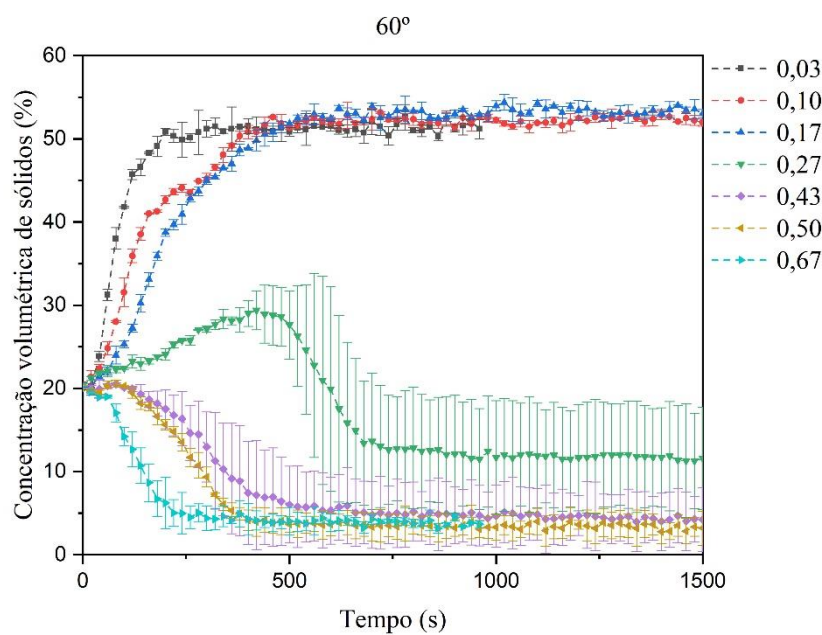


Fig.4.20. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v inclinação de 60°.

Observa-se nas figuras a presença das 3 regiões de sedimentação, assim como no teste anterior. Para melhor visualização, nas Figs. 4.21 e 4.22 apresentam-se os resultados do monitoramento da concentração local de sólidos como função da posição e do tempo

para suspensões de ME 150- 212 μm sedimentando em soluções de GL 92% v/v para duas posições próximas à base do tubo de testes (onde foi estabelecida a formação de sedimento - região III). As demais posições testadas se encontram em anexo.

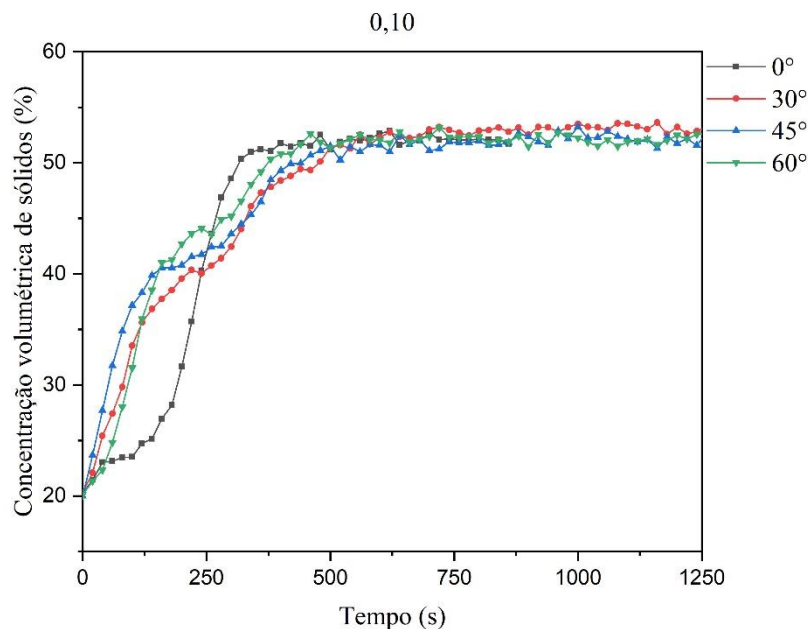


Fig. 4.16. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,1.

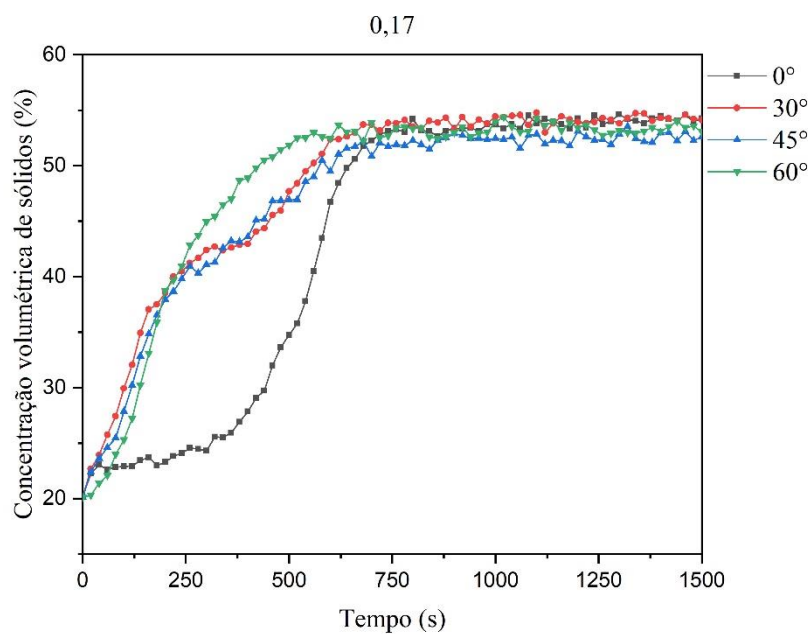


Fig. 4.22. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,17.

Pode-se observar nas Figs 4.21 e 4.22 que a formação do sedimento na inclinação de 0° (vertical) ocorreu de uma forma diferente das outras inclinações. Em 0° a concentração de sólidos permaneceu constante por um período, e então aconteceu um rápido aumento da concentração, marcando a passagem da interface ascendente. Confirmando o comportamento encontrado na literatura para fluido newtoniano. (MOREIRA, 2014)

Nas inclinações de 30° , 45° e 60° foi verificada uma região de concentração constante bastante estreita, causada pelo aumento quase instantâneo da concentração de sólidos após o processo de homogeneização. Em seguida verificou-se uma região em que a concentração aumentou de forma mais lenta, que ocorreu quando as concentrações volumétricas do sólido atingiam cerca de 40%. Podendo ser explicado pela redução da concentração local dos sólidos, que reduz a concentração de partículas reduzindo a taxa de sedimentação.

A seguir, após o período em que o aumento da concentração se tornou menos pronunciado, ocorreu mais uma vez um rápido acréscimo na concentração de sólidos, o que pode ser identificado pelas inflexões nas curvas de crescimento do sedimento nas suspensões de GL sedimentando (Figs 4.21 e 4.22). Esse fenômeno pode ser atribuído à chegada de um sedimento compactado à altura de leitura de pontos.

Isso sugere que, simultaneamente ao acúmulo gradual de sólidos ao longo do tempo, devido ao aumento da concentração, também ocorre o desenvolvimento de um sedimento compactado (ou saturado) que se move da base em direção ao topo, formado pela sobreposição das partículas. Quando esse sedimento compactado alcança a posição de leitura, é identificada uma inflexão nas curvas de crescimento.

A inclinação do recipiente exerce uma influência significativa no efeito *Boycott* durante o processo de sedimentação. Isso se deve ao fato de que a inclinação afeta o comportamento do fluido e das partículas em suspensão, alterando a interação entre as partículas, o que pode promover ou inibir a formação de aglomerados.

Durante a sedimentação em tubos inclinados, as partículas têm a tendência de se aproximar rapidamente da parede inclinada do recipiente. À medida que se aproximam dessa parede, as partículas formam uma área mais densamente concentrada de sólidos próximo a ela, enquanto a área oposta a parede inclinada permanece mais clara. Devido à diferença de densidade entre essas regiões, a parte mais densa desliza até o fundo do recipiente. Esse efeito pode ser amplificado com o aumento do ângulo de inclinação em relação à vertical, inclusive pode ser observado na Fig. 4.22 que embora inicialmente as curvas nas 3 inclinações estejam bem próximas, a inclinação de 60° foi a que

concentração que começou a estabilizar mais rapidamente. Também na Fig. 4.23, é possível observar que somente a curva de inclinação de 60° já está na região II, em que a concentração de sólidos tende a zero, enquanto as outras inclinações estão na região III.

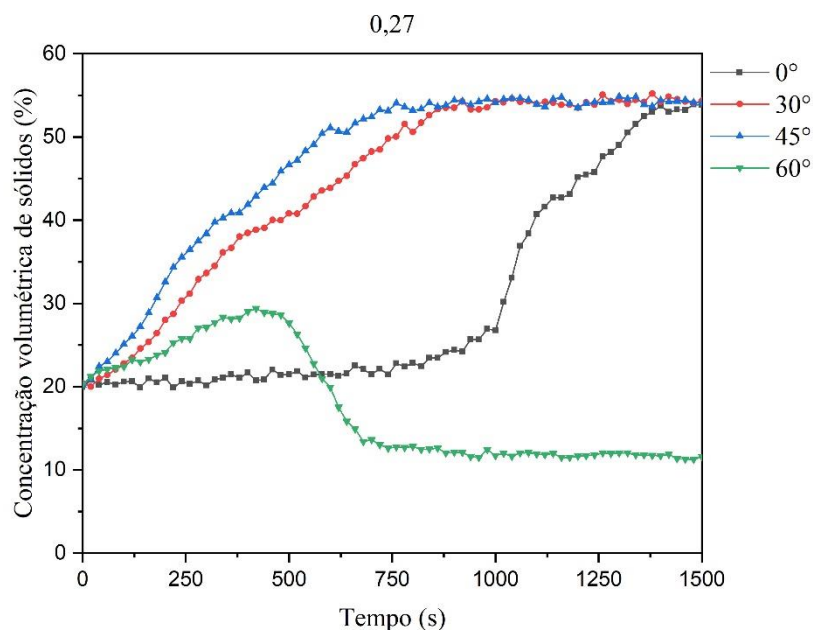


Fig. 4.17. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,27.

Na Fig. 4.23, observa-se na posição 0,27 que a curva referente a inclinação de 60° está na região em que a concentração de sólidos tende a zero. Enquanto as outras inclinações ainda estão na região de compactação do sedimento. E pode-se ver desta forma nitidamente a maior velocidade de sedimentação com o aumento do ângulo de inclinação com a vertical.

A distribuição das partículas na suspensão também é impactada pela inclinação do recipiente. Em um recipiente inclinado, as partículas podem se acumular em áreas específicas, dependendo de fatores como densidade e forças envolvidas. Essa acumulação pode favorecer a formação de aglomerados em regiões de maior concentração de partículas.

Nas Figs. 4.24 e 4.25 são apresentadas as curvas referentes às regiões I e II (região em que a concentração de sólidos tende a zero após certo período).

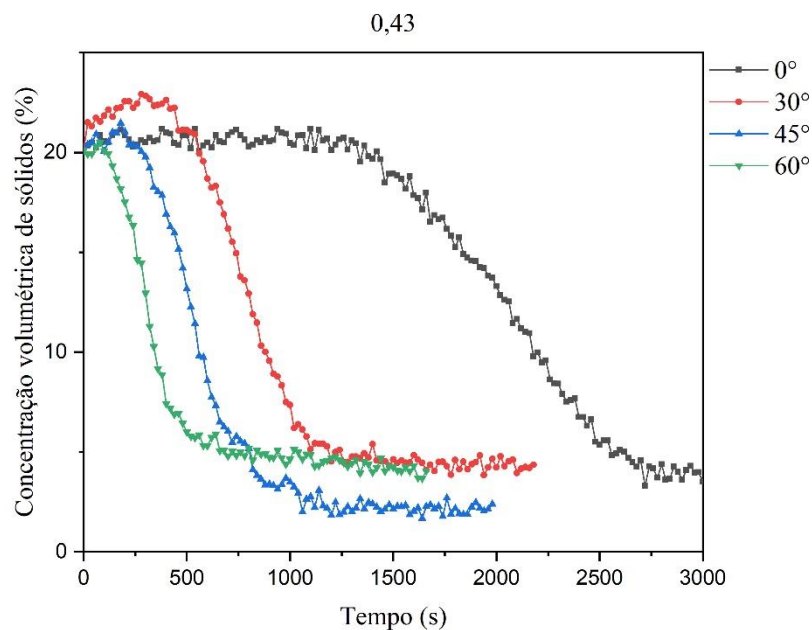


Fig. 4.18. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,43.

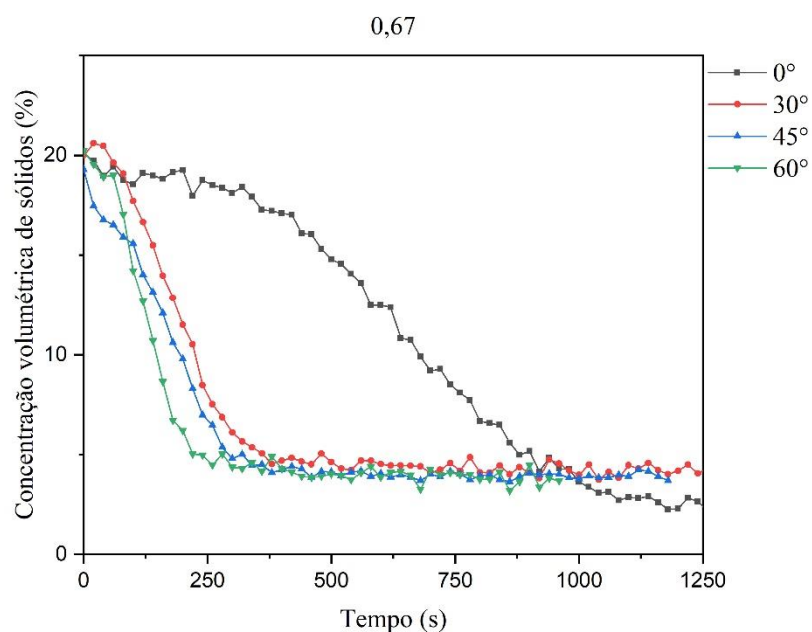


Fig. 4.19 Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL 92% v/v + ME 20% v/v na posição 0,67.

Ao analisar as Figs. 4.22 e 4.23, pode-se notar um padrão comum, após um determinado período, houve uma diminuição gradual na concentração de sólidos, até atingir valores próximos a zero. Essa mudança pode ser atribuída ao deslocamento da

frente superior difusa, que representa a interface entre a suspensão e a região de líquido clarificado, ao longo do sistema de medição.

Esse fenômeno de deslocamento da frente difusa, que se move do topo em direção ao fundo, é uma característica observada em todos os ensaios de sedimentação, especialmente nas regiões distantes da base do tubo de testes, onde não ocorre a formação de sedimento. Esse deslocamento indica a transição gradual da suspensão para o estado de líquido clarificado à medida que o tempo avança. À medida que a frente superior difusa continua seu deslocamento, a região de líquido clarificado aumenta em altura, enquanto a concentração de sólidos diminui.

Observa-se também que quanto mais inclinado o tubo em relação a vertical, mais rápida aconteceu a passagem da interface descendente, possivelmente devido ao efeito *Boycott*.

O acréscimo na concentração de sólidos nas soluções com inclinação diferente de 0°, principalmente nas regiões intermediárias do tubo (Região II), pode ser explicado pelo efeito *Boycott*.

B. GX 0,2% v/v + ME 20% v/v

Os resultados do monitoramento da concentração local de sólidos como função da posição e do tempo para suspensão de GX para todas as 4 inclinações testadas (0°, 30°, 45° e 60°) são apresentadas na Figs. 4.26 a 4.29, em que estão presentes todas as posições do tubo de teste que foram testadas.

Observa-se nas figuras a presença das 3 regiões de sedimentação (região I próxima ao topo do tubo, região II, uma posição intermediária e a região III próxima ao fundo do tubo) . Para melhor visualização, nas Figs. 4.30 e 4.31 apresenta-se o resultado do monitoramento da concentração local de sólidos como função da posição e do tempo para suspensões de ME 150- 212 µm sedimentando em soluções de GX 0,2% v/v para as posições próximas à base do tubo de testes (onde foi estabelecida a formação de sedimento - região III).

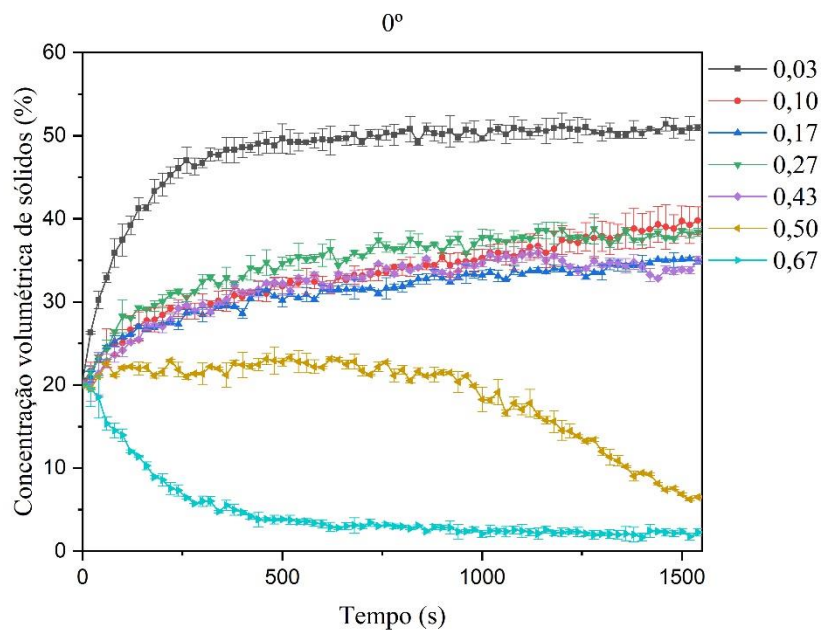


Fig. 4.20. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 0°.

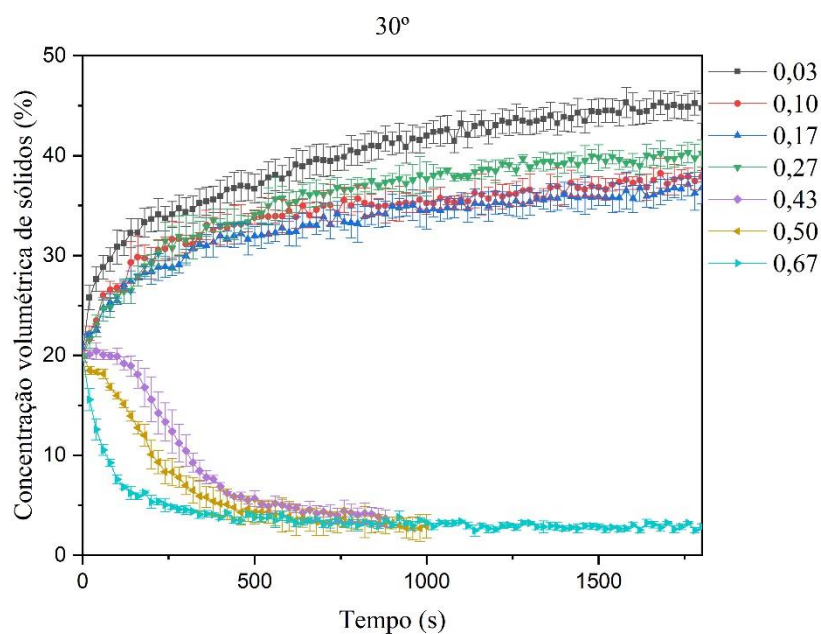


Fig. 4.27. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 30°.

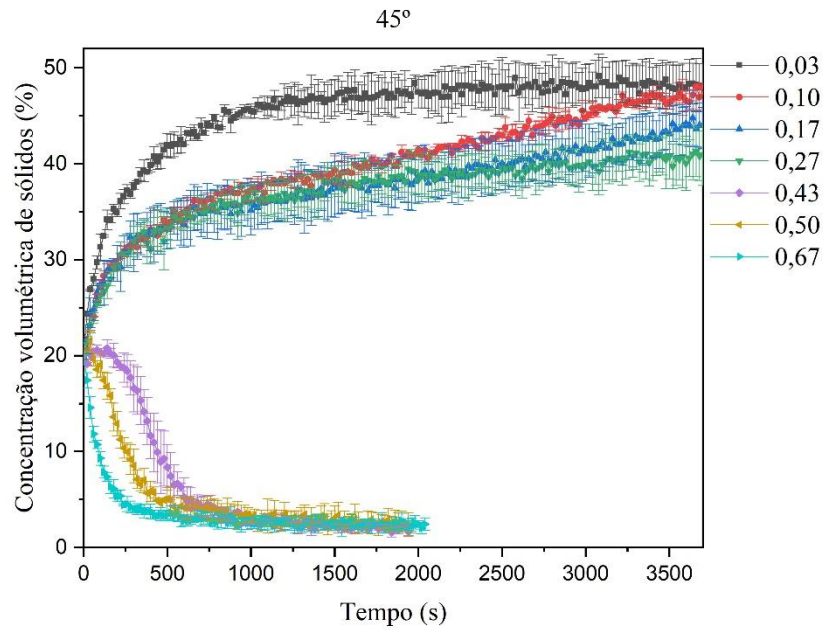


Fig. 4.21. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 45°.

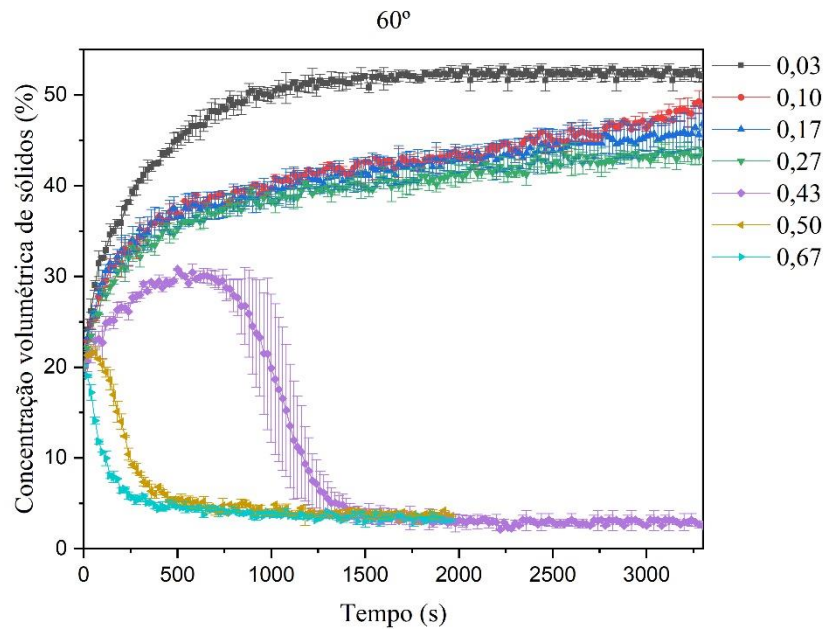


Fig. 4.22. Concentração volumétrica de sólidos como função do tempo para suspensão de GX 0,2% v/v + ME 20% v/v inclinação de 60°.

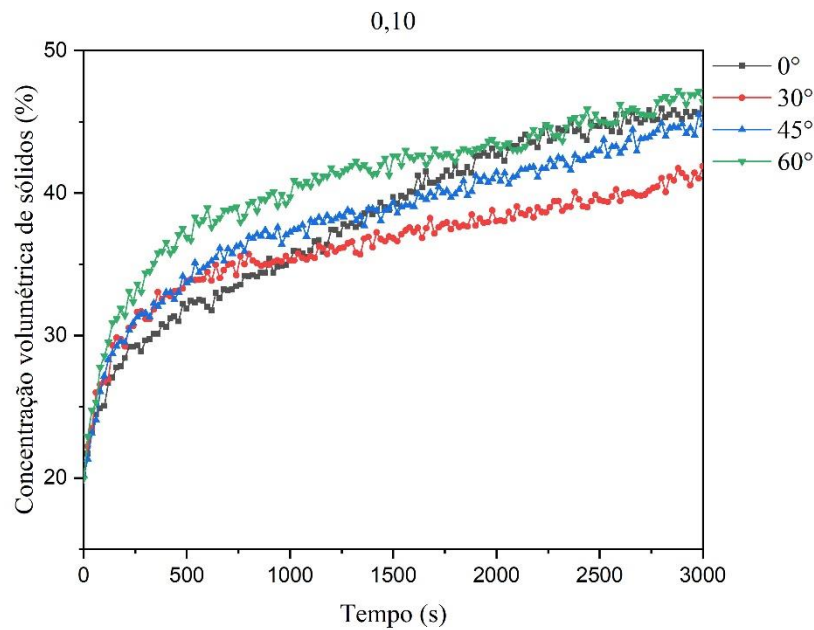


Fig.4.23. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,1

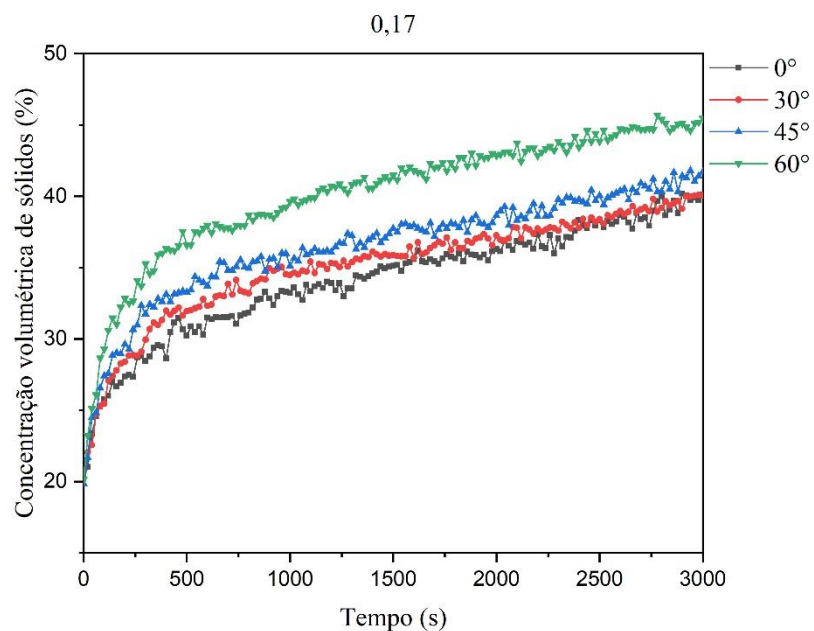


Fig. 4.31. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,17.

Analisando as Figs 4.30 e 4.31, nota-se um padrão interessante na suspensão que inclui GX e ME. Observa-se a presença de uma região de alta concentração bastante

estreita, a qual se formou rapidamente logo após a homogeneização da suspensão. Esse fenômeno pode ser associado, em parte, aglomeração de partículas durante a sedimentação.

O que acontece é um aumento repentino e significativo na concentração de sólidos assim que a suspensão é homogeneizada. Isso sugere que as partículas presentes na suspensão têm uma tendência natural de se agrupar ou se aglomerar durante o processo de sedimentação. Esse comportamento é uma resposta às forças intermoleculares e às características das partículas em suspensão (MOREIRA, 2014).

Nas Figs. 4.32 a 4.34 são apresentadas as curvas referentes às regiões I e II (região em que a concentração de sólidos tende a zero após certo período) da suspensão de GX 0,2% v/v e ME 20% v/v

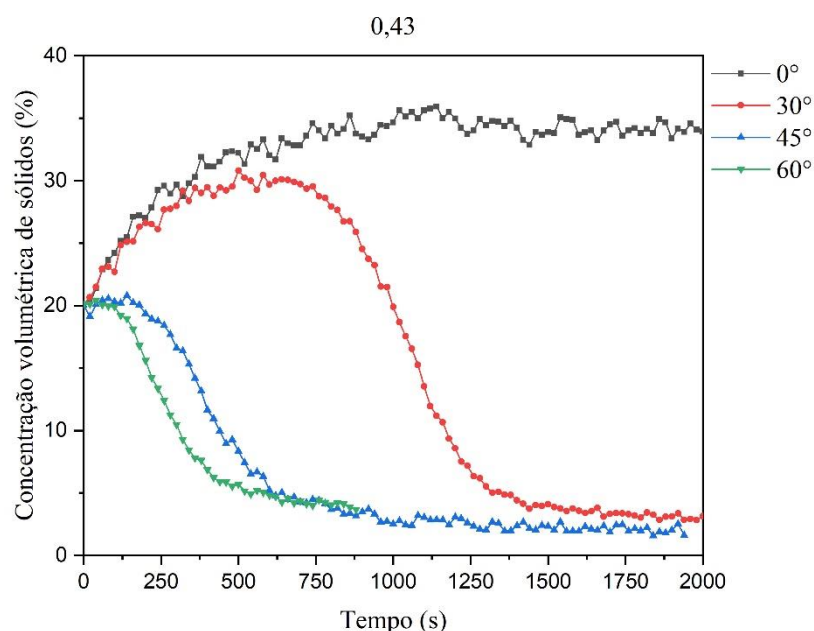


Fig. 4.24. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,43.

Na Figura 4.32, podemos notar que, na posição 0,43, são representadas curvas correspondentes às três regiões distintas. A inclinação de 0° está associada à Região III, onde ocorre um aumento na concentração de sólidos. Por outro lado, a inclinação de 30° em relação à vertical está na região II. Em que, observa-se um rápido aumento na concentração, seguido por uma desaceleração que mantém a concentração praticamente constante por um determinado período. Posteriormente, ocorre um decaimento exponencial.

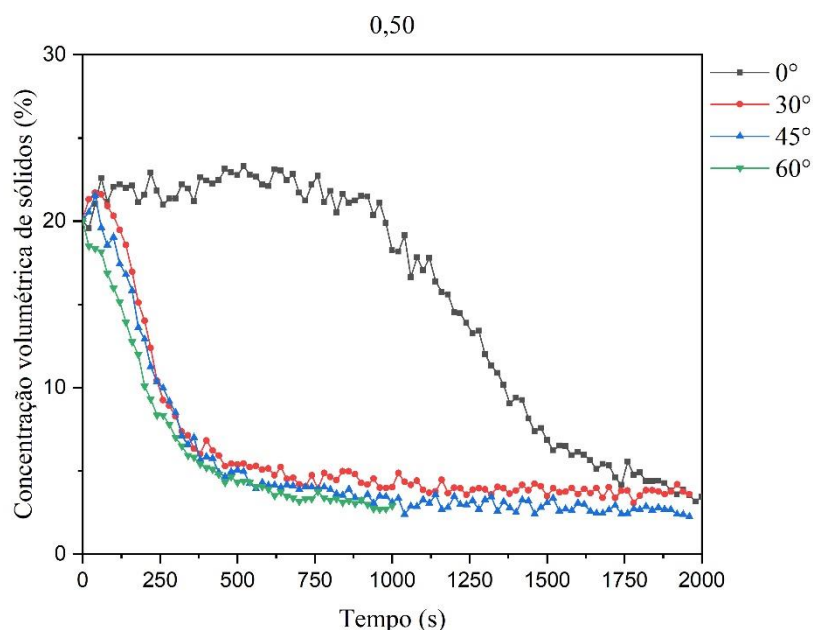


Fig. 4.25. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,5.

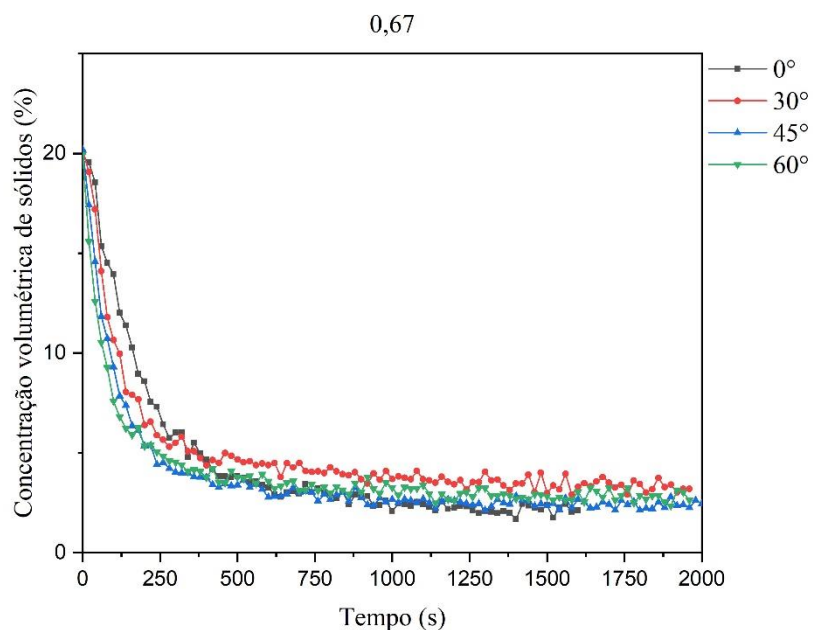


Fig. 4.26. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GX e ME 20% v/v na posição 0,67.

As inclinações de 45° e 60° com a vertical estão na região I, e exibem um comportamento semelhante, onde a concentração se mantém constante por um período e, em seguida, diminui rapidamente.

Essas observações ressaltam como a inclinação do recipiente influencia significativamente o comportamento da concentração de sólidos durante o processo de sedimentação, e que quanto maior o ângulo em relação a vertical, maior a velocidade de sedimentação (Fig. 4.32, 4.33 e 4.34).

4.3. Comparação entre o comportamento das suspensões sedimentando em GL e em GX na mesma inclinação

Para uma análise mais precisa das variações nos processos de sedimentação nos fluidos em estudo, as Figs. 4.35 e 4.36 apresentam graficamente os resultados na altura de 0,10 do recipiente de teste, na inclinação de 30° e 60° com a vertical, para as amostras de microesfera de vidro com GL e GX.

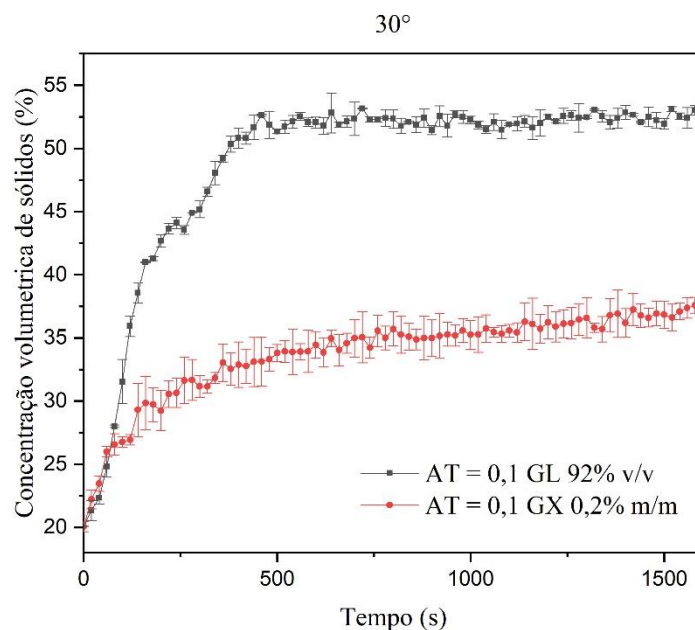


Fig. 4.27. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,10 e inclinação de 30° .

Nas Figuras 4.35 e 4.36, é possível observar que a formação do sedimento nos fluidos apresentou características distintas entre o fluido newtoniano (GL) e os fluidos não newtonianos (GX), nas duas inclinações analisadas 30° e 60° . Na sedimentação do fluido newtoniano, que é a solução aquosa de glicerina 92%, observa-se um aumento quase

instantâneo na concentração de sólidos após o processo de homogeneização, seguido por uma estabilização da concentração que resulta na formação da camada de sedimentos.

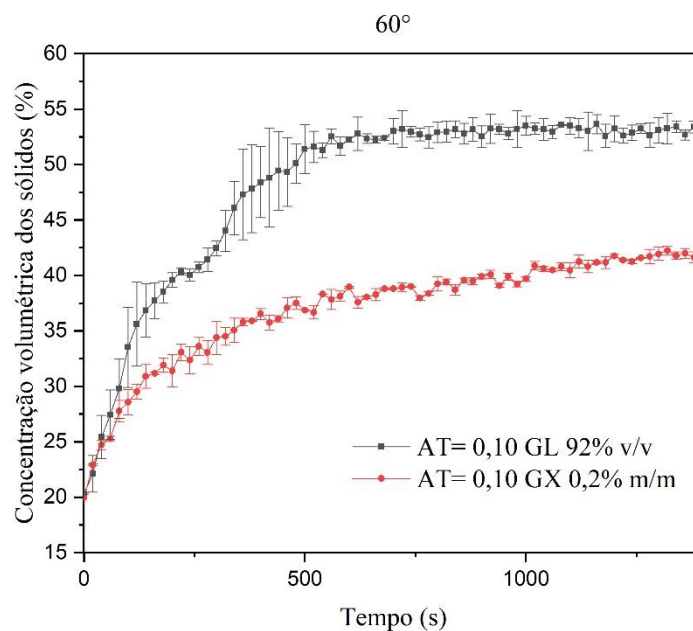


Fig. 4.28. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,10 e inclinação de 60°.

Por outro lado, na sedimentação da solução de GX, nota-se inicialmente uma região com aumento rápido de concentração de sólidos. Posteriormente, a concentração aumenta de forma mais gradual até atingir uma concentração de sólidos constante. Essas diferenças evidenciam a influência das propriedades reológicas dos fluidos na dinâmica da sedimentação.

O fenômeno de gelificação das soluções GX pode ser interpretado como mais um fator que contribuiu para a suavização das curvas de concentração de sólidos. À medida que as taxas de sedimentação diminuíram por conta da redução da concentração de sólidos, é possível inferir que o fluxo ascendente do líquido também tenha diminuído com o tempo. Esse decréscimo do fluxo líquido influenciou o processo de gelificação do fluido, resultando em um aumento da viscosidade aparente ao longo do tempo. A gelificação, por sua vez, contribuiu para uma redução adicional na sedimentação das partículas, prolongando assim o tempo necessário para que todas as partículas se separassem (MOREIRA, 2017). Resultando que o tempo gasto para a compactação total do sedimento por sedimentação gravitacional foi consideravelmente menor para o fluido

newtoniano, e não foi encontrada a tendência de concentração constante para o fluido não newtoniano.

As Figs. 4.37 e 4.38 apresentam as curvas em 2 alturas diferentes (0,17 e 0,27) para inclinação de 30° com a vertical, para as amostras de ME na solução de glicerina (GL) e goma xantana (GX).

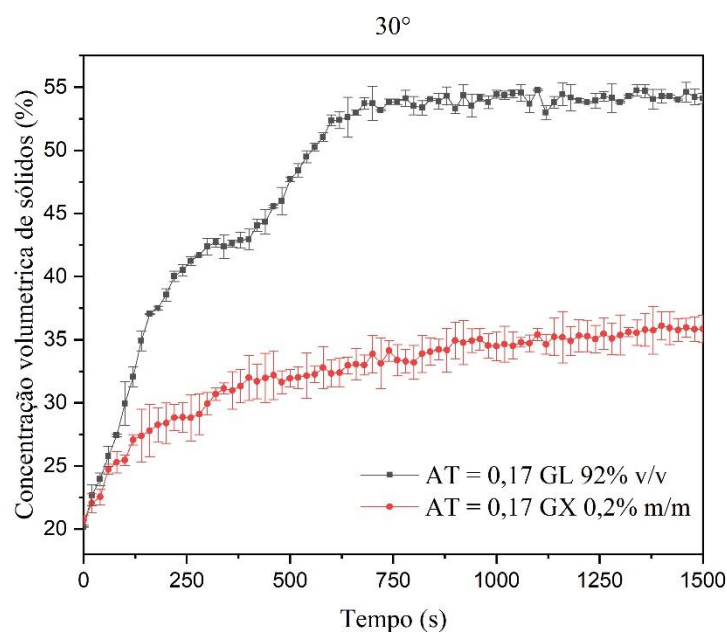


Fig. 4.29. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,17 e inclinação de 30° .

Na Fig. 4.37, observa-se que, na mesma posição e inclinação (0,27 e 30°), duas curvas estão presentes em diferentes regiões. A curva referente à sedimentação na solução com GX está na região III, com um aumento da concentração até a compactação. Em contraste, a curva relacionada à solução com GL está na região II, na qual ocorre um aumento da concentração seguido pelo declínio da concentração de sólidos, tendendo a zero. Essa diferença de região na mesma posição, para fluidos diferentes, é devido à diferença de viscosidade de cada um dos fluidos.

Observando a Fig. 4.38, fica evidente que durante o tempo observado a concentração volumétrica de sólidos alcançada pela suspensão com GL é mais alta, atingindo aproximadamente 55%, enquanto a concentração de sólidos na suspensão com GX atinge menos de 35%. Isso indica que os sólidos se concentraram mais facilmente devido a viscosidade na suspensão de GL, resultando em maiores concentrações e,

consequentemente, em regiões diferentes a uma altura de 0,27 em uma inclinação de 30° em relação à vertical.

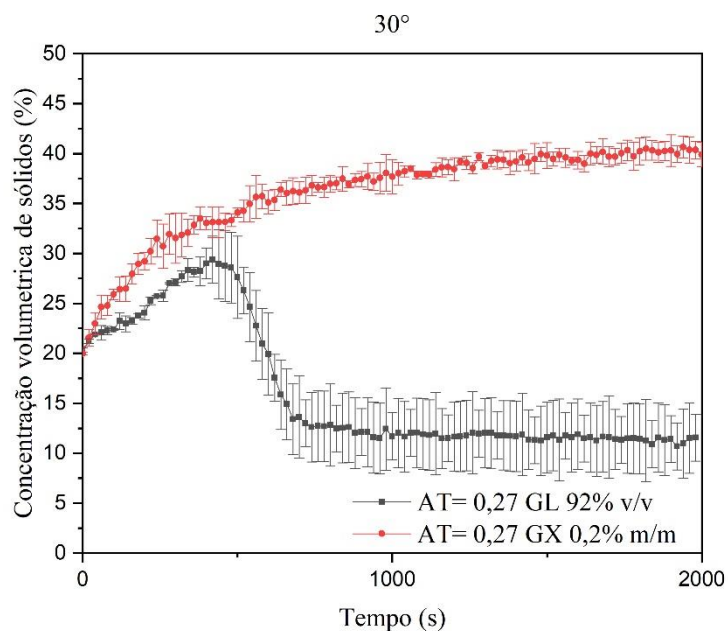


Fig. 4.30. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,27 e inclinação de 30° .

A Fig. 4.39 apresenta as curvas na altura de 0,43 para inclinação a de 60° com a vertical, para as amostras de microesfera de μm na solução de GL e GX.

Na Fig. 4.39, é possível notar que ambos os fluidos estudados apresentaram uma redução na concentração de sólidos ao longo do tempo e um comportamento semelhante. A concentração se manteve constante inicialmente e posteriormente, houve um decaimento exponencial na concentração volumétrica dos sólidos, que tendeu a zero. Esse comportamento foi resultado da passagem da frente superior difusa, que representa a interface entre a suspensão e o líquido clarificado, diante do sistema de medição. É relevante ressaltar que o deslocamento dessa frente difusa em direção ao topo é uma característica comum em todos os testes de sedimentação, especialmente nas regiões mais afastadas da base do tubo de testes, onde não ocorre a formação de sedimentos sólidos.

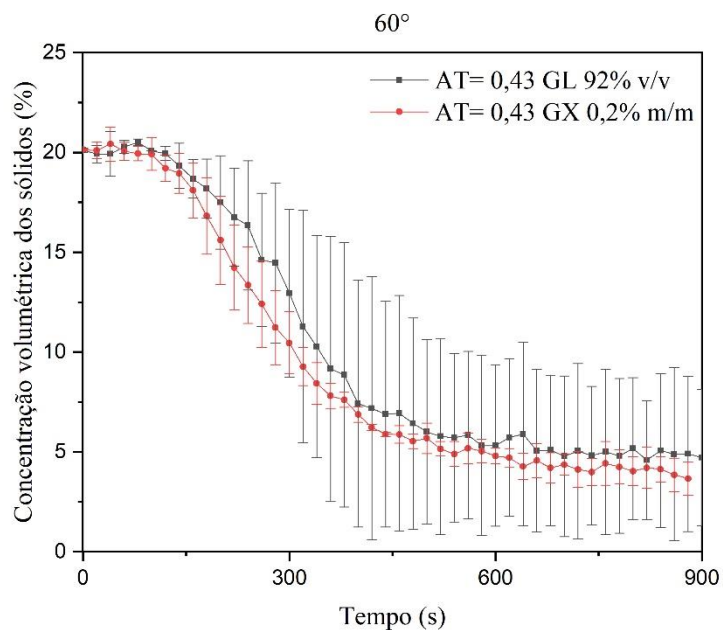


Fig. 4.31. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 60°.

A Fig. 4.40 apresenta a curva em na altura de 0,43 para a inclinação de 30° com a vertical, para as amostras de microesfera de vidro sedimentando tanto na solução de glicerina (GL) quanto na solução de goma xantana (GX).

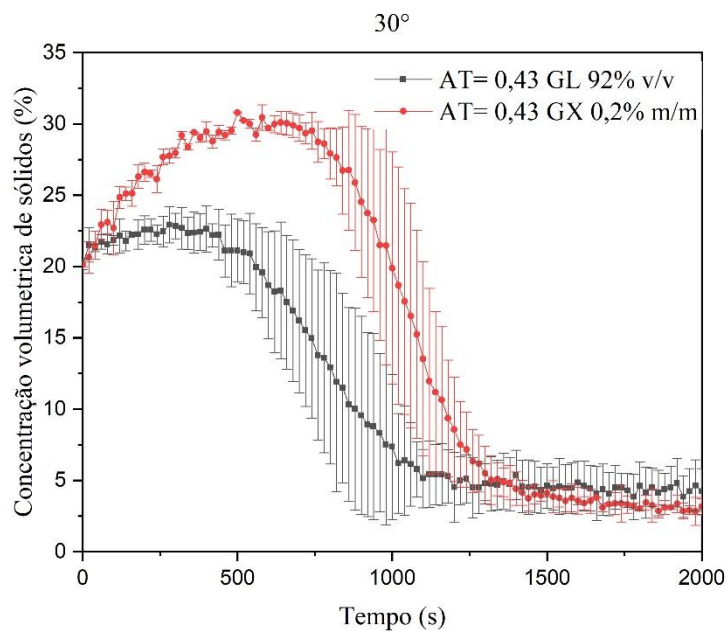


Fig. 4.32. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 30°.

Na Fig. 4.40, tem-se uma curva situada nas regiões I e II (regiões em que a concentração de sólidos tende a zero após certo período) na inclinação de 30° . Observa-se que no fluido newtoniano (GL) a concentração chegou no mínimo mais rapidamente, quando comparado com o fluido não newtoniano de viscosidade aparente similar (GX). Na inclinação de 30° o comportamento foi de acordo com o esperado pela literatura (MOREIRA, 2014). Diferente do que aconteceu na inclinação de 60° , onde houve um comportamento similar para as duas suspensões e a solução de GX clarificou mais rapidamente, sendo o efeito *Boycott* o possível responsável por essa mudança no comportamento com o aumento da inclinação.

As Figs. 4.41 e 4.42 apresentam as curvas em 2 alturas diferentes (0,43 e 0,50) para inclinação de 45° com a vertical, para as amostras de microesfera de vidro na solução de GL e GX.

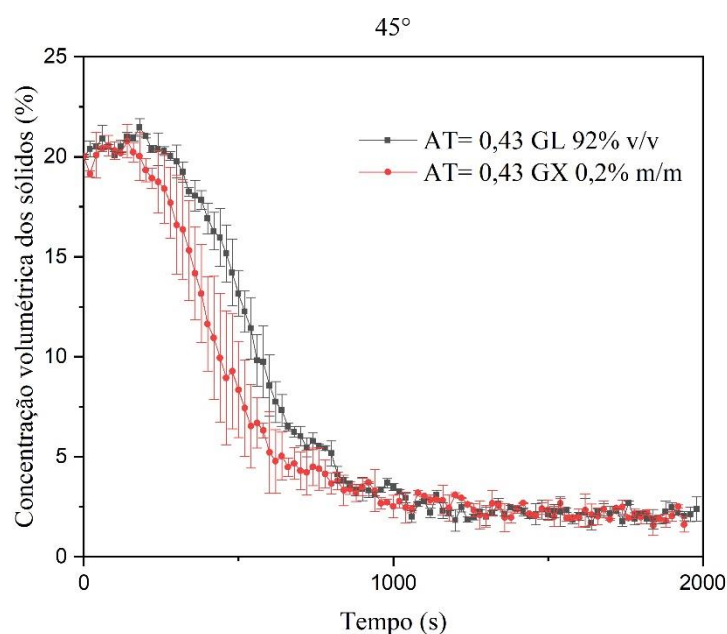


Fig. 4.41. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 45° .

Nas Figs. 4.41 e 4.42, é possível notar que ambos os fluidos estudados apresentaram uma redução na concentração de sólidos ao longo do tempo nas duas alturas. E que na inclinação de 45° o comportamento das duas diferentes soluções (fluido newtoniano e pseudoplástico) foi bastante semelhante mesmo com o comportamento dos fluidos sendo tão diferente.

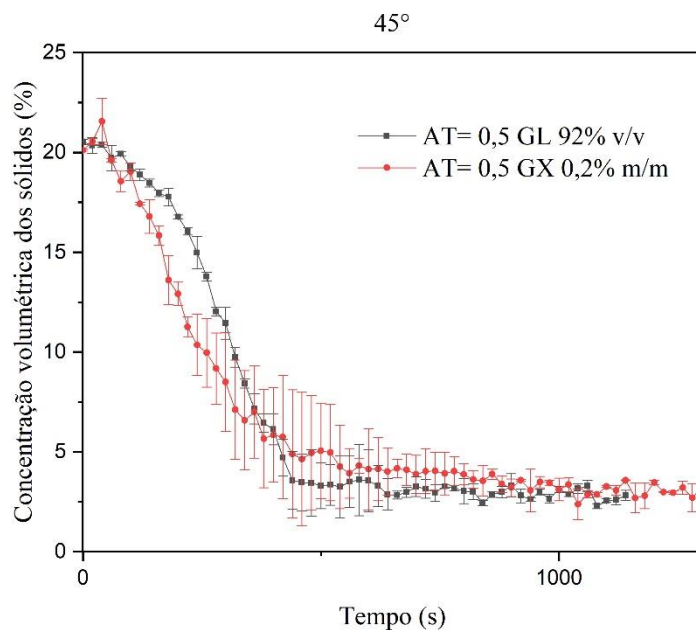


Fig. 4.42. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,50 e inclinação de 45°.

As Figs. 4.43 a 4.44 apresentam a curva na altura de 0,43; 0,5 e 0,67 para inclinação de 0°, para as amostras de microesfera de vidro sedimentando tanto na solução de GL quanto na solução de goma GX.

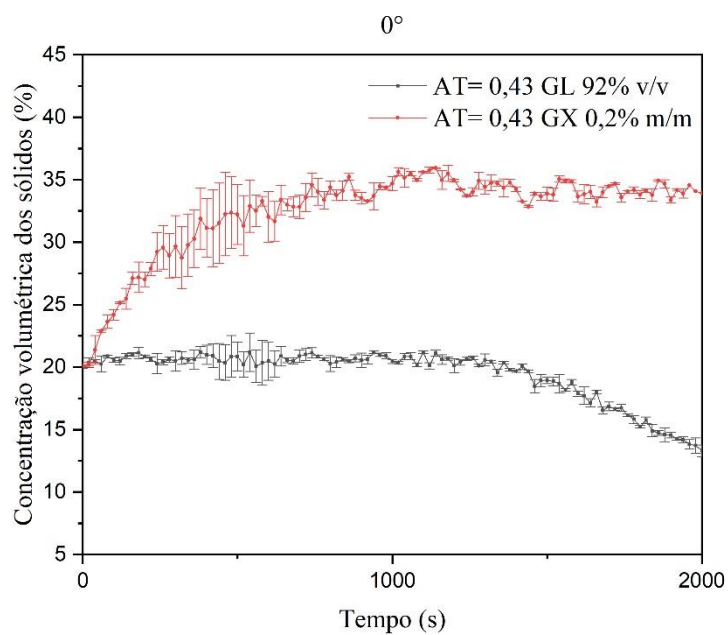


Fig. 4.43. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,43 e inclinação de 0°.

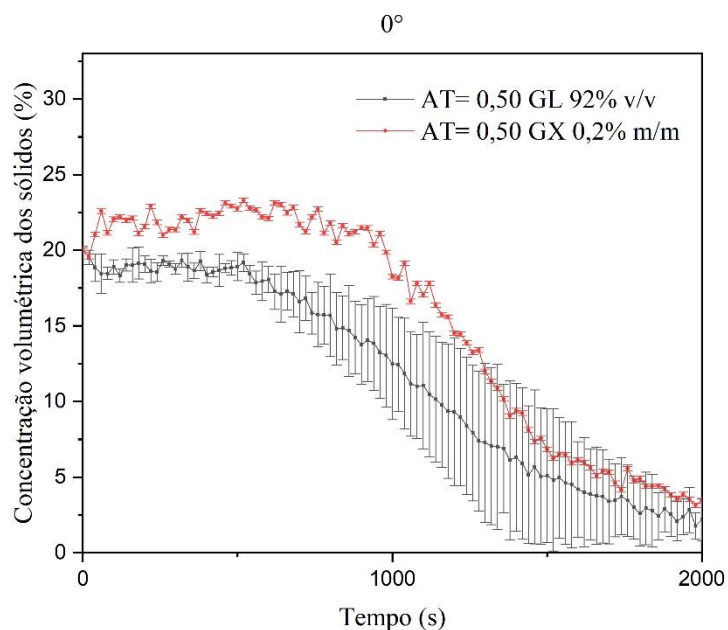


Fig. 4.44. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,5 e inclinação de 0°.

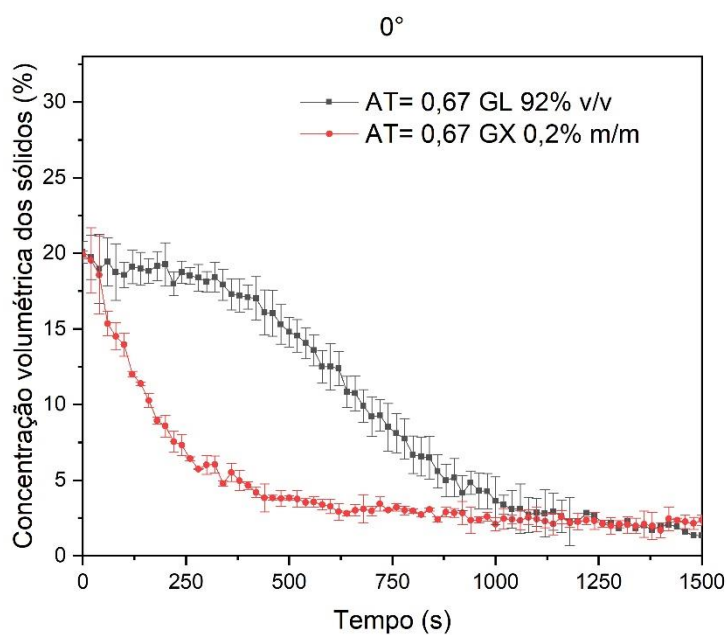


Fig. 4.45. Monitoramento da concentração de sólidos como função do tempo para suspensão de GL e GX na posição 0,67 e inclinação de 0°.

Nas Fig. 4.43 a 4.45 tem-se que as duas suspensões estão em uma região que tende a 0 de concentração. Que a separação das partículas no fluido pseudoplástico (GX)

ocorreu inicialmente mais rápida (quando comparado com o fluido newtoniano de viscosidade aparente similar), resultado que vai de acordo com o encontrado por Moreira (2017).

Os resultados evidenciam a influência significativa das propriedades reológicas dos fluidos e da inclinação do recipiente na dinâmica da sedimentação. Verificam-se comportamentos distintos com as variações na inclinação. Em particular, nas regiões em que a concentração tende a zero (I e II), observa-se um comportamento interessante. Na inclinação de 30°, o fluido newtoniano (GL) apresenta uma taxa mais rápida de clarificação da mesma forma que na inclinação de 0°, enquanto na inclinação de 60° e 45°, não se observa uma diferença significativa no comportamento entre os dois fluidos, mas é o fluido com comportamento pseudoplástico (GX) que se torna mais eficiente na clarificação.

Esse cenário aponta para uma mudança dinâmica marcante na sedimentação, que é diretamente influenciada pela inclinação do recipiente e pelas características reológicas dos fluidos. E estão associadas ao efeito Boycott e à gelificação das estruturas do biopolímero GX. O efeito Boycott, que aumenta a velocidade de sedimentação e se intensifica com o aumento da inclinação (NIR et al., 1990; BURGER et al., 2012), está presente tanto em suspensões de XG quanto de GL. No entanto, a gelificação das estruturas tixotrópicas resultou na diminuição do fluxo líquido ascendente, aumentando a viscosidade do meio e dificultando o deslocamento das partículas, resultando em taxas de sedimentação menores.

Acredita-se que, em inclinações maiores, o efeito Boycott predominou sobre o comportamento pseudoplástico e tixotrópico da suspensão de GX, resultando em taxas de sedimentação semelhantes para ambas as suspensões. Em inclinações menores em relação a vertical, o comportamento reológico dependente do tempo influenciou mais a sedimentação do que o efeito Boycott.

4.4 As curvas de equiconcentração

4.4.1. Curvas de equiconcentração para as posições próximas a base e intermediárias

As curvas de equiconcentração foram desenvolvidas para uma avaliação mais precisa das características dos materiais sólidos que estavam em processo de sedimentação nos

fluidos estudados. Os resultados estão separados de acordo com o fluido usado na suspensão.

A. Água + CaCO_3

Para as curvas que demonstraram comportamento dos tipos II e III (próximas a base), foram determinados os momentos em que as concentrações alcançavam os valores de $\varepsilon_s=17\%$, $\varepsilon_s=28\%$, $\varepsilon_s=35\%$ e $\varepsilon_s=40\%$.

As Figs. 4.46 a 4.48 apresentam as curvas de equiconcentração para as posições mencionadas nas 4 inclinações estudadas (0° , 30° , 45° e 60°) na altura adimensionalizada.

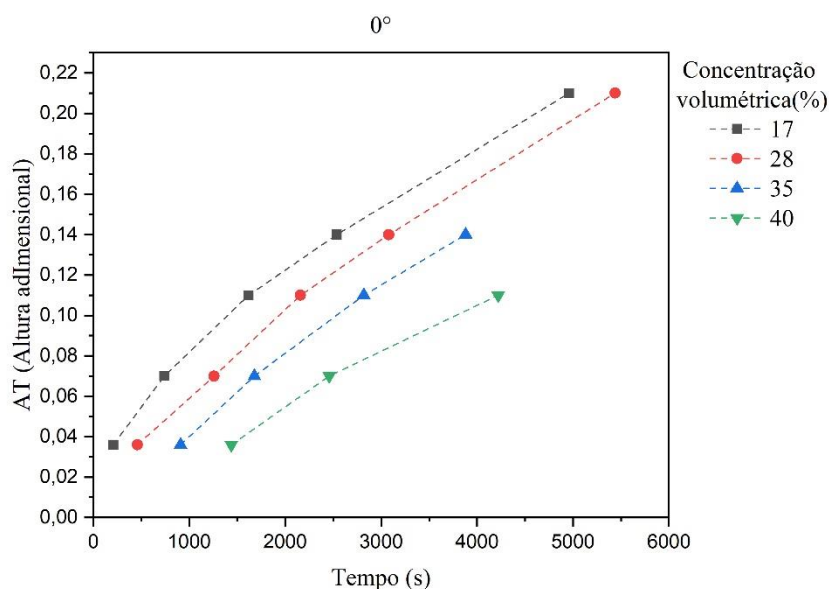


Fig. 4.33. Curvas de equiconcentração para o CaCO_3 com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 0° .

Nas Fig. 4.46, referente a água (fluido newtoniano) em 0° , é notável que as linhas de equiconcentração relacionadas à formação do sedimento apresentam inclinações bastante semelhantes. Esse padrão quer dizer que a taxa de aumento da concentração de sólidos ao longo do tempo em uma posição específica ocorreu de maneira relativamente constante.

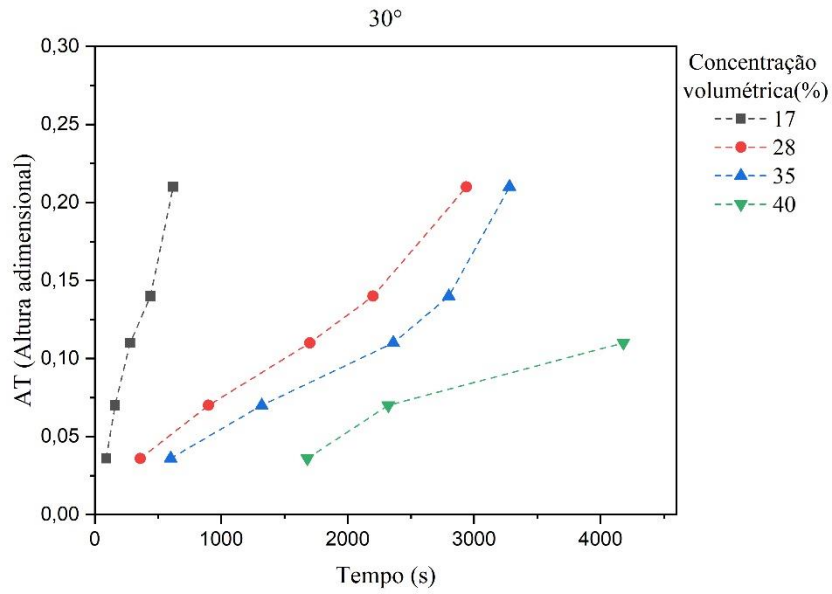


Fig. 4.34. Curvas de equiconcentração para o CaCO_3 com $\epsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 30° .

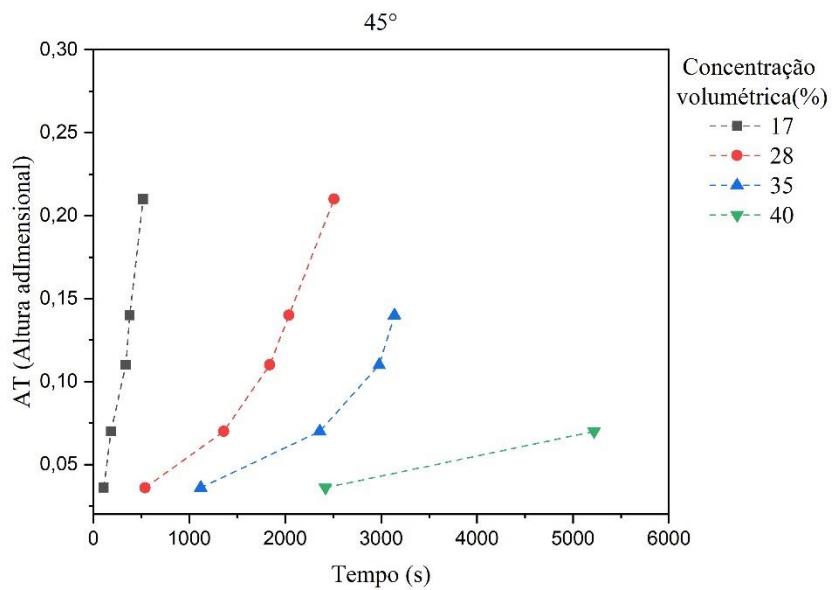


Fig. 4.35. Curvas de equiconcentração para o CaCO_3 com $\epsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 45° .

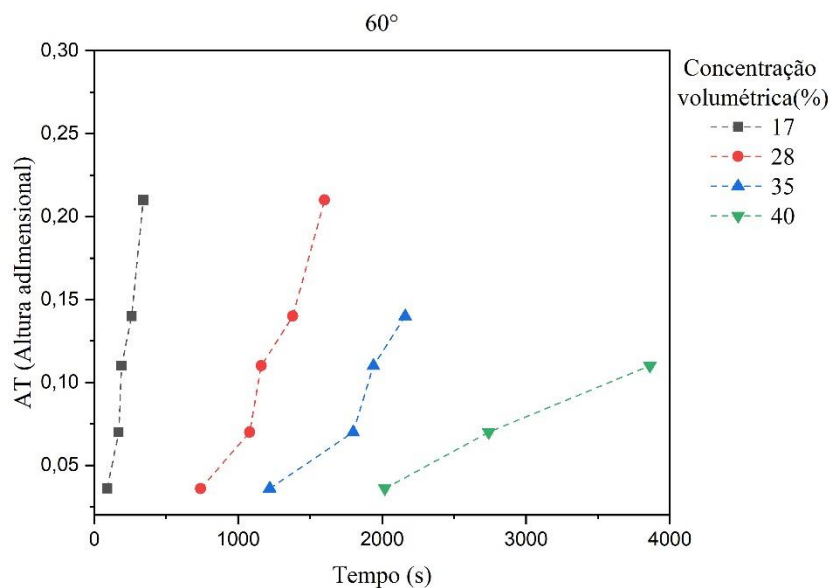


Fig. 4.36. Curvas de equiconcentração para o CaCO_3 com $\varepsilon_{s0}=10\%$ (Região II e III) na inclinação de 60° .

Nas Figs. 4.47 a 4.49, que são referentes aos ângulos 30° , 45° e 60° com a vertical. As inclinações das linhas de equiconcentração apresentaram comportamento não linear e variações significativas, indicando que nas inclinações diferentes de 0° a compactação do sedimento ao longo do tempo não se deu de maneira uniforme.

Nas Figs. 4.46 a 4.49, observa-se que os momentos em que as linhas de equiconcentração se iniciam estão diretamente relacionadas às concentrações correspondentes. Em outras palavras, quanto maior a concentração de sólidos, maior é o tempo necessário para que as curvas de equiconcentração se inicie. Isso sugere relação entre o tempo de formação das equiconcentração e os níveis de concentração de sólidos.

Ao observar as diferentes inclinações, é notável que, para concentrações mais elevadas, o período necessário para que as curvas de equiconcentração se iniciassem nas inclinações diferentes de 0° , foram consideravelmente maiores do que na inclinação de 0° .

Nota-se que, ao contrário do que foi descrito por Kynch (1952), as curvas de equiconcentração não apresentam uma trajetória linear que partem da origem. Isso indica que a propagação de ondas de concentração uniforme não teve início no fundo da vidraria de teste. De acordo com os estudos de Concha e Bustos (1987) e Arouca (2006), esse

padrão está associado à compressão do sedimento causada pelas camadas de sólidos superiores.

B. GL 92% v/v + ME 20% v/v

Para as curvas que demonstraram comportamento dos tipos II e III, foram determinados os momentos em que as concentrações alcançavam os valores de $\varepsilon_s = 26\%$, $\varepsilon_s = 30\%$, $\varepsilon_s = 35\%$, $\varepsilon_s = 40\%$ e $\varepsilon_s = 45\%$.

As Figs. 4.50 a 4.53 apresentam as curvas de equiconcentração para as posições mencionadas nas 4 inclinações estudadas (0° , 30° , 45° e 60°).

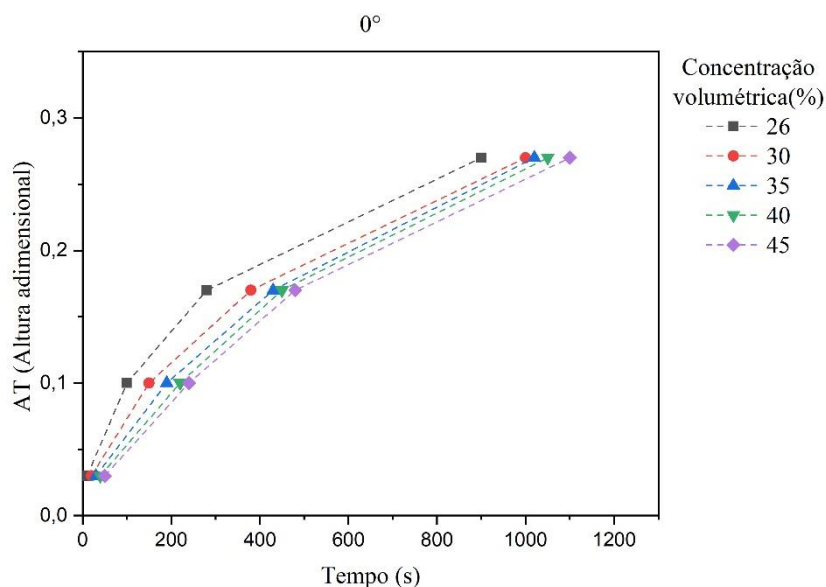


Fig. 4.37. Curvas de equiconcentração para Microesfera de vidro sedimentando em GL com concentração inicial de sólidos de $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 0° .

Na Fig. 4.50, referente a GL (fluido com comportamento newtoniano) em 0° , é observado que as linhas de equiconcentração relacionadas à formação do sedimento apresentam inclinações muito semelhantes. Esse padrão quer dizer que a taxa de aumento da concentração de sólidos ao longo do tempo em uma posição específica ocorreu de maneira relativamente constante. E as curvas se iniciaram na origem do gráfico, indicando baixo grau de compressibilidade do sedimento, conforme esperado para suspensões formadas por ME (MOREIRA, 2014).

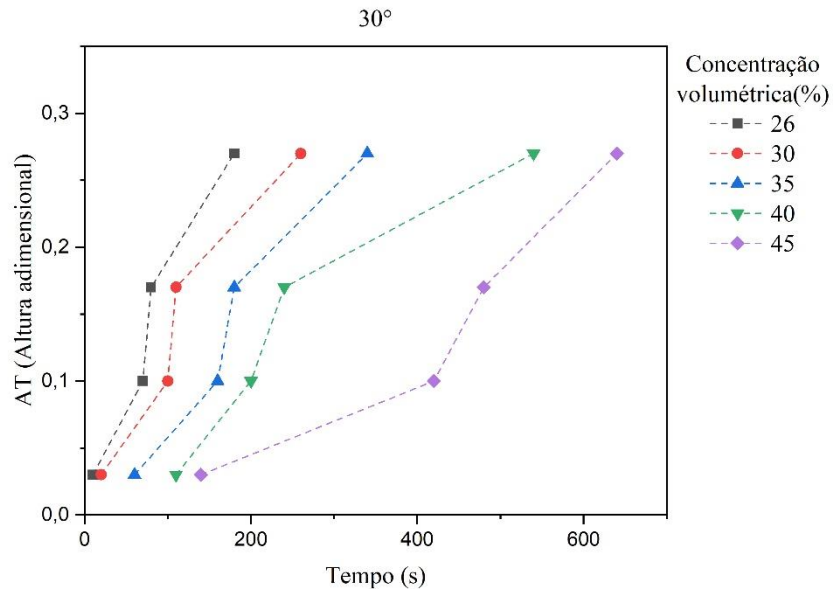


Fig. 4.51. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 30°.

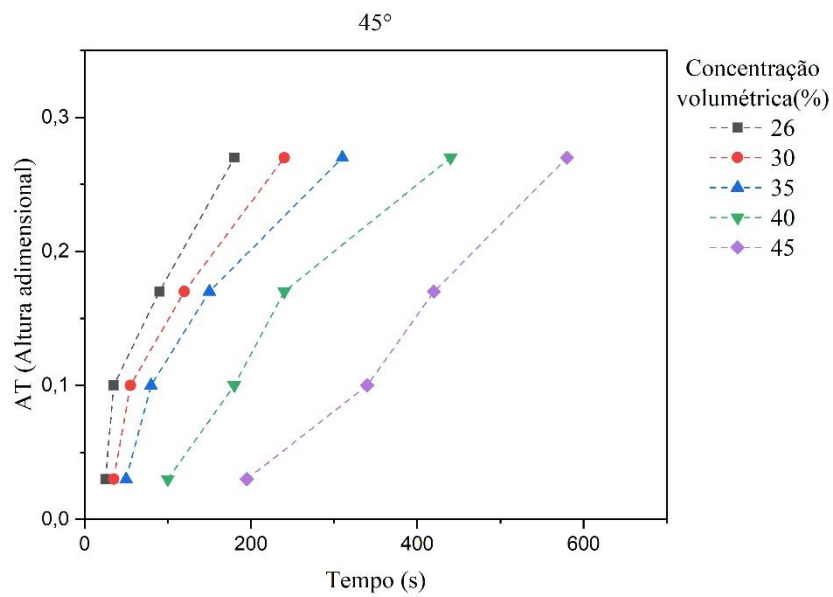


Fig. 4.38. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 45°.

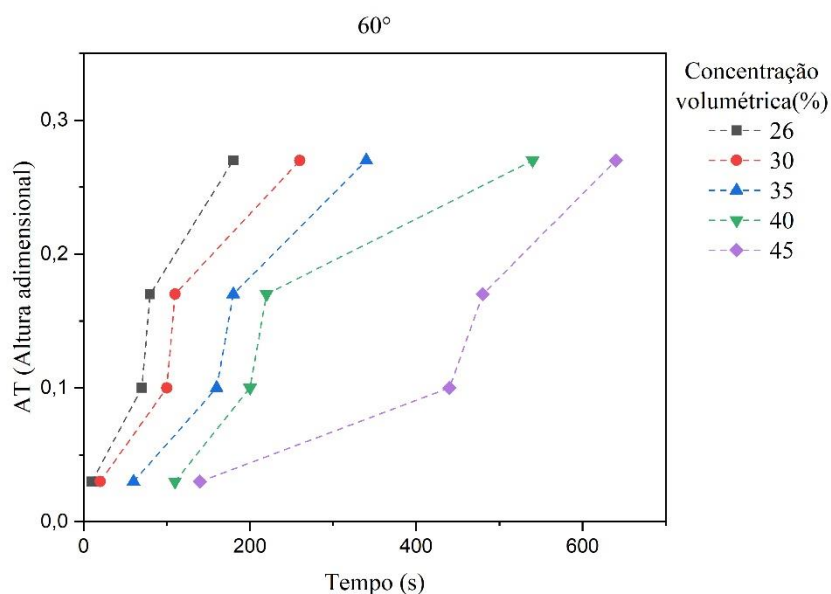


Fig. 4.39. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GL com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 60° .

Nas curvas referentes aos ângulos 30° , 45° e 60° com a vertical (4.51, 4.52 e 4.53). As inclinações das linhas de equiconcentração apresentaram comportamento não linear e variações significativas, indicando que nas inclinações diferentes de 0° a compactação do sedimento ao longo do tempo não se deu de maneira uniforme.

Em todas as inclinações, observa-se que os momentos em que as linhas de equiconcentração se iniciam estão diretamente relacionadas às concentrações correspondentes. Isso quer dizer que, quanto maior a concentração de sólidos, mais tempo demorou para que as curvas de equiconcentração se iniciassem, mesmo que essa diferença de tempo não fosse muito significativa ela existiu, sendo menor na inclinação de 0° .

Para as curvas que demonstraram comportamento dos tipos II e III (aumentando a concentração ao longo do tempo), foram determinados os momentos em que as concentrações alcançavam os valores de $\epsilon_s = 26\%$, $\epsilon_s = 30\%$, $\epsilon_s = 35\%$, $\epsilon_s = 40\%$ e $\epsilon_s = 45\%$, mesmos valores usados para as curvas da suspensão com GL.

Os resultados observados para as suspensões de GL 92% v/v e ME 20% v/v, bem como para a suspensão de água e CaCO_3 10% v/v, apresentam uma trajetória não linear que não se inicia na origem. Esses padrões contrariam as conclusões de Concha e Bustos (1987) e Arouca (2006), que destacaram que as linhas de equiconcentração não têm

origem na origem. Em desacordo com a concepção linear de Kynch, esses estudos revelaram que a compressão do sedimento pelas camadas superiores de sólidos não apenas modifica a linearidade dessas linhas, mas também as faz emergir em momentos temporais posteriores.

As Figs. 4.54 a 4.57 apresentam as curvas de equiconcentração para as posições mencionadas nas 4 inclinações estudadas (0° , 30° , 45° e 60°).

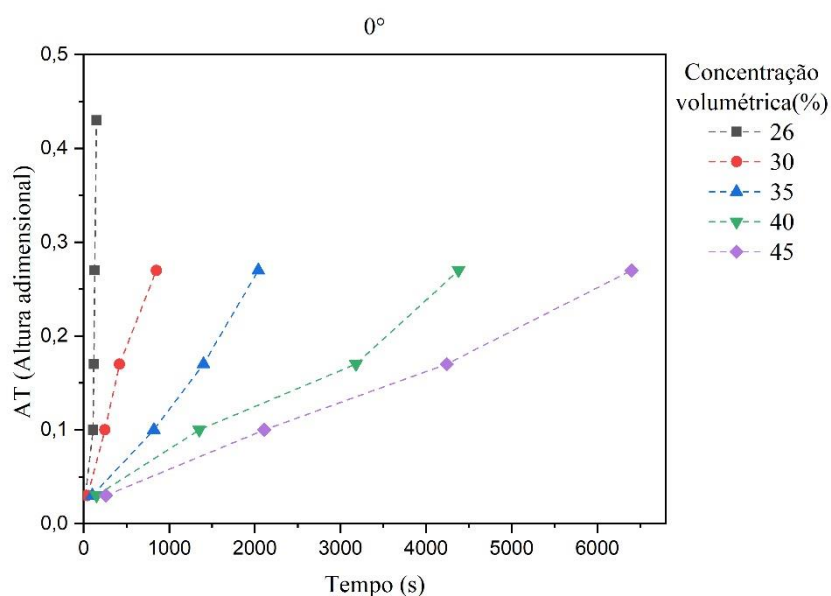


Fig.4.40. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com de $\varepsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 0° .

Nas Figuras 4.54 a 4.57, as inclinações das linhas de equiconcentração exibiram variações significativas, indicando que a compactação do sedimento ao longo do tempo na suspensão de GX e ME não seguiu um padrão uniforme em nenhuma das inclinações avaliadas. É importante notar que, como nas outras suspensões, o momento em que as linhas de equiconcentração se iniciam está diretamente relacionado com as concentrações correspondentes.

As curvas da Fig. 4.54 (inclinação de 0°), mostraram-se com comportamento mais próximo ao linear. Nas demais inclinação, nota-se uma tendência não-linear principalmente para as posições mais distantes do sedimento ($AT > 0,2$). Tal comportamento pode ser devido a formação de sedimentos com baixa compressibilidade

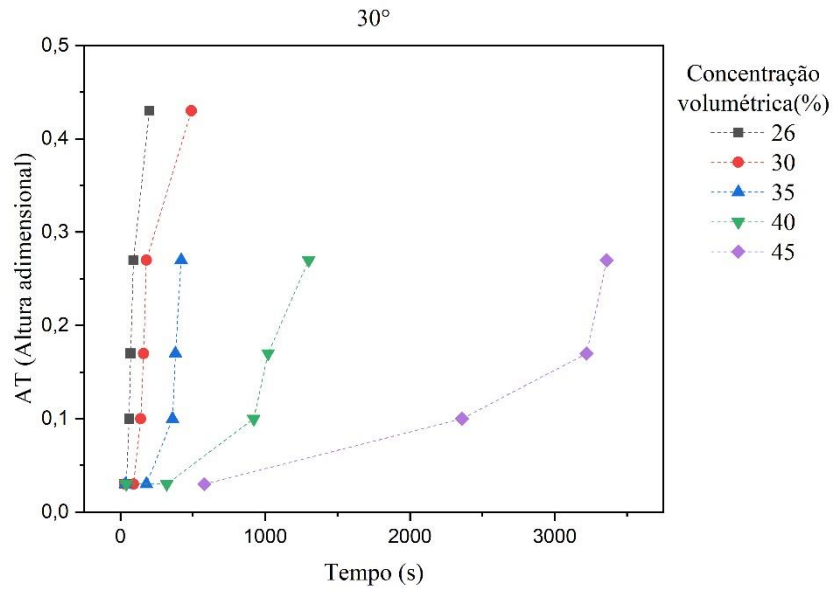


Fig. 4.41. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 30°.

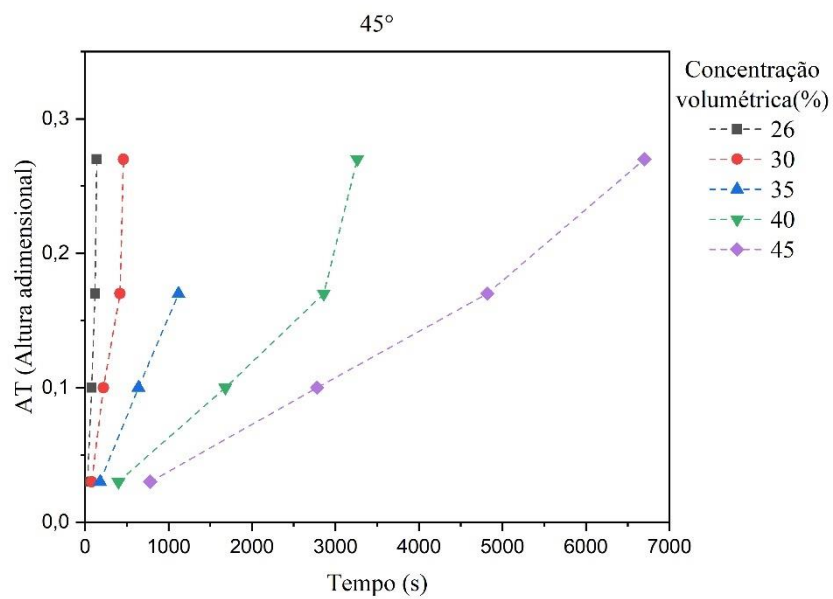


Fig. 4.42. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 45°.

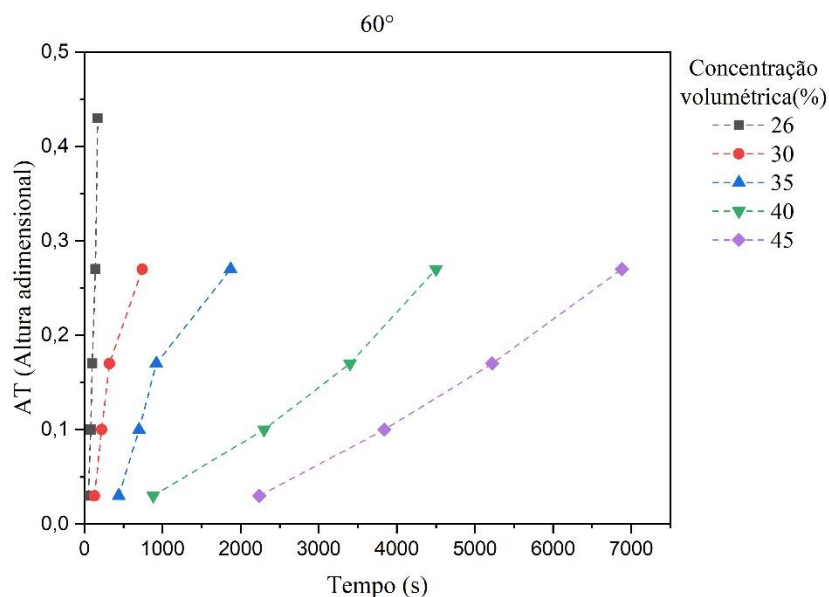


Fig. 4.43. Curvas de equiconcentração para ME sedimentando em GX com $\epsilon_{s0}=20\%$ (Região II e III) na inclinação de 60° .

Conforme descrito por Kynch (1952), a sedimentação foi tradicionalmente definida como um fenômeno de ondas de concentração constante que se propagavam ao longo do recipiente, indo da base até a interface clarificada. Estas "ondas" eram representadas graficamente por meio das linhas (curvas) de equiconcentração, as quais eram retas e partiam da origem.

No entanto, trabalhos posteriores realizados por Concha e Bustos (1987), Arouca et al. (2006) e Moreira (2014) mostraram que as linhas de equiconcentração não seguiam o padrão de serem retas e não necessariamente se iniciavam da origem. Estes autores argumentaram que a compressão do sedimento, provocada pelas camadas de sólidos que se formavam na parte superior do recipiente, tinha o potencial de alterar a linearidade das equiconcentração e atrasar o momento em que elas surgiam.

Os resultados obtidos para as 3 suspensões usadas no presente estudo corroboram essas descobertas. Ainda, observou-se que, ademais da compressibilidade do sedimento, das propriedades reológicas do fluido, as diferentes inclinações também desempenham um papel significativo na determinação das inclinações das retas (linearidade) e do tempo de aparecimento das equiconcentração. Portanto, a inclinação do tubo de teste afeta a formação e o comportamento das curvas de equiconcentração durante o processo de sedimentação.

4.5. Velocidade de sedimentação das partículas

4.5.1. Velocidade de sedimentação das partículas constituintes das suspensões (v_s)

4.5.1.1. Água + CaCO_3

A Fig. 4.58 traz a curva de passagem de interface para as 4 inclinações estudadas.

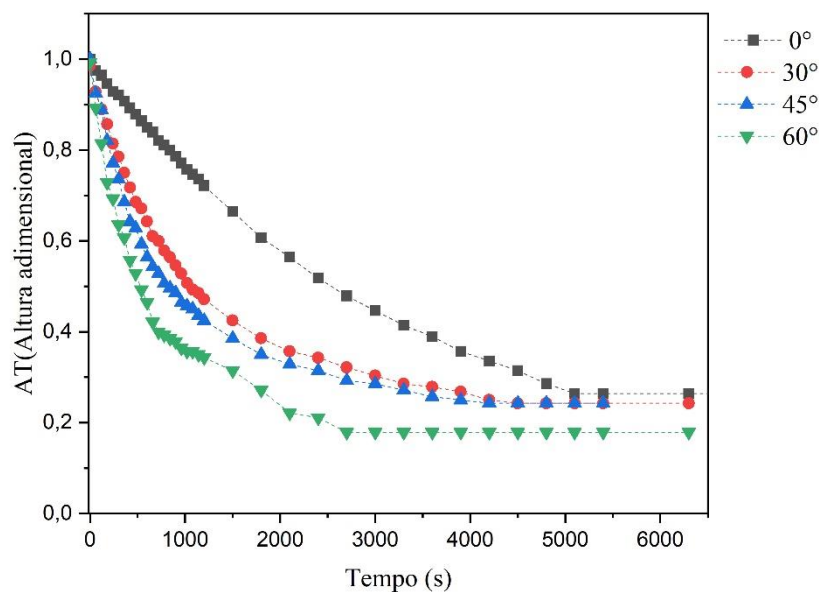


Fig. 4.44. Passagem da interface superior descendente em função do tempo na suspensão água + CaCO_3 nas 4 inclinações (0° , 30° , 45° e 60°).

Observa-se claramente na figura, que quanto maior a inclinação com a vertical, maior a velocidade de sedimentação das partículas. Vindo de encontro ao que é descrito pelo efeito *Boycott*. (BOYCOTT, 1920).

A velocidade de sedimentação das partículas presentes na suspensão de água e CaCO_3 foi avaliada para todas as 4 inclinações pela curva de posição (adimensional) versus tempo, e foi possível calcular a velocidade de sedimentação das partículas (v_s) em suspensão com base na inclinação da reta na região linear do gráfico. Os valores correspondentes de v_s estão apresentados de forma detalhada na Tab. 4.2 e a curva correspondente aos valores da tabela estão na Fig. 4.59.

Tab. 4.2. Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do carbonato de cálcio decantando em água.

Inclinação	v_s (m/s)
0°	$6,51 \times 10^{-5}$
30°	$1,53 \times 10^{-4}$
45°	$2,01 \times 10^{-4}$
60°	$2,81 \times 10^{-4}$

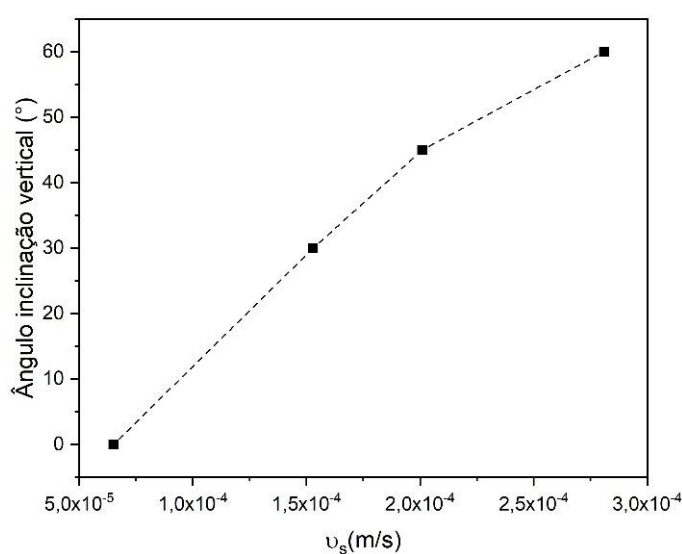


Fig. 4.45. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre de CaCO_3 em água.

Observando a Fig. 4.59 e a Tab. 4.2, conseguiu-se confirmar que com o aumento da inclinação com a vertical existe um aumento da velocidade de sedimentação livre, possivelmente devido ao efeito *Boycott* que acontece pelo aumento da inclinação com a vertical, mas esse aumento não é linear.

4.5.1.2. GL 92% v/v + ME 20% v/v

Nos experimentos com as suspensões de GL e GX com microesferas, não foi possível determinar a velocidade de sedimentação das partículas por meio do monitoramento visual do deslocamento da interface superior ao longo do tempo. Isso ocorreu devido ao movimento descendente da interface superior ocorrer de forma gradual e suave, o que

resultou em um gradiente de concentração contínuo, em vez de uma descontinuidade nítida entre o líquido clarificado e a suspensão, impossibilitando essa visualização.

Então a velocidade de sedimentação das partículas presentes na suspensão de GL e ME foi avaliada para todas as 4 inclinações com auxílio da TARG. Na Fig. 4.60, temos as curvas de posição (adimensional) versus tempo da passagem da interface descendente fluido suspensão, em que foi possível calcular a velocidade de sedimentação livre das partículas (v_s) com base na inclinação da reta na região linear do gráfico. Os valores correspondentes de v_s estão apresentados de forma detalhada na Tab. 4.3 e na Fig. 4.61.

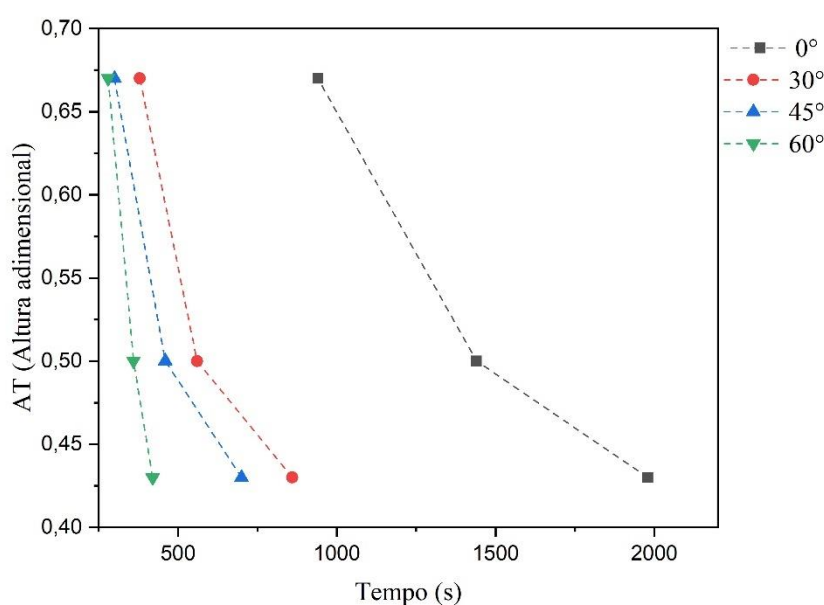


Fig. 4.46. Curva de descida da frente superior difusa para as suspensões constituídas pela microesfera e GL 92%.

Tab. 4.3. Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do microesfera decantando em GL.

Inclinação	v_s (m/s)
0°	$1,3 \times 10^{-4}$
30°	$2,33 \times 10^{-4}$
45°	$2,92 \times 10^{-4}$
60°	$1,17 \times 10^{-3}$

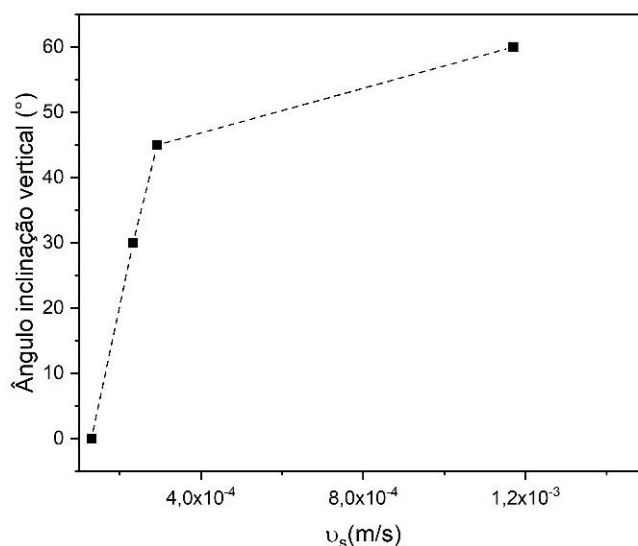


Fig. 4.61. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre ME em GL.

Os dados da velocidade de sedimentação para diferentes inclinações (0° , 30° , 45° e 60°), mostrados na Tab. 4.3 junto com a Fig. 4.61 demonstram uma relação entre a inclinação do recipiente e a taxa de sedimentação. Observa-se que a relação não é linear, à medida que a inclinação se torna mais acentuada, a velocidade de sedimentação aumenta de maneira significativa. Isso indica que em inclinações de 60° , a sedimentação ocorre a uma taxa muito mais rápida do que em ângulos de 0° . Tanto na suspensão de água e CaCO_3 quanto na suspensão de GL e ME tem-se um comportamento linear até a inclinação de 45° .

Observa-se por exemplo que na variação de 30° para 45° , tem-se um aumento de 25% na velocidade de sedimentação. Já em um ângulo de inclinação maior temos um aumento de 400% na velocidade de sedimentação da inclinação de 45° para 60° .

4.5.1.3. GX 0,2% v/v + ME 20% v/v

A velocidade de sedimentação das partículas na suspensão de GX e ME foi determinada nas quatro inclinações diferentes por meio da técnica TARG, já que por conta de sua interface difusa não foi possível obter a curva de interface visualmente. A Fig. 4.62 exhibe as curvas que relacionam a posição (adimensional) com o tempo da passagem da interface descendente entre o fluido e a suspensão. A partir destas curvas, a velocidade de sedimentação livre das partículas (v_s) foi calculada com base na inclinação da reta na região linear dos gráficos. Os valores correspondentes de v_s estão detalhadamente apresentados na Tab. 4.4 e o gráfico dos dados da Tab. na Fig 4.63.

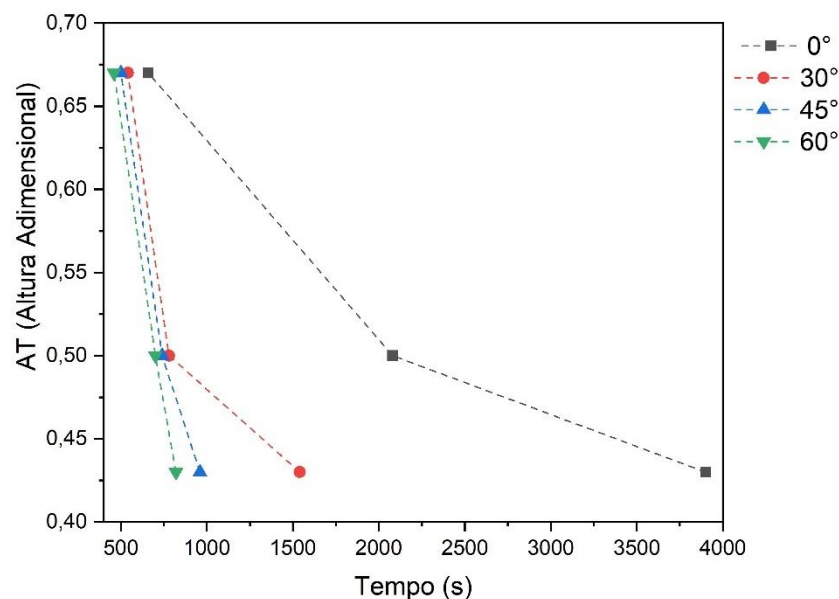


Fig. 4.62. Curva de descida da frente superior difusa para as suspensões constituídas pela microesfera e GX 0,2% v/v.

Analisando os valores da velocidade de sedimentação encontrados na Fig. 4.63 e na Tab. 4.4, observa-se um padrão similar aos valores obtidos para a suspensão com glicerina. A taxa de sedimentação aumenta à medida que a inclinação do sistema aumenta. Porém na GX existe um aumento menor quando mudamos a inclinação de 0 para 30° e aumentos mais substanciais de 30 para 45° e 45 para 60°.

Tab. 4.4. Velocidade de sedimentação livre das partículas obtidas experimentalmente para suspensões do microesfera decantando em GX.

Inclinação	v_s (m/s)
0°	$3,85 \times 10^{-5}$
30°	$9,2 \times 10^{-5}$
45°	$3,18 \times 10^{-4}$
60°	$5,83 \times 10^{-4}$

Os resultados da inclinação de 60° apresentam as maiores velocidades de sedimentação, enquanto na inclinação de 0° tem-se as menores velocidades. Observa-se um aumento na velocidade de sedimentação ao passar de 0° para 30°, e esse aumento

continua à medida que a inclinação aumenta para 45° e, subsequentemente, para 60° e como esperado a velocidade de sedimentação para suspensão de glicerina é mais alta do que a velocidade de sedimentação para a suspensão com goma xantana.

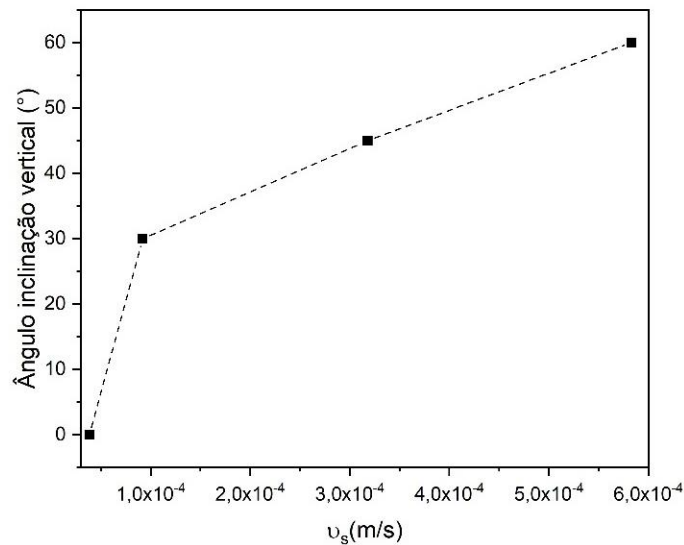


Fig. 4.63. Curva de inclinação versus velocidade de sedimentação livre ME em GX.

Esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos pelas outras suspensões estudadas, de que a inclinação desempenha um papel significativo na determinação da velocidade de sedimentação. Além disso, essa análise reforça a sensibilidade do sistema a mudanças na inclinação, especialmente em ângulos mais elevados.

Após a obtenção dos resultados de velocidade de sedimentação foi usado o modelo proposto por Nakamura e Kuroda (1937), conhecido como modelo PNK (Eq. 2.10), para estimar a taxa de sedimentação em recipientes inclinados e comparar se os valores previstos pelo modelo são próximos aos valores experimentais encontrados no trabalho. Os resultados estão apresentados na Tab. 4.5.

$$\frac{dh}{dt} = -V_0 \left(1 + \frac{h}{b} \text{sen}(A) \right) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Tab. 4.5. Velocidade de sedimentação prevista pelo modelo PNK.

Inclinação	v_s (m/s)		
	Água + CaCO ₃	ME + GL	ME+ GX
30°	$1,39 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-5}$
45°	$2,12 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$
60°	$2,82 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$

Os resultados das velocidades de sedimentação experimentais e teóricas (Tabela 4.5) para a suspensão aquosa de CaCO₃ mostraram-se altamente concordantes, com diferenças inferiores a 10%. Isso sugere que o modelo PNK conseguiu prever bem a velocidade da sedimentação em diferentes inclinações dessa suspensão.

No entanto, ao avaliar as suspensões de ME com GL e GX, observa-se que, na inclinação de 30°, os valores previstos pelo modelo estão em proximidade, com diferenças abaixo de 10%. Contrastando, nas outras duas inclinações, em que os valores foram consideravelmente subestimados. Indicando que o modelo não foi satisfatório para descrever a velocidade de sedimentação nessas suspensões.

Considerando que o modelo PNK é um modelo simples, ele somente conseguiu estimar a velocidade do fluido mais simples utilizado (água). Sendo indicado usar outros modelos mais complexos para as outras duas suspensões estudadas.

4.5.2. Permeabilidade fluidos newtonianos

Com base nos resultados obtidos de v_s para os fluidos newtonianos (água e solução aquosa 92% v/v de GL), a permeabilidade do meio poroso foi calculada usando a Eq. (3.10). Os resultados estão apresentados na Tab. 4.6.

$$\kappa(\varepsilon_s) = \frac{\mu v_s}{(\rho_s - \rho_f) \varepsilon_s g} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Tab. 4.6. Valores calculados para permeabilidade das suspensões de água e CaCO₃ e das suspensões de ME e GL.

Inclinação	κ (m ²)	
	Água	GL
0°	$3,93 \times 10^{-10}$	$8,32 \times 10^{-8}$
30°	$9,23 \times 10^{-10}$	$1,49 \times 10^{-7}$
45°	$1,21 \times 10^{-9}$	$1,87 \times 10^{-7}$
60°	$1,69 \times 10^{-9}$	$7,49 \times 10^{-7}$

Observando os valores do resultado da permeabilidade na tabela, não é possível comparar as duas suspensões porque são sólidos e fluidos distintos. Porém ao comparar a mesma suspensão em diferentes inclinações, existe um aumento do valor da permeabilidade com o aumento do ângulo com a vertical podendo ser devido ao efeito *Boycott* que possui um comportamento semelhante ao da convecção, ou seja, movimentação ascendente e descendente de porções do fluido modificando um pouco a configuração do meio permeável aumentando a permeabilidade com o aumento da inclinação (CHANG et al., 2019).

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os principais resultados relacionados as 4 inclinações testadas (0, 30, 45 e 60°) no processo de sedimentação do carbonato na água, e da microesfera na suspensão de glicerina e goma xantana. Além da determinação velocidade de sedimentação dos sólidos e do cálculo da permeabilidade do sedimento.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Diante do crescente uso de poços direcionais de petróleo e dos desafios que ele proporciona, este estudo buscou investigar o comportamento da sedimentação em poços inclinados, variando os ângulos (0° , 30° , 45° e 60°) através da TARG. Os objetivos específicos, desde a caracterização reológica dos fluidos até a comparação entre comportamentos newtonianos e não newtonianos, delinearam a abordagem desta tese. Nos resultados que seguem, tem-se as contribuições desse estudo para a melhor compreensão da sedimentação em poços inclinados.

A sedimentação na vidraria posicionada na inclinação de 60° em todas as três suspensões investigadas (água, GL e GX), revelou um tempo significativamente menor para a estabilização do sedimento em comparação com as demais posições avaliadas. Esses resultados indicam que o aumento do ângulo de inclinação está diretamente associado a uma maior velocidade de sedimentação dos sólidos.

O efeito *Boycott* se tornou evidente e desempenhou um papel importante durante a separação das suspensões. Esse efeito contribuiu para a rápida sedimentação dos sólidos em tubos inclinados.

Nas regiões (I e II), as inclinações de 30° e 0° , favoreceram a sedimentação do fluido newtoniano (GL), enquanto nas inclinações 45° e 60° o comportamento dos dois fluidos não teve diferenças significativa, mas o fluido pseudoplástico (GX) se sedimentou mais rapidamente. Indicando uma mudança na dinâmica da sedimentação relacionada à inclinação do recipiente e às características reológicas dos fluidos, sendo que em inclinações mais elevadas, o efeito *Boycott* predominou sobre o comportamento pseudoplástico e tixotrópico da suspensão de GX, resultando em taxas de sedimentação semelhantes para ambas as suspensões. E em inclinações mais baixas, o comportamento da GX influenciou de forma mais significativa a sedimentação do que o efeito *Boycott*.

As inclinações das linhas de equiconcentração apresentaram comportamento não linear e variações significativas, indicando que nas inclinações diferentes de 0° a compactação do sedimento ao longo do tempo não se deu de maneira uniforme. E em

todas as inclinações, observa-se que os momentos em que as linhas de equiconcentração se iniciam estão diretamente relacionadas às concentrações correspondentes.

O modelo PNK demonstrou uma adequada capacidade de estimar a velocidade do fluido em suspensões mais simples, como a de água. No entanto, diante das outras duas suspensões (ME com GL e GX) não obteve resultados satisfatórios, sugere-se a consideração de modelos mais complexos para uma análise mais precisa e abrangente desses casos.

Observou-se um aumento nos valores de permeabilidade à medida que o ângulo em relação à vertical aumentava. Esse fenômeno pode ser atribuído ao efeito *Boycott*, que apresenta um comportamento semelhante ao da convecção, modificando a configuração do meio permeável.

Por fim, ao considerar a perfuração de canais direcionais, deve-se considerar que além dos benefícios oferecidos pelos poços inclinados, como maior produtividade e menor impacto ambiental, tem-se o aumento da velocidade de sedimentação dos sólidos nos fluidos de perfuração que não é uma característica desejada nesses fluidos. Dessa forma, a tomada de decisão sobre o uso de poços inclinados deve levar em conta não apenas os ganhos na exploração, mas também os desafios que a sedimentação mais rápida pode apresentar em termos de manutenção e operação do poço.

Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver uma equação que relacione a inclinação com a velocidade de sedimentação da partícula.
- Realizar a leitura dos pontos de forma perpendicular ao efeito *Boycott* para observar de forma diferente o efeito.
- Estudar a sedimentação de partículas que constituem outros fluidos com diferentes características.
- Estudar a sedimentação de partículas que constituem fluidos de perfuração reais.
- Realizar testes com superfícies de parede diferente para verificar se tem influência no efeito *Boycott*.

- Realizar uma avaliação da sedimentação em suspensões que contenham concentrações volumétricas iniciais de sólidos diferentes das usadas no presente estudo, com os mesmos fluidos usados (GL e GX).
- Avaliar a transmissibilidade de pressão do sedimento após diferentes tempos de sedimentação.

O presente capítulo apresentou as principais conclusões referentes ao efeito da inclinação do recipiente durante a sedimentação. Nele, também foram apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDA F., AZBAID A., ENSMINGER D., FISCHER S., FRANÇOIS P., SCHMITT P., PALLARÈS. A ultrasonic device for real-time sewage velocity and suspended particles concentration measurements. **Water Sci Technol** 1, v.60 (1), p. 117–125, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.281
- AMORIM, L. V. **Melhoria, Proteção e Recuperação da Reologia de Fluidos Hidro argilosos para Uso na Perfuração de Poços de Petróleo**. 2006. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.
- ANDRADE, P. C.; VALADÃO, G. E. S. Planejamento experimental aplicado à sedimentação de lamas fosfáticas. **Holos**, [S. l.], v. 6, p. 201–216, 2017. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/6543>. Acesso em: 2 jun. 2022. DOI: 10.15628/holos.2017.6543.
- ALMEIDA, R. D. F.; SILVA, W. G. A. L. **Avaliação De Fluidos De Perfuração De Base Aquosa Contendo Poliglicóis Modificados**. Projeto de graduação (curso de engenharia de petróleo), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- AROUCA, F. O. **Obtenção Experimental das Equações Constitutivas para o Espessamento e Filtração Utilizando Técnica de Atenuação de Radiações de Altas Energias**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- AROUCA, F. O. **Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. The use of high energies radiation to characterise solid-liquid systems. **Materials Science Forum**, v. 498-499, p. 49–54, 2005a. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.49

- AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. Analysis of the behavior of solid-liquid systems based on the shape, size distribution and density of the solid particles. In: **Fifth International Latin-American Conference On Powder Technology - Ptech**, 2005b. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.530-531.35
- BAMBERGER, J.A., GREENWOOD F., Using ultrasonic attenuation to monitor slurry mixing in real time, **Ultrasonics** 42, pp. 145-148, 2004. DOI: 10.1016/j.ultras.2004.02.016
- BORHAN, A.; ACRIVOS, A. The sedimentation of nondilute suspensions in inclined settlers. **Phys. Fluids**, 31, 3488-3501, 1988. DOI: 1 1063/1.866917
- BOYCOTT, A. E. Sedimentation of blood corpuscles, **Nature**. 104,532, 1920. DOI: 1 1038/104532b0
- BÜRGER, R. RUIZ-BAIER, R.; SCHNEIDER, K.; TORRES, H. A multiresolution method for the simulation of sedimentation in inclined channels. **International Journal of Numerical Analysis and Modeling**, v. 9, 3, p. 479-504, 2012. ISSN: 1705-5105
- BUSTOS, M. C.; CONCHA, F.; BÜRGER, R.; TORY, E. M. Sedimentation and thickening – Phenomenological foundation and mathematical theory, **Kluwer Academic Publishers**, 1999. DOI:1 1017/S0022112000221319
- CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Fluidos de Perfuração e Completação. **Elsevier**, 2014. Doi:10.1016/0920-4105(95)00051-8.
- CHANG, Yen-Cheng; CHIU, Te-Yao; HUNG, Chen; CHOU, Yi-Ju. Three-dimensional Eulerian-Lagrangian simulation of particle settling in inclined water columns. **Powder Technology**, v. 348, 2019. DOI: 1 1016/j.powtec.2019.02.052.
- CHAVES, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem**. São Paulo: Signus, 2004. ISBN: 9788587803399

- CHHABRA, R. P. N. **Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids**. 2 ed. Taylor e Francis Group, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420015386>
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-newtonian flow and applied rheology**, Second Edition, 2008. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7.
- COLNAGO, L. A., ALMEIDA F. C.L., VALENTE A.P. **Espectrometria de massa e RMN multidimensional e multinuclear**. Atualidades em química, vol 16, p. 9- 14, 2002.
- CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p. 2012. ISBN: 9788521208556.
- DAMASCENO, J. J. R. **Uma contribuição ao estudo do espessamento contínuo**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 1992.
- DEMIR, A. Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks, **Water Res.** p. 611–616, 1995. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00165-4.
- FAUST, A. S. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. ISBN-10: 8521610386.
- FAGUNDES, F.M. **Estudo da sedimentação de Partículas em fluidos de Perfuração pelo uso da técnica de Atenuação de raios gama**. Tese (Doutorado), Uberlândia, UFU. 2019. DOI: 10.14393/ufu.te.2019.28.
- FAGUNDES F. M.; SANTOS N. B. C.; DAMASCENO J. J. R.; AROUCA F. O. Estudo do Efeito do Adensante Hematita na Sedimentação Gravitacional e em Batelada em Fluido Aquoso Polimérico Pelo Uso da Técnica de Atenuação de Raios Gama. **ENAHPE 2019 Encontro Nacional de Construção de Poços de Petróleo e Gás**. Serra Negra/SP, 2019.
- GARCÍA-OCHOA, F.; SANTOS, V.E.; CASAS, J.A.; GÓMEZ, E. Xanthan gum: Production, recovery, and properties. **Biotechnology Advances**, v. 18 p.549-579, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)

- GARDNER, R. P.; ELY-JR, R. L. Radioisotope measurement applications in engineering. **Reinhold Publishing Corporation**, Nova Iorque. 1967.
- GROWCOCK, F. B.; ANDREWS, S. L.; FREDERICK, T. P. Physicochemical Properties of Synthetic Drilling Fluids. Society of Petroleum Engineers and International Association of Drilling Contractors, paper IADC/SPE 27450, IADC/SPE **Drilling Conference**, Dallas, 1994. DOI: 1 2118/27450-MS
- HAMACHER, M. E. **Um Estudo da Sedimentação Utilizando o Método da Atenuação de Raios Gama**. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, 1978. DOI: minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000149352&local_base=UFR01
- HANSON, P.M, TRIGG JR, T.K., RACHAL, G., ZAMORA, M. Investigation of Barite Sag in Weighted Drilling Fluids in Highly Deviated Wells, SPE 20423, **SPE Annual Technical Conference**, p. 23-26, New Orleans, LA, 1990. DOI: 1 2118/20423-MS
- HEMPHILL, T.; RAVI, K. Turning on Barite Sag with Drillpipe Rotation: Sometimes Surprises Are Really Not Surprises. AADE-06-DF-HO-28, AADE **Drilling Fluids Technical Conference**, Houston, Texas, 2006.
- HERBOLZHEIMER, E. AND ACRIVOS, A., Enhanced sedimentation in narrow tilted channels, **J. Fluid Mech.**, v.108 p.485–499, 1981. DOI: 1 1017/S0022112081002231
- HIPP, A.K.; STORTI, G.; MORBIDELLI, M. Acoustic Characterization of Concentrated Suspensions and Emulsions. 1. Model Analysis. **Langmuir**, v. 18, p. 391-404, 2002. DOI: 1 1021/la015538c.
- SMAIL, A. R.; ISMAIL, N. J.; JAAFAR, M. Z., Hassa, R. **The Application of Biodiesel as an Environmental Friendly Drilling Fluid to Drill Oil and Gas Wells**. Presented at the 5th Sriwijaya International Seminar on Energy and Environmental Science e Technology, Palembang, Indonesia, 2014.

- JEFFERSON, D.T. New Procedure Helps Monitoring Sag in the Field. ASME 91-PET-3, **Energy Sources Technology Conference and Exhibition**, New Orleans, 20-24 Jan. 1991.
- KAPOOR, B. **Flow of a sediment layer on an inclined plate**. Tese (doutorado), The City University of New York, 1994.
- KAPPOOR, B.; ACRIVOS, A. Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls. **J. Fluid Mech.**, v. 290, p. 39-66, 1995. DOI: 10.1017/S0022112095002412.
- KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. *Trans. Amer. Soc.*, p. 166-176, 1952. DOI: 10.1039/tf9524800166.
- KRIEGER, I.M. Rheology of monodisperse lattices. *Adv. Colloid Interface Sci.*, v. 3, n. 2, p. 111-136, 1972. DOI: 10.1016/0001-8686(72)80001-1
- LI, W.; ZHAO, X.; JI, Y.; PENG, H.; CHEN, B.; LIU, L.; HAN, X. Investigation of Biodiesel-Based Drilling Fluid, Part 1: Formulation Design, Rheological Study, and Laboratory Evaluation. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 22, pp 15, 2016. DOI: 10.1007/s13202-015-0205-7
- LOCATELLI, F. et al. Detailed Velocity and Concentration Profiles Measurement During Activated Sludge Batch Settling Using an Ultrasonic Transducer. **Separation Science and Technology**, v. 50, p. 1059–1065, 2015. DOI: 10.1080/01496395.2014.980002
- LUCENA, D. V.; VERONESE, J. P. Análise da influência do tempo na viscosidade para amostras de bentonitas para seu uso em fluidos de perfuração. In: **Congresso Norte Americano de Pesquisa e Inovação**, 2012.
- LUVIELMO, M. M.; SCAMPARINI, A. R. P. Goma xantana: produção, recuperação, propriedades e aplicação. **Estudos Tecnológicos**, vol. 5 (1), p. 50-67, 2009. DOI:10.4013/ete.2009.51.04

- LUZ, A. B. et al. **Tratamento de Minérios**. 3ª edição. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral; Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- LUMMUS, J. L.; AZAR, J. J. Drilling fluids optimization a practical field approach. **Penn Well Publishing Company**. Tulsa, Oklahoma, 1986. ISBN: 0878143068.
- MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos**. Ênfase da indústria do petróleo. Editora Interciência. p.21-37, 2002.
- MACHADO, J. B. **Curso Básico de Perfuração Direcional**. Halliburton, 2ª edição, 2010.
- MACCAFFERY, S. J.; ELLIOTT, L.; INGHAM, D. B. One-dimensional enhanced sedimentation in inclined fracture channels. **Math. Eng. Ind.**, 6, 261–290, 1998. ISBN: 9781853125461
- MENDES, D. B.; SERRA, J. C. V. Glicerina: uma abordagem sobre a produção e o tratamento. **Revista Liberato**, vol. 13 (20), p. 59-67, 2012. DOI:10.31514/rliberato.2012v13n20.p59
- MEWIS, J.; WAGNER, N. J. **Tixotropy**. Advances in colloid and interface science, vol.147-178, p. 214-227, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.005>
- MOHAMED, A., BASFAR, S., ELKATATNY, S., AL-MAJED A. Prevention of Barite Sag in Oil-Based Drilling Fluids Using a Mixture of Barite and Ilmenite as Weighting Material. **Sustainability** v. 11, p. 5617, 2019. DOI: 13390/su11205617
- MOREIRA, B. A. **Estudo da sedimentação em suspensões de fluido com características reológicas pseudoplásticas**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, 2014. DOI: 10.14393/ufu.te.2014.73
- MOREIRA, B.A.; AROUCA, F.O.; DAMASCENO, J.J.R. Analysis of suspension sedimentation in fluids with rheological shear-thinning properties and thixotropic effects. **Power Technology**, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.034

- NAKAMURA, H.; KURODA, K. The cause of the acceleration of the sedimentation velocity of suspensions in inclined vessels. **The Keijo Journal of Medicine**, v. 8, p. 256-296, 1937.
- NGUYEN, T.C. **Predicting Dynamic Barite Sag in Oil Based Drilling Fluids**, Dissertação (Ph.D.), The University of Tulsa, The Graduate School, Tulsa, Oklahoma, 2009. DOI: 10.2118/124137-MS
- OLIVEIRA, G.M. et al. Reinício Da Circulação De Fluidos De Perfuração Gelificados. In: **4º PDPETRO Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, 2007, Campinas, SP. Anais. Campinas, p. 21-24, 2007.
- OMLAND, T. H. **Particle settling in non-Newtonian drilling Fluids**. Dissertação (Ph.D), University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Department of Petroleum Engineering, 2009. ISBN: 978-82-7644-388-2
- OMLAND, T.H.; DAHL, B.; SAASEN, A.; SVANES, K.; AMUNDSEN, P.A. The Influence of Particle type and Size Distribution on Viscosity in a Non-Newtonian Drilling Fluid. **Ann. Trans. Nordic Rheology Soc.**, vol. 13, p. 107-110, 2005.
- Palma, S., Ihle, C. F., Tamburrino, A. Characterization of a sediment layer of concentrated fluid-solid mixtures in tilted ducts at low Reynolds numbers. **Powder Technology**, v. 325, p. 192-201, 2018. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.053.
- PIRES, L. F. Soil analysis using nuclear techniques. A literature review of the gamma ray attenuation method. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 216-234, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.07.015
- PROBSTEIN, R. F.; YUNG, R.; HICKS, R. **Physical separations**. In: FREEMAN, M. P.; FITZPATRICK, J. A. (Eds.). **Physical Separations**, New York: Engineering Foundation, p. 53-92, 1981.

- QUEIROZ NETO, J. C. Q.; BISCAIA, C. E.; PETRI D. F. S. Estudo sobre a adsorção do fluido de perfuração salgado contendo polímeros sobre SiO₂. **Química Nova**, v. 30, n. 4, p. 909-915, 2007. DOI:10.1590/S0100-40422007000400028
- REYES, C.; IHLE, C. F.; APAZ, F.; CISTERNAS, L. A. Heat-Assisted Batch Settling of Mineral Suspensions. **Minerals**, v. 9, 228, 2019. DOI: 10.3390/min9040228.
- REYES, C.; APAZ, F.; NIÑO, Y.; BARRAZA, B.; ARRATIA, C.; IHLE, C. F.; IHLE, C. F. A review on steeply inclined settlers for water clarification, **Minerals Engineering**, v. 184, 2022. DOI:10.1016/j.mineng.2022.107639
- RISMANTO, R.; VAN DER ZWAAG, C. Explorative Study of NMR Drilling Fluid Measurement. **Ann. Trans. Nordic Rheology Soc.**, v. 15, 2007.
- RITTENHOUSE, G. A. A visual method of estimating two-dimensional sphericity. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 13 (2) p. 79–81, 1943.
- ROCHA, L. A. S. et al. **Perfuração Direcional**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobrás: IBP, 2008. ISBN: 9788571932777
- SANTANNA, V. C. **Slides de aula da disciplina de Química do Petróleo**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- SKALLE, P.; BACKE, K.R; LYOMOV, S.K; SVEEN, J. Barite Segregation in Inclined Boreholes. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 38, 1999. DOI: 10.2118/99-13-11
- STEFFE, J. F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**. 2nd edition, Freeman Press, 1996. ISBN: 9780963203618
- SOUZA, L. Z. **Estudo Do Estado Da Arte Da Perfuração Direcional De Poços De Petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso (curso de engenharia mecânica), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- SOUZA, H. M. **Perfuração de Poços Direcionais na Indústria Petrolífera**. Ciências Exatas e Tecnológicas, Aracaju, v. 4, n. 3, p. 39-52, 2018.

- TEHRANI, A.; ZAMORA, M. Power D. Role of Rheology in Barite Sag in SBM and OBM. **Drilling Fluids Technical Conference**, Houston, Texas, 2004.
- THOMAS, J. E., organizador. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- TILLER, F.M.; LEU, W. Basic data fitting in filtration. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 1, p. 61-70, 1998.
- VALADÃO, G.E. **Notas de Aula do Curso de Especialização em Recursos Minerais – DEMIN: ERM 526 – Separação Sólido-Líquido I**. Belo Horizonte, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- VATH, B. **Perfuração direcional e horizontal em poços de petróleo**. Trabalho de conclusão de curso (engenharia de petróleo). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.
- WALDMANN, A. T. A. **Mecanismos que governam a efetividade de agentes obturantes no controle da invasão de fluidos de perfuração na rocha reservatório de petróleo**. Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2005. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.7651
- ZAKER, S., SARAFZADEH, P., AHMADI, A. et al. Experimental investigation on barite sag under flowing condition and drill pipe rotation. **J Petrol Explor Prod Technol** 10, 3497–3503, 2020. DOI:1 1007/s13202-020-00988-0
- ZU-JIA, X., EFSTATHIOS E. M., Numerical Simulation of the Boycott Effect. **Chem. Eng. Comm.**, 192: 532–549, 2005. DOI: 1 1080=00986440590477971

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta os resultados do monitoramento da variação da concentração de sólidos obtidos experimentalmente para amostras do carbonato de cálcio sedimentando em água (Fig. Ap.1e Ap.2), sendo a concentração inicial de 10%. Também para amostras de Microesfera sedimentando em glicerina a 92% v/v (Figs. Ap.3 e Ap. 4) e goma xantana a 0,2% m/m (Figs. Ap.5 e Ap.6) com concentração volumétrica de sólidos das suspensões no início dos testes de 20%.

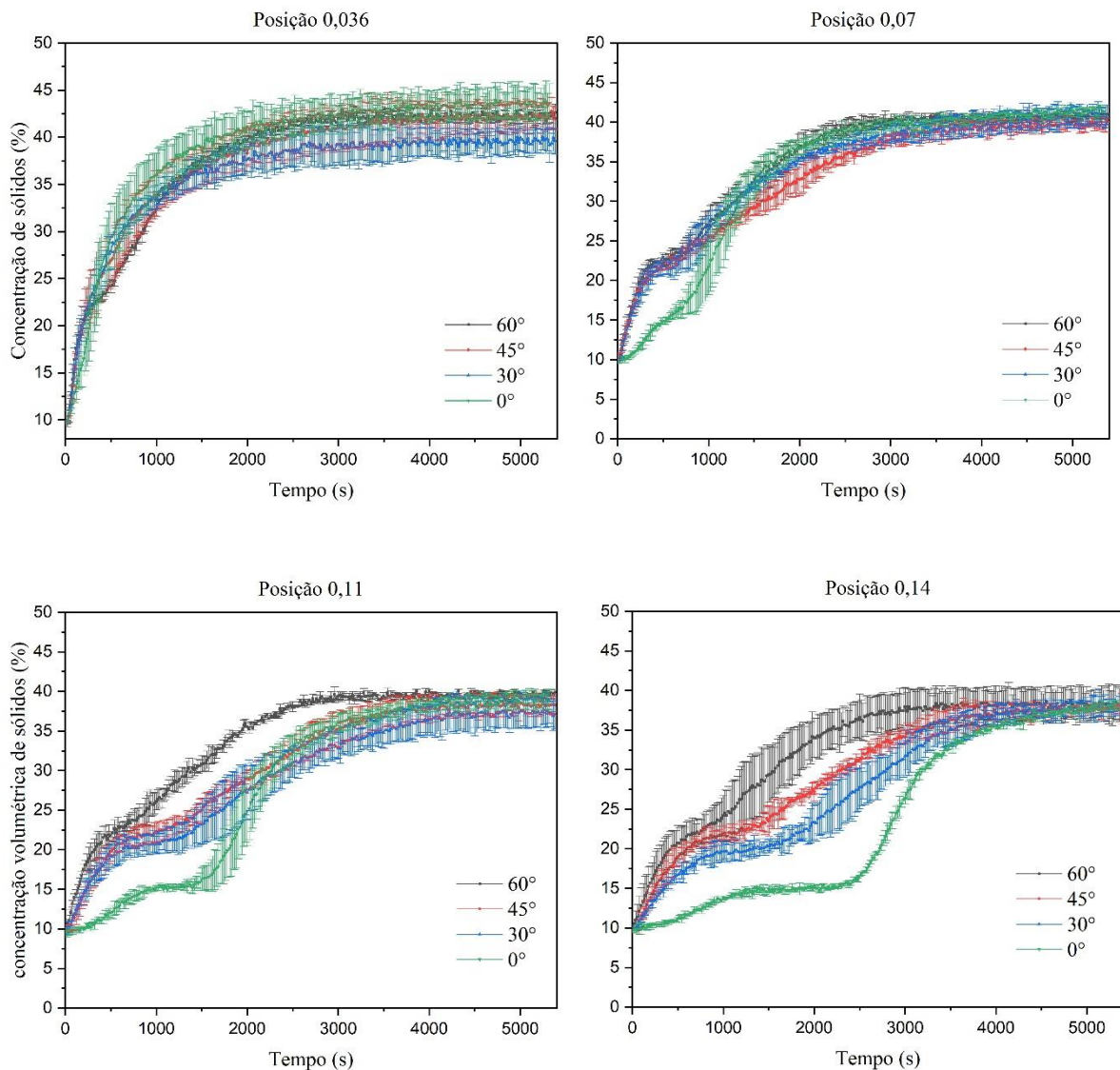


Fig. Ap.1 Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do carbonato de cálcio sedimentando em água nas posições 0,036; 0,07; 0,11 e 0,14.

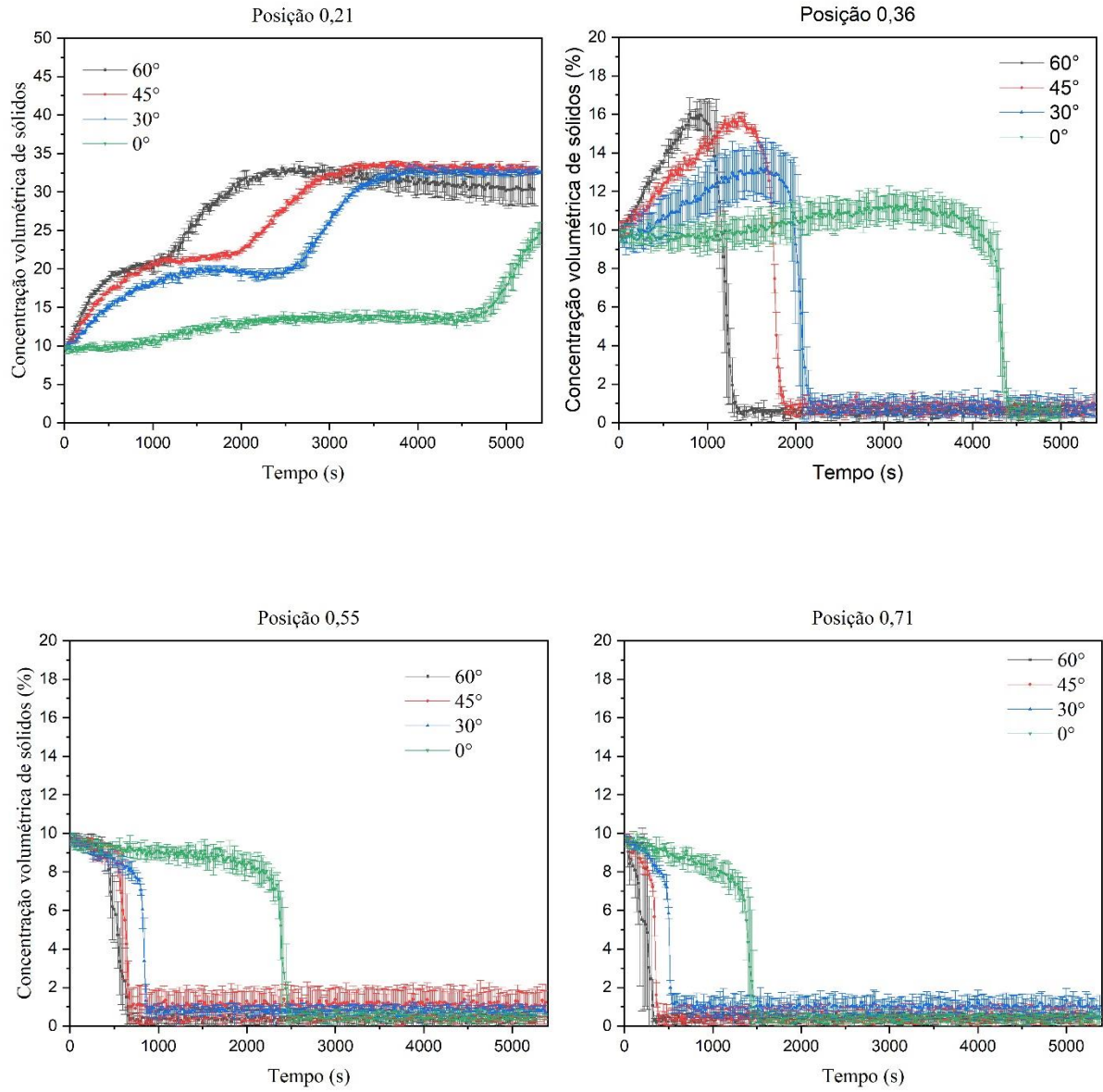


Fig. Ap.2 Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do carbonato de cálcio sedimentando em água nas posições 0,21; 0,36; 0,55 e 0,71.

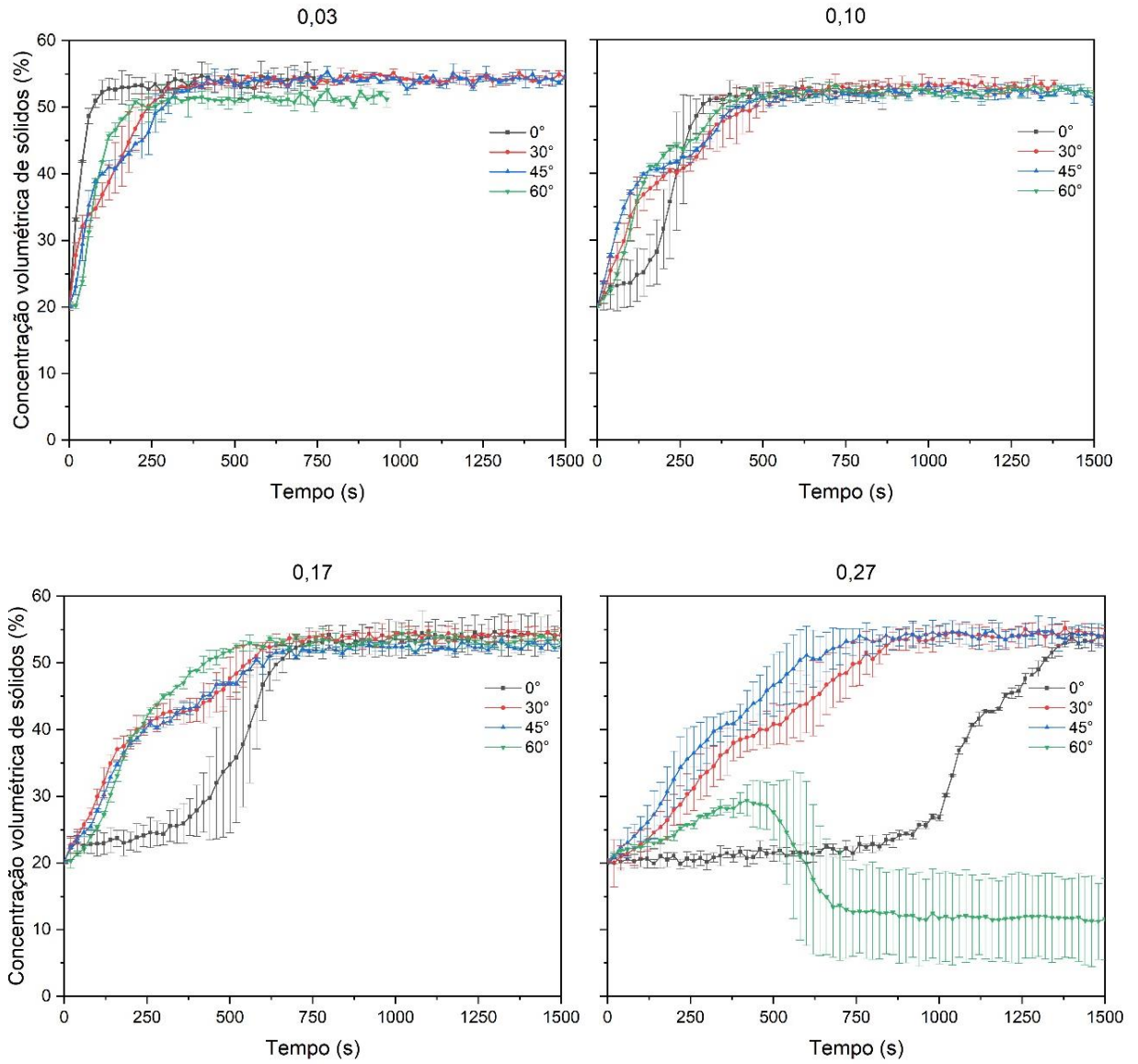


Fig.Ap.3. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do Microesferas de vidro sedimentando em GL 92% v/v nas posições 0,03; 0,10; 0,17 e 0,27.

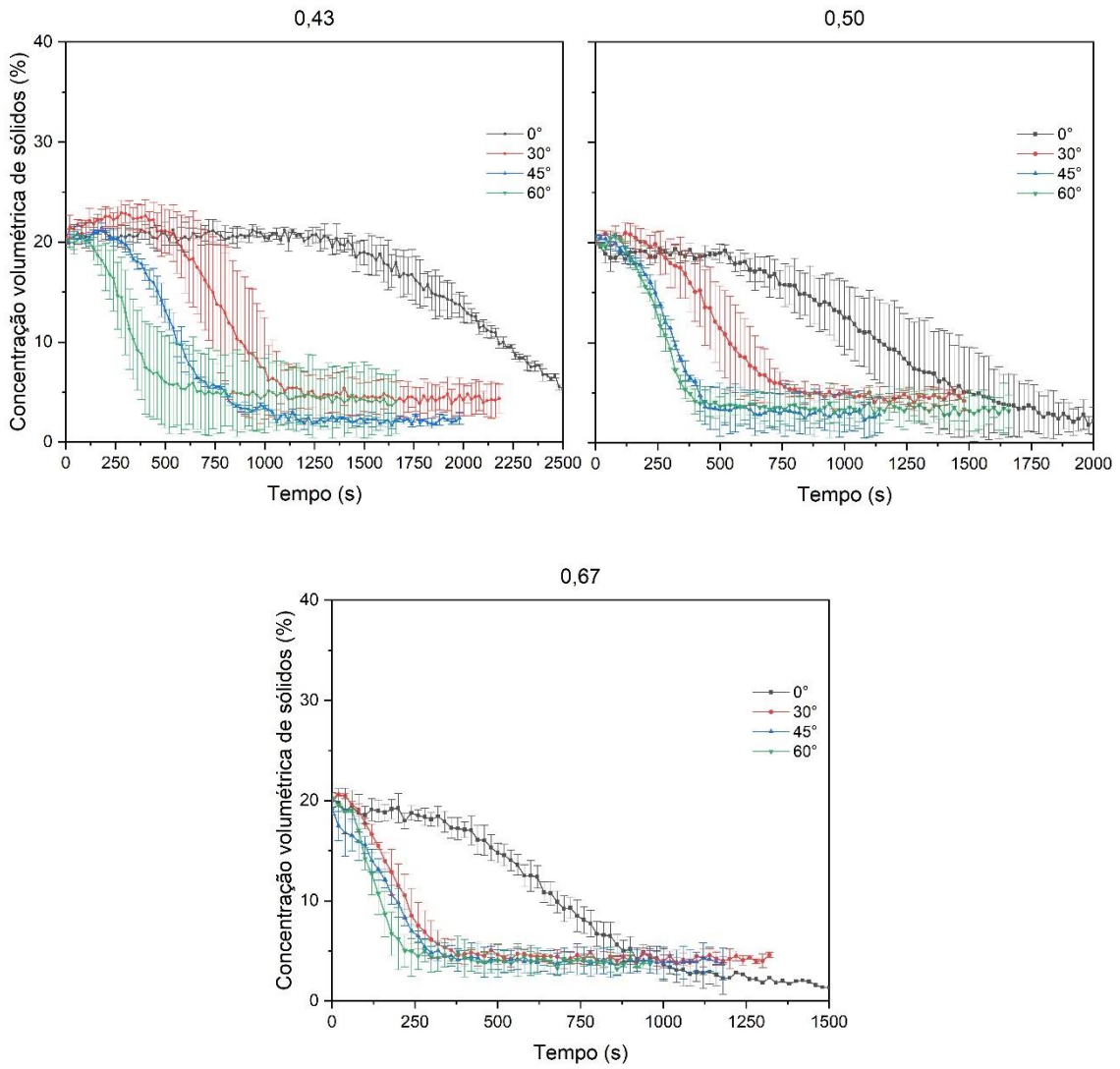


Fig.Ap.4. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do Microesferas de vidro sedimentando em GL 92% v/v nas posições 0,43; 0,55 e 0,67.

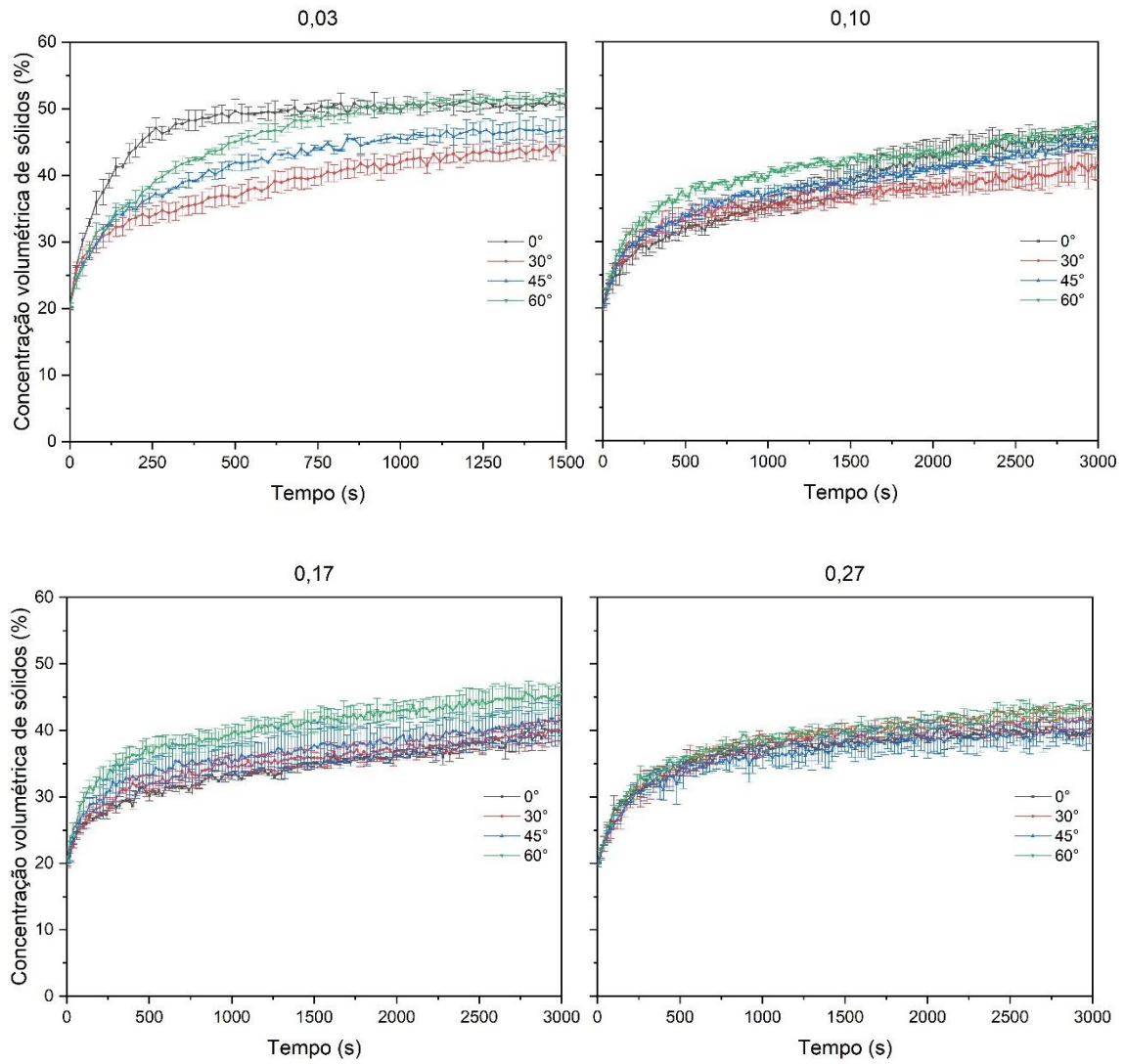


Fig. Ap.5. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do Microesferas de vidro sedimentando em GX 0,2% v/v nas posições 0,03; 0,10; 0,17 e 0,27.

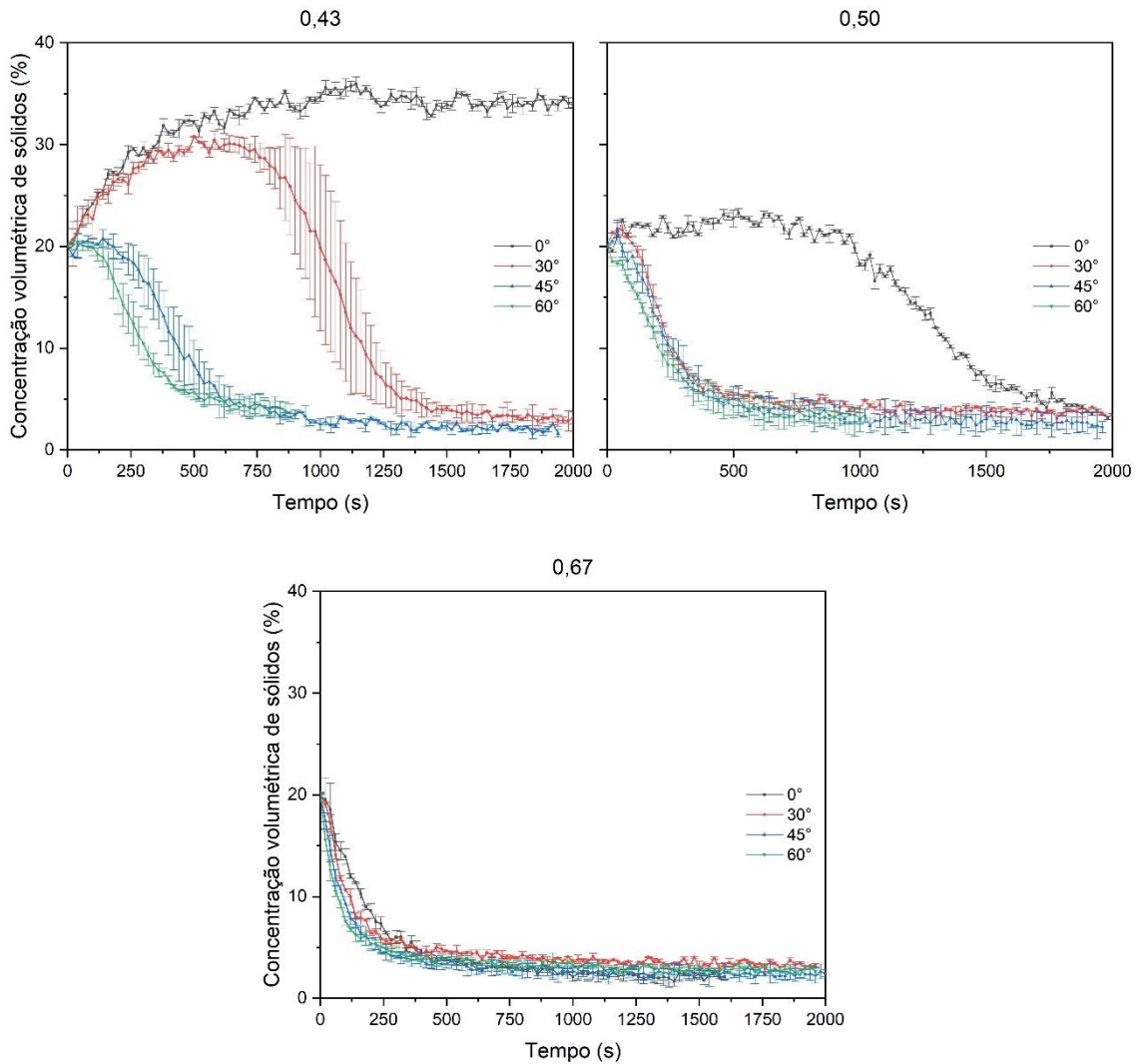


Fig. Ap.5. Concentração de sólidos em função do tempo para as amostras do Microesferas de vidro sedimentando em GX 0,2% v/v nas posições 0,43; 0,55 e 0,67.

Nas Figs. Ap. 6 a Ap.9, tem-se a curva de passagem de interface completa da suspensão de água e CaCO_3 junto com as curvas de equiconcentração para cada uma das 4 inclinações estudadas.

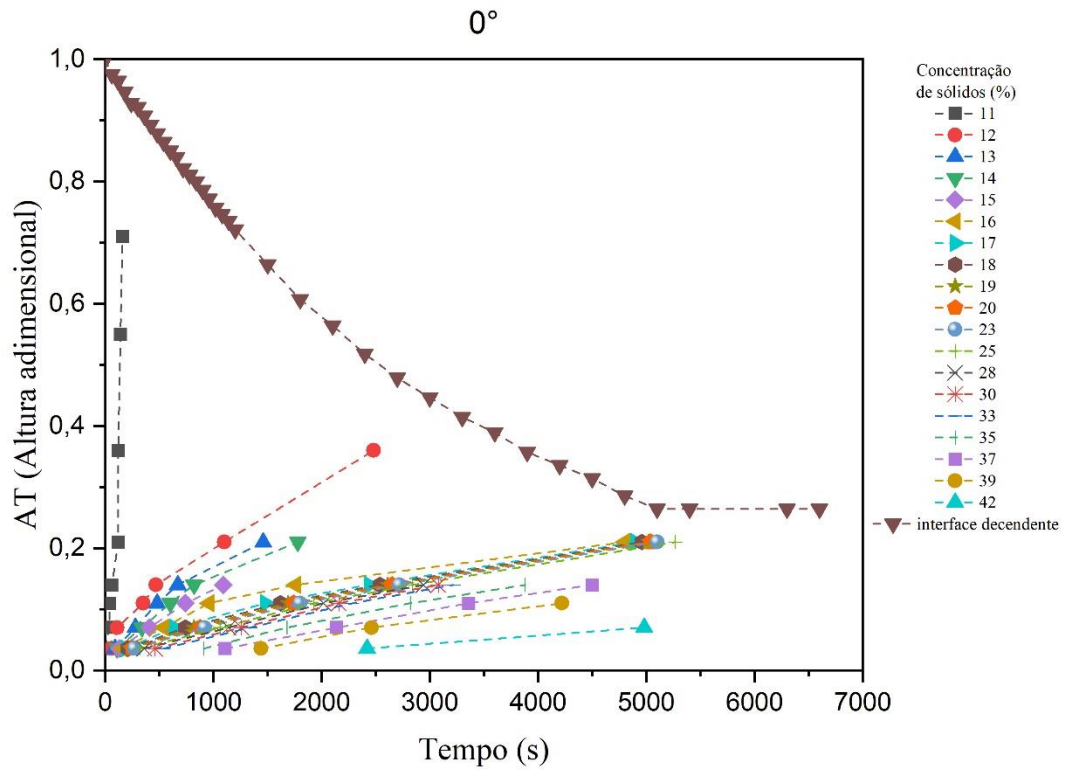


Fig. Ap.6. Curvas de equiconcentração para solução de água e carbonato de cálcio em 0°.

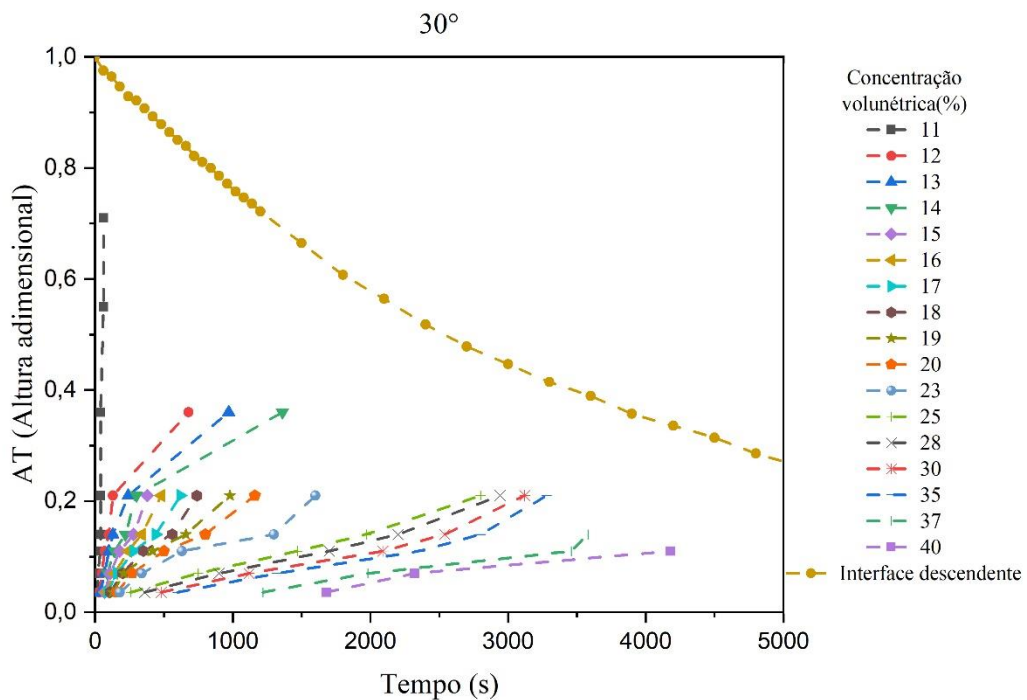


Fig. Ap.7. Curvas de equiconcentração para solução de água e carbonato de cálcio em 30°.

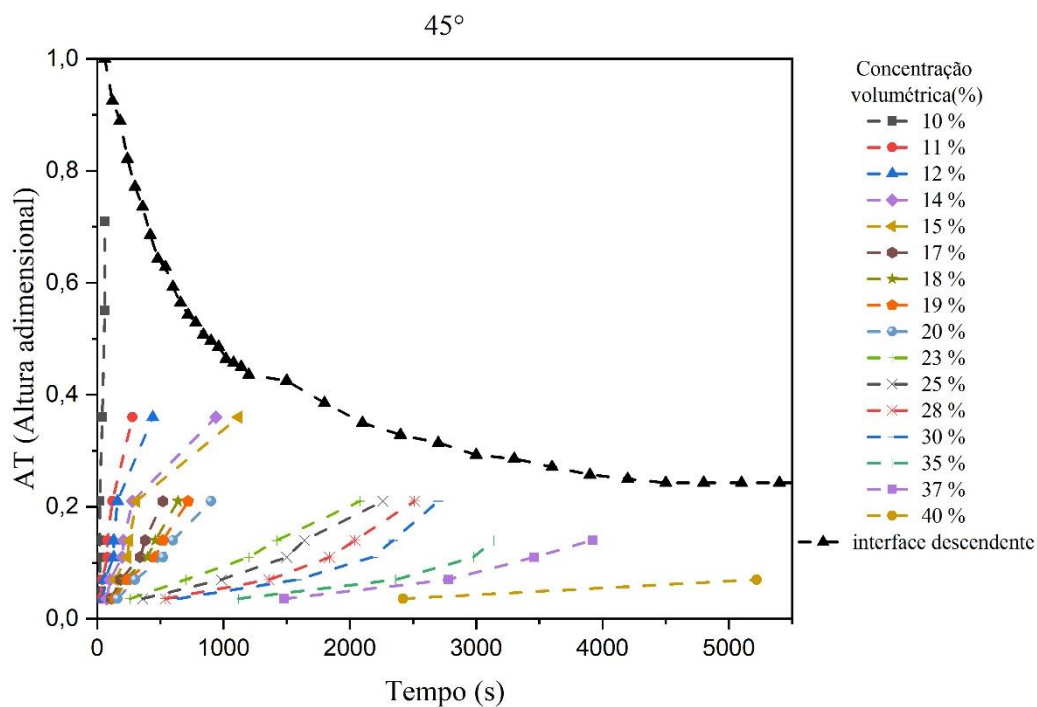


Fig. Ap.8. Curvas de equiconcentração para solução de água e carbonato de cálcio em 45°.

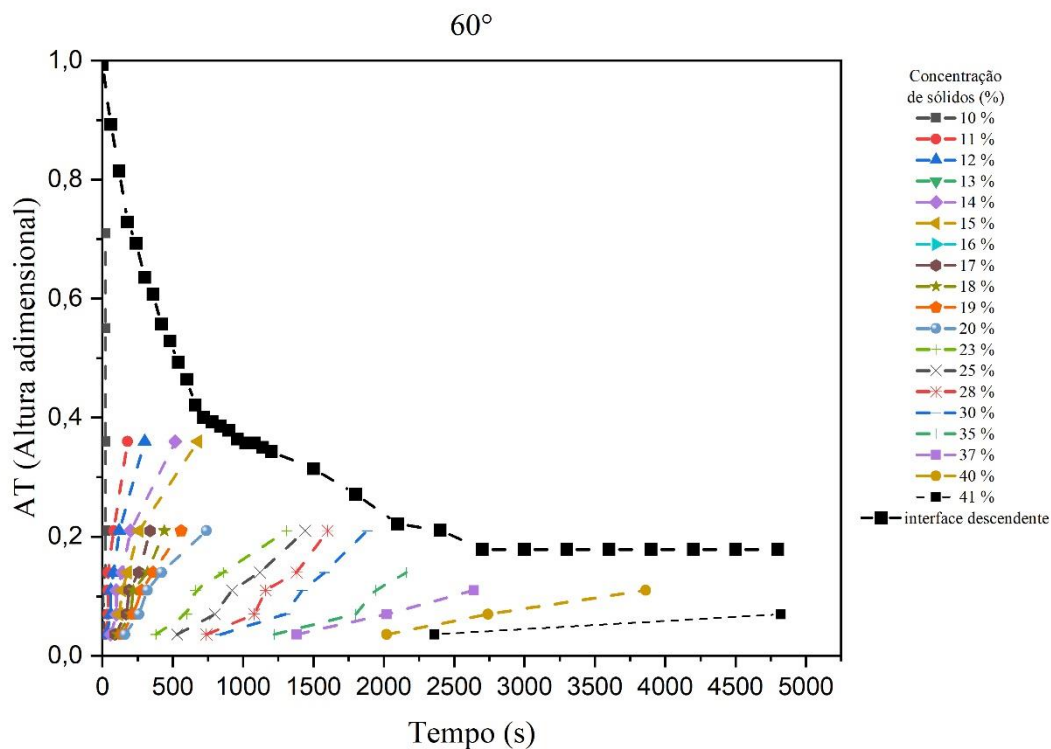


Fig. Ap.9. Curvas de equiconcentração para solução de água e carbonato de cálcio em 60°.

ANEXO A

Neste anexo temos a figura proposta por Rittenhouse (1943) para a estimativa aproximada da esfericidade dos materiais sólidos utilizados.

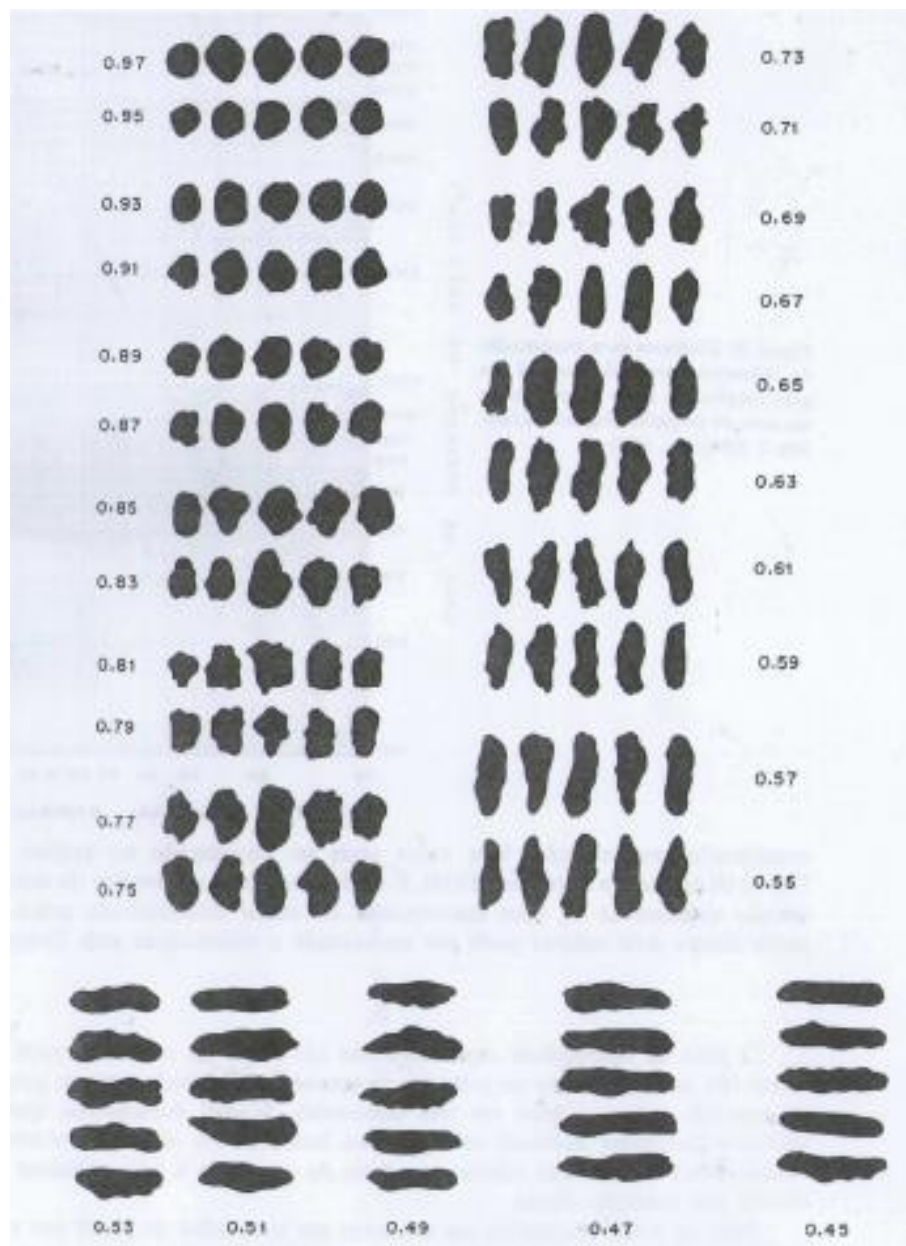


Fig. A.1. Tabela comparativa proposta por Rittenhouse (1943).