

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

ANA BEATRIZ DIAS JARDIM DA SILVA

**MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS-X (μ -CT) APLICADA AO ESTUDO DE *SOFT-
SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURE* (SSDS) RELACIONADOS À DEPOSIÇÃO
DE *DROPSTONES* EM AMBIENTES GLACIAIS.**

BRASÍLIA

2024

ANA BEATRIZ DIAS JARDIM DA SILVA

**MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS-X (μ -CT) APLICADA AO ESTUDO DE *SOFT-
SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURE* (SSDS) RELACIONADOS À DEPOSIÇÃO
DE *DROPSTONES* EM AMBIENTES GLACIAIS.**

Trabalho apresentado à Universidade de Brasília
como requisito para conclusão do curso de graduação
em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Elder Yokoyama

BRASÍLIA

2024

AGRADECIMENTOS

Escrevo estes agradecimentos no momento mais caótico da minha vida, com lágrimas nos olhos e muitas coisas na cabeça. Que longa jornada, certo? Quase 8 anos de curso e muitas, muitas coisas vividas. Sinceramente, nunca pensei que chegaria a este momento. Ingressar na universidade, viver intensamente essa experiência, ter amigos para a vida, descobrir que alguns amigos não são para todos os momentos da vida, passar por uma pandemia, me apegar a um grupo que me trouxe um pouco de volta a vontade de viver, descobrir algo que eu gostasse de estudar, odiar estudar o que antes eu amava, desistir, levar puxão de orelha, tentar, desistir de novo, ser motivada e tentar de novo, sentir que eu não conseguiria, viajar para um país que era meu maior sonho e apresentar meu trabalho de três anos de estudo no maior Congresso de Geologia do mundo, sentir que eu posso ser boa em algo de verdade. A Ana Beatriz de 15 anos jamais imaginaria isso.

Não foi fácil, e eu sei que daqui pra frente a tendência é que seja ainda mais difícil, mas no último ano eu finalmente entendi o principal: eu nunca estive sozinha até aqui. Certamente meus maiores aprendizados de graduação foram: “peça ajuda” e “para, respira e continua. Você consegue. A hora de desistir não é agora”.

Dito isso, gostaria de quebrar as tradições de trabalhos finais que já li e agradecer primeiramente às pessoas que passam mais tempo comigo que minha própria família. Com toda certeza vocês desempenham um papel crucial para que eu continue seguindo em frente. Em meio a tantas coisas negativas, vocês foram a luz que eu precisava para continuar seguindo, não só neste trabalho, mas em muitas questões da vida. Meu coração sempre se alegra quando vejo Itallo, Adriano, Milena, Matheus, Ozi, Dhamaria, Yasmin, Cátia, Ruth, Genesson e Erick em algum momento do meu dia. Alguns estão há muitos anos, outros há poucos, mas o significado da presença destes seres (especificamente) em minha vida é imenso. Vocês não fazem ideia do quanto sou grata pela vida de cada um.

Gostaria de agradecer também à minha família, especialmente às minhas avós Maria (e tio Ricardo) e Darci (e Tio Zé). Eu as amo do fundo do meu coração e este caminho também só foi possível de ser trilhado devido à presença destas senhoras incríveis. Aos meus pais, Rodrigo e Michelle, que pela paciência de ter esperado por tanto tempo que eu finalmente lhes desse orgulho e que todo o tempo e investimento em minha educação tenha finalmente valido à pena. Agradeço também às minhas tias Gisele, Grasielle e Mirelle por todas as conversas, todo o incentivo e,

principalmente, pelos meus primos. Se não fosse por elas, eu não teria a Pâmela, Vivi, Cauã, Gugu e Gael tornando minha vida mais divertida. Gostaria também de agradecer à vida dos meus sobrinhos Miguel e Bruno Henrique por me motivarem a ser (talvez) a tia rica algum dia e ao meu irmão Bruno e sua esposa Aline pelas conversas realistas que sempre acabam me ensinando algo.

Agradeço também imensamente ao BTS por ter me puxado para cima nos momentos em que eu realmente achava que nada mais valia a pena. Essas 7 pessoas do outro lado do mundo mudaram a minha em muitos sentidos, inclusive academicamente. Agradeço também à Taylor Swift por escrever músicas que me acolhem e melhoram meus dias.

Deixo aqui também meus mais sinceros agradecimentos ao cara que tornou tudo isso possível e não desistiu de mim, mesmo quando eu achava (e acho que ele também) que eu não tinha mais jeito, meu orientador, professor Elder Yokoyama. Obrigada pelos sermões, pelo conhecimento, as conversas, todas as oportunidades e confiança. Se você não tivesse falado comigo na pandemia sobre criosfera e mudanças climáticas, nada disso seria possível. Muito obrigada (te vejo no mestrado)! E agradeço também à Ingrid pela ajuda no desenvolvimento dos primeiros experimentos durante o PIBIC.

Por fim, agradeço a todos os professores com quem convivi e que me acolheram sempre de braços abertos, em especial à professora Adriana Chatack por todo ensinamento fornecido em μ -CT durante a elaboração deste trabalho, ao Instituto de Geociências, ao LEMAG, ao Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados (LMCNano) e à Universidade de Brasília.

P.S.: Agradecimento especial à minha psicóloga que vai ter que lidar comigo neste novo episódio da série da minha vida. Será insano :)

“Everything you lose is a step you take” – Taylor Swift

“If I were afraid of everything too

Will you believe me?

All the sincerity and the remaining time

All your answers are in this place you found

In your galaxy, in your heart” – BTS

RESUMO

Dropstones são clastos transportados por icebergs que, ao caírem em sedimentos finos saturados em água, geram deformações no sedimento de fundo marinho, chamados Estruturas de Deformação de Sedimentos Moles (*Soft-Sediments Deformation Structures* - SSDS). Modelos numéricos sugerem que há uma correlação direta entre a espessura da coluna d'água e o tipo de deformação causado pelos dropstones, mas estudos anteriores enfrentaram limitações quanto à variação de parâmetros físicos, como a salinidade da água, resultando em representações distantes da realidade geológica. Para melhorar a compreensão desses processos, a presente pesquisa investiga a aplicação da Microtomografia de Raios-X (μ -CT) no estudo de SSDS relacionados à deposição de dropstones em ambientes glaciais, observando a influência da espessura da coluna d'água, densidade e salinidade do meio aquático para formação destas estruturas. A técnica de μ -CT neste estudo permite a avaliação de parâmetros como a profundidade de penetração dos clastos e os ângulos de deformação das camadas sedimentares. Além disso, o estudo investiga a trajetória e velocidade das partículas em diferentes meios, visando criar um modelo que correlacione a espessura da coluna d'água com as SSDS causadas por dropstones. Compreender essas relações é fundamental para a reconstrução de padrões climáticos do passado e prever os impactos futuros das mudanças climáticas, fornecendo uma perspectiva sobre a influência das ações humanas no clima global.

Palavras-chave: Microtomografia de Raios-X (μ -CT); *Dropstones*; SSDS; Glaciações; Mudanças Climáticas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. À esquerda é apresentada a taxa de derretimento do gelo da Groenlândia no ano de 2024 (fonte: nsidc.org) e, à direita, imagem da Antártica obtida através do satélite LANDSAT 7 ETM+.....	20
Figura 3.2. Representação esquemática de diversos tipos de deposições de sedimentos em lagos glaciais. Figura adaptada de Brodzikowski e Van Loon (1991)	22
Figura 3.3 – Representação esquemática da formação e jangadas de gelo flutuante na borda da calota de gelo continental. Após o desprendimento do gelo das geleiras, estes podem se tornar apenas gelo flutuante nas dependências da geleira, o, para massas de gelo maiores, dar origem a icebergs. (Figura adaptada de Brodzikowski e Van Loon, 1991)	24
Figura 3.4. Modelos de formação de <i>dropstones</i> , <i>dumpstones</i> e estruturas de <i>grounding</i> . Figura adaptada de Thomas & Connell, 1985.....	27
Figura 3.5 - Exemplificação simplificada de funcionamento da microtomografia de raios-x e suas três principais componentes: fonte de raios-x, cintilador e detector.	29
Figura 4.1. Fotos do difratômetro de raio x: (a,b) Câmara do difratômetro e (c) amostras das argilas utilizadas para o experimento.	31
Figura 4.2. Fotos da montagem dos corpos de prova. (a) Balança de precisão do Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília, (b) mistura das argilas após a agitação e (c) mistura das argilas após a deposição.	32
Figura 4.3. Representação das camadas dos corpos de prova utilizados no experimento.....	33
Figura 4.4. Foto do aquário utilizado para elaboração dos experimentos. A linha vermelha delimita a espessura de 25 cm de coluna d'água.	34
Figura 4.5. Fotografias das argilas depositadas: (a) Primeira camada da mistura 2 após a deposição dos projéteis; (b) Última camada depositada após a deposição dos projéteis. Os círculos de cor laranja foram colocados para sinalizar a localização dos projéteis.	34
Figura 4.6. Fluxograma de processamento dos vídeos para aquisição dos trajetos das partículas	37
Figura 4.7. Fotografias do sistema de microtomografia. a) Microtomógrafo <i>HeliScan MK1 micro-CT system (Thermo Fisher Scientific)</i> do Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados (LMCNano); (b) Interior do equipamento com detalhamento dos componentes do micro-CT.....	38
Figura 4.8. Amostra de campo colocada no suporte para aquisição dos dados de μ -CT.....	39

Figura 4.9. (a) Microtomógrafo <i>SkyScan 1172 (Bruker)</i> no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas (LPFR). (b) Interior do equipamento com detalhamento das componentes do microtomógrafo.	40
Figura 5.1. Gráfico da contagem total dos minerais presentes na Amostra 1 obtidos por difratometria de raio-X.	43
Figura 5.2. Gráfico da contagem total dos minerais presentes na Amostra 2 obtidos por difratometria de raio-X.	44
Figura 5.3. Resultados de trajetória das chumbadas em 25 cm de lâmina d'água para água doce.	45
Figura 5.4. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 5 mm em 25 cm de lâmina d'água para água doce.	46
Figura 5.5. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para água doce.	46
Figura 5.6. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para água salgada.	47
Figura 5.7. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em 50 cm de lâmina d'água para água salgada.	48
Figura 5.8. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em (a) 25 cm de lâmina d'água para água salgada e (b) 50 cm.	49
Figura 5.9. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra D25V10.	52
Figura 5.10. Análise dos ângulos de deformação da amostra D25V10 para os 5 <i>slices</i>	53
Figura 5.11. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra AS50V10.	54
Figura 5.12. Análise dos ângulos de deformação da amostra AS50V10 para os 5 <i>slices</i>	55
Figura 5.13. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra ASG50V10.	56
Figura 5.14. Análise dos ângulos de deformação da amostra ASG50V10 para os 5 <i>slices</i>	57
Figura 5.15. Representação histogrâmica da amostra, classificadas anteriormente (Tab 4.7); (a) Classe 1 - Poros; (b) Classe 2 – Seixos e Matriz; (c) Classe 3 – Matriz 2; (d) Classe 4 - Seixos com Faixas densas e; (e) Classe 5 – Grãos mais densos.	59

Figura 5.16. Modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada em diferentes visadas (a) Sólido e; (b) Realçado.....	60
Figura 5.17. Modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada atenuada.....	61
Figura 5.18 - Modelo 3D do Volume de Interesse (<i>Volume of Interest - VOI</i>) a partir do ROI da amostra renderizada do sólido; (a,b) Visada frontal e; (c) Visata topo-frontal.	61
Figura 6.1. Desvio de trajetória das esferas de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para os ambientes de (a) água doce e (b) água salgada.....	64
Figura 6.2. Desvio de trajetória das esferas de 10 mm em 50 cm de lâmina d'água para os ambientes de (a) água salgada a 23°C e (b) água salgada com presença de gelo e estratificação de temperatura do meio aquoso.....	65
Figura 6.3. Modelo de SSDS causado por dropstones adaptado de Thomas & Connell (1985)...	67
Figura 6.4. Deformações de SSDS nos corpos de prova para (a) água doce com espessura de coluna d'água de 25 cm e; (b) água salgada com presença de gelo para espessura de coluna d'água de 25 cm.	67
Figura 6.5. Deformação de penetração para o experimento de iniciação científica para a espessura de 30 cm de lâmina de água doce.	68
Figura 6.6. Deformações de SSDS nos corpos de prova para (a) água salgada com espessura de coluna d'água de 50 cm e; (b) água salgada com presença de gelo para espessura de coluna d'água de 50 cm.	69
Figura 6.7. Comparação de SSDS entre a amostra (a) real e (b) sintética.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição dos materiais utilizados para a confecção das camadas de argila e suas proporções.	32
Tabela 4.2. Nomenclatura das amostras do experimento	35
Tabela 4.3. Parâmetros de aquisição em micro-CT das amostras retiradas do experimento.....	39
Tabela 4.4. Parâmetros de aquisição em μ -CT para a amostra de campo.	40
Tabela 4.5. Parâmetros de reconstrução da amostra em μ -CT.	41
Tabela 5.1. Resultado da análise dos minerais presentes na amostra 1	42
Tabela 5.2. Resultado da análise dos minerais presentes na amostra 2.	43
Tabela 5.3. Resultados para as análises de velocidade, tempo de trajetória e número de Reynolds para todas as espessuras de lâmina d'água e propriedades químicas da água.....	50
Tabela 5.4 - Volume 3D calculado a partir da definição da Região de Interesse (ROI)	58

LISTA DE ABREVIações

μ -CT	Microtomografia de Raios-X
SSDS	Soft-Sediment Deformation Structure
DRX	Difratometria de Raios-X
ROI	Região de Interesse
VOI	Volume de Interesse
Re	Número de Reynolds

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_p	Densidade da partícula
ρ_w	Densidade da água
μ	Viscosidade dinâmica
v_t	Velocidade terminal da partícula
t	Tempo de trajetória
I_0	Intensidade inicial de um feixe de raio-X
$\mu(x)$	Função da atenuação dos raios-X
h_0	Ponto inicial
h_1	Ponto final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Gerais	17
2.1	2.2 Específicos	Erro! Indicador não definido.
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	GLACIAÇÕES E GLACIAIS	18
3.2	GEOLOGIA DOS AMBIENTES GLACIAIS	20
3.3	DEPOSIÇÃO EM AMBIENTES GLACIAIS	21
3.3.1	GLACIO LACUSTRE	23
3.3.2	GLACIO MARINHA	24
3.4	DROPSTONES: DEFINIÇÃO	25
3.5	MICROTOMOGRÁFIA PARA DETECÇÃO DE DROPSTONES	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	MATERIAIS PARA O EXPERIMENTO FÍSICO	30
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
4.3	PROTOCOLO EXPERIMENTAL	31
4.3.1	Água doce	32
4.3.2	Água Salgada	35
4.4	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	36
4.5	AQUISIÇÃO DE DADOS DO MICRO-CT (μ CT) PARA AS AMOSTRAS SINTÉTICAS. ...	38
4.6	AQUISIÇÃO DE DADOS DO MICRO-CT (μ CT) PARA A AMOSTRA DE CAMPO	39
5	RESULTADOS	42
5.1	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	42
5.1.1	Amostra 1	42
5.1.2	Amostra 2	43
5.2	ANÁLISE DE TRAJETÓRIA DA PARTÍCULA	44
5.2.1	Trajetória em Água Doce	44
5.2.2	Trajetória em Água Salgada	47
5.2.3	Trajetória em Água Salgada com Gelo	48
5.3	ANÁLISE DE VELOCIDADE DA PARTÍCULA	49

5.4	ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIO-X (M-CT) DAS AMOSTRAS SINTÉTICAS	51
5.4.1	Água doce.....	51
5.4.2	Água salgada	54
5.5	ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIO-X (μ -CT) DA AMOSTRA DE CAMPO....	58
6	DISCUSSÃO.....	62
6.1	COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS CORPOS DE PROVA	62
6.2	VELOCIDADES E TRAJETÓRIAS DOS <i>DROPSTONES</i> EM AMBIENTES GLACIOLACUSTRES E GLACIOMARINHO	63
6.3	<i>SOFT-SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURES (SSDS)</i> EM AMBIENTES GLACIOLACUSTRES E GLACIOMARINHOS	66
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS REAIS E SINTÉTICAS	69
7	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas em curso são uma realidade inegável, impactando o planeta de maneira profunda. O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) apresenta projeções alarmantes sobre o futuro do clima e seus impactos, afetando quase todas as formas de vida, incluindo a humana. Evidências científicas demonstram alterações significativas nos sistemas climáticos, incluindo a circulação atmosférica e oceânica, o ciclo hidrológico global e os sistemas de gelo marinho e mantos de gelo continentais (IPCC, 2023).

Nesse contexto, compreender a dinâmica do clima presente e futuro exige uma análise do passado, e os registros paleoclimáticos desempenham um papel crucial. Esses registros fornecem uma perspectiva sobre a variabilidade climática do planeta ao longo da história, revelando seus impactos nos seres vivos (Bradley, 2000). Ambientes glaciais e periglaciais, em particular, demonstram de forma evidente essa variabilidade, moldando o relevo e influenciando diretamente a sedimentação (Knight & Harrison, 2014; Garcia et al., 2024).

O aquecimento global intensifica o derretimento das geleiras, liberando grandes blocos de gelo flutuantes, os icebergs, nos oceanos (Jordan et al., 2016). Esses icebergs transportam sedimentos aprisionados durante a formação da geleira, que são liberados durante o degelo. O degelo de icebergs resulta em três tipos principais de sedimentação: *dumpstones* (provenientes de jangadas de gelo), *groundings* (causados pelo encalhe e degelo de icebergs, criando depressões em diamictitos) e *dropstones* (provenientes do derretimento de icebergs) (Thomas & Connell, 1985). Esses tipos de deposição são classificados como *sediment gravity flows* (SGF) (Molén, 2023).

A morfologia das deformações geradas pelos SGF é influenciada por diversos fatores, como a espessura da coluna d'água, densidade, salinidade e viscosidade da água. Em ambientes glaciais, o SGF geralmente ocorre em sedimentos finos e saturados em água, causando marcas no sedimento de fundo e penetrando as camadas superficiais (Bronikowska & Pisarka-Jamrozy, 2020; Haarland et al., 1966; Menzies, 2002). Essas marcas são conhecidas como *soft-sediment deformation structures* (SSDS) (Bronikowska & Pisarka-Jamrozy, 2020).

Bronikowska & Pisarka-Jamrozy (2020) utilizaram modelos numéricos para correlacionar a queda de *dropstones* com a formação de SSDS, buscando relacionar essas estruturas com a

espessura da coluna d'água. Os *dropstones*, também conhecidos como *ice-rafted debris* (IRD) (Hoffman & Scrag, 2002), são clastos extrabasinais com diâmetro significativamente maior que os sedimentos de fundo. A energia cinética gerada durante a queda dos *dropstones* causa impactos que levam à formação de SSDS (Bronikowska & Pisarka-Jamrozy, 2020).

Embora os modelos numéricos tenham esclarecido parte do processo de formação de SSDS, a variação de parâmetros físicos como a salinidade da água foi limitada, derivando em resultados distantes da realidade geológica. Para sanar essas limitações e comparar as deformações com a classificação de Thomas e Connell (1985), este estudo realizou simulações físicas da deposição de *dropstones* para investigar a relação entre as deformações presentes em SSDS e a variação de parâmetros físicos.

Foram conduzidos experimentos utilizando diferentes composições de argilas, variando as propriedades da água (doce, salgada e salgada com adição de gelo) e lançando projéteis de diferentes tamanhos e densidades para simular os *dropstones*. Por meio da microtomografia computadorizada (μ CT), foi possível observar com alta resolução espacial as estruturas sedimentares formadas após a deposição dos projéteis e analisar as deformações geradas nas camadas de sedimentos. Além das simulações em laboratório, o estudo analisou amostras coletadas na Formação Vila Maria, relacionada a glaciação do Ordoviciano-Siluriano da Bacia do Paraná (Assine et al., 1998). A combinação entre experimentos laboratoriais e análises de campo proporcionou uma compreensão mais ampla e robusta sobre a deposição de partículas em ambientes glaciais e suas implicações no registro geológico, contribuindo para o entendimento de como esses processos se manifestam em diferentes condições físicas e abrindo caminho para futuras interpretações paleoclimáticas.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

2.1 GERAIS

Investigar a aplicação da Microtomografia de Raios-X (μ -CT) no estudo de *Soft-Sediment Deformation Structures* (SSDS) relacionadas à deposição de *dropstones* em ambientes glaciais, correlacionando amostras sintéticas, provenientes de experimentações físicas, com amostra coletada em campo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar o impacto da espessura da coluna d'água na formação de SSDS;
- Estudar a influência de diferentes propriedades da água (doce, salgada, com gelo) a fim de relacioná-las com as deformações finais em SSDS causadas por *dropstones*;
- Analisar os resultados obtidos com μ -CT e correlacionar com amostras de campo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 GLACIAÇÕES E GLACIAIS

Desde sua formação até os dias atuais, o planeta Terra passa por períodos de mudanças abruptas de temperatura. Por exemplo, durante o início do Plioceno (5 - 3,6 Ma), as temperaturas médias globais apresentavam-se 3 a 4 °C mais quentes do que atualmente, criando um ambiente favorável para as espécies que habitavam o planeta. Olhando individualmente para as regiões polares que vemos hoje em dia, o Ártico estava cerca de 12 °C mais quente, e o Hemisfério Norte estava em grande parte livre de glaciação (Ravelo, 2010).

As mudanças nas forçantes climáticas e a variação na concentração de gases de efeito estufa são os principais fatores desses ciclos de glaciação no planeta. Ao longo dos últimos 50 milhões de anos as evidências de mudanças climáticas nos continentes são limitadas e incompletas, especialmente se tratando das ocorrências dos primeiros mantos de gelo. Dados isotópicos de oxigênio são amplamente utilizados em estudos paleoclimáticos, apesar de apresentar limitações. Essas se baseiam no fato de que o oxigênio é um elemento móvel e seu registro acaba sendo prejudicado devido ao intemperismo das rochas expostas. Entretanto, o oceano profundo oferece registros climáticos contínuos e detalhados, onde o sinal isotópico do oxigênio é particularmente importante. Esse sinal fornece informações quantitativas sobre as mudanças climáticas (Ruddiman et al., 2014).

Para os últimos 800 mil anos, essas observações são determinadas a partir do estudo de testemunhos de gelo na Antártica, que apresentam variações entre 50 e 100 ppm na concentração de CO₂ (Bereiter et al., 2015). Estudos realizados por Lüthi et al. (2008) com perfurações de mais de 200 m nesses testemunhos de gelo marcam o registro da concentração de CO₂ por dois ciclos glaciais completos nesses 800 mil anos. Esses estudos também mostram a baixa desses níveis de carbono por um período de 3000 anos, resultado de um armazenamento de carbono nos oceanos.

Ao longo dos últimos 50 milhões de anos as evidências de mudanças climáticas nos continentes são limitadas e incompletas, especialmente se tratando das ocorrências das primeiras mantos de gelo. Dados isotópicos de oxigênio, por exemplo, não apresentam um bom registro, uma vez que o oxigênio é um elemento móvel e seu registro acaba sendo prejudicado devido ao intemperismo das rochas expostas. Entretanto, o oceano profundo oferece registros climáticos

contínuos e detalhados, onde o sinal isotópico do oxigênio é particularmente importante. Esse sinal fornece informações quantitativas sobre as mudanças climáticas (Ruddiman et al., 2014).

A razão pela qual os registros isotópicos de oxigênio marinhos são importantes é devido a mudanças nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ da água no oceano e do gelo em geleiras e camadas de gelo. Dos fatores climáticos citados por Ruddiman et al. (2014) para essas variações de $\delta^{18}\text{O}$ são: 1) mudanças de temperatura da água dos oceanos e 2) mudança nas espessuras das camadas de gelo presentes nos continentes. Estudos feitos utilizando as carapaças de foraminíferos indicam que, para cada aumento de temperatura de $4,28^\circ\text{C}$, a concentração de $\delta^{18}\text{O}$ diminui em 1%. Já para ambientes de águas mais geladas, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tendem a aumentar. Mudanças nas espessuras das geleiras também têm relação direta com as alterações dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ nas conchas de foraminífero.

Durante a formação de mantos de gelo em escala continental, o nível do mar consequentemente também sofre uma baixa. Por exemplo, durante as maiores glaciações do Pleistoceno, o nível dos mares esteve 100 m abaixo do que o observado atualmente (Van Loon, 2008). No passado, o planeta Terra passou por seis grandes intervalos de glaciação. Os primeiros registros de períodos glaciais conhecidos se formaram há cerca de 2,8 Ga, porém as glaciações mais severas (que afetaram todo o planeta), ocorreram entre 750 e 600 Ma (Dalrymple e James, 2010).

O balanço de massa de glaciares que terminam nos oceanos, os chamados *tidewater glaciers*, e das calotas de gelo é afetado pelo ganho e perda de massa de gelo da superfície da geleira. Dentre as diversas categorias de gelo encontradas nos polos, a espessura varia de alguns milímetros a centenas de metros (gelo doce e marinho) (Dowdeswell, 2017).

Atualmente, a distribuição de geleiras na Terra se dá de forma heterogênea, com extensas calotas de gelo da Groenlândia e da Antártida (Fig. 3.1). Embora geleiras e calotas polares sejam os maiores contribuintes para o atual aumento eustático do nível do mar, a perda de massa de montanhas glaciais também contribui para este evento. O derretimento do gelo em montanhas glaciais, como as costeiras no Canadá, Alasca e Himalaia, é responsável pelo aumento do nível dos oceanos em 0,27 mm por ano (Lüthi et al., 2006).

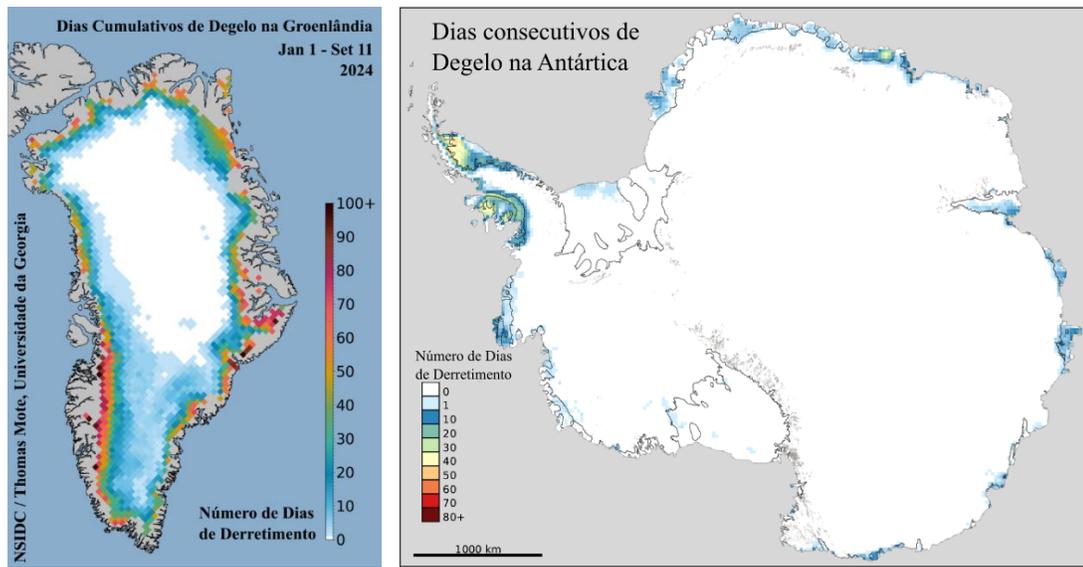


Figura 3.1. À esquerda é apresentada a taxa de derretimento do gelo da Groenlândia no ano de 2024 (fonte: nsidc.org) e, à direita, imagem da Antártica obtida através do satélite LANDSAT 7 ETM+.

Junto com o derretimento do gelo, sedimentos são depositados nas bordas das geleiras. Dessa forma, há uma descarga dinâmica, ou seja, uma massa de gelo que as geleiras de maré ou as geleiras de saída das camadas de gelo transportam para o oceano através do fluxo de gelo (Lüthi et al., 2006), e a formação de fluxos de detritos na borda das geleiras com os sedimentos desprendidos dos icebergs (Nichols et al., 2009), formando feições de deposições de ambientes glaciais que contribuem para o entendimento do degelo no planeta, tanto em glaciações distantes no passado geológico, quanto atualmente.

3.2 GEOLOGIA DOS AMBIENTES GLACIAIS

A sedimentologia de ambientes glaciais desempenha um papel importante no entendimento de períodos glaciais no planeta e, também, para o conhecimento de depósitos importantes no meio econômico e socioambiental (Dalrymple e James, 2010). Por exemplo, em regiões onde ainda hoje há geleiras, existem programas de exploração de aquíferos que fornecem água potável para milhões de pessoas. Para um passado mais recente, reservatórios de gás raso estão armazenados em sedimentos glaciais do Pleistoceno, como em Alberta, no Canadá. Além disso, há também presença de depósitos minerais do Pré-Cambriano cobertas por extensas camadas de sedimentos glaciais.

De acordo com Dalrymple e James (2010), a dificuldade de reconstrução de um ambiente glacial ocorre devido aos processos de degelo que afetam as deposições de sedimentos tanto em

ambiente glacioterrestre, quanto em ambiente glaciomarinho. Além disso, há diversos sub-ambientes dentro desses dois segmentos. Outro fator que dificulta o detalhamento de cada região desses ambientes é a deposição rápida de sedimentos que ocorre devido à variação da camada de gelo, pois o crescimento e o derretimento dos mantos de gelo dão origem a deposição rápidas, implicando no retrabalhamento desses sedimentos devido à transgressão de ambientes marinhos e fluviais.

A distribuição de temperaturas frias por todo o planeta em períodos de glaciação reduz a taxa de derretimento das geleiras, resultando no avanço dos glaciais e espessando as camadas de gelo pelos vales glaciares e pelo continente (Nichols, 2009).

3.3 DEPOSIÇÃO EM AMBIENTES GLACIAIS

De um ponto de vista sedimentológico, as deposições mais características de ambientes glaciais são por derretimento de extensas massas de gelo, formando diamictitos (Brodzikowski e Van Loon, 1991). Isso ocorre devido à forma desordenada que estes clastos são acomodados dentro de grandes massas de gelo e são transportados dentro das mesmas por extensos vales glaciais. Apesar de serem depositados de forma desordenada, principalmente na base da geleira, os clastos maiores tendem a apresentar orientações preferenciais, indicando fluxo de massa. Este fluxo também pode ser validado através de evidências de marcas de estrias deixadas na base da geleira durante seu deslocamento (Fig. 3.2).

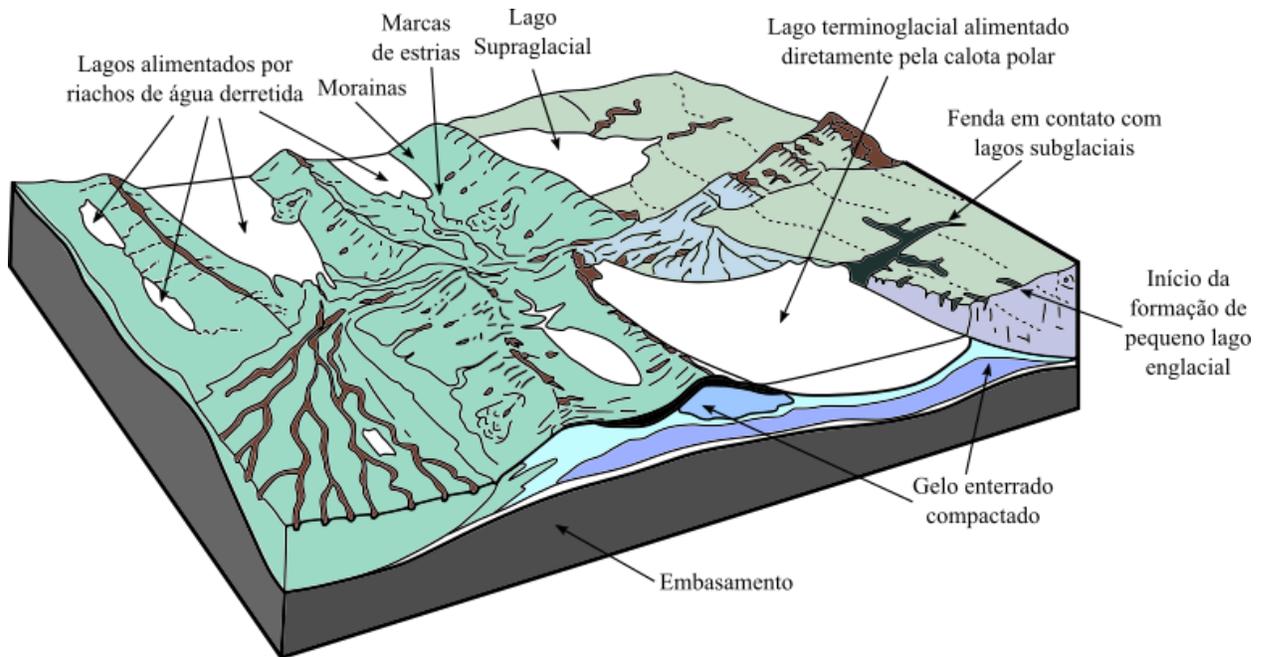


Figura 3.2. Representação esquemática de tipos de ambientes onde há deposições de sedimentos em lagos glaciais. Figura adaptada de Brodzikowski e Van Loon (1991)

Durante a formação de uma geleira, a massa de gelo sofre deformações, dobramentos internos, falhamentos e empurrões (Nichols et al., 2009). Toda essa movimentação afeta diretamente os clastos que são incorporados a essa massa durante a formação da geleira. Os detritos podem ser inseridos nas massas de gelo de duas formas:

- 1) Detritos supraglaciais, que caem dos lados do vale glacial, se acumulando na superfície da geleira e;
- 2) Detritos basais, que são incorporados à geleira devido a processos de abrasão. Este processo quebra e arranca fragmentos de rocha da base da geleira devido ao movimento do gelo.

Em geral, a deposição desses sedimentos ocorre entre o ambiente glacial e o periglacial. O primeiro é formado por uma área inteiramente coberta por um manto de gelo e uma geleira podendo ser ativo ou passivo (Brodzikowski e Van Loon, 1991). A margem externa é formada por uma frente bem definida, possibilitando uma divisão bem demarcada entre os dois ambientes. O ambiente periglacial começa a partir deste ponto, onde o fluxo de água do degelo e detritos glaciais é bem-organizado.

3.3.1 GLACIO LACUSTRE

A maioria dos lagos glaciogênicos encontram-se no ambiente periglacial, onde as massas de gelo e a topografia irregular têm uma forte influência no padrão de fluxo, nomeadamente no subambiente glacial terminal e no subambiente proglacial (Brodzikowski e Van Loon, 1991). Os lagos glaciogênicos são um pouco menos abundantes no ambiente glacial, mas ocorrem no subambiente supraglacial e no subglacial (Nichols, 2009).

Os depósitos formados pela deposição de partículas finas apresentam frequentemente estratificação graduada (varves), indicando flutuação sazonal no fornecimento de sedimentos. O vento e as correntes superficiais continuam a fornecer partículas se o lago é coberto por gelo durante o inverno (Brodzikowski & van Loon, 1991). A redeposição de material poderá ocorrer ao longo das margens do lago. Os depósitos glaciolacustres formados em lagos proglaciais têm uma chance razoável de preservação, enquanto a probabilidade diminui para depósitos terminoglaciais, supraglaciais e subglaciais. Grandes lagos glaciais podem preservar depósitos por milhares de anos, enquanto pequenos lagos têm menor chance de preservação. Esses depósitos são formados principalmente por sedimentos transportados por cursos de água de degelo e, em menor grau, por detritos de massas de gelo flutuantes e ventos fortes (Nichols, 2009).

Existem vários tipos de corpos de água estagnada nos quais a sedimentação glaciolacustre pode ocorrer. Esses tipos incluem depressões de fusão, depressões de termocarste, partes alargadas de canais supraglaciais e fendas largas e rasa (Nichols, 2009). Os lagos também podem ser abundantes se uma barreira rochosa for encontrada pelo gelo ativo, impedindo a drenagem de transportar a água até outros lagos ou ao mar. Durante o Pleistoceno, muitos lagos glaciais da Europa se formaram desta forma (Brodzikowski & van Loon, 1991).

Quando falamos sobre depósitos em lagos glaciais, podemos separá-lo em três partes: 1) complexo lacustre, onde há sedimentos de lagos que são pequenos demais para terem depósitos centrais e marginais distintamente diferenciados (comumente encontrados nos subambientes supraglacial, terminoglacial e proglacial, e mais raramente também no subambiente subglacial); 2) depósitos marginais, que compreendem todos os depósitos lacustres que se formam na zona marginal relativamente rasa, com exceção da sedimentação em água parada, e; 3) depósitos de

fundo, que são formados mais ao centro do lago, onde a deposição de sedimentos mais finos é feita por gravidade. É nesta região onde há formação de varves.

3.3.2 GLACIO MARINHA

Quando o gelo continental chega à costa, ele pode se estender sobre o mar formando plataformas de gelo. As plataformas atuais ao redor da Antártida avançam centenas de quilômetros mar adentro, cobrindo vastas áreas com gelo flutuante (Nichols, 2009). Essas plataformas funcionam como barreiras que reduzem o fluxo do gelo continental para o oceano (Fig. 3.3).

Embora o derretimento de grandes massas de gelo flutuante não aumente o volume dos oceanos, a remoção destas poderia acelerar o movimento do gelo continental, elevando o nível do mar. Elas possuem poucos sedimentos devido à escassez de rochas expostas, sendo o detrito basal a principal fonte de sedimentos. Essas plataformas também se fragmentam, formando icebergs, e derretem na base em contato com a água do mar. O gelo marinho, por sua vez, é formado por água do mar congelada e geralmente não contém sedimentos, exceto por poeira trazida pelo vento em sua superfície (Nichols, 2009).

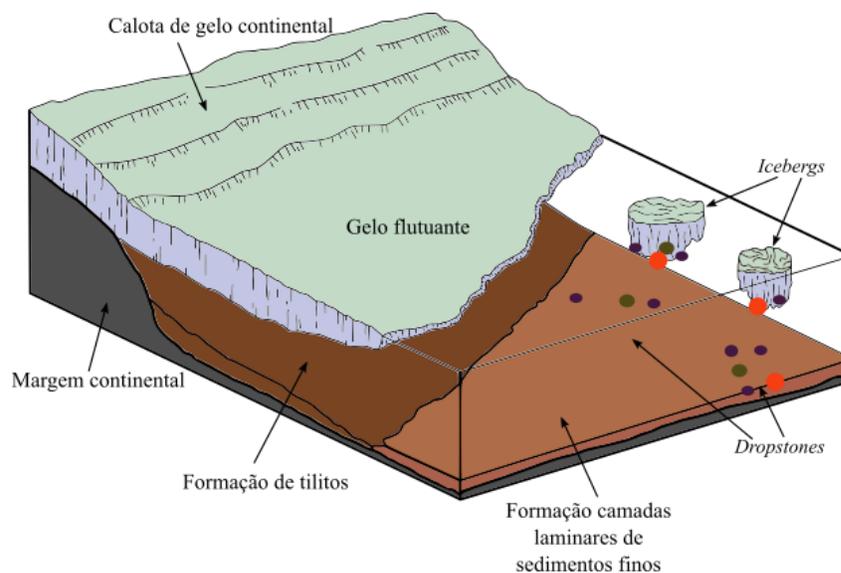


Figura 3.3 – Representação esquemática da formação e jangadas de gelo flutuante na borda da calota de gelo continental. Após o desprendimento do gelo das geleiras, estes podem se tornar apenas gelo flutuante nas dependências da geleira, o, para massas de gelo maiores, dar origem a icebergs. (Figura adaptada de Brodzikowski e Van Loon, 1991)

Quando o gelo de uma camada ou geleira continental atinge uma plataforma rasa na costa, ele pode ancorar-se no fundo do mar. O movimento do gelo e dos icebergs pode criar sulcos profundos e longos nos sedimentos moles do fundo, causados por grandes blocos de rocha que se desprendem do fundo dos vales glaciais e são arrastados pelas geleiras (Nichols, 2009; Thomas & Connell, 1985). A água de degelo sob pressão pode esculpir canais nos sedimentos, formando vales de túnel que, mais tarde, são preenchidos com depósitos sedimentares. Esses depósitos e marcas de escavação ficam preservados em estratos marinhos rasos, como nas plataformas continentais cobertas por gelo no passado.

Os depósitos em ambiente glaciomarinho são chamados “till” ou “tillitos”. Esses depósitos, formados pela liberação de detritos da base de plataformas de gelo, podem ser bastante extensos (Thomas & Connell, 1985). Os depósitos glaciomarinhos próximos ao gelo são geralmente diamictitos mal selecionados, enquanto os distais são compostos principalmente por sedimentos liberados de icebergs que derretem como resultado tanto da irradiação solar quanto do derretimento subaquático, por transferência de calor da água do lago para o gelo, resultando no desprendimento dos sedimentos presos ao gelo (Brodzikowski & van Loon, 1991). Os sedimentos mais distantes podem ser retrabalhados por processos marinhos, como ondas e correntes de fundo, que separam os grãos e formam estruturas sedimentares.

A deposição de sedimentos de uma plataforma de gelo, onde há formação de jangadas de gelo cheias de sedimentos, é bastante diferente da sedimentação resultante do derretimento de icebergs. No primeiro ambiente, o derretimento das jangadas de gelo resulta na deposição de todo o material liberado aleatoriamente do gelo. No caso do derretimento de icebergs, os clastos denominados “*dropstones*” se desprendem à medida que o gelo derrete e segue seu trajeto para mares mais profundos. Esse processo é o único que contribui para a sedimentação de grandes clastos provenientes do gelo glacial, sendo marcadores de depósitos marinhos terminoglaciais transportados por gelo (Brodzikowski & van Loon, 1991).

3.4 DROPSTONES: DEFINIÇÃO

Atualmente, há uma certa discussão acerca do termo *dropstone* para clastos encontrados em sedimentos mais finos. O primeiro geólogo a utilizar o termo foi Charles Lyell no livro “*Principles of Geology*”, publicado em 1830. De acordo com Bennett et al., 1996, dropstones são clastos de tamanho anômalo em meio à sedimentos finos. São indicativos de deposição vertical e

ou oblíqua nos sedimentos que os comporta. Os icebergs têm o potencial de transportar dropstones por longas distâncias, não precisando estar associados a outros sedimentos glaciomarinhos.

O registro de derretimento das calotas de gelo polar é relativamente simples, tratando-se de medidas diretas da temperatura local no verão. Camadas de derretimento ocorrem quando a água da superfície percola para baixo e congela novamente dentro da neve (Bradley, 2000). A circulação da água quente do lago aumenta o derretimento ao redor das margens do lago e o calor armazenado impulsiona o derretimento subaquático, mesmo quando a temperatura ambiente diminui abaixo do ponto de congelamento, (Sakai et al., 2000)). Com o derretimento do gelo da geleira devido à diferença de temperatura, a água mais fria do fundo do lago, e mais densa, tende a subir, formando uma espécie de convecção no fundo da geleira, ocasionando em fraturas na base do gelo, dando origem a jangadas de gelo e icebergs.

De acordo com Thomas & Connell, 1985, o degelo dessas massas de gelo pode apresentar três tipos de sedimentação: de jangadas de gelo, chamados *dumpstones*, encalhe e degelo de icebergs, chamados *groundings* (criando depressões isoladas em diamictitos) e degelo de icebergs em porções mais distais, gerando *dropstones* (Fig. 3.4). Estas deformações causam estruturas chamadas Estrutura de Deformação de Sedimento Mole (*Soft-Sediment Deformation Structures – SSDS*) (Bronikowska et al., 2021). As jangadas são responsáveis por carregar os sedimentos que se localizam nas proximidades das geleiras. Já os *dumpstones* são rochas que originam estruturas de despejo, geralmente são materiais mais grossos e com estrias, características de sedimentos de base de geleira. Em geral, localizam-se no limite onde há a quebra da geleira. Por fim, os *dropstones* são clastos isolados mais distantes da geleira, carregados por icebergs que, ao longo de seu trajeto pela água, acabam perdendo massa de gelo e, conseqüentemente, dispensando os clastos presos em seu interior (Thomas & Connell, 1985).

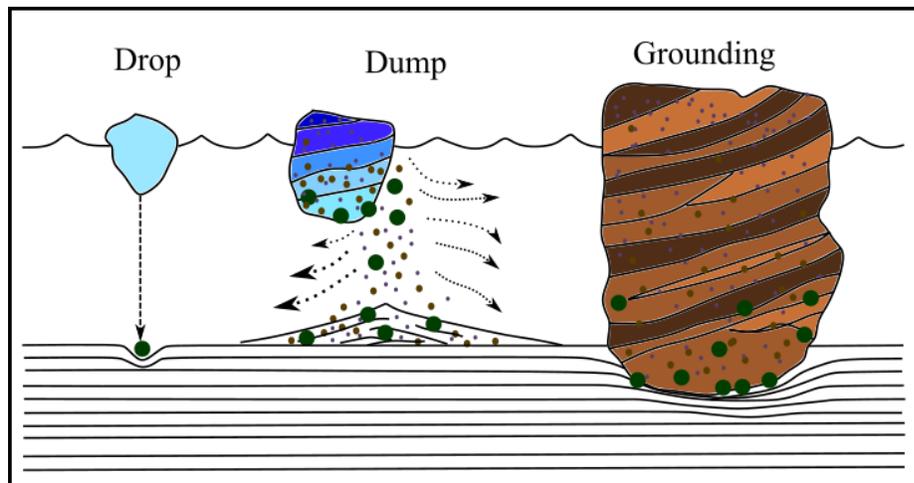


Figura 3.4. Modelos de formação de *dropstones*, *dumpstones* e estruturas de *grounding*. Figura adaptada de Thomas & Connell, 1985.

3.5 MICROTOMOGRAFIA PARA DETECÇÃO DE DROPSTONES

O estudo de ambientes sedimentares, principalmente de ambientes glaciais, ainda apresenta limitações devido à possíveis destruições das amostras durante a coleta e eventual danificação em microestruturas importantes. As técnicas utilizadas para análise macroscópica podem identificar estruturas em lâminas com espessura de milímetros a centímetros, porém são incapazes de visualizar microestruturas indicativas de sazonalidade dentro das amostras, a verdadeira natureza das laminações e se elas preservam ou não uma estrutura anual, os chamados varves (Bendle et al., 2015).

Para estudos menos destrutivos e mais ágeis em rochas sedimentares, especificamente para ambientes glaciais marinhos e lacustres, (Bendle et al., 2015) sugere a utilização de microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT). Esta técnica não destrutiva baseia-se no princípio da atenuação dos raios-X pela matéria, sendo assim, torna-se possível a análise de centenas de seções microtomográficas e visualização tridimensional interna das amostras (Neto et al., 2011).

O método de microtomografia computadorizada de raios-x (micro-CT) é realizado a partir da produção artificial de raios X por meio da aceleração de elétrons em direção a um material metálico de número atômico alto (REF). Esse fenômeno resulta em uma radiação e alta frequência, pequeno comprimento de onda e alto poder de penetração. O feixe emitido é composto por fótons

que, ao atravessarem a matéria, têm sua intensidade reduzida devido à atenuação, que pode ser por absorção ou dispersão. A intensidade da radiação, medida por um detector, diminui ao atravessar materiais, conforme a equação de atenuação dos raios X. Para identificar diferentes materiais e saber a capacidade de penetração dos fótons, o método baseia-se na lei de Beer-Lambert, esta que é dada pela seguinte equação:

$$I = I_0 e^{-\int \mu(x) dx}, \quad (1.1)$$

onde I_0 é a intensidade inicial de um feixe monoenergético, μ é o coeficiente de atenuação linear do meio e da energia da Radiação Eletromagnética (REM) e x é a espessura do material. Materiais com maiores valores de μ atenuam mais os fótons de raios X. A reconstrução tomográfica usa a transformada inversa de Radon para atribuir o valor correto de μ a cada voxel, considerando que a qualidade da imagem final é influenciada por fatores como a razão sinal-ruído (SNR) e a resolução espacial (Wang e Miller, 2020). A maior vantagem da microtomografia com relação à tomografia convencional é a reconstrução 3D das amostras através de artifícios matemáticos a partir das projeções dos raios-X (Neto et al., 2011).

Os tomógrafos modernos utilizam raios X com feixe cônico para obter imagens detalhadas em 3D, substituindo as antigas geometrias de feixe paralelo e em leque. Embora a tecnologia tenha avançado, problemas como ruído e artefatos ainda afetam a qualidade das imagens, especialmente devido à similaridade nos coeficientes de atenuação dos materiais e falhas nos detectores. A qualidade das imagens também depende dos parâmetros de aquisição, como tensão e corrente, e do uso de filtros para eliminar radiação de baixa energia (Neto et al., 2011). A resolução final é influenciada pelo tamanho do pixel e a proximidade da fonte de raios-X em relação à amostra. Assim, é essencial ajustar corretamente os parâmetros e conhecer bem o equipamento para garantir imagens de alta qualidade.

Para realização da aquisição dos dados, dentro do equipamento, a fonte e de raios-x e o detector são estacionários, sendo assim, o sistema do micro-CT contém três componentes (Fig 3.5): I) Fonte de raios-x; II) Cintilador e; III) Detector.

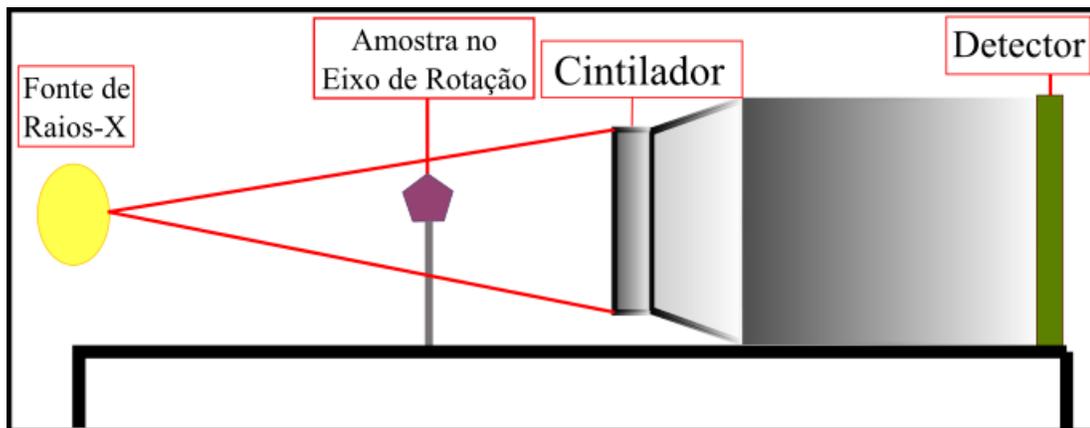


Figura 3.5 - Exemplo simplificado de funcionamento da microtomografia de raios-x e suas três principais componentes: fonte de raios-x, cintilador e detector.

Além de imagear as amostras de forma tridimensional, o micro-CT também retorna à distribuição 3D de atenuação linear local, gerando como produtos um conjunto de cortes 2D (*slices*) para visualização das seções. Para obter resultados quantitativos da amostra analisada, é necessário analisar todo o volume 3D em um software dedicado, como Avizo, VGStudio Max, MAVI, porém outros softwares, como Fiji, VGStudio e Avizo, podem ser utilizados para análise das imagens 2D (Cnudde & Boone, 2013; Wang & Miller, 2020). Esses resultados quantitativos podem incluir dados sobre a textura do material, frações volumétricas dos componentes, tamanho de poros e grãos, dentre outros aspectos.

O uso do micro-CT possibilita a visualização da morfologia das partículas internas, bem como das estruturas sedimentares tridimensionais que apresentam um contraste de densidade claramente distinto em relação ao ambiente ao redor (como restos de plantas em sedimentos lacustres, diques de areia, entre outros) (Cnudde & Boone, 2013). Como descrito por Menzies & Maltman (1999), em um contexto mais amplo da sedimentologia subglacial, o estudo de estruturas micromorfológicas são multifacetados. Estudos realizados pelo mesmo na Baía de Mohawk, mostram a diversidade de estruturas identificadas em ambientes subglaciais e evidências de condições de leito subglacial deformável. Porém, com o uso da técnica de micro-CT por Bendle et al. (2015), microestruturas e informações de porosidade, densidade das argilas, diferenças de minerais nas camadas de varves, estruturas de deformação de pequenos dropstones etc., podem ser facilmente identificados e descritos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS PARA O EXPERIMENTO FÍSICO

Com o intuito de simular a formação de varves em ambientes, foram utilizados os seguintes materiais:

- I. Argilas: Para a simulação de ambientes de formação de varves e criação dos corpos de prova, utilizou-se illita ((K,H3O)(Al,Mg,Fe)2(Si,Al)4O10[(OH)2,(H2O)]) para as camadas brancas e uma mistura com partes de illita + dolomita(CaMg(CO3)2) + hematita (Fe2O3) para as camadas vermelhas.
- II. Projéteis: Com o intuito de simular os *dropstones*, foram utilizadas esferas de vidros de 10 mm de diâmetro. Para fins de análise de corte, também foram utilizadas esferas de chumbo de 10 mm e 8g para os experimentos em água doce.
- III. Aquário: Para recriação em laboratório de ambientes lacustres de água doce e ambientes salinos, foi utilizado um aquário retangular de vidro de 2000 L com dimensões de 1 m de largura x 40 cm de profundidade x 50 cm de altura.
- IV. Termômetro: Para medir a medição da temperatura da água em diferentes profundidades, foi utilizado um termômetro MT455A da marca MINIPA com dois canais e faixas de temperatura de -200 °C a +1372°C.
- V. Água: Para simulação de ambientes não salinos e salinos, utilizou-se água de doce retirada da própria torneira do laboratório. Já para recriação da salinidade média dos mares em escala laboratorial, para cada 100 L de água, foram diluídos 3,5 kg de sal.
- VI. Formas para criação dos corpos de prova: Foram utilizados dois tipos de formas para deposição dos corpos de prova:
 - A. Formas de vidro retangulares (para a execução dos experimentos com água doce);
 - B. Formas de metal com fundo falso (para a execução dos com água salgada).
- VII. Câmera: A gravação dos experimentos foi feita através do uso de um celular modelo A52 da Samsung de 64 MP no modo vídeo.
- VIII. Canos de PVC de 5 cm de diâmetro x 3 cm de altura: Utilizados para cortar os corpos de prova.
- IX. Resina epóxi: por serem delicadas, as amostras foram resinadas para não serem danificadas.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a caracterização e definição dos materiais, foram feitas análises no Laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Foi utilizado o difratômetro da marca Rigaku (Fig. 4.1.a, b), modelo Ultima IV, de tubo de cobre. Já para o processamento dos dados foi utilizado o software Jade 9. Para a aquisição, foram utilizadas duas lâminas com as argilas selecionadas para o experimento (Fig. 4.1.c). Estas foram levadas para aquisições no difratômetro com tempo de leitura de 12 minutos para cada lâmina. As medidas para obtenção de resultados foram feitas no canal da amostra total em uma velocidade programada para, a cada 1 minuto, o equipamento se mover 5°.

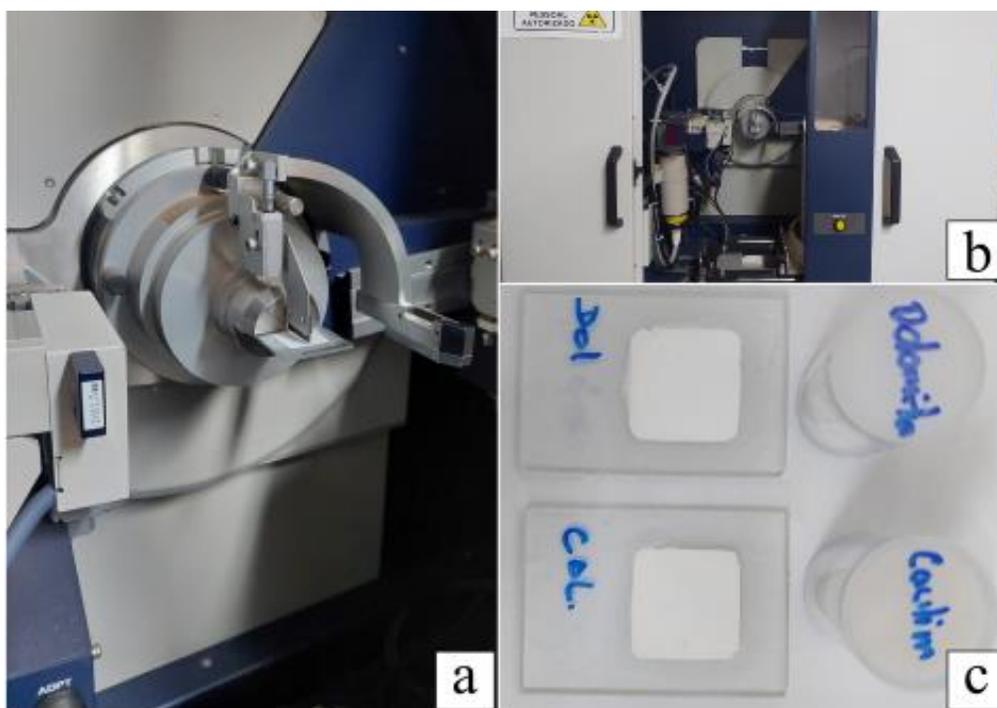


Figura 4.1. Fotos do difratômetro de raio x: (a,b) Câmara do difratômetro e (c) amostras das argilas utilizadas para o experimento.

4.3 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para determinarmos a melhor forma de depositar as camadas de argila, a fim de simular ambientes de varves, foram realizados experimentos no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília. Utilizando uma balança de precisão (Fig. 4.2.a), foram colocados 10 g de illita em três béqueres de 80 ml cada. Em seguida, foram inseridos 30 g de água doce, álcool e água com sal, respectivamente em cada béquer contendo illita. A mistura foi agitada até tornar-se

homogênea e em seguida deixada em repouso por 72 horas (Fig. 4.2.b). Após o tempo de repouso foi feita a deposição de uma nova camada, porém houve mistura entre as camadas (Fig. 4.2.c). Sendo assim, definimos que as camadas deveriam ser criadas por meio de deposições de finas camadas de pastas de argila, como será descrito posteriormente.

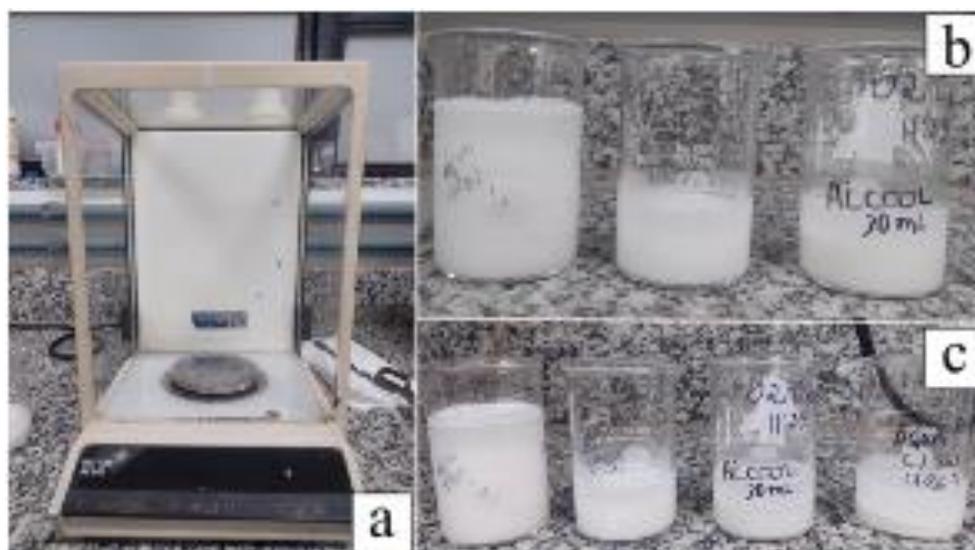


Figura 4.2. Fotos da montagem dos corpos de prova. (a) Balança de precisão do Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília, (b) mistura das argilas após a agitação e (c) mistura das argilas após a deposição

4.3.1 Água doce

O primeiro passo para a criação do experimento ocorre com a criação dos corpos de prova onde ocorrerá a deposição dos projéteis. Para isso, em duas formas de vidro preparadas com papel filme, foram depositadas camadas de argila em proporções e misturas diferentes, com o intuito de formar camadas com cores e propriedades físicas distintas. Dessa forma, as medidas utilizadas para a criação das pastas de argila estão dispostas na tabela.

Tabela 4.1. Composição dos materiais utilizados para a confecção das camadas de argila e suas proporções.

MISTURA	MATERIAL	QUANTIDADE - ÁGUA (g)	QUANTIDADE - ILITA (g)	QUANTIDADE - DOLOMITA (g)	QUANTIDADE - HEMATITA (g)	QUANTIDADE - SAL (g)
1	Illita	50	80	-	-	-
2	dolomita + illita +	40	50	25	15	-

hematita							
3	Illita	9	8	-	-		0,38
4	dolomita + illita + hematita + sal	9	5	3	1		0,38

Seguindo as medidas da tabela anterior, foram feitas cinco camadas, intercalando as misturas 1 e 2, sendo a mistura 1 sempre a camada de base e topo dos corpos de prova (Fig. 4.3). Cada camada apresentava de 1 a 2 mm e levavam 24 horas para secar de forma que possibilitasse a deposição da camada seguinte, totalizando seis dias para a elaboração dos corpos de prova.

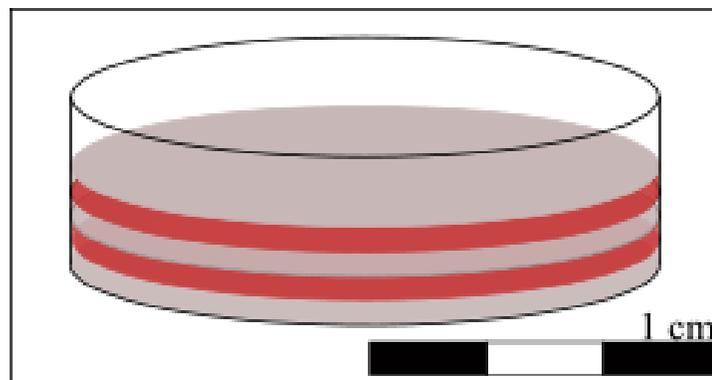


Figura 4.3. Representação das camadas dos corpos de prova utilizados no experimento

Para este primeiro experimento, o aquário de 200 L foi preenchido apenas até a metade, com 25 cm de altura de coluna d'água (Fig. 4.4). Antes de atingir a altura desejada de água para a execução do experimento, os corpos de prova foram inseridos lentamente no aquário para não haver danos nas camadas de argila. Em seguida, voltou-se a inserir água no aquário até atingir a altura desejada. Enquanto aguardava-se a coluna d'água ficar estável, foi posicionado um tripé com o celular para a gravação do experimento e utilização do material de vídeo para análises de trajeto e velocidade da partícula na água. Com tudo montado, foram executados três experimentos:

- I - A dispensa de 3 chumbadas de 10 mm no lado esquerdo do aquário;
- II - A dispensa de 3 esferas de vidro de 5 mm ao lado direito do aquário e;

III - A dispensa de 3 esferas de vidro de 10 mm ao lado direito do aquário. Todos os projéteis foram dispensados manualmente, tendo seu ponto zero da trajetória na superfície da água.

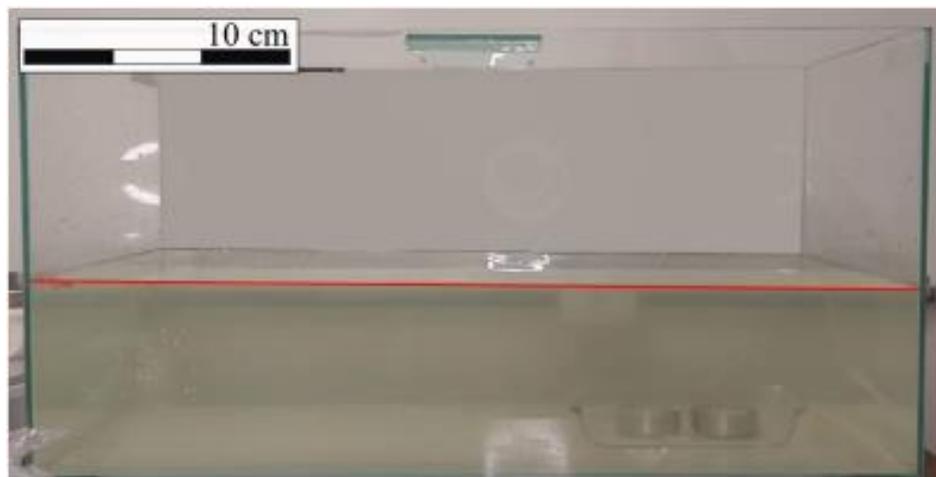


Figura 4.4. Foto do aquário utilizado para elaboração dos experimentos. A linha vermelha delimita a espessura de 25 cm de coluna d'água.

Após o fim do experimento e da gravação, os corpos de prova com os projéteis foram cuidadosamente retirados do aquário. O excesso de água das formas foi drenado com uma seringa e o experimento foi posto para secar durante 48 horas para que, após a secagem, camadas de argila voltassem a ser depositadas, totalizando mais quatro camadas sendo a primeira a da mistura 2 (Fig. 4.5).

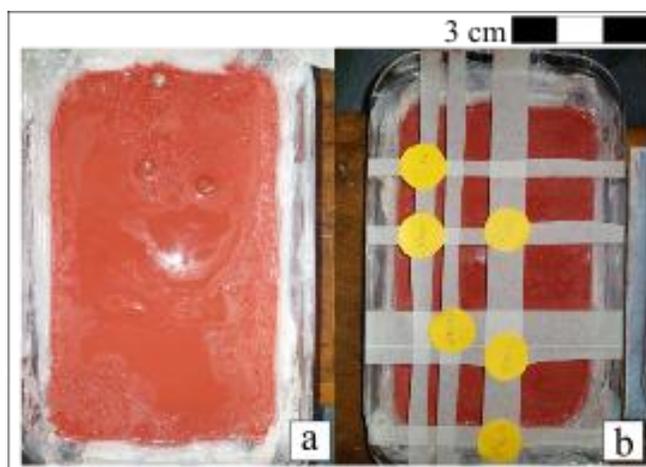


Figura 4.5. Fotografias das argilas depositadas: (a) Primeira camada da mistura 2 após a deposição dos projéteis; (b) Última camada depositada após a deposição dos projéteis. Os círculos de cor laranja foram colocados para sinalizar a localização dos projéteis.

Com os corpos de prova secos, foram utilizados canos de PVC de 5 cm de diâmetro por 3 cm de altura para cortar e separar as amostras. Estas foram resinadas (com o tempo de secagem da resina de 8 horas), e enviadas para análises de micro-CT no laboratório de Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

Cada uma das amostras levadas para análises foi nomeada de acordo com os parâmetros listados na seguinte tabela:

Tabela 4.2. Nomenclatura das amostras do experimento.

Salinidade da água	Espessura de lâmina d'água (cm)	Material da esfera dentro da amostra	Tamanho da esfera dentro da amostra (mm)	Nomenclatura final das amostras
Doce	25	V (vidro)	5	D25V5
Doce	25	V (vidro)	10	D25V10
Salgada	25	V (vidro)	10	AS25V10
Salgada	50	V (vidro)	10	AS50V10
Salgada + gelo	25	V (vidro)	10	ASG25V10
Salgada + gelo	50	V (vidro)	10	ASG50V10

4.3.2 Água Salgada

Após a elaboração do primeiro experimento com água doce, foi iniciada a elaboração dos corpos de prova do experimento para ambientes salinos. Diferentemente do primeiro experimento, desta vez as camadas de argila dos corpos de prova foram depositadas em formas de metal com fundo falso para facilitar a retirada do experimento após sua execução. Além disso, foi adicionado sal na mistura, para que houvesse uma maior aproximação do ambiente marinho. Sendo assim, duas misturas de argila foram feitas (Tabela 3.1) e depositadas de forma intercalada, sendo necessário um tempo de 24 horas para a deposição da camada seguinte.

Assim como feito no experimento com água doce, foram depositadas cinco camadas intercalando as misturas 3 e 4, sendo a mistura 3 a camada de base e topo (Figura 3.3). Cada camada apresentava de 1 a 2 mm e levavam 24 horas para secar de forma que possibilitasse a deposição da camada seguinte, totalizando também seis dias para a elaboração dos corpos de prova.

Nesta parte do experimento, para cada 100 L de água, foram misturados 3,5 kg de sal, aproximando-se da salinidade da água do mar. No primeiro momento, a água foi colocada no aquário até a altura de 25 cm. Em seguida, os corpos de prova foram colocados cuidadosamente dentro da água até atingirem o fundo do aquário. Novamente, enquanto esperávamos a coluna d'água estabilizar, foi posicionado um tripé com um celular para a gravação do experimento e utilização do material de vídeo para análises posteriores. Com tudo montado, o experimento de 25 cm de coluna d'água foi executado com a dispensa de 3 esferas de 10 mm. Ao fim deste experimento, os corpos de prova foram retirados da água com cautela. Dando procedimento ao experimento, foram adicionados mais 100 L de água e 3,5 kg de sal na água já presente no aquário, totalizando 200 L de água e 7 kg de sal, fazendo a coluna d'água atingir 50 cm. Novamente, novos corpos de prova foram inseridos no aquário com cautela até atingir o fundo. Aguardamos até a água ficar estável e realizamos o experimento como descrito anteriormente, dispensando 3 esferas de vidro a partir da linha do nível d'água. Ao fim do experimento, as formas foram retiradas do aquário, a água foi drenada com uma seringa e foram colocados para secar por 48 horas para que, após a secagem, camadas de argila voltassem a ser depositadas, totalizando mais quatro camadas sendo a primeira a da mistura 4.

Para o experimento com gelo, a fim de simular ambientes glaciais, foram mantidas as proporções de sal para a água, porém, para chegar às espessuras de coluna d'água desejadas, foi acrescentado gelo na água até alcançar a altura desejada. A temperatura ao longo do experimento foi monitorada por meio do termômetro de dois canais, com sensores na superfície e no fundo do aquário. Para as duas espessuras de coluna d'água foram seguidos os mesmos passos para dispensa dos projéteis e recolhimento dos corpos de prova do fundo do aquário.

Assim como foi feito para o experimento de água doce, ao secaram parcialmente, foram utilizados canos de PVC de 5 cm de diâmetro por 3 cm de altura para cortar e separar as amostras. Estas foram resinadas e enviadas para análises de micro-CT no laboratório de Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

4.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Para analisar os vídeos feitos do experimento, foi utilizado o software ImageJ (Fiji). que trabalha com a junção de diversos atributos. A análise de trajetória de cada partícula é feita com o uso da extensão *Manual Tracking*. Esta permite ao usuário quantificar o movimento de objetos

entre quadros de uma pilha temporal, em 2D e 3D. A extensão fornece as coordenadas XY e XYZ da partícula através da geração de uma planilha, assim como velocidade, distância percorrida entre dois quadros e intensidade do pixel ao clicar no objeto a ser analisado.

Para o processamento dos vídeos, o primeiro passo é a conversão deles para o formato para AVI. Os arquivos convertidos em AVI podem ser abertos usando o comando Arquivo> Abrir ou arrastando e soltando na janela "ImageJ".

Com o vídeo salvo, é possível importá-lo no formato AVI e dar início ao processamento. Para a análise de cada partícula individualmente, o vídeo foi separado por meio da seleção dos frames. Cada execução do experimento recebeu o nome de "shot". Usando como exemplo o experimento onde a partícula era a chumbada, separamos o vídeo em três partes. Cada shot trata-se da quantidade de vezes que o experimento foi repetido e gravado. A seleção dos *frames* é feita quando o vídeo é importado como AVI.

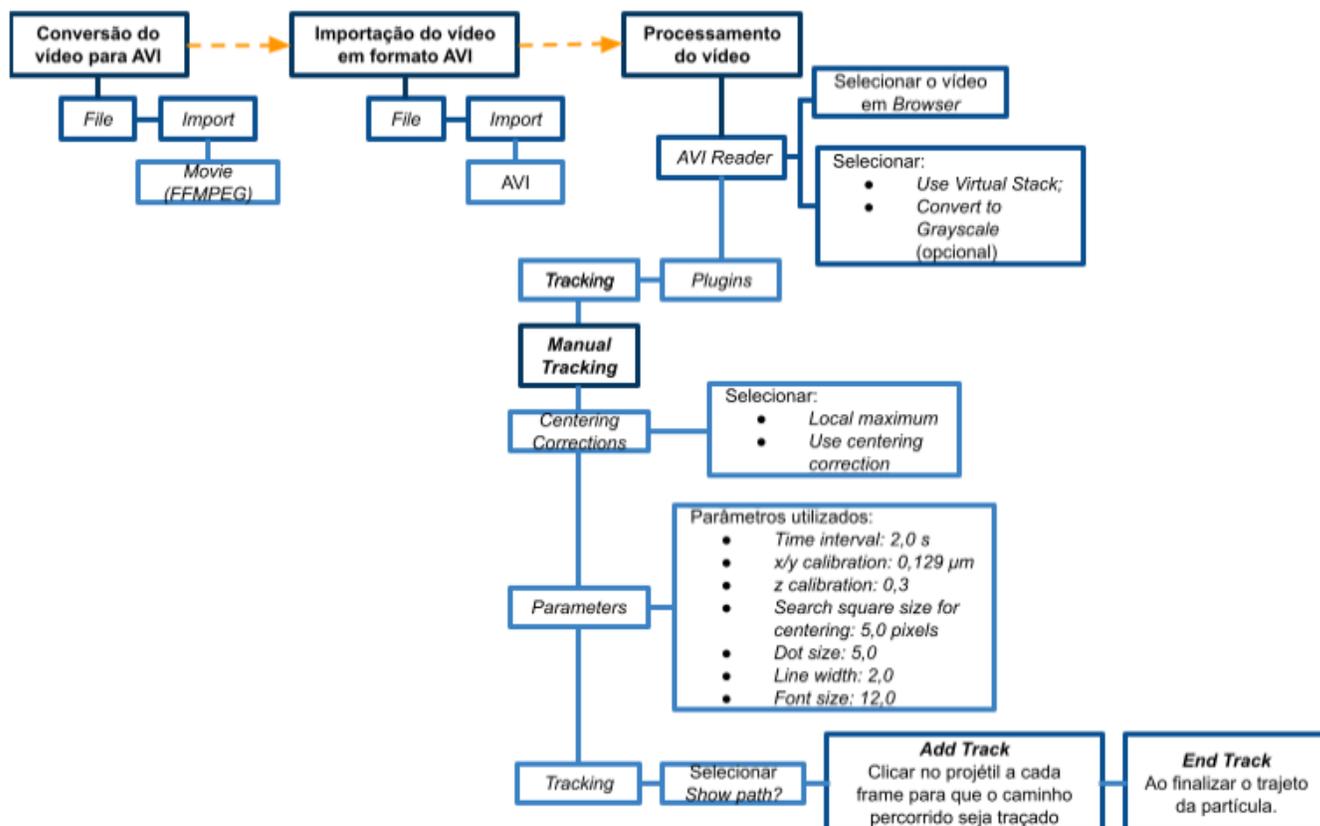


Figura 4.6. Fluxograma de processamento dos vídeos para aquisição dos trajetos das partículas.

Ao dar início ao processamento com *Add Track*, automaticamente uma tabela é aberta. Ao finalizar o processamento com *End Track*, a tabela para de receber dados. Para exportar os dados, deve-se clicar em *File > Save as* e escolher a pasta de salvamento.

Os vídeos de trajetória das partículas também foram salvos. Com a aba *Tracking* ainda aberta, são apresentadas formas de visualização da trajetória da partícula em *Drawing*. Essas visualizações podem ser através de pontos, linhas progressivas ou pontos e linhas com ou sem a sobreposição do vídeo. O salvamento do vídeo foi realizado em *File > Save As > AVI* e alocados em uma pasta com os outros dados.

4.5 AQUISIÇÃO DE DADOS DO MICRO-CT (μ CT) PARA AS AMOSTRAS SINTÉTICAS.

As amostras dos experimentos foram levadas para o Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados (LMCNano) (Fig. 4.7), para aquisição dos dados de micro tomografia de raio-X. O escaneamento das amostras foi realizado no *HeliScan MK1 micro-CT system (Thermo Fisher Scientific)*, equipado com tubo de microfoco, com transmissão máxima de 160 kV, corrente de 100 μ A, alvo de tungstênio e resolução de 3072 x 3072 px² com *pixels* de 139 μ m.

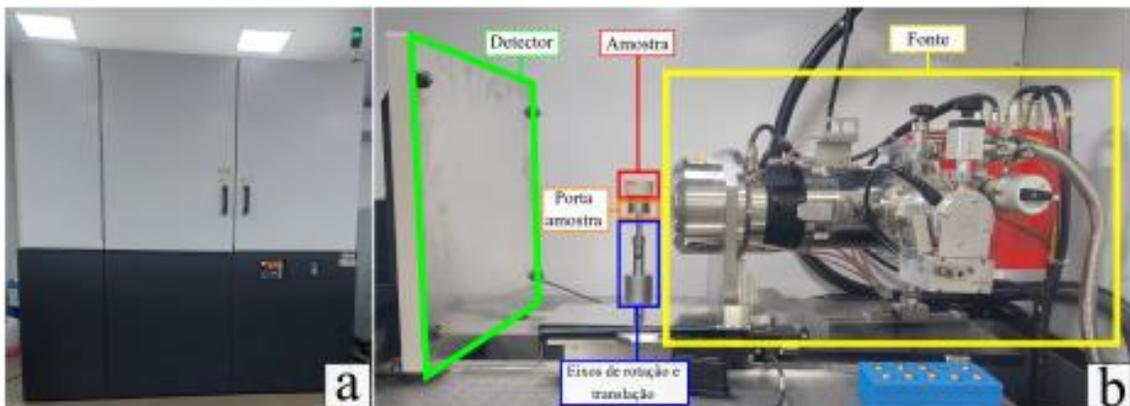


Figura 4.7. Fotografias do sistema de microtomografia. a) Microtomógrafo *HeliScan MK1 micro-CT system (Thermo Fisher Scientific)* do Laboratório de Materiais Cerâmicos e Nanoestruturados (LMCNano); (b) Interior do equipamento com detalhamento dos componentes do micro-CT.

Para a análise, foram escolhidas três amostras: D25V10, AS50V10 e ASG50V10. Todas foram resinadas, para melhor manuseamento durante a aquisição. Por terem sido colocadas em cilindros, para uma visualização homogênea das camadas da amostra, foi utilizada uma redundância de trajetória chamada *double-helix*. Para realização das aquisições, foram utilizados os parâmetros da tabela 3.2.

Tabela 4.3. Parâmetros de aquisição em micro-CT das amostras retiradas do experimento.

	D25V10	AS50V10	ASG50V10
Tempo de aquisição	4:10:56	4:20:38	3:58:50
Distância da câmera	459.7790 mm	459.9640 mm	459.4120 mm
Distância da amostra	64.6053 mm	66.6137 mm	66.6137 mm
Detector horizontal	-0.5119 mm	-0.3542 mm	-0.0181 mm
Detector vertical	2.6355 mm	2.6966 mm	2.6613 mm
Detector phi	-0.0167°	-0.0028°	-0.0244°
Detector teta	-0.0052°	-0.1248°	0.1847°
Detector psi	0.0000°	0.0000°	0.0000°
Tamanho do voxel	19.5314 um	20.1305 um	20.1547 um

4.6 AQUISIÇÃO DE DADOS DO MICRO-CT (μ CT) PARA A AMOSTRA DE CAMPO

A amostra analisada (Fig. 4.8), chamada de ABJ_A1 foi coletada no município de Bom Jardim de Goiás -GO, em afloramento da Formação Vila Maria, Ordoviciano da Bacia do Paraná.

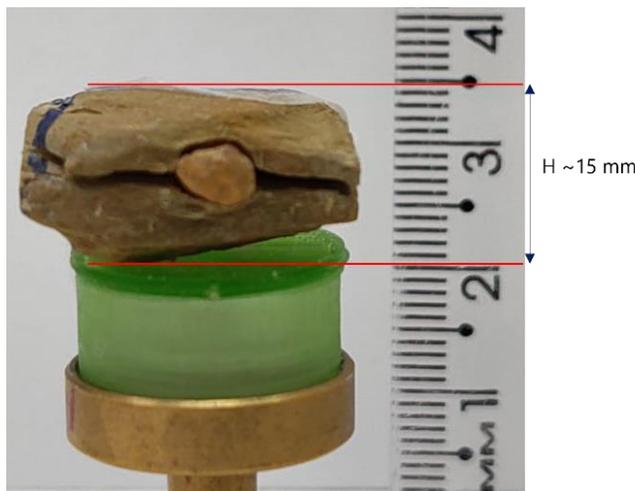


Figura 4.8. Amostra de campo colocada no suporte para aquisição dos dados de μ -CT.

A aquisição foi realizada no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas (LPFR) localizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Para aquisição, foi utilizado o Microtomógrafo *SkyScan 1172 (Bruker)* (Fig. 4.9).

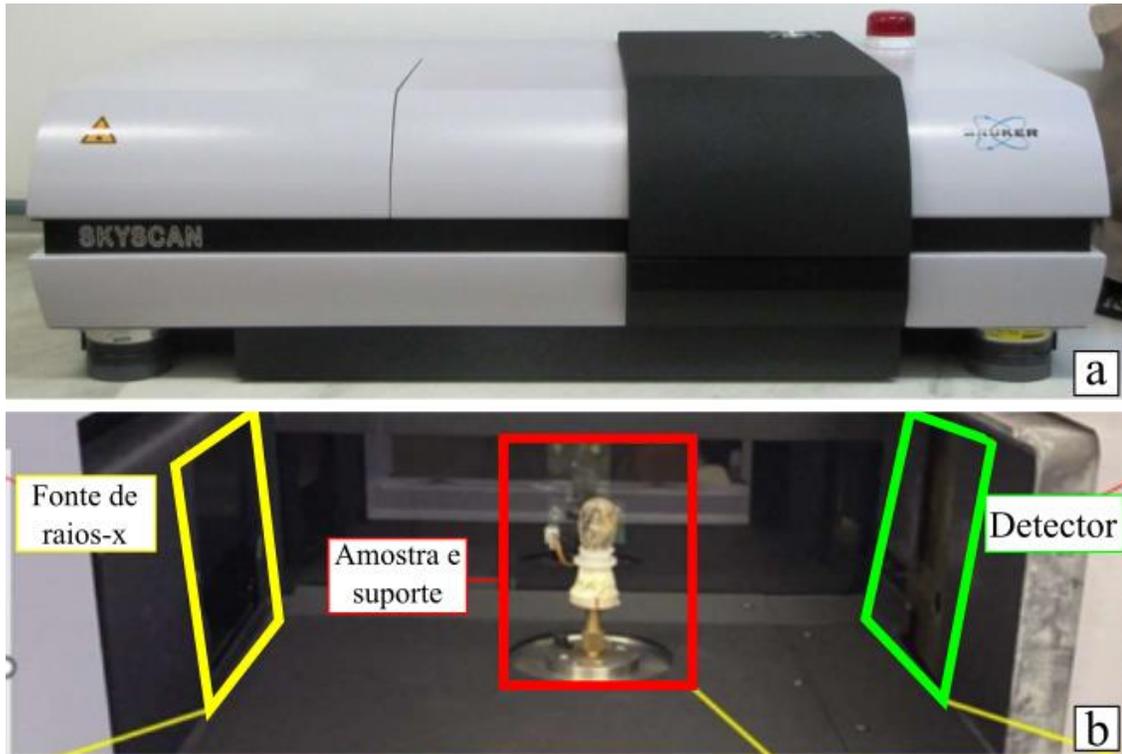


Figura 4.9. (a) Microtomógrafo *SkyScan 1172 (Bruker)* no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas (LPFR). (b) Interior do equipamento com detalhamento das componentes do microtomógrafo.

Os parâmetros de aquisição (Tabela 4.4) foram selecionados de acordo com o tamanho da amostra e o objeto a ser detectado dentro da amostra.

Tabela 4.4. Parâmetros de aquisição em μ -CT para a amostra de campo.

Parâmetros de aquisição	Valores obtidos da amostra ABJ_A1
Tempo de aquisição	5:11:00
Número de imagens	1802
Voltagem da fonte	100 kV
Corrente de fonte	100 μ A
Tamanho do pixel da imagem	5.43 μ m
Posição vertical do objeto	42.300 mm
Filtro	Al + Cu

Exposição	2050 ms
Passos de rotação	0.200°
Média de frames	3
Rotação de 360°	SIM
Correção de campo plano	SIM

Para melhorar o processamento a amostra, foi necessário fazer uma reamostragem (*resize*) de 2:1 nos bancos de dados da amostra, isto é, dobrar o tamanho do pixel da imagem, para assim realizar o processamento e a análise. Os parâmetros de *resize* podem ser vistos na tabela 3.4.

Tabela 4.5. Parâmetros de reconstrução da amostra em μ -CT.

Parâmetros de reconstrução	Valores obtidos da amostra ABJ_A1
Tempo de reconstrução	13:10:02
Tamanho de pixel da imagem em escala	10.87 μ m
Primeira seção	60
Última seção	1280
Número de seções	1221
Faixa Angular de Reconstrução	360°
Ângulo do passo	0.2000°
Suavização	2
Suavização de kernel	2 (Gaussiana)
Correção de artefato de anel	8

5 RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho foram divididos de acordo com os tipos de análises feita, considerando as diferentes propriedades físicas da água. Primeiramente, na seção 5.1, são apresentados os resultados das argilas feitas com análise de difratometria de raio-X. Já na seção 5.2 são apresentados os dados de trajetória das partículas para as condições de água doce, água salgada e água salgada com adição de gelo. Na seção 5.3, para as mesmas condições, são apresentados os dados de análise de velocidade das partículas para os três tipos de condições da água. Em seguida, na seção 5.4 são apresentados os resultados obtidos por análise de microtomografia de raio-X (μ -CT) das amostras obtidas após o experimento em laboratório. Por último, são apresentados os dados obtidos da aquisição de μ -CT para uma amostra de dropstones coletadas na Formação Vila Maria.

5.1 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Duas amostras foram analisadas de argila, como citadas na seção 3.2 deste trabalho:

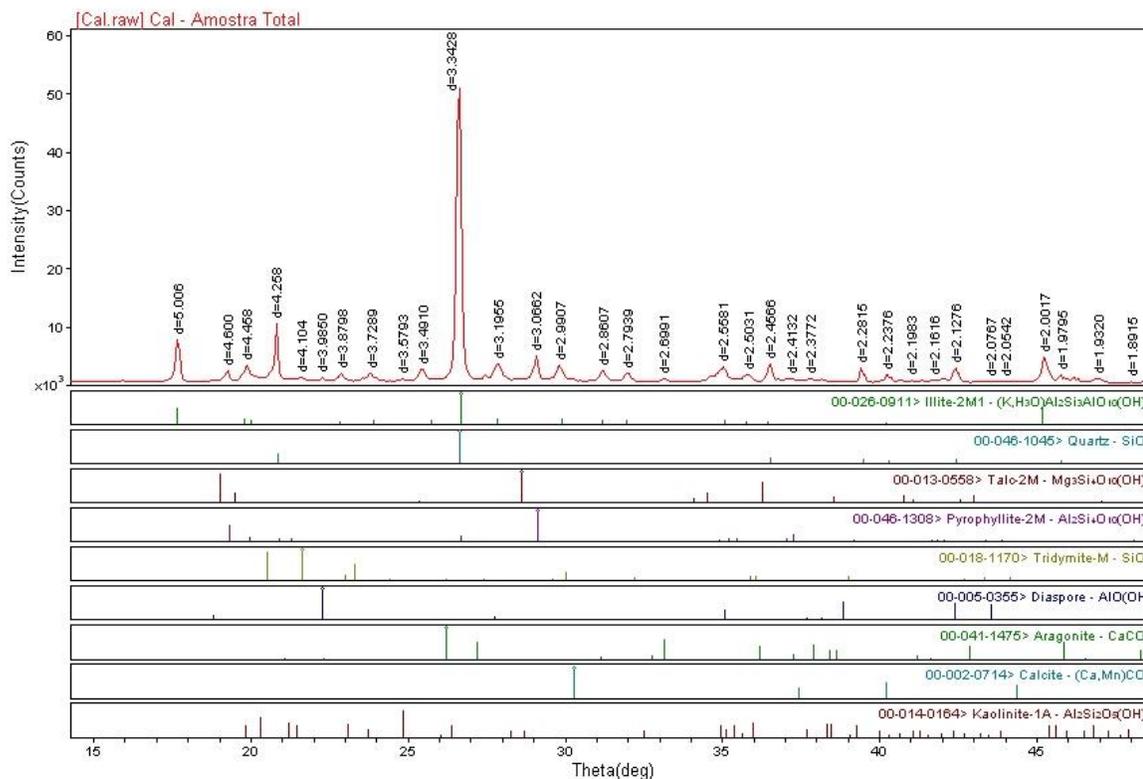
5.1.1 Amostra 1

Após a análise de DRX, amostra 1 (identificada inicialmente como caulim), apresenta a seguinte composição dada na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Resultado da análise dos minerais presentes na amostra 1

Mineral	Porcentagem
Illita	60%
Quartzo	35%
Talco	4%
Outros minerais (aragonita, calcita, caulinita)	1%

A figura 5.1, obtida como resultado das análises realizadas no LDRX, reforçam a determinação dos minerais principais e acessórios da amostra.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Monday, February 05, 2024 04:27p (MDI/JADEB)

Figura 5.1. Gráfico da contagem total dos minerais presentes na Amostra 1 obtidos por difratometria de raio-X.

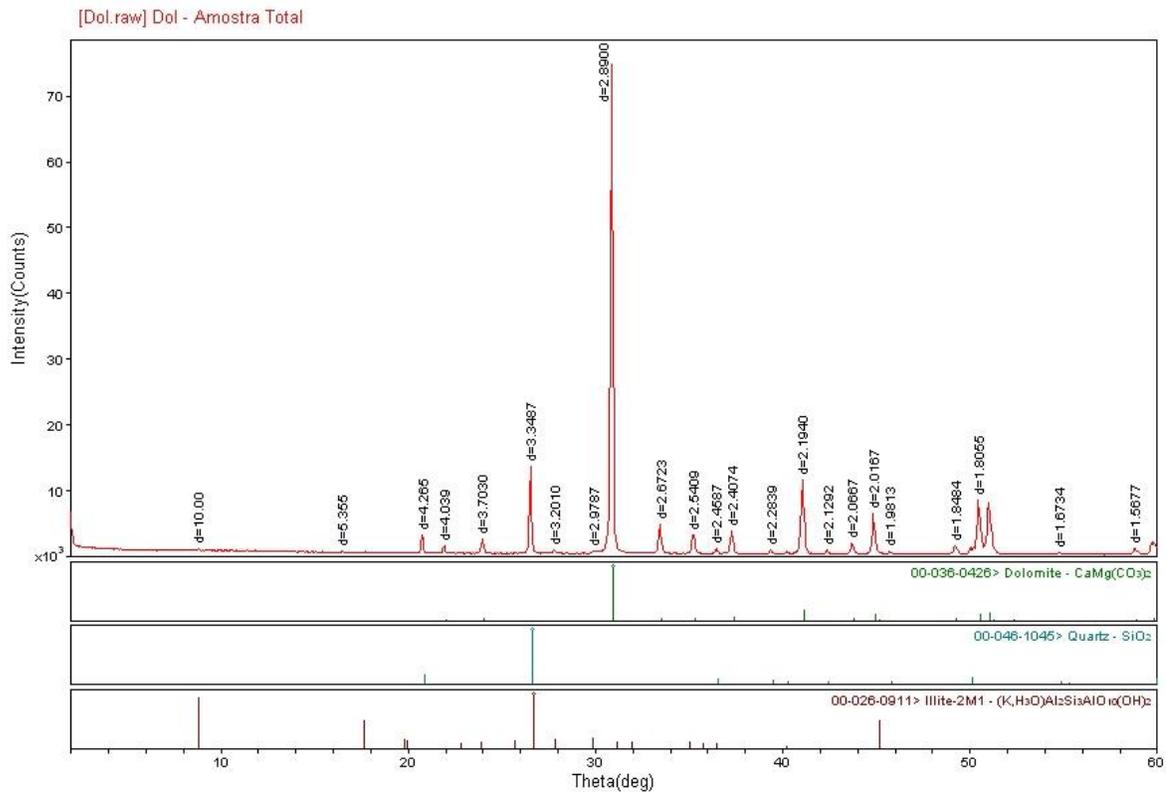
5.1.2 Amostra 2

Após a análise de DRX, a amostra 2 (identificada inicialmente como caulim), apresenta a seguinte composição:

Tabela 5.2. Resultado da análise dos minerais presentes na amostra 2.

Mineral	Porcentagem
Dolomita	90%
Quartzo	9%

Na figura 5.2, há novamente o gráfico dos resultados obtidos no LDRX, com a determinação dos materiais que compõem a amostra.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Monday, February 05, 2024 04:02p (MDI/JADE9)

Figura 5.2. Gráfico da contagem total dos minerais presentes na Amostra 2 obtidos por difratometria de raio-X.

5.2 ANÁLISE DE TRAJETÓRIA DA PARTÍCULA

Para visualizar a percurso de cada partícula, foi realizada a análise de trajetória de cada uma delas para os três ambientes aquáticos distintos. A seguir, são apresentados os resultados desta análise.

5.2.1 Trajetória em Água Doce

Abaixo são apresentados os resultados da análise de trajetória das partículas em água doce para 25 cm de coluna d'água. Para simulação de ambientes lacustres restritos, foram realizados três experimentos variando o tipo e tamanho do material. A figura 5.3 apresenta a trajetória das chumbadas para essa espessura de lâmina d'água.

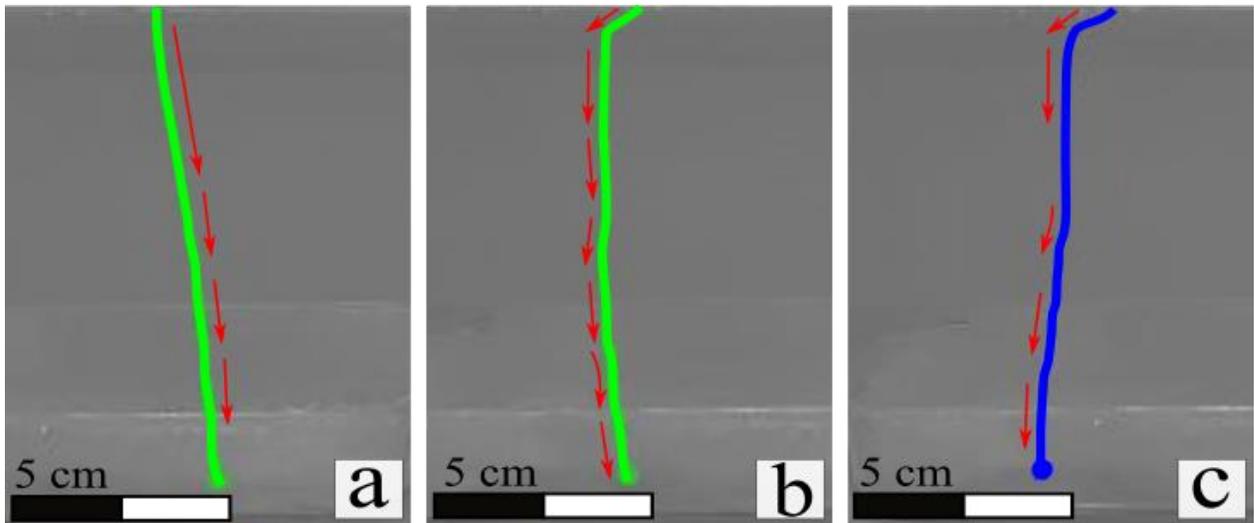


Figura 5.3. Fotos indicando as trajetórias das chumbadas em 25 cm de lâmina d'água para água doce

Para os três lançamentos, há desvios de trajetória da chumbada com leve inclinação para sudeste (*a*) e sudoeste (*b*, *c*). As figuras *b* e *c* apresentam desvios no começo da trajetória, diferenciando da figura *a*. Os três lançamentos apresentam ângulo de desvio de trajetória de h_0 (ponto inicial) à h_1 (ponto final) menor que 10° , sendo 5.47° para a figura *a*, 1.51° para a figura *b* e 9.1° para a figura *c*.

A figura 5.4 apresenta os resultados de trajetória das esferas de vidro de 5 mm. Novamente, é possível observar um desvio de trajetória da partícula com desvio para a esquerda (*a*, *b*) e para a direita (*c*). Os três lançamentos apresentam ângulo de desvio de trajetória das partículas menores que 5° de h_0 a h_1 , sendo 3.79° para a figura *a*, 2.42° para a figura *b* e 1.85° para a figura *c*.

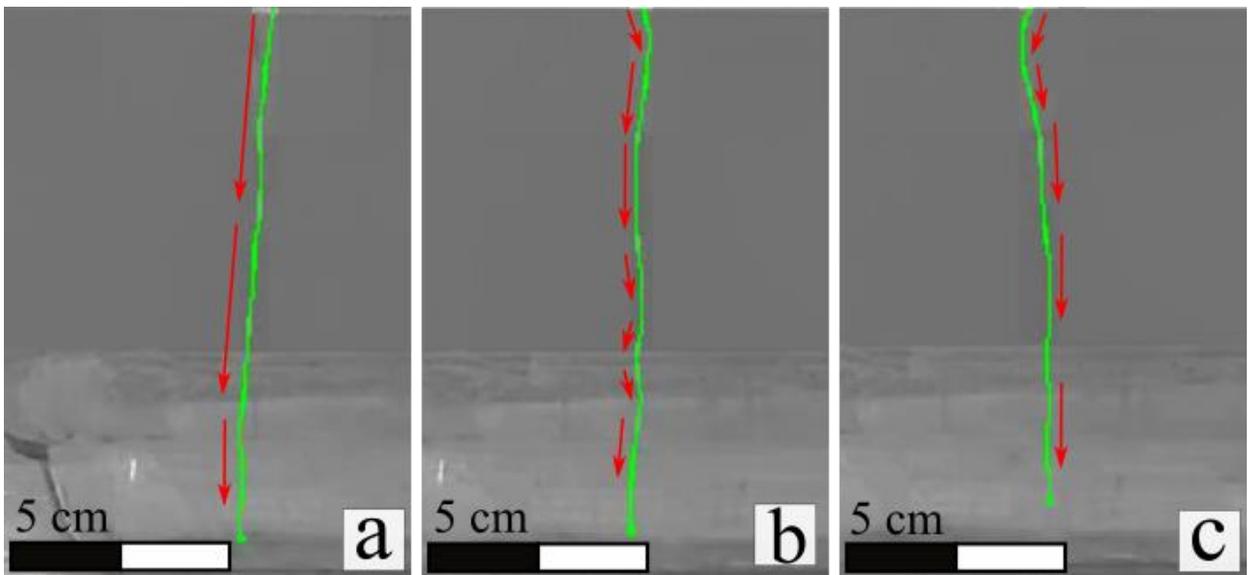


Figura 5.4. Fotos indicando as trajetórias das esferas de vidro de 5 mm em 25 cm de lâmina d'água para água doce.

O último experimento dessa série é mostrado na figura 5.5 apresenta os resultados de trajetória para as esferas de vidro de 10 mm. Neste caso, há desvio de trajetória mais pronunciado para os três lançamentos das esferas de vidro, com inflexões nos primeiros 10 cm de trajetória da partícula. Para figura *a*, a esfera apresenta um desvio de 5.31° de h_0 a h_1 , para *b* temos um desvio de 6.60° e, para *c*, 13.61° .

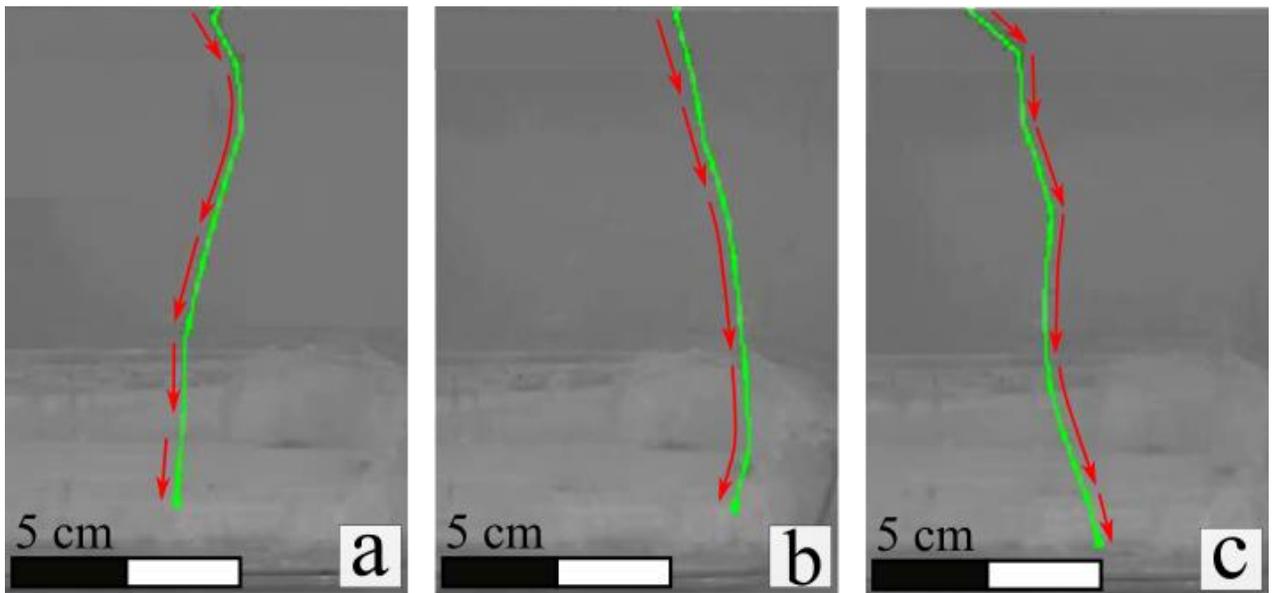


Figura 5.5. Fotos indicando as trajetórias das esferas de vidro de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para água doce.

5.2.2 Trajetória em Água Salgada

Para estudos relacionados a ambientes marinhos, os resultados apresentados a seguir foram obtidos através da análise de trajetória das esferas de vidro de 10 mm para as espessuras de coluna d'água de 25 cm (Fig. 5.6), para ambientes marinhos rasos marinhos mais profundos. As trajetórias variam de relativamente linear (*a*) para curvada (*b*), com três ou quatro inflexões de direção, uma próxima de 1 cm, outra em 5 cm, uma próxima 8 cm e uma em 9 cm, mais evidenciada na trajetória curva,

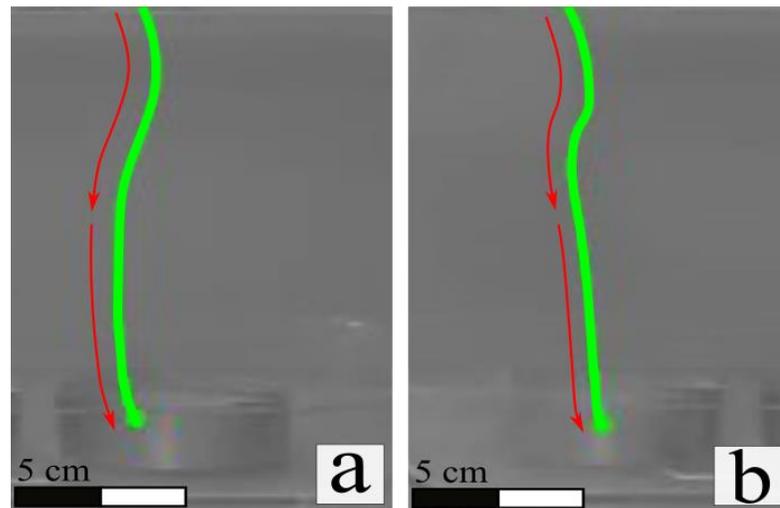


Figura 5.6. Fotos indicando as trajetórias das esferas de vidro de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para água salgada.

Foi realizado também a análise de trajetória das esferas de vidro de 10 mm para as espessuras de coluna d'água de 50 cm (Fig. 5.7) com três repetições. Nesse caso, as trajetórias foram mais lineares com duas ligeiras inflexões de direção próximas a 20 cm e 30 cm. Para este caso, o desvio de trajetória de h_0 a h_1 é de 2.92° para a figura *a*, 3.45° para a figura *b* e 3.37° para a figura *c*.

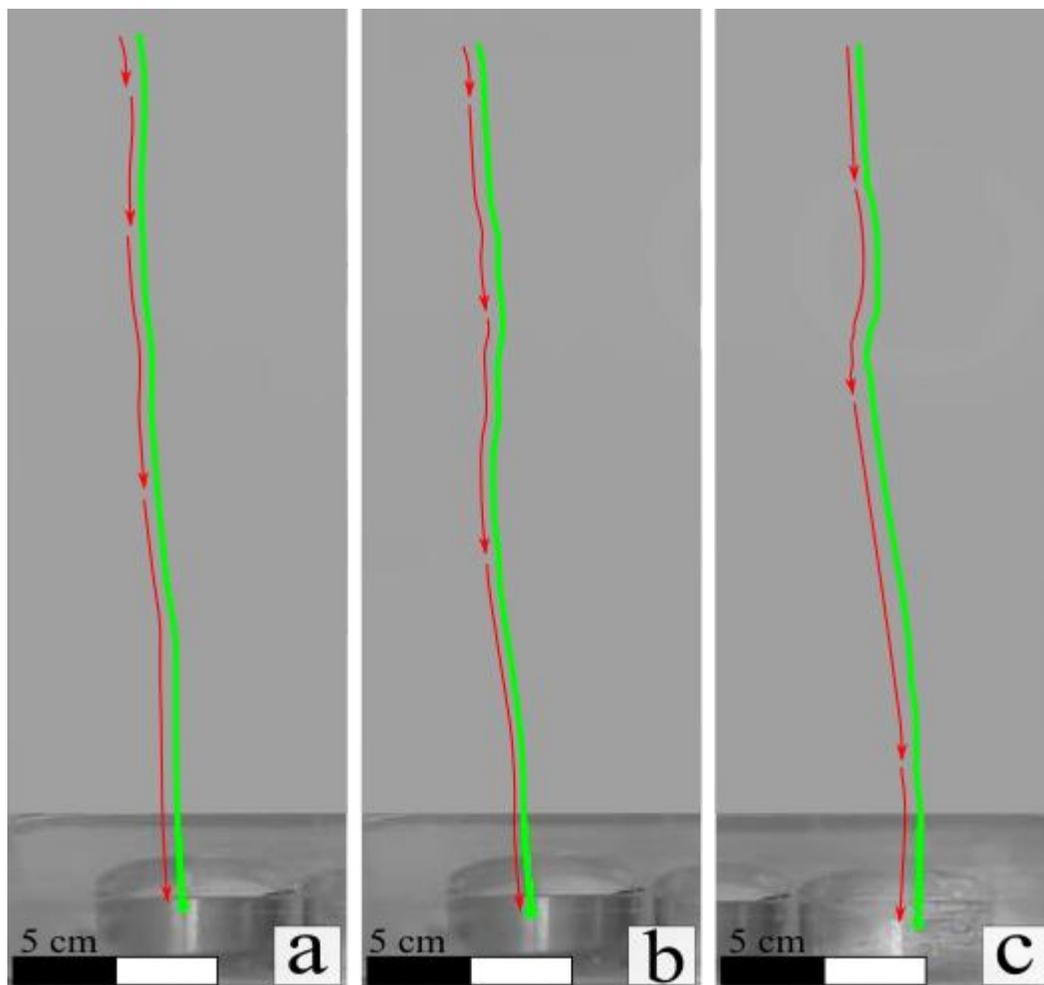


Figura 5.7. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em 50 cm de lâmina d'água para água salgada.

5.2.3 Trajetória em Água Salgada com Gelo

Para a simulação de trajetória de clastos em ambientes marinhos próximos à geleiras, foram realizadas análises de trajetória das partículas para as espessuras de coluna d'água de 25 cm (Fig 5.8.a) e 50 cm (Fig. 5.9.b). Novamente, as duas alturas foram escolhidas visando a simulação em ambientes marinhos rasos e profundos, respectivamente.

Nas as duas espessuras de lâmina d'água, notam-se inflexões durante a trajetória, porém estas são mais evidentes para a espessura de 25 cm, apresentando uma inflexão à altura de 5cm e uma próxima a 18 cm. Para esta altura, o desvio de trajetória de h_0 a h_1 é de 5.39° .

No caso da espessura de lâmina d'água de 50cm, observa-se pequenos desvios de trajetória ao longo do percurso percorrido pela partícula, com um desvio maior por volta da altura de 12 cm. Para este ambiente, a partícula apresenta um desvio de 1.96° de h_0 a h_1 .

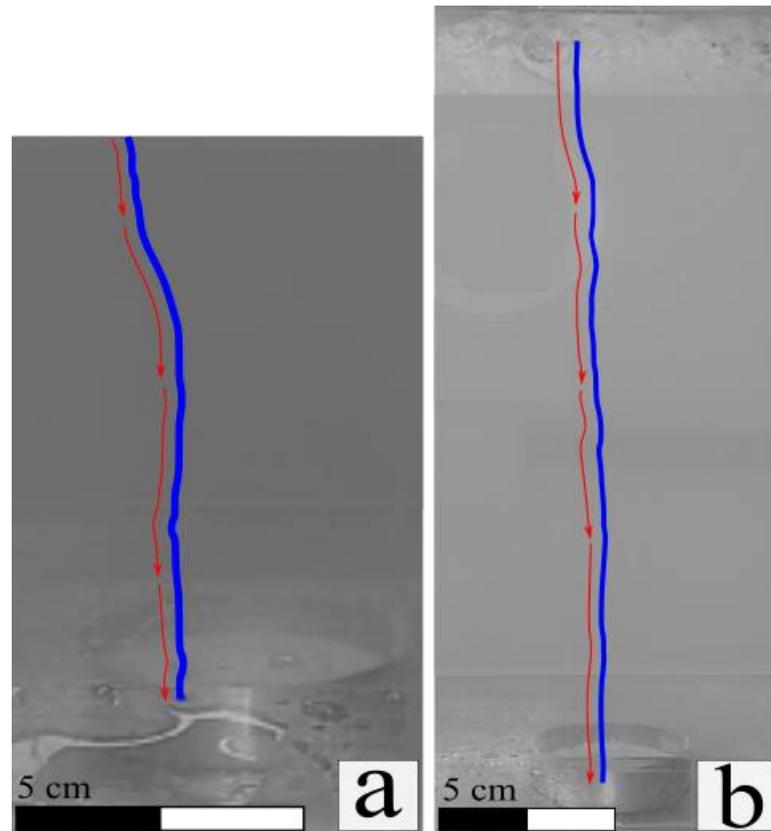


Figura 5.8. Resultados de trajetória das esferas de vidro de 10 mm em (a) 25 cm de lâmina d'água para água salgada e (b) 50 cm.

5.3 ANÁLISE DE VELOCIDADE DA PARTÍCULA

As análises de velocidade da partícula foram realizadas a partir da equação de Stokes para fluxo laminar de um fluido Newtoniano (Eq. 4.1).

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{r^2(\rho_p - \rho_w)g}{\mu}, \quad (4.1)$$

onde r é o raio da partícula (seja a chumbada ou a esfera de vidro), ρ_p é a densidade da partícula, ρ_w é a densidade (para água com sal, utilizamos ρ_{sw}), g é o valor de $9,81 \text{ m/s}^2$, e μ é a viscosidade da água (para água com sal, utilizamos μ_{sw}). Para a obtenção do tempo de trajetória

da partícula no meio, foi utilizada a aplicação da fórmula de velocidade média (Eq. 4.2), levando em consideração que a partícula atinge o fundo com uma velocidade terminal (v_t) e esta é mantida ao longo da trajetória vertical enquanto percorre a distância d .

$$t = \frac{d}{v_t}, \quad (4.2)$$

Foram realizados também os cálculos para o número de Reynolds para cada partícula através da fórmula:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}, \quad (4.3)$$

Onde ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade terminal da esfera, D é o diâmetro da esfera e μ é a viscosidade dinâmica da água (este valor varia de acordo com a temperatura e a quantidade de sais dissolvidos na água)

Os resultados obtidos após os cálculos estão sumarizados na tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resultados para as análises de velocidade, tempo de trajetória e número de Reynolds para todas as espessuras de lâmina d'água e propriedades químicas da água.

Material da partícula	Propriedade da água	Espessura de Lâmina d'água (cm)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_w (kg/m ³)	μ (kg/m.s)	Velocidade da Partícula (v_t) (m/s)	Tempo de trajetória (t) (s)	Re
Chumbada (10 mm)	Doce	25	11340	1000	0.00089	563	0.00044	5635300
Esfera de vidro (5 mm)	Doce	25	2500	1000	0.00089	20.44	0.012	10278
Esfera de vidro (10 mm)	Doce	25	2500	1000	0.00089	81,75	0.0031	817500
Esfera de vidro (10 mm)	Salgada	25	2500	1025	0.0011	80.39	0.0031	823971
Esfera de vidro (10 mm)	Salgada	50	2500	1025	0.0011	80.39	0.0062	823971

Esfera de vidro (10 mm)	Salgada + gelo	25	2500	1026	0.00115	79.02	0.0028	838751
Esfera de vidro (10 mm)	Salgada + gelo	50	2500	1026	0.00115	79.02	0.0056	838751

5.4 ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS-X (M-CT) DAS AMOSTRAS SINTÉTICAS

As amostras levadas para análise de μ -CT foram separadas de acordo com a espessura de coluna d'água e a mudança de propriedades físicas da água. Para as dezessete execuções do experimento em sete condições diferentes, foram escolhidas quatro amostras para análise de μ -CT, sendo elas as amostras D25V10, ASG50V10 e AS50V10.

5.4.1 Água doce

Amostra D25V10

Como produtos da análise de micro tomografia de raio-X, foram escolhidas cinco seções, que chamaremos de *slices*, para análises de ângulos de deformação, estes que discutiremos no capítulo a seguir. A primeira amostra a ser analisada trata-se do corpo de prova utilizado para 25 cm de água doce, sendo presente em seu interior a esfera de vidro de 10 mm. A figura 5.10 apresenta os resultados dos cinco *slices* escolhidos para serem feitas as análises de deformação e representam os eixos XZ e YZ de aquisição, respectivamente.

Para a amostra D25V10, as análises foram realizadas nas direções dos eixos XZ e YZ (Fig. 4.9). As regiões de análise foram escolhidas por representarem:

- a. Primeira deformação da amostra na borda da esfera;
- b. Deformação intermediária entre a borda inicial e o meio da amostra;
- c. Corte da deformação no centro da amostra;
- d. Deformação intermediária entre a borda inicial e o meio da amostra;
- e. Última deformação da amostra na borda da esfera.

Esta escolha de *slices* foi aplicada a todas as outras imagens de microtomografia de raios-x do experimento para análise das amostras sintéticas.

Com as figuras adquiridas através da aquisição dos dados, foram extraídos os ângulos de deformação de cada camada para cada um dos cinco *slices* escolhidos (Fig. 5.9).

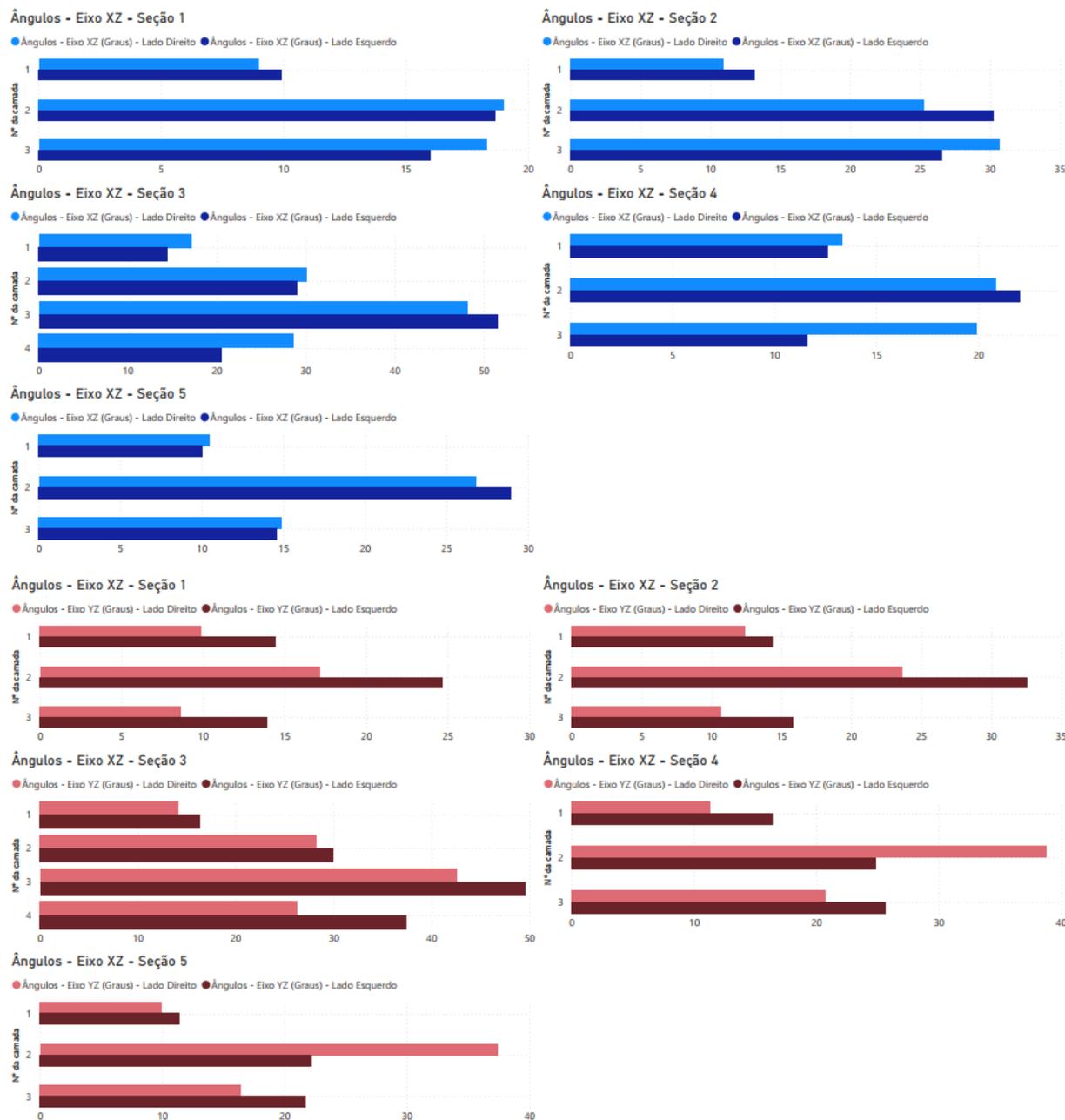


Figura 5.9. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra D25V10.

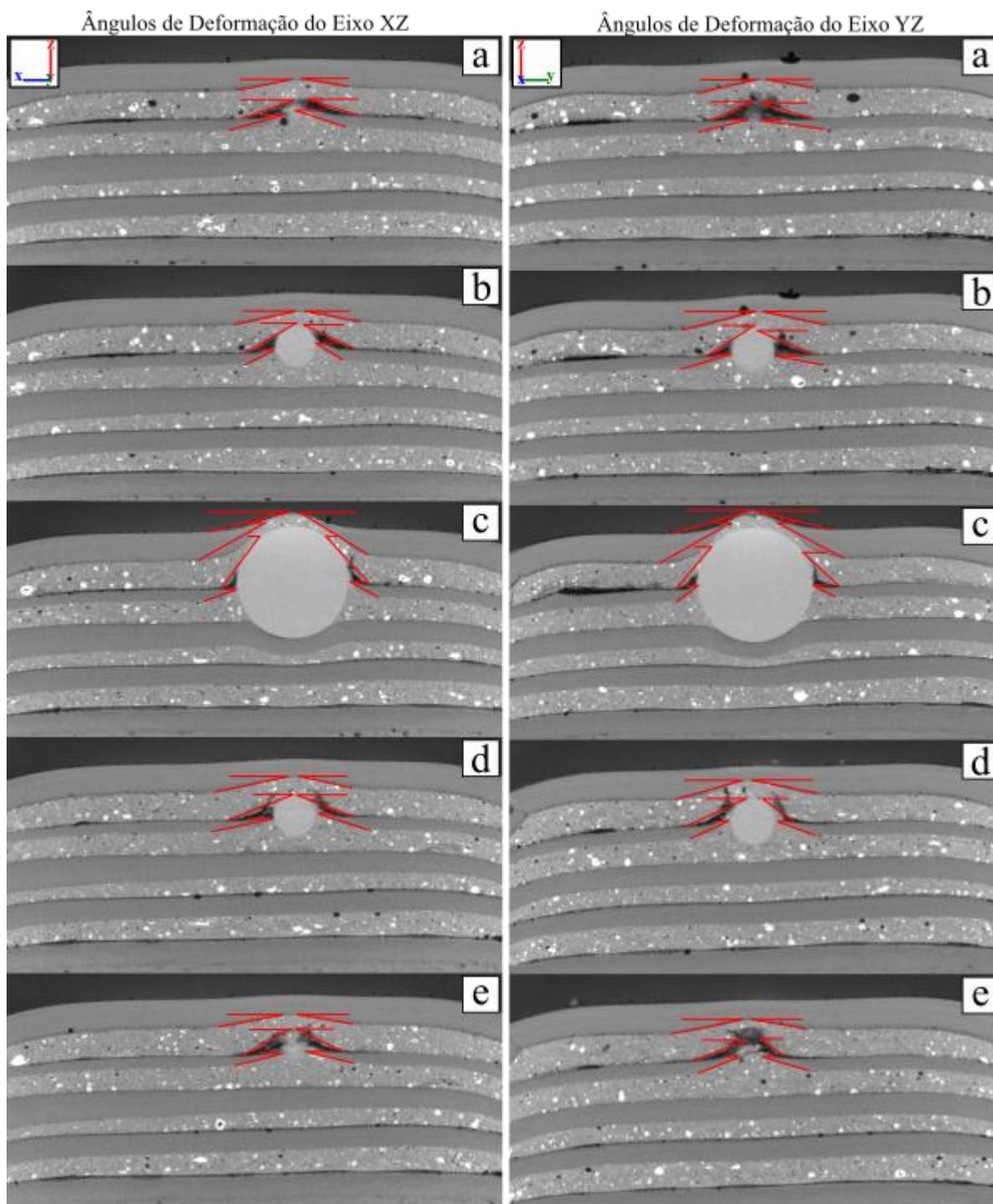


Figura 5.10. Imagens de tomografia de Raios-X e análise dos ângulos de deformação da amostra D25V10 para os 5 *slices*.

5.4.2 Água salgada

Amostra AS50V10

Para a amostra AS50V10, as análises foram realizadas nas direções dos eixos XZ e YZ (Fig. 5.12). Com as figuras adquiridas através da aquisição dos dados, foram extraídos os ângulos de deformação de cada camada para cada um dos cinco *slices* escolhidos (Tab. 5.11).

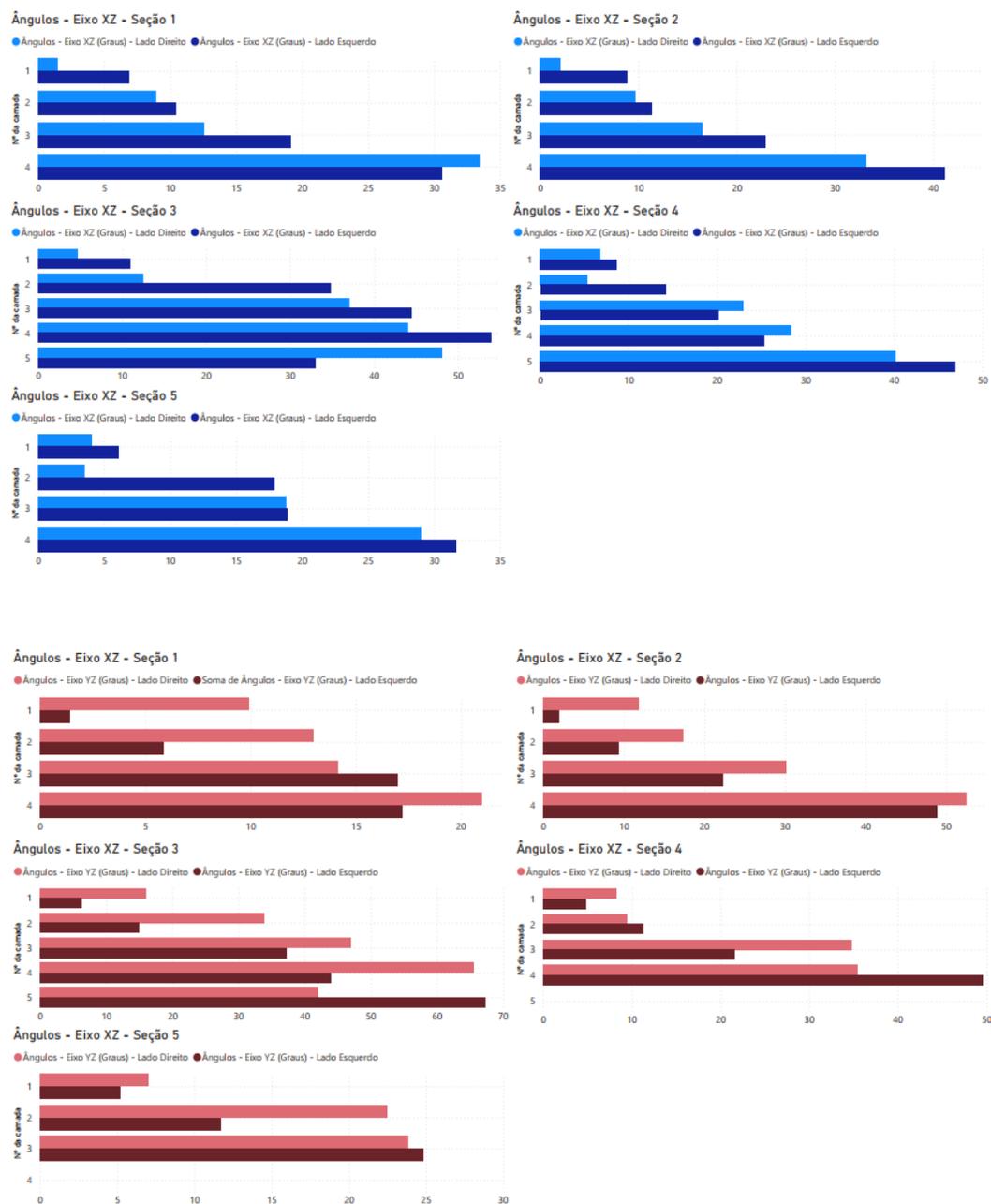


Tabela 5.11. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra AS50V10.

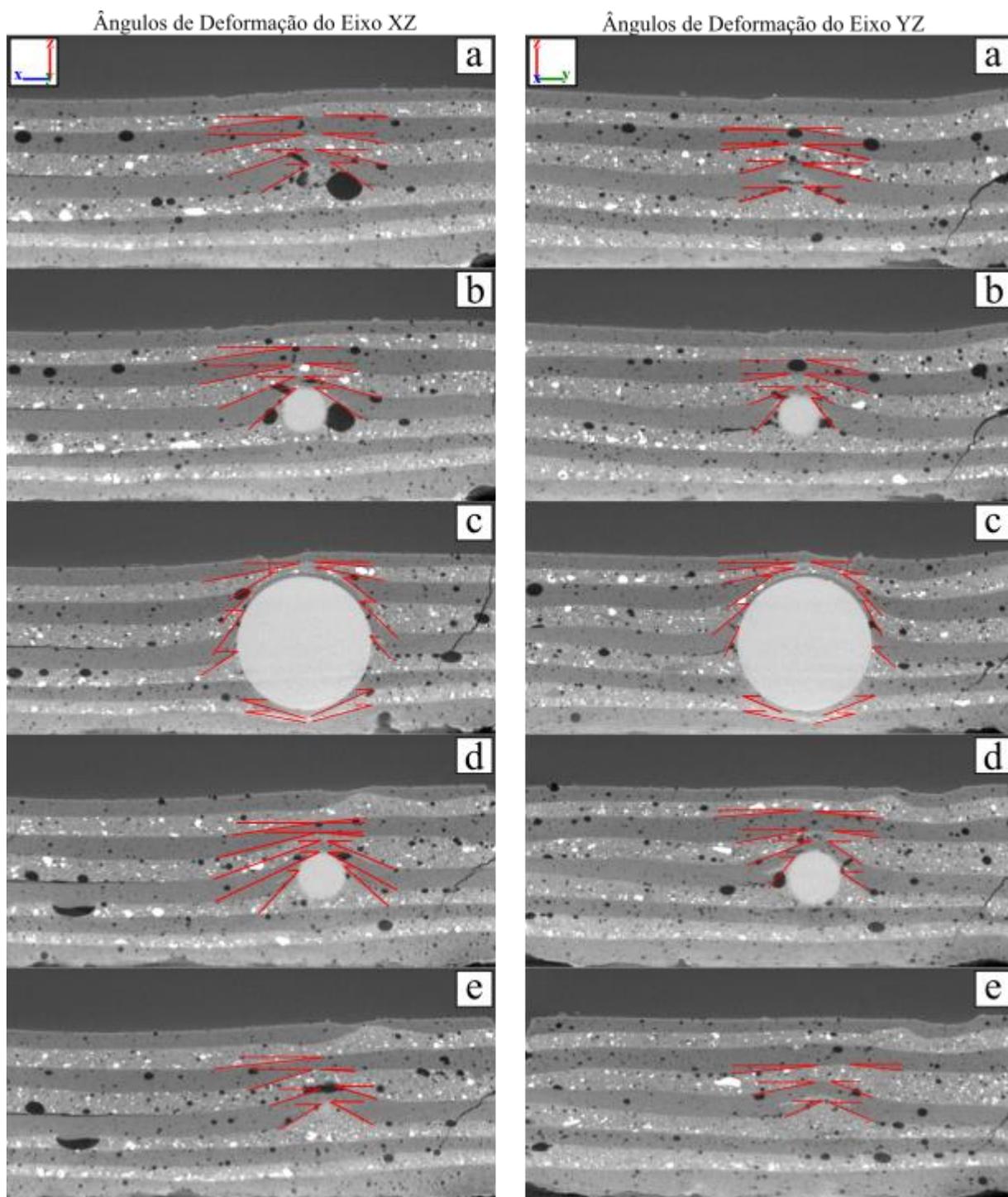


Figura 5.12. Imagens de tomografia de Raios-X e análise dos ângulos de deformação da amostra AS50V10 para os 5 *slices*.

Amostra ASG50V10

Para a amostra ASG50V10, as análises foram realizadas nas direções dos eixos XZ e YZ (Fig. 5.14). Com as figuras adquiridas através da aquisição dos dados, foram extraídos os ângulos de deformação de cada camada para cada um dos cinco *slices* escolhidos (Fig. 5.13).

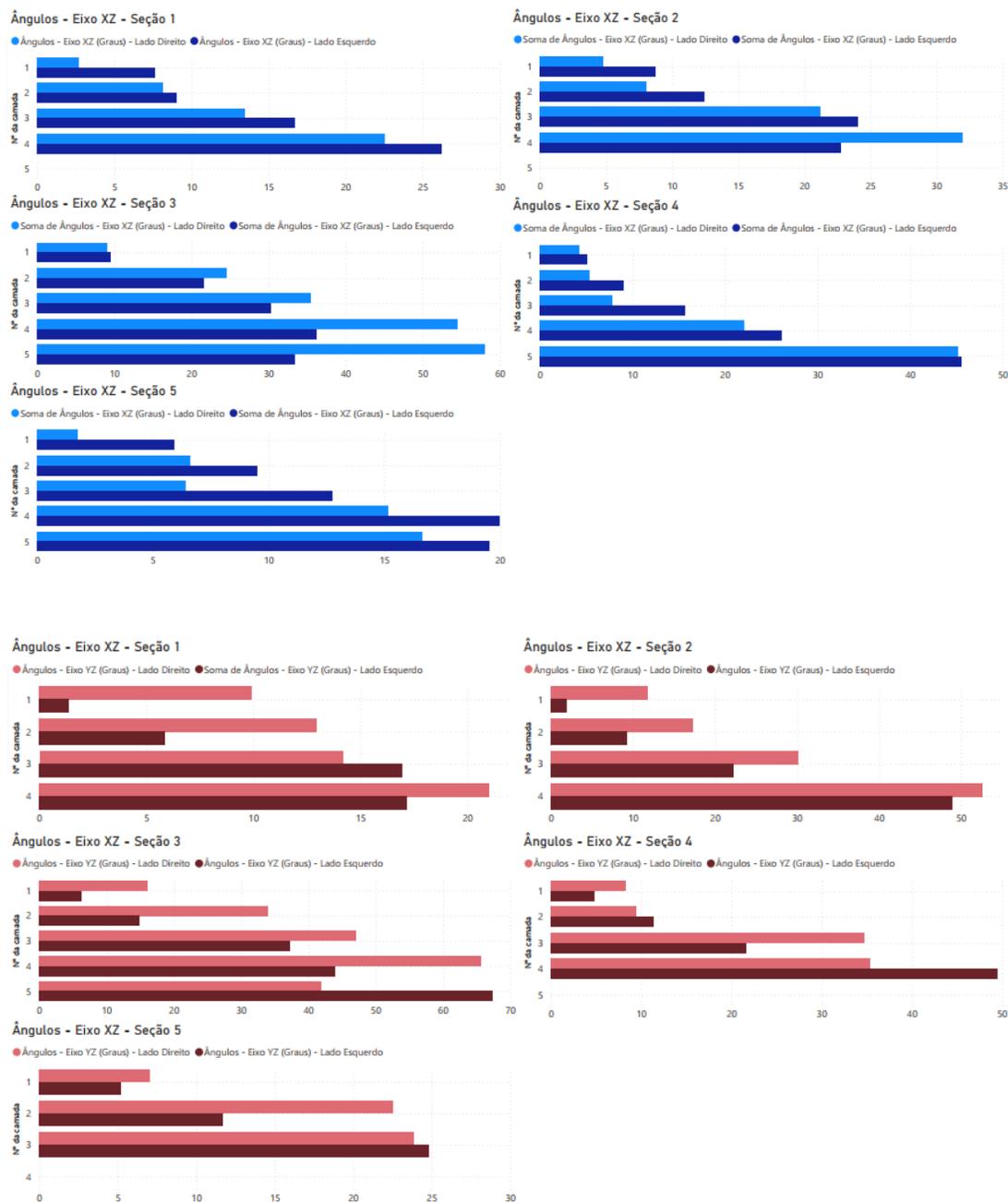


Tabela 5.13. Análise gráfica e comparação dos ângulos de deformação para a amostra ASG50V10.

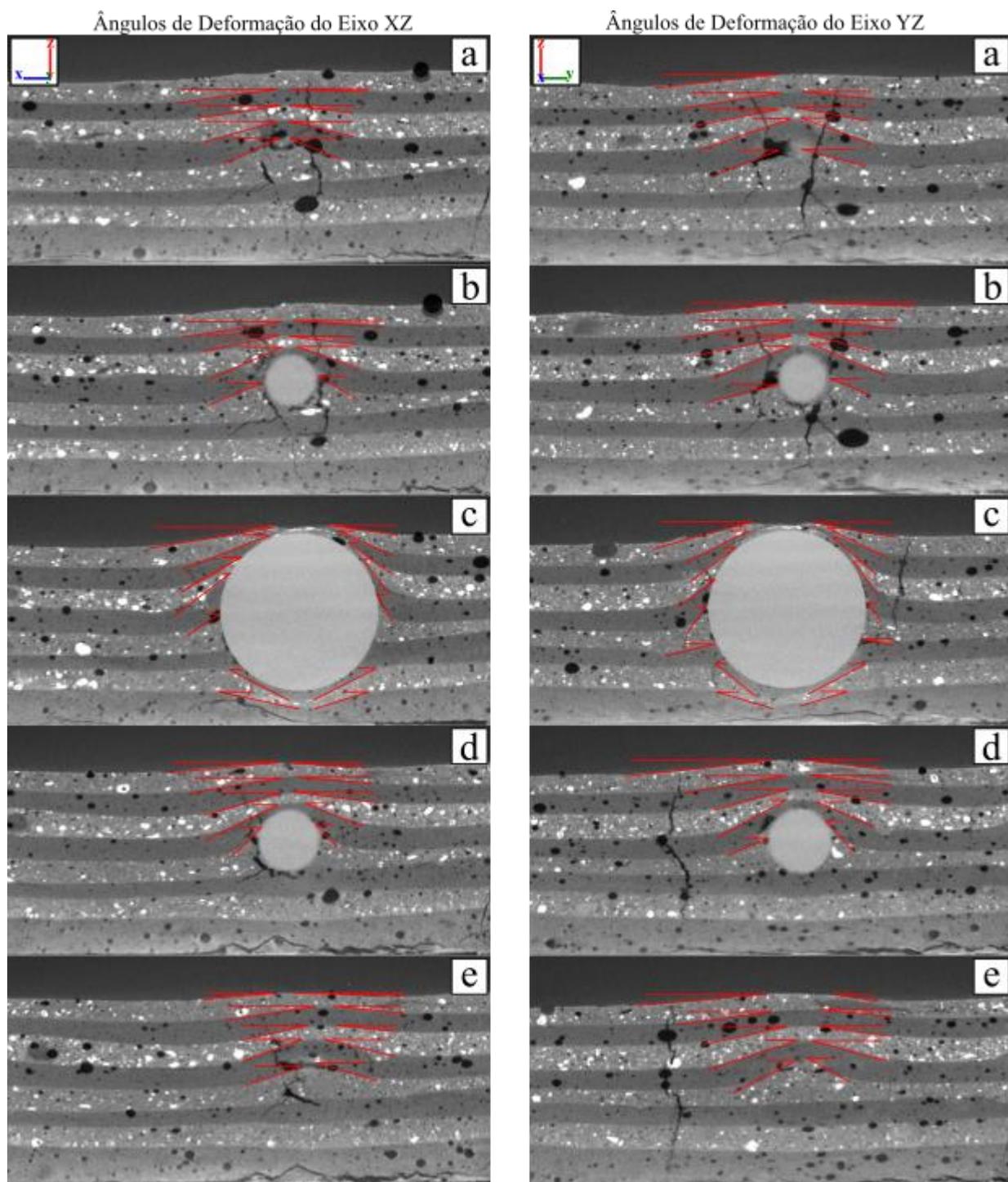


Figura 5.14. Imagens de tomografia de Raios-X e análise dos ângulos de deformação da amostra ASG50V10 para os 5 *slices*.

5.5 ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS-X (μ -CT) DA AMOSTRA DE CAMPO

Após análise da amostra utilizando μ -CT, foram obtidos resultados para o volume 3D calculado a partir da definição da Região de Interesse (*Region of Interest - ROI*) (Tab. 5.4) e a segmentação histográfica de cada classe da amostra (Fig. 5.15), o modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada do sólido (Fig. 5.16), o modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada atenuada (Fig. 5.17) e o modelo 3D do Volume de Interesse (*Volume of Interest - VOI*) a partir do ROI da amostra renderizada do sólido (Fig. 5.18).

O ROI (Tab. 5.4) se trata de uma área ou volume específico da amostra selecionado para análise mais detalhada das estruturas, como porosidade e materiais de densidades diferentes. Essa escolha é fundamental para focar nas partes da amostra que são relevantes para o estudo, e pode ser selecionada de forma manual ou automatizada. Para esta amostra, o ROI foi escolhido de forma manual.

Tabela 5.4 – Volume 3D calculado a partir da definição da Região de Interesse (ROI)

Classe	Amostra ABJ_A1
Classe 1 (Poros)	1.8%
Classe 2 (Seixos e Material da Matriz 1)	19.8%
Classe 3 (Matriz 2)	78%
Classe 4 (Seixos com Faixas mais densas)	0.22%
Classe 5 (Grãos mais densos)	0.0087%
Total	99.83%

Após a seleção do ROI, há a classificação dos diferentes componentes da amostra. Esta separação gera a segmentação histográfica (Fig. 5.15) que é baseada na intensidade dos *voxels* obtidos nas imagens. Isso facilita a separação entre materiais e fases presentes na amostra, separando as regiões sólidas dos poros e, também, materiais de diferentes densidades. A partir do histograma de intensidade, é possível atribuir cada *voxel* a uma classe específica, permitindo uma melhor visualização da distribuição dos materiais.

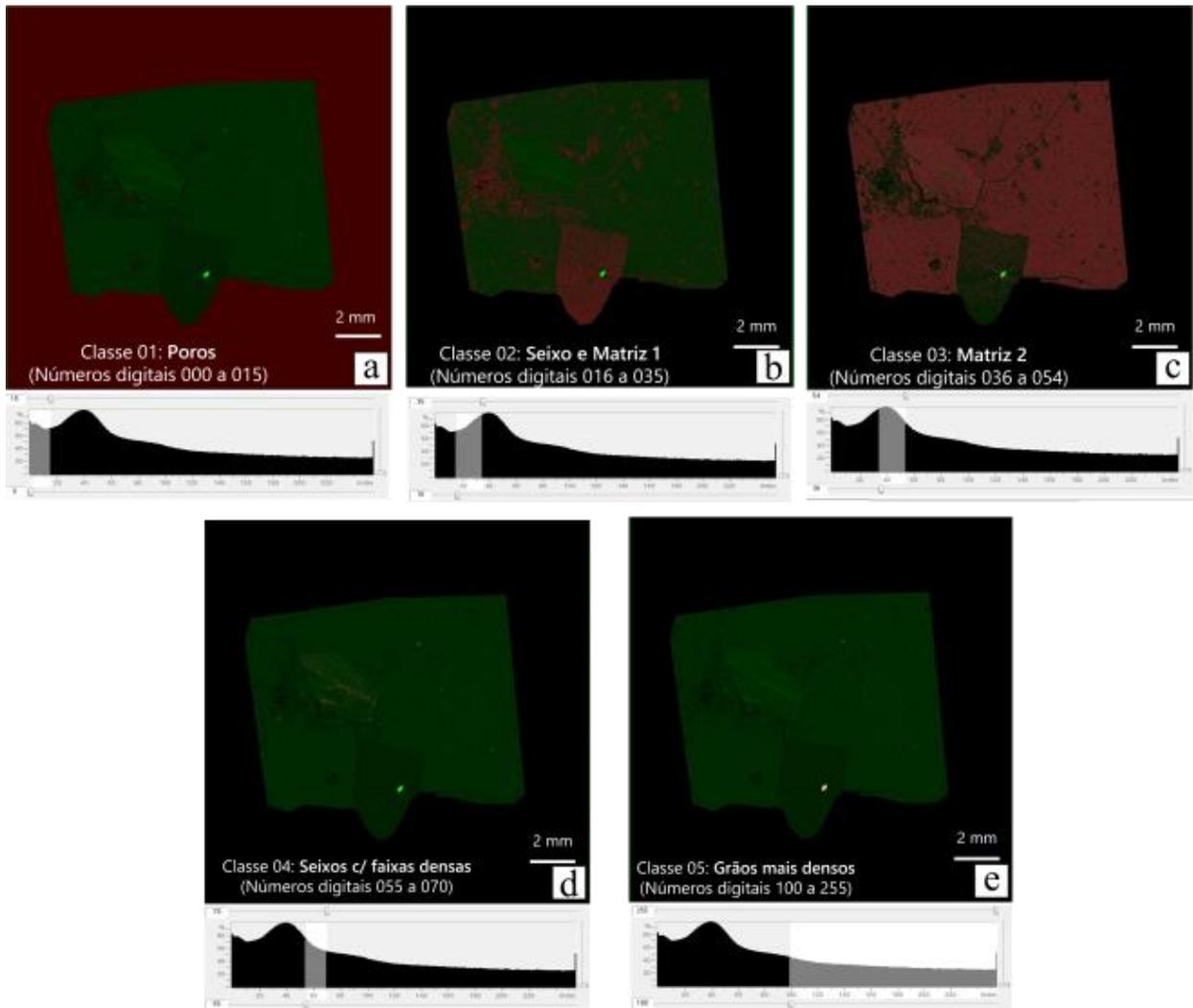


Figura 5.15. Representação histogrâmica da amostra, classificadas anteriormente (Tab 4.7); (a) Classe 1 – Poros; (b) Classe 2 – Seixos e Matriz; (c) Classe 3 – Matriz 2; (d) Classe 4 – Seixos com Faixas densas e; (e) Classe 5 – Grãos mais densos.

A partir do ROI, é feito um modelo volumétrico (Fig. 5.16). Este modelo é uma reconstrução tridimensional da região de interesse da amostra, gerada com base nos dados obtidos da aquisição de μ -CT. Para este caso, o modelo volumétrico da amostra foi observada de seis ângulos diferentes, permitindo uma cobertura total de todas as faces e uma análise quantitativa da microestrutura internas da amostra.

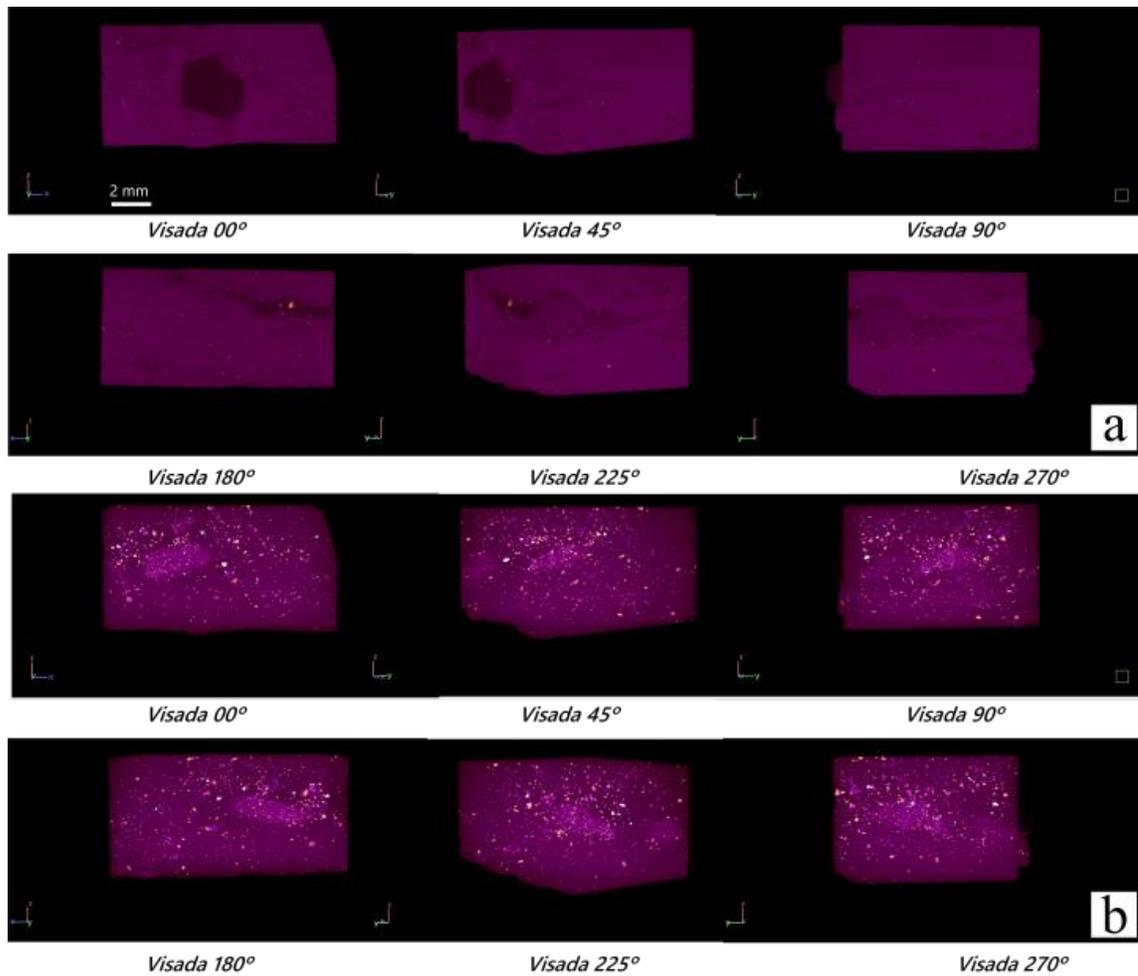


Figura 5.16. Modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada em diferentes visadas (a) Sólido e; (b) Realçado.

Por último, foi realizado mais um corte do ROI da amostra para uma visualização mais detalhada das estruturas deformacionais e dos poros da amostra, chamado VOI (Fig. 5.17). Ele permite focar em uma região de maior relevância na amostra, garantindo uma análise mais refinada de estruturas mais específicas. O VOI também pode ser visto de forma 3D, resultando em uma visualização completa da região de interesse da amostra em todas as direções (Fig. 5.18).

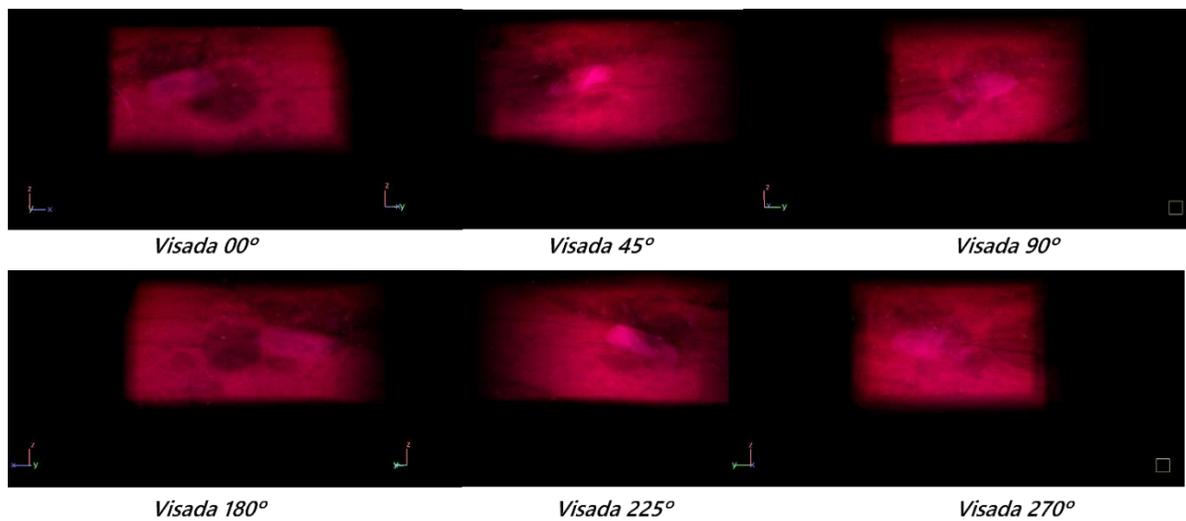


Figura 5.17. Modelo volumétrico do ROI da amostra renderizada atenuada.

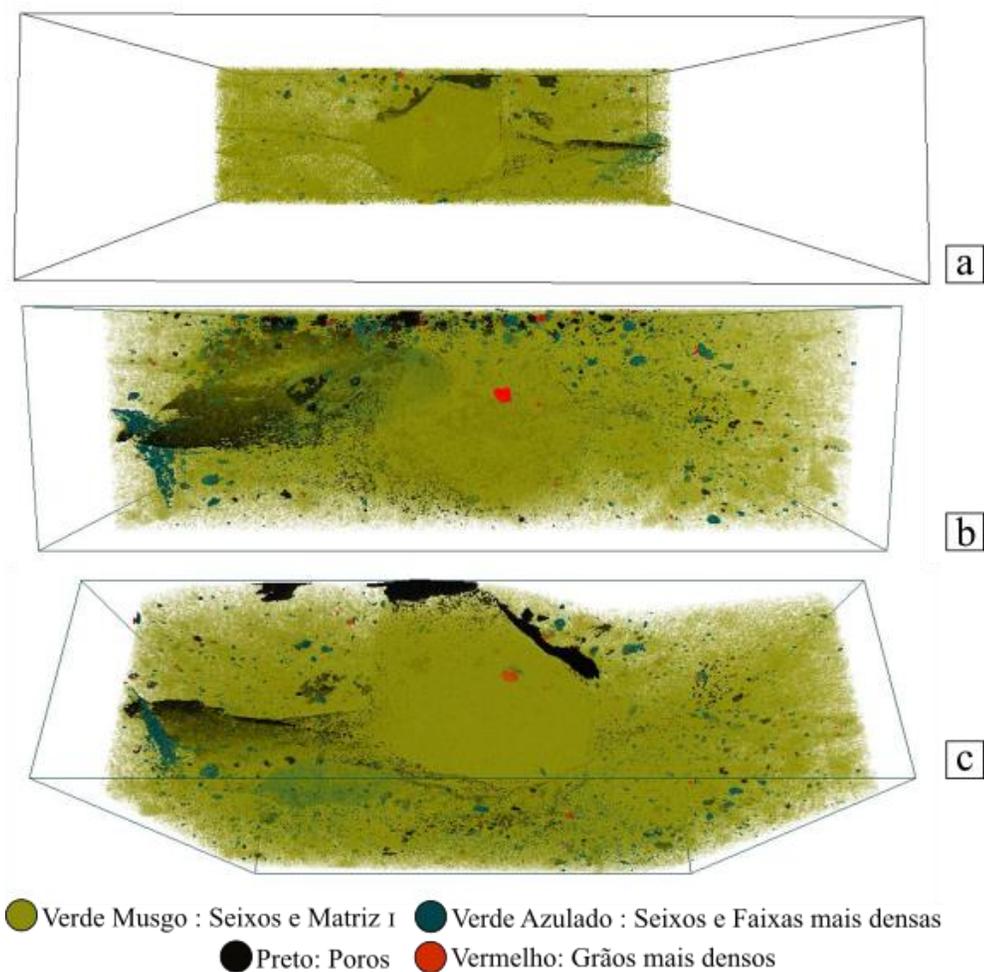


Figura 5.18 - Modelo 3D do Volume de Interesse (*Volume of Interest - VOI*) a partir do ROI da amostra renderizada do sólido; (a,b) Visada frontal e; (c) Visata topo-frontal.

6 DISCUSSÃO

6.1 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS CORPOS DE PROVA

A reologia é a ciência que se preocupa com a descrição do comportamento mecânico da matéria, ou seja, como um sólido se deforma, ou como um fluido flui, quando submetida a forças externas (Carroll & Starkey, 2013; Castro & Alegre, 2011). Na natureza, as misturas aparecem nos fluxos de lama, os quais são escoamentos decorrentes de deslizamento de encontro ou de enxurradas e também podem estar presentes nos rios, nos estuários e no mar. As propriedades reológicas resultam da transferência de quantidade de movimento das partículas. A intensidade dessas interações pode mudar com o tempo e com as características do fluxo, o que induz mudanças na resistência de escoamento.

Para este trabalho, foram feitas análises em DRX para conhecimento dos materiais utilizados para os corpos de prova que, posteriormente, foram deformados por esferas de vidro de 10 mm. O primeiro material argiloso, classificado como illita, foi utilizado nos corpos de prova de duas formas: 1) para ambientes lacustres e; 2) para ambientes marinhos. Por apresentar a fórmula química $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$, ao adicionarmos sal à mistura para simulação de um ambiente marinho, o magnésio (Mg^{2+}), presente na água do mar, desloca preferencialmente o sódio (Na^+) e o cálcio (Ca^{2+}) das posições de troca dos minerais (Carroll & Starkey, 2013). Além disso, há dissolução de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) presentes nos materiais argilosos, possibilitando a solubilidade destes minerais na água salina. O mesmo ocorre para a mistura de illita + dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) + hematita (Fe_2O_3), havendo também uma oxidação causada pela interação entre o sal e a hematita.

Sobre o comportamento reológico de misturas, este pode ser alterado pelo aumento da concentração de partículas sólidas, o que transforma um fluido inicialmente newtoniano (com comportamento de viscosidade constante) em não-Newtoniano (viscosidade variável) (Castro & Alegre, 2011; Harari, 2021). Observou-se que para os experimentos em água doce, as deformações são mais resistentes ao cisalhamento, sendo estas mais suaves. Isto também pode ser resultado da pouca densidade da esfera de vidro. Para o caso do trabalho de iniciação científica, onde foi utilizado um corpo de prova mais denso (chumbada), a resistência ao cisalhamento das camadas de argila resulta em estruturas de penetração, também relacionadas à maior velocidade da partícula

do meio devido ao menor empuxo da água. Olhando agora pra as misturas com presença de sal, é possível observar deformações mais plásticas, onde as camadas deformadas (principalmente as de fundo), apresentam uma continuidade, sem rupturas. Este comportamento é resultado da interação das argilas com o meio salino e da viscosidade do meio no qual a partícula transita até entrar em contato com o sedimento de fundo que também possui um comportamento específico, descrito anteriormente.

6.2 VELOCIDADES E TRAJETÓRIAS DOS *DROPSTONES* EM AMBIENTES GLACIOLACUSTRES E GLACIOMARINHO

Para se obter entendimento dos fatores influentes na velocidade e trajetória das partículas dentro de um fluido, dois princípios da conservação de energia são importantes para o entendimento da interação entre o sistema e suas vizinhanças. O princípio da conservação de massa e o da conservação da quantidade de movimento (Castro & Alegre, 2011). O primeiro expressa que, para um fluido ideal, não ocorre surgimento ou destruição de massa, ou seja, a massa deve ser conservada, e o segundo, expressa o fato de que é constante a quantidade de movimento de um sistema quando a resultante das forças externas for nula. Utilizando a equação de Stokes para fluxo laminar de um fluido Newtoniano (Eq. 4.1) para determinação da velocidade das partículas, variando apenas a densidade da água de acordo com sua propriedade química (salina ou não salina) e os valores de viscosidade, obtêm-se velocidades constantes das partículas para cada um dos ambientes. Para este experimento, foram utilizadas esferas com diâmetro específico de 10mm, sendo assim, resultados de velocidade final de *dropstones* podem apresentar resultados diferentes dependendo de seu formato (Bronikowska et al., 2021).

Já a trajetória percorrida pela partícula pode indicar que o movimento de uma partícula em queda é impulsionado por forças de corpo. De forma teórica e desconsiderando a presença da água, a força exercida pelo peso da partícula assim que atinge o sedimento de fundo pode ser explicado pela equação $\rho C h g N m^{-2}$, onde g é a aceleração da gravidade, ρ é a densidade, C é a concentração fracionária média e h é a altura de queda, de modo que a força efetiva do corpo, que atua para baixo (devido à densidade da partícula ser maior que a do líquido), é o peso da partícula imersa (Greensmith, 1989). Quanto maior a densidade do fluido, maior é a força de empuxo exercida sob

a partícula, resultando em uma diminuição de velocidade da partícula, como observado nas velocidades das partículas em meio salino e salino com adição de gelo.

Outro fator influente na trajetória percorrida por partículas dentro de um fluido é o número de Reynolds. Para partículas com número de Reynolds > 1500 , estes corpos comportam-se como um escoamento turbulento, permitindo que tenham capacidade locomotora suficiente para vencer a força da corrente. No caso do experimento todas as partículas, exceto a esfera de vidro de 5 mm em água doce, apresentam escoamento turbulento. Para a esfera de 5 mm, está apresentada características de uma transição entre escoamento laminar e turbulento. Os fatores que influenciam esta diferença são tamanhos e densidade da partícula (Bird et al., 2002).

Como evidência deste escoamento turbulento, temos o desvio de trajetória presentes em todos os experimentos. Se compararmos, por exemplo em ambientes mais rasos, os ambientes de água doce e água salgada com gelo, ambos com 25 cm de lâmina d'água, o primeiro ambiente apresenta um desvio de trajetória mais pronunciado que o segundo devido à diferença de densidade do meio, sendo o ambiente salino e de menor temperatura o mais denso (Fig 6.1).

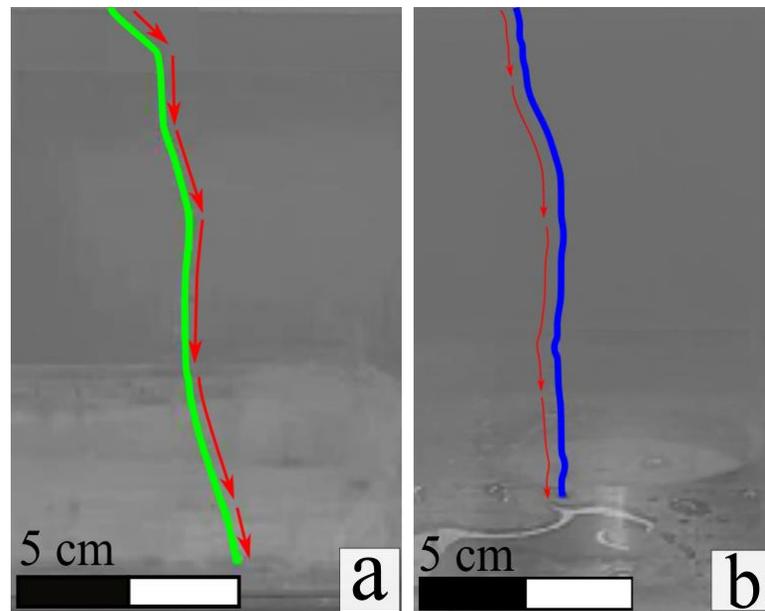


Figura 6.1. Fotos dos experimentos mostrando o desvio de trajetória das esferas de 10 mm em 25 cm de lâmina d'água para os ambientes de (a) água doce e (b) água salgada.

Seguindo o mesmo raciocínio, agora para a simulação de ambientes marinhos mais profundos, se compararmos as trajetórias das esferas para a água com temperatura de $\sim 23.1^{\circ}\text{C}$ e para a água com presença de gelo, percebemos o mesmo desvio de trajetória (Fig. 6.2). Neste caso,

além da presença de salinidade no meio, há também a estratificação de temperatura da água para o ambiente com presença de gelo. Enquanto a temperatura permanece constante para o ambiente a, no ambiente b, a temperatura da água na altura inicial é de 17.7°C e, ao atingir o corpo de prova, a temperatura da água na parte inferior da coluna d'água é de 16.2°C .

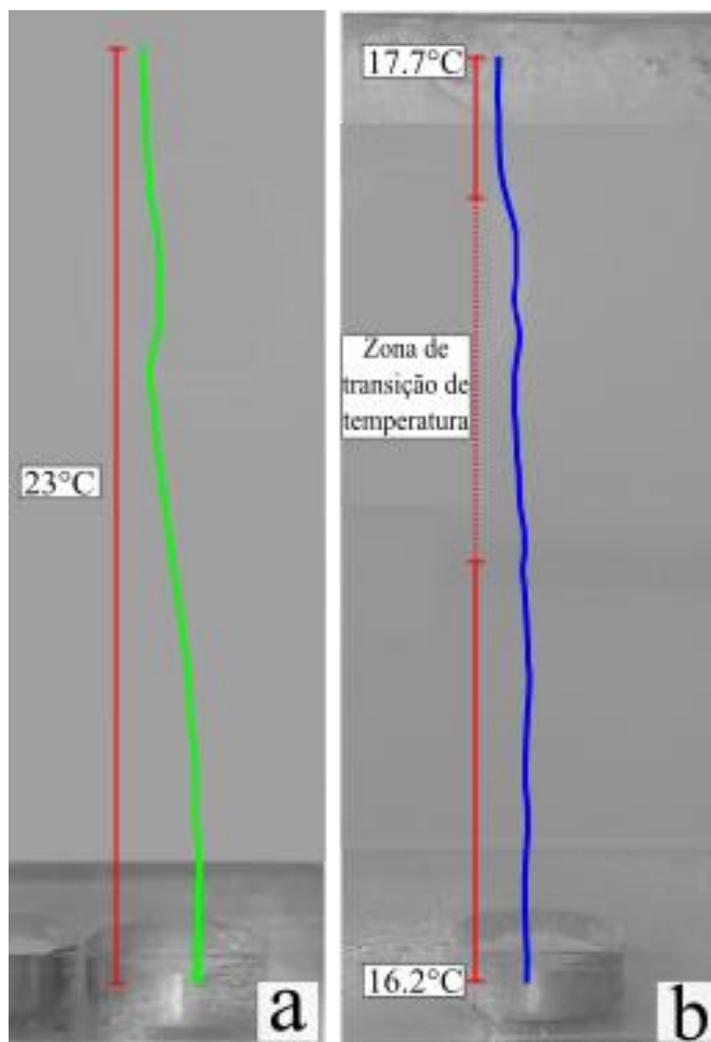


Figura 6.2. Desvio de trajetória das esferas de 10 mm em 50 cm de lâmina d'água para os ambientes de (a) água salgada a 23°C e (b) água salgada com presença de gelo e estratificação de temperatura do meio aquoso.

Para o ambiente da figura 6.2a, observa-se uma mudança de trajetória mais abrupta, resultado de uma densidade alta, porém não alta o suficiente para a esfera seguir o caminho até corpo de prova em linha reta. Já para o ambiente da figura 6.b, é possível ver uma mudança sutil de trajetória, demarcada principalmente nas zonas de transição de temperatura. À medida que o corpo percorre a água e a temperatura é diminuída, a esfera tente a seguir seu caminho em linha reta, pois o

ambiente se torna mais denso. Os fatores que aumentam esta densidade são a temperatura, salinidade e pressão (esta que não foi levada em conta para este experimento) uma vez que, devido ao derretimento do gelo, a parte superior da água apresenta densidade menor que o fundo, onde há maior salinidade (Harari, 2021). Todos esses fatores impactam diretamente as nos tipos de deformações observados nos corpos de provas do experimento. Este aspecto será tratado a seguir.

6.3 *SOFT-SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURES (SSDS) EM AMBIENTES GLACIOLACUSTRES E GLACIOMARINHOS*

Como discutido anteriormente, a velocidade das partículas e a diferença de propriedades físicas e químicas do meio que elas percorrem influenciam exercem um impacto no tipo de deformação observado nos corpos de prova. Na literatura, ainda há discussões acerca da definição do tipo de ambiente onde são encontrados os dropstones em afloramentos. De acordo com Brodzikowski & van Loon (1991), os processos deposicionais observados em ambientes marinhos assemelham-se aos que ocorrem em grandes lagos. As principais diferenças estão relacionadas à escala e à intensidade dos processos envolvidos. Em geral, em ambientes lacustres, os depósitos glaciogênicos não mostram o gradiente de espessura dos sedimentos tão pronunciados. Já em ambientes marinhos, a deposição dos sedimentos é melhor demarcada, principalmente à medida que há distanciamento da margem continental (Brodzikowski & van Loon, 1991).

Para este trabalho, foram realizadas análises de deformação de SSDS para quatro ambientes diferentes a fim de comparar as deformações, são eles: 1) lagos de água doce e lagos de água salgada com presença de gelo e; 2) ambiente marinho com e sem a presença de gelo. Os resultados dos experimentos foram comparados com as estruturas descritas por Thomas & Connell (1985) resumidas na figura 6.3.

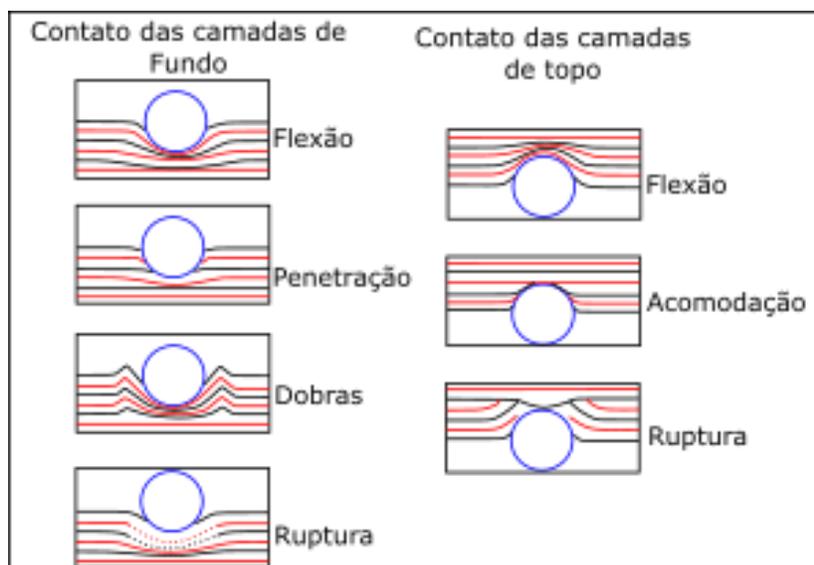


Figura 6.3. Modelo de SSDS causado por dropstones adaptado de Thomas & Connell (1985).

No primeiro ambiente de água doce, nota-se deformações de fundo menos pronunciadas, com camadas bem separadas e homogêneas (Fig. 6.4a). De acordo com a classificação de Thomas & Connell (1985) para deposição de dropstones (Fig. 6.3), pode-se dizer que há estruturas suaves de flexão (*bending*) nas deformações de fundo e de topo, indicando uma deposição suave da esfera.

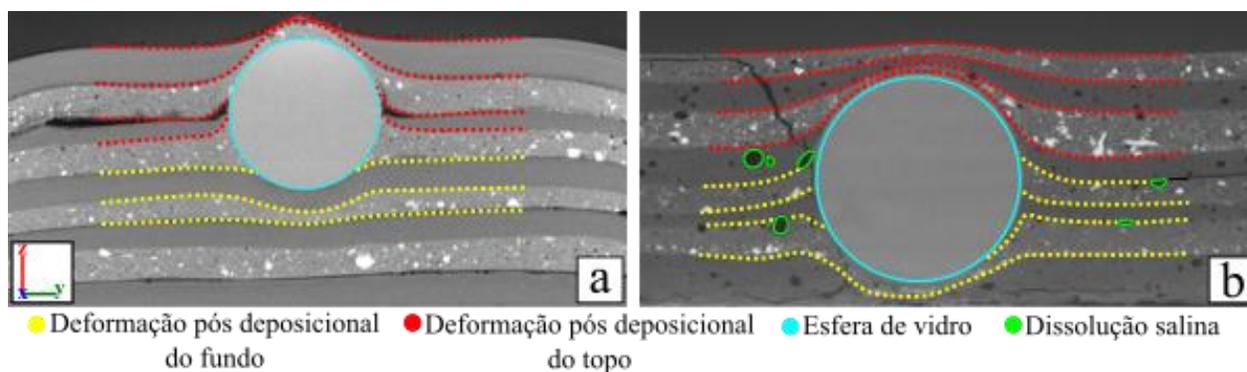


Figura 6.4. Deformações de SSDS nos corpos de prova para (a) água doce com espessura de coluna d'água de 25 cm e; (b) água salgada com presença de gelo para espessura de coluna d'água de 25 cm.

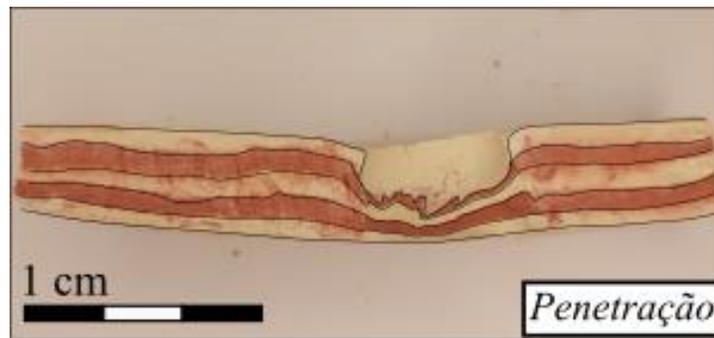


Figura 6.5. Deformação de penetração para o experimento de iniciação científica para a espessura de 30 cm de lâmina de água doce.

No caso do experimento em água salina para o segundo ambiente, foram observadas estruturas de *rucking* com pequenas dobras nas bordas da esfera. Nota-se também que a esfera se encontra mais inserida no sedimento de fundo. Além disso, outras estruturas podem ser observadas, como dissoluções salinas nas vizinhanças da esfera e entre as camadas e pequenas rachaduras ocorridas após a secagem total das amostras, resultado também da presença de sal no meio. Com relação à deformação de topo, observa-se que as camadas se mantêm bem preservadas e acompanham o formato do clasto, como descrito por Thomas & Connell, 1985), indicando flexão.

Para os dois últimos casos, foram realizados experimentos para comparação de SSDS para ambiente marinho mais profundo com e sem a presença de gelo no meio (Fig. 6.6). Para o ambos os ambientes, observa-se que há dissolução salina, resultando em espaços vazios. Isto ocorre devido à entrada do sal na estrutura cristalina da argila, como descrito anteriormente. Como descrito por Thomas & Connell, 1985), as estruturas observadas na deformação de fundo também são parecidas, indicando sedimentos mais plásticos onde é depositada a esfera e criando estruturas de penetração (*penetration*) para ambos os casos, havendo uma suave flexão (*bending*) logo abaixo das esferas. Com relação às deformações de topo, observa-se flexões (*bending*) em ambos os casos.

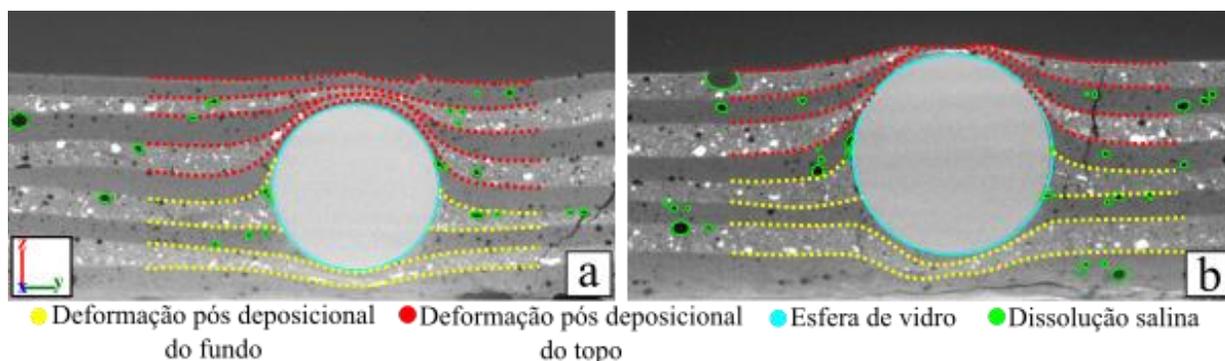


Figura 6.6. Deformações de SSDS nos corpos de prova para (a) água salgada com espessura de coluna d'água de 50 cm e; (b) água salgada com presença de gelo para espessura de coluna d'água de 50 cm.

Para este tipo de ambiente, observamos que há evidências de dissolução salina em ambas as amostras, porém estas são mais abundantes para o experimento ocorrido na presença de sal e gelo. Isto ocorre devido à estratificação de temperatura da água, resultando também em uma estratificação de salinidade do meio. Sendo assim, há maior concentração de sal no fundo do aquário do que em regiões mais próximas da superfície (Harari, 2021).

6.4 COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS REAIS E SINTÉTICAS

A partir das observações feitas em amostras sintéticas, foram feitas também análises em μ -CT para comparação dos resultados obtidos no experimento com uma amostra real.

As deformações encontradas na amostra real também são consistentes com as observadas na amostra sintética para ambiente marinho raso com presença de gelo anteriormente descrito por Assine et al. (1998), havendo formação de estruturas descritas por Thomas & Connell, (1985) como penetração e, ao fundo, pequenas camadas flexionadas (*bending*) logo abaixo do clasto. De acordo com Assine et al. (1998), os dropstones do depósito glacial do limite Ordoviciano-Siluriano da formação Iapó são vistos em meio a sedimentos finos e bastante abundantes, indicando um ambiente marinho raso. Assim como na amostra sintética, a amostra de campo apresenta zonas porosas, provavelmente de dissolução salina, próximas aos clastos (Fig. 6.7).

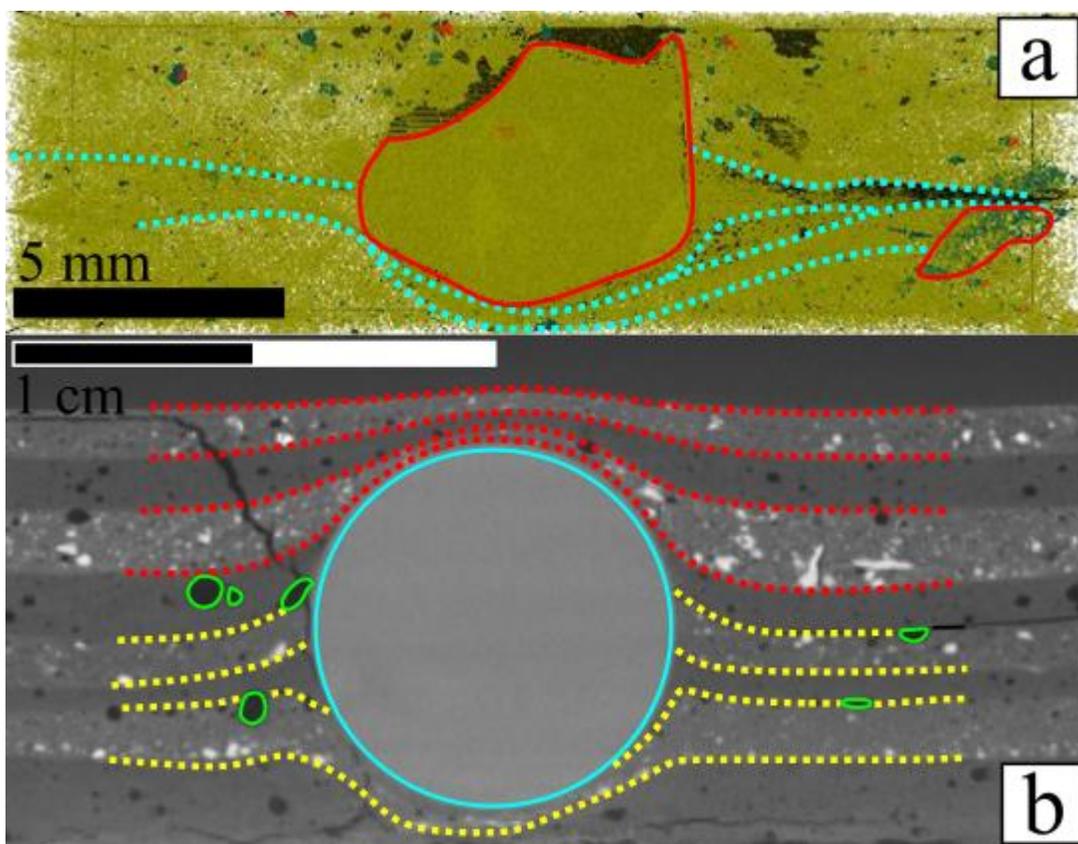


Figura 6.7. Microtomografia de Raio-X mostrando a comparação de SSDS entre a amostra (a) da Fm. Vila Maria e (b) Sintética.

Outra observação consistente com os estudos de Assine et al. (1998) nesta região, é a presença de pequenos clastos inseridos na matriz da amostra, Estes clastos podem estar relacionados com a espessura de lâmina d'água rasa na borda da geleira, caracterizando o ambiente marinho raso onde há deposição de *dropstones* associados ao processo de deglaciação, devido ao avanço das geleiras para oeste da bacia do Paraná.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste estudo permitiram uma análise mais detalhada sobre o comportamento de sedimentos em ambientes glaciais e periglaciais simulados, oferecendo um melhor entendimento dos processos de formação de deformações em meio aquoso para esses ambientes. As deformações observadas nos corpos de prova demonstraram como a variação de salinidade, temperatura e densidade das partículas influencia a deposição de sedimentos e a formação das SSDS.

Por meio das simulações realizadas em ambientes lacustres e marinhos, foi possível identificar padrões distintos de deposição de *dropstones* e formação de estruturas de deformação em diferentes condições aquáticas. Nos ambientes de água doce, as esferas de vidro apresentaram trajetórias menos lineares e com mais inflexões, refletindo a menor densidade da água e a menor viscosidade em comparação com os experimentos de água salgada. Já nos ambientes salinos e com a adição de gelo, as esferas mostraram trajetórias mais lineares, revelando maior interferência da estratificação térmica e das variações na densidade do fluido.

Os dados obtidos por microtomografia computadorizada (μ -CT) mostraram como os *dropstones*, ao se depositarem no sedimento de fundo, provocam deformações nas camadas inferiores de sedimentos, criando estruturas de deformação (SSDS), havendo distinção entre ambiente salino e ambiente de água doce. Esses resultados são consistentes com a literatura sobre sedimentação em ambientes glaciais e marinhos e lacustres.

O uso da técnica de microtomografia foi essencial para a observação detalhada das deformações pós deposicionais de topo, além de possibilitar a comparação entre as amostras sintéticas e a amostra de campo, também analisada em μ -CT. Essas comparações e semelhanças reforçam a validade dos experimentos.

REFERÊNCIAS

- Assine, M. L., Alvarenga, C. J. S., Alexandre, J., & Perinotto, J. (1998). *Formação Iapó: Glaciação Continental no Limite Ordoviciano/Siluriano da Bacia do Paraná*.
- Bendle, J. M., Palmer, A. P., & Carr, S. J. (2015). A comparison of micro-CT and thin section analysis of Lateglacial glaciolacustrine varves from Glen Roy, Scotland. *Quaternary Science Reviews*, 114, 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.02.008>
- Bennett, M. R., Doyle, P., & Mather, A. E. (1996). Dropstones: Their origin and significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 121(3–4), 331–339. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00071-2)
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Fenômenos de Transporte*.
- Bradley, R. S. (2000). Past global changes and their significance for the future. In *Quaternary Science Reviews* (Vol. 19).
- Brodzikowski, K., & van Loon, A. J. (1991). *Glacigenic Sediments*.
- Bronikowska, M., Pisarska-Jamrozy, M., & van Loon, A. J. (2021). Dropstone deposition: Results of numerical process modeling of deformation structures, and implications for the reconstruction of the water depth in shallow lacustrine and marine successions. *Journal of Sedimentary Research*, 91(5), 507–519. <https://doi.org/10.2110/JSR.2020.111>
- Carroll, D., & Starkey, H. C. (2013). Effect of Sea-Water on Clay Minerals. In *Clays and Clay Minerals* (pp. 80–101). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-009235-5.50007-3>
- Castro, C., & Alegre, P. (2011). *Caracterização Reológica de uma Mistura de Água e Sedimento*.
- Cnudde, V., & Boone, M. N. (2013). High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 123, pp. 1–17). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.003>
- Greensmith, J. T. . (1989). *Petrology of the sedimentary rocks*. Unwin Hyman.
- Harari, J. (2021). *Noções de Oceanografia*.
- Lüthi, M., Walter, F., & Werder, M. (2006). *Physics of Glaciers*.
- Menzies, J., & Maltman, A. J. (1992). *Microstructures in diamictons evidence of subglacial bed conditions* (Vol. 6).
- Neto, J. M. dos R., Fiori, A. P., Lopes, A. P., Marchese, C., Pinto-Coelho, C. V., Vaconcellos, E. M. G., da Silva, G. F., & Secchi, R. (2011). A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. *Revista Brasileira de Geociências*, 41, 498–508.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*.

- Ravelo, A. C. (2010). Warmth and glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(1–2), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.010>
- Sakai, A., Chikita, K., & Yamada, T. (2000). Expansion of a moraine-dammed glacial lake, Tsho Rolpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya. *Limnology and Oceanography*, 45(6), 1401–1408. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1401>
- Thomas, G. S. P., & Connell, R. J. (1985). *Iceberg Drop, Dump, and Grounding Structures from Pleistocene Glacio-Lacustrine Sediments, Scotland I*. <http://pubs.geoscienceworld.org/sepm/jsedres/article-pdf/55/2/243/2809523/243.pdf>
- Wang, Y., & Miller, J. D. (2020). Current developments and applications of micro-CT for the 3D analysis of multiphase mineral systems in geometallurgy. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 211). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103406>