

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Alessandra Silveira Machado

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Nuclear, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS ATRAVÉS
DA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Alessandra Silveira Machado

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof^a. Inayá Corrêa Barbosa Lima, D.Sc.

Prof. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2015

Machado, Alessandra Silveira

Caracterização Geológica de Rochas Carbonáticas
Através da Técnica de Microtomografia
Computadorizada de Raios X/ Alessandra Silveira
Machado. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XIX, 139 p.:il; 29,7 cm

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Nuclear, 2015.

Referências Bibliográficas: 123 – 128

1. Microtomografia Computadorizada 2. Rocha
Carbonática 3. Caracterização. I. Lopes, Ricardo Tadeu.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças e iluminar meus caminhos.

Ao meu marido Leandro, Nino obrigada por tudo, pelo o que você é pelo que você faz por mim e por acreditar em mim. Mas principalmente obrigada por me amar e falar isso todos os dias. Eu também te amo e vou te amar para sempre.

Aos meus pais, Maria e Altamiro, por todo esforço, apoio e amor que sempre recebi de vocês. Eu sei que a distância dói, mas vocês estão aqui o tempo todo no meu coração.

À minha irmã Geruza, obrigada por ser minha irmã e por me amparar, tenho muito orgulho de você minha pequena. E como sempre falo pra você "... que amor é esse tão forte assim... amor de anjo que existe em mim...". Não fica triste cunhado não me esqueci de você, Gio obrigada pelo exemplo de esforço, comprometimento e responsabilidade que sempre vejo em você. Gostaria de agradecê-los especialmente pelo maior e melhor presente de todos que já recebi que é o Teodoro.

Um agradecimento especial e cheio de amor ao meu sobrinho Teodoro. A "pessoinha" que mesmo de longe ilumina os meus dias me trazendo força e me fazendo sorrir só ao lembrá-lo.

Aos meus amados avôs Virginia e Eci, pelo exemplo de simplicidade, bom caráter, amor incondicional e por serem essas pessoas maravilhosas de quem me orgulham tanto.

A toda a minha família, pelo carinho e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, prof. Ricardo Tadeu Lopes, pela oportunidade, pelos ensinamentos, por acreditar no meu trabalho e por contribuir na minha formação profissional. Muito obrigada principalmente por muitas vezes ter "começado o começo" para mim. Serei eternamente grata a você e sempre que precisar poderá contar comigo.

Ao Professor Leonardo Borghi, por ter doado as amostras de rochas carbonáticas. E muito obrigada pela confiança, suporte e por ter me ajudado tanto nessa jornada.

À professora Inayá Lima pela orientação e os ensinamentos tão necessários para a realização deste trabalho.

Ao Davizinho, com quem tenho a alegria de conviver por todos esses anos. Obrigada pelo apoio, pelos ensinamentos, incentivos e pela disposição de ajudar em todos os meus trabalhos. Muito obrigado pela amizade, companheirismo, conversas, risadas, carinho, paciência e confiança. Sei que te perturbo muito e pretendo perturbar ainda mais.

Aos amigos Joseilson e Aline, pela ajuda, pelas conversas e por tornarem os meus dias mais alegres.

À minha amiga Ale Castro, pela atenção, por compartilhar comigo seus conhecimentos que ajudaram muito na realização desse trabalho. Muito obrigada pelo companheirismo, amizade, pelas conversas sérias e pelas risadas. Saiba que sempre poderá contar comigo.

Aos demais colegas da microCT Átila, Thais, Simone e Bernardo, com quem tenho a alegria de trabalhar diretamente todos os dias. Muito obrigada pela força e ajuda nas dificuldades do dia a dia.

À colega Amanda, por ter me ajudado com tanta competência e atenção na descrição das lâminas petrográficas.

Aos amigos do LIN, que me ajudam no dia-a-dia e participaram direta ou indiretamente a realização deste trabalho. Já são alguns anos de uma ótima convivência e sou muito grata à todos vocês por isso.

Aos colegas do LAGESED, por terem me recebido com carinho e por terem paciência em ajudar com tantas dúvidas que aparecerem durante a realização desse trabalho.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Nuclear/COPPE pela cooperação e apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a empresa Petrobrás S/A pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Ciências (D.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Alessandra Silveira Machado

Fevereiro/2015

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

As rochas carbonáticas possuem um papel relevante na geologia do petróleo, por conterem cerca da metade das reservas de óleo e gás conhecidas no mundo. O estudo das rochas carbonáticas, principalmente as formadas por influência microbiana, tornaram-se muito importante no cenário exploratório de hidrocarbonetos no Brasil, devido as analogia às rochas reservatório do intervalo Pré-Sal. A motivação para realização deste trabalho se baseia na utilização da técnica de microtomografia para criar um banco de dados de imagens de rochas em benefício às necessidades atuais do Brasil. O objetivo é a caracterização de rochas sedimentares, em especial as carbonáticas, através da avaliação da porosidade total. As mesmas são originárias de Bacias Sedimentares e Lagoas hipersalinas. Foram encontrados valores de porosidade total de no máximo 17,15 % pertencente a estromatólitos originários de Lagoa hipersalina. Dessa forma, os resultados expuseram a técnica de microCT como uma ferramenta adequada para complementar técnicas petrográficas clássicas e agregar informações na caracterização de rochas carbonáticas, com a vantagem da abordagem não destrutiva e natureza tridimensional.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

GEOLOGIC CHARACTERIZATION OF CARBONATE ROCKS BY X-RAY COMPUTED MICROTOMOGRAPHY

Alessandra Silveira Machado

February/2015

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

Carbonate rocks play an important role in petroleum geology by acting as reservoir rocks, generators and even hydrocarbon sealants, accounting for about half of the oil and gas reserves known in the world. The study of these carbonate rocks, especially those formed by microbial influence, have become very important in the hydrocarbon exploration scene in Brazil because of the analogy to the reservoir rocks of the pre-salt interval. The motivation for carrying out this work comes precisely from the idea of using the microCT technique to create a rock images dataset benefit the current needs of Brazil. The goal is the characterization of sedimentary rocks, especially the carbonate, by evaluating the total porosity. They originate in Sedimentary Basins and Hypersaline Lagoons. Were found total porosities of no more than 17.15% pertaining to stromatolites originating in hypersaline lagoon. Thus, the results exposed the microCT technique as an appropriate tool to complement conventional petrography techniques and aggregate information on the characterization of carbonate rocks, with the advantages of a non-destructive and three-dimensional approach.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
CAPÍTULO III	13
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
III.1 – MicroCT	13
<i>III.1.1 – Princípios Físicos da microCT.....</i>	<i>14</i>
<i>III.1.2 – Feixe Cônico.....</i>	<i>18</i>
<i>III.1.3 – Reconstrução</i>	<i>19</i>
III.2 – Imagem Digital.....	21
<i>III.2.1 – Processamento de Imagem Digital.....</i>	<i>22</i>
III.3 – Rochas Carbonáticas	25
<i>III.3.1– Classificação das Rochas Carbonáticas</i>	<i>27</i>
<i>III.3.2 – Porosidade das Rochas Carbonáticas.....</i>	<i>33</i>
<i>III.3.2.1– Classificação da Porosidade</i>	<i>33</i>
CAPITULO IV.....	37
MATERIAIS	37
IV.1. – Amostras	37
<i>IV.1.2– Localização de Origem.....</i>	<i>43</i>
MÉTODOS.....	51
IV.2. Aplicação da MicroCT.....	51
<i>IV.2.1. – Aquisição das Imagens de microCT</i>	<i>52</i>
<i>IV.2.2 – Reconstrução das Imagens de microCT</i>	<i>54</i>
<i>IV.2.2.1 Smoothing</i>	<i>56</i>
<i>IV.2.2.2 Misalignment compensation</i>	<i>56</i>
<i>IV.2.2.3 Beam hardening</i>	<i>57</i>

IV.2.2.4 <i>Ring artifacts</i>	57
IV.2.3 – <i>Análises quantitativas e qualitativas de microCT</i>	60
IV.2.3.1 – <i>Segmentação (binarização)</i>	61
IV.2.3.2 – <i>Parâmetros Morfométricos</i>	63
IV.2.3.3 – <i>Modelos em três dimensões (3D)</i>	65
IV.3 – Lâmina Petrográfica	66
CAPÍTULO V	68
RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
V.1 – Amostras da Lagoa Vermelha	68
V.2 – Amostras Bacia do Irecê - Formação Salitre	73
V.3 – Amostras Bacia de Sergipe e Alagoas	83
V.3.1 <i>Formação Cotinguiba</i>	84
V.3.2 <i>Formação Riachuelo</i>	88
V.3.3 <i>Formação Morro do Chaves</i>	92
V.4 – Amostra Bacia de Itaboraí - Formação Itaboraí	98
V.5 – Amostra Bacia do Parnaíba - Formação Codó	101
V.6 Amostra Lagoa Salgada - Recente	107
V.7 Amostra Bahia - Formação Caatinga	113
RESUMO QUANTITATIVO	118
CAPÍTULO VI	121
CONCLUSÕES	121
SUGESTÕES	122
REFERÊNCIAS	123
ANEXO	129

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1: Exemplo de uma amostra de testemunho do reservatório Pré-Sal (bacia de Santos) e seu “análogo”, estromatólito recente da Lagoa Salgada, litoral Norte do estado do rio de Janeiro.	2
Figura III.1: Esquema da em obtenção de projeções passos angulares constantes.....	17
Figura III.2: Esquema exemplificando (a) raio soma e (b) sinograma.....	17
Figura III. 3: Geometria do feixe cônico.	19
Figura III.4: Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza.....	22
Figura III.5: Passos fundamentais em processamento de imagens digitais	23
Figura III. 6: Principais constituintes das rochas carbonáticas.....	27
Figura III.7: Classificação de rochas carbonáticas	28
Figura III. 8: Classificação de rochas carbonáticas	29
Figura III. 9: Classificação das rochas carbonáticas.....	31
Figura III. 10: Classificação das rochas carbonáticas.....	32
Figura III. 11: Classificação dos tipos de porosidade por.	34
Figura IV. 1: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 01- Cacilutito, 02- Calcilutito Laminito Microbial, 03- Calcarenito, 04- Pisolito Calcário, 05- Coquina e 06- Estromatólito Silicificado.	40
Figura IV. 2: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 07 e 09- Estromatólito Carbonático, 08- Estromatólito Fosfático, 10- Estromatólito + Calcarenito, 11- Calcrete e 12- Estromatólito Biscuit Microfacies I.....	41
Figura IV. 3: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 13- Biolaminito, 14- Estromatólito Biscuit Microfacies II e 15- Matéria Orgânica.	42
Figura IV. 4: Mapa de localização da Bacia de Sergipe e Alagoas	43
Figura IV. 5: Foto de satélite Bacia São José de Itaboraí.	45
Figura IV. 6: Mapa de localização da Bacia de São José de Itaboraí.	45
Figura IV. 7: Unidades geotectônicas da Bacia Parnaíba	47
Figura IV. 8: Mapa de localização da Bacia de Irecê – Bahia.	48
Figura IV. 9: Mapa da Região norte do estado do Rio de Janeiro, destaque para Lagoa Salgada. Modificado de.	49
Figura IV. 10: Foto de satélite da Lagoa Vermelha no estado do Rio de Janeiro.....	51

Figura IV. 11: Foto do equipamento de microCT Skyscan/Bruker modelo 1173.....	52
Figura IV. 12: Gráficos mostrando os espectros simulados para a tensão de 130 kV, sem filtro e com a combinação de filtros utilizada neste trabalho.....	53
Figura IV. 13: (a) a seta amarela mostra o plug fixada dentro do equipamento, seta vermelha mostra o suporte de acrílico utilizado para fixar a amostra e a seta verde indica o filtro de Cu, posicionada na saída do feixe de raios X; (b) Projeção de um dos plugs de rocha carbonática.	54
Figura IV. 14: (a) pré visualização de uma fatia transversal da amostra; (b) histograma de coeficiente de atenuação; (c) valores de máximo e mínimo para o coeficiente de atenuação.	55
Figura IV. 15: Esquema apresentando os parâmetros de correção no processo de reconstrução.....	56
Figura IV. 16: Aplicação parâmetros de correção; (a) Correção do smoothing (suavização); (b) Correção do alinhamento; (c) Efeitos de anel, nota-se principalmente no centro da amostra; (e) Correção do endurecimento do feixe, é possível notar a linearização nos gráficos (indicados seta verde e vermelha), após a correção.....	59
Figura IV. 17: Esquema mostrando aquisição, reconstrução e visualização de amostra 03 (Calcarenito).	60
Figura IV. 18: Esquema para as análises quantitativas. (a) fatia 1731 da amostra 09 , (b) em vermelho a ROI determinada, (c) segmentação da amostra para quantificação dos poros (pretos) e matriz da rocha (branco), (d) histograma de intensidade dos tons de cinza de todas as secções transversais.	62
Figura IV. 19: Esquema para as análises quantitativas. (a) fatia 2661 da amostra 03, (b) em vermelho a ROI determinada, (c) segmentação da amostra para quantificação dos minerais de maior densidade (branco) e poros e matriz da rocha (preto), (d) histograma de intensidade dos tons de cinza de todas as secções transversais.	63
Figura IV. 20: Task list utilizado para as quantificações, as setas verdes na (b) indicam o plug- in ROI shrink wrap utilizados para as amostras de 12 a 15.....	65
Figura IV. 21: Fotomicrografia da Lâmina petrográfica feita a partir das amostras 02 (calcilutito laminado microbiano) e 09 (estromatólito carbonático).....	67
Figura V.1: Imagens microtomográficas da amostra 12 (Estromatólito I), (a) Projeção (b) fatia 1758 e (c) imagem 3D, nota-se os otacódios destacados em amarelo em meio a matriz carbonática na cor laranja.....	69

Figura V. 2: Imagens microtomográficas da amostras 13 (Biolaminito), (a) Projeção (b) fatia 1118 e (c, d, e e f) imagens 3D.....	70
Figura V. 3: Imagens microtomográficas da amostras 14 (Estromatólito II), (a) Projeção (b) fatia 1591 e (c e d) imagem 3D.....	71
Figura V. 4: Imagens microtomográficas da amostras 13 (Material Orgânico), (a) Projeção (b) fatia 1128 e (c, d, e e f) imagens 3D.	72
Figura V. 5: Gráfico do perfil de porosidade ao longo das amostras (12, 13, 14, e 15).	72
Figura V. 6: Calcilutito com níveis ricos em matéria orgânica (estilolitos) intercalados com calcita/dolomita. Fraturas pós-deposicionais preenchidas por calcita cortam a rocha em diversas direções (seta).	74
Figura V.7: Dolomita (seta) substituindo calcita (cor rosa, tingida com uma solução de Alizarina-S+HCl).	74
Figura V. 8: Teepes com nódulos de sílex (seta vermelha) com estilolitização sobreposta (seta amarela).....	75
Figura V. 9: Nódulo de sílex (seta vermelha) e estilolitos nos níveis microbianos (seta amarela). Polarizadores cruzados.	75
Figura V. 10: Nódulos de sílex (setas vermelhas) em macroescala, Unidade Nova América.	75
Figura V. 11: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 02.	76
Figura V. 12: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 2.	77
Figura V. 13: Imagens 3D da amostra 2,(a) a seta vermelha indicando estruturas de ressecamento e (b) pontos branco evidenciando a presença de sílica.	77
Figura V. 14: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 2.	78
Figura V. 15: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 2.	78
Figura V. 16: Imagens 3D da amostra 2,(a) seta verde evidencia os níveis ricos em matéria orgânica, formando estilolitos intercalados com níveis calcíticos substituídos por dolomita e (b) as. setas azuis indicam as fraturas pós-deposicionais.....	79
Figura V. 17: Fotomicrografia da Lâmina petrográfica, (a) destaca os oncoides e os aglomerados oncolíticos na base da amostra, (b) estilolitos desenvolvidos pela presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal e (c) o escâner da lâmina petrográfica	

inteira, onde é possível notar-se com clareza a diferença estrutural entre o topo e a base da amostra 10.....	80
Figura V.18: Modelos 3D gerados para amostra 10, onde é possível observar a diferença estrutural do calcarenito, as setas azuis destacam os tons mais claros que compõem a base da amostra, diferente do topo (setas vermelhas) que apresenta uma coloração mais escura. Isso ocorre justamente pela presença dos oncoides e aglomerados oncolíticos. A seta verde destaca os estilólitos que aparecem claramente devido a maior densidade física, uma vez que resultam da presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal, contrastando com o restante da amostra.	81
Figura V. 19: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 10.	82
Figura V. 20: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 10.....	82
Figura V. 21: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 10, esses minerais compreendem siliciclásticos (quartzo), pirita e fragmentos carbonosos.	83
Figura V. 22: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 10.	83
Figura V. 23: Fotomicrografia da lâmina petrográfica mostrando (a) calcisferas e (b) dolomitas.	85
Figura V. 24: Modelos 3D mostrando estrutura da amostra 01, a seta verde indica elementos de alta densidade e a seta vermelha indica fratura ao longo da amostra.	86
Figura V. 25: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 01.	87
Figura V. 26: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 01.....	87
Figura V. 27: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e pirita) ao longo da amostra 3.	88
Figura V. 28: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 01.	88
Figura V. 29: Fotomicrografia da lamina petrográfica destacando (a) textura, (b) a dissolução dos ooides e (c) porosidade vugular.	89
Figura V. 30: Modelos 3D mostrando cortes transversais para a amostra 03. As setas vermelhas indicam porosidade vugular e setas verdes elementos de maior densidade (bivalves e quartzo e pirita).	90
Figura V. 31: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 03.....	91
Figura V. 32: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 03.	91

Figura V. 33: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e pirita) ao longo da amostra 03.	92
Figura V. 34: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 03.	92
Figura V. 35: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 05, nota-se que a composição é composta praticamente por bivalves parcialmente fragmentados e raramente articulados.....	93
Figura V. 36: Modelos 3D da amostra 05, mostrando três diferentes cortes transversais, setas azuis mostram bioclastos articulados, setas vermelhas apresenta aglomerados de bioclastos fragmentados e setas verdes elementos de alta densidade que correspondem a cristais de calcita com maior grau de pureza.	94
Figura V. 37: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 05.	95
Figura V. 38: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade (cristais de calcita com maior grau de pureza) da amostra 05.	95
Figura V. 39: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 05.	96
Figura V. 40: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 05.	97
Figura V. 41: Gráfico de número de poros por intervalo de tamanho dos poros (2D, fatia/fatia) para amostra 05. Nota-se que a maioria dos poros possuem tamanho menor que 0,07 mm.	97
Figura V.42: Imagem do eixo mostrando transaxial da amostra 4 mostrando o diâmetro aproximado (7,56 mm) de um grânulo calcário.	99
Figura V.43: (a) imagem 3D da amostra 04, (b) seta verde apresentam regiões de baixa densidade, devido a concentração de porosidade (c) pontos brilhantes são material de alta densidade e (d) a seta vermelha indica (em amarelo) regiões de densidade intermediária que correspondem aos grânulos calcário.....	99
Figura V. 44: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 04 nota-se que amostra apresenta regiões onde os poros estão concentrados, mas aparentemente essas regiões não estão conectadas.	100
Figura V. 45: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 4.	100
Figura V. 46: Figura V.5.1. (a) Modelo 3D da amostra 07 de Estromatólito carbonático, (b) imagem de uma fatia do eixo coronal, (c) imagem de uma fatia do eixo transaxial e (d) imagem de uma fatia do eixo sagital.....	101

Figura V. 47: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 07. Notam-se os níveis ricos em pelóides, sendo zonas preferenciais de faturamento e também as fraturas que por vezes são preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro.	102
Figura V. 48: (a) e (b) representam modelos 3D mostrando cortes transversais da amostra 07 onde é possível ver os pelóides indicados pela seta verde. E (c) exibe em destaque a região da lâmina delgada onde foi observado o pelóide.	103
Figura V. 49: Modelos 3D mostrando cortes transversais da amostra 07, onde as setas amarelas mostram algumas fraturas, (a) parcialmente preenchidas e (b) totalmente preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro. E (c) imagem da fotomicrografia da lâmina petrográfica em que a seta vermelha evidencia a zona onde uma fratura aparece totalmente preenchida.	104
Figura V. 50: Modelos 3D da amostra 07, (a) pontos brilhantes rosa que representam os óxidos/ hidróxidos de ferro, (b) cor amarela representa as regiões preenchidas pela calcita mosaico grosso e (c) em azul/roxo tem-se a região de menor densidade, região preferencial dos poros.	105
Figura V. 51: Gráfico da distribuição dos elementos de maior densidade na amostra 7.	105
Figura V. 52: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 07.	106
Figura V. 53: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 07.	106
Figura V. 54: Modelos 3D da amostra 07 nota-se em amarelo os elementos de maior densidade, em roxo a região de menor densidade onde são encontrados os poros e em verde a matriz carbonática. As setas vermelhas indicam porosidade vulgar.	107
Figura V. 55: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 09. Nota-se a presença de gastrópodes, laminações, porosidade vulgar e a base constituída de textura grumosa que tem sua origem relacionada a calcificação de cianobactérias esféricas.	108
Figura V. 56: (a) Modelo 3D da amostra 09 apresentando um corte transversal, nota-se a grande heterogeneidade da amostra. (b) Modelo 3D destacando a região onde pode ser vistos os gastrópodes, seta verde destaca ostracode fragmentado. (c) Detalhe da fotomicrografia da lâmina delgada destacando a presença dos gastrópodes. Em ambos (b-c) as setas azuis mostram o corte longitudinal e as vetas vermelhas o corte perpendicular.	110

Figura V. 57: (a) Modelo 3D da amostra 09 apresentando um corte transversal, (b) modelo 3D destacando as laminações de calcita contínuas e descontínuas no topo da lâmina apontadas pela seta amarela, poro vulgar mostrado pela seta vermelha e grãos siliciclásticos associados identificados pela seta verde, essas estruturas podem ser comparadas com a lâmina delgada (c).	110
Figura V. 58: Imagens da lâmina petrográfica mostrando (a) registros de cianobactérias filamentosas indicadas pela seta vermelha e (b) tubos calcificados de serpulídeos evidenciado pela seta azul.	111
Figura V. 59: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 09.	112
Figura V. 60: Gráfico de número de poros por intervalo de tamanho dos poros para amostra 09 nota-se que a maioria dos poros encontra-se no intervalo de tamanho menor que 0,14 mm.	112
Figura V. 61: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 09.	113
Figura V. 62: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 09.	113
Figura V. 63: (a-b-c) Modelos 3D da amostra 11 apresentando cortes transversais, (d) fotomicrografia da lâmina petrográfica, setas verdes indicam os grumos com estruturas microbais e as setas vermelhas indicam as feições das gretas circunplanulares. Nota-se que a seta verde no modelo (b) mostra a projeção do grumo em profundidade no interior da amostra.	115
Figura V. 64: Modelos 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 11.	116
Figura V. 65: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 11.	116
Figura V. 66: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e fragmentos de rochas plutônicas) ao longo da amostra 11.	117
Figura V. 67: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 11.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1: Descrição das amostras de rochas	38
Tabela IV.2: Parâmetros de escaneamento.	53
Tabela IV.3: Valores dos parâmetros de correção utilizados antes do processo de reconstrução das imagens microtomográficas.	58
Tabela V.1: Resultados quantitativos de volume total, porosidade e minerais de maior densidade	119

LISTA DE SÍMBOLOS

microCT - Microtomografia Computadorizada de Raios X

2D - Duas Dimensões

3D - Três Dimensões

$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)$ - Ankerita

CaCO_3 - Calcita

CaMgCO_3 - Dolomita

CT - Tomografia Computadorizada

FBP - Retroprojeção Filtrada (*Filtered Back-projection*)

FeCO_3 - Siderita

MgCO_3 - Magnesita

R - Raio

ROI - Região de Interesse

TH - *Threshold* / Limiar

VOI - Volume de Interesse

Z - Número Atômico

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As rochas carbonáticas possuem um papel relevante na geologia do petróleo. Elas atuam como rochas reservatórios, geradoras e até mesmo selantes de hidrocarbonetos (óleo e gás). O petróleo e o gás tendem a migrar até a superfície, passando vagarosamente pelos poros das rochas facilitados por meio de fraturas ou falhas. As rochas carbonáticas porosas, por exemplo, são caracterizadas por conterem aproximadamente metade das reservas de hidrocarbonetos conhecidas no mundo.

O estudo de rochas carbonáticas, principalmente as formadas por influência microbiana, estão se tornando muito importante no cenário exploratório de hidrocarbonetos no Brasil, devido às analogias às rochas reservatório do intervalo Pré - Sal das bacias sedimentares da margem continental leste brasileira. Em rochas carbonáticas, a sedimentação e diagênese produzem geometrias, tamanhos e distribuição espacial complexas dos poros, bem como de conectividade entre eles (ARMS, 2005).

O Pré-Sal, citado acima, é o nome dado às reservas de hidrocarbonetos em rochas sedimentares (carbonáticas) que se localizam abaixo de camadas de sal. A formação dessas rochas ainda traz grande discussão, pois pode se tratar de rochas de origem microbial, como os estromatólitos; microbial bioacumulada, como a coquina ou químico-microbial, onde se encontram os travertinos; ou somente químico, como os evaporitos. Pode-se dizer hoje, que as rochas carbonáticas formadoras do intervalo Pré-

Sal são únicas e de sistemas deposicionais extremos. A caracterização do seu espaço interno e a sua identificação estrutural e mineralógica são um grande desafio para o desenvolvimento dos campos de petróleo, pois existe ao alto grau de heterogeneidade do sistema poroso, bem como outros aspectos geológicos (PAPATERRA, 2010).

O que se sabe atualmente é que não há análogos bons o suficiente para comparar com o intervalo Pré-Sal. Contudo, é necessário superar os obstáculos teóricos, tecnológicos e até mesmo práticos, e isso só será possível intensificando os estudos com os materiais disponíveis no momento para pesquisa. Dessa forma, o presente trabalho está focado em investigar as amostras carbonáticas retiradas de contextos geológicos diversos (Figura I.1). Note que é possível encontrar rochas nas quais se podem estabelecer análogos com o intervalo Pré-Sal de forma poder traçar paralelos de estudo de complexidade estrutural das mesmas.

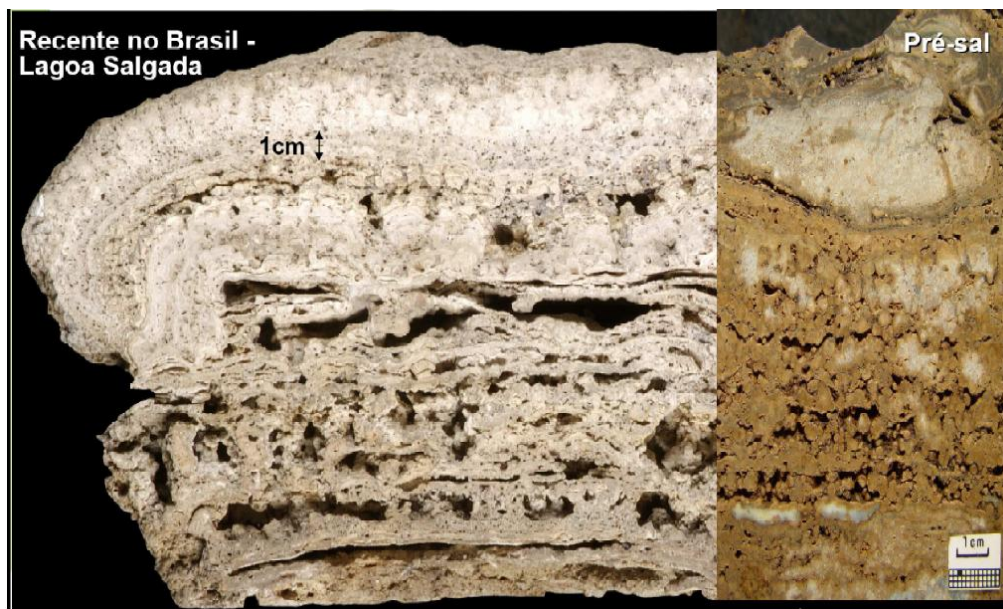


Figura I. 1: Exemplo de uma amostra de testemunho do reservatório Pré-Sal (bacia de Santos) e seu “análogo”, estromatólito recente da Lagoa Salgada, litoral Norte do estado do Rio de Janeiro, (ESTRELLA, 2008).

Na busca de novas técnicas de análise, com o objetivo de não só complementar como também agregar novas informações referentes ao comportamento estrutural das rochas carbonáticas, a Microtomografia Computadorizada de Raios X (microCT) apresenta-se como uma técnica não-destrutiva e de rápida análise. A microCT está cada dia mais presente nas análises petrofísicas. Estudar uma rocha com microCT significa obter conhecimento, em microescala, a respeito da forma, tamanho, distribuição, volume, área e conectividade dos poros. Com essa técnica também é possível observar diferentes minerais com diferentes densidades bem como as fácies que a estruturam.

A microCT, também denominada de microtomografia computadorizada de alta resolução permite a análise de milhares de planos/seções microtomográfica e visualização tridimensional interna do material em estudo, além de quantificações automatizadas de área e/ou volume. Não é necessário que o corpo de prova seja submetido a um método de preparação, tais como impregnação, desbaste ou polimento (REMEYSEN & SWENNEN, 2008).

A motivação para realização do presente trabalho vem justamente da ideia de utilizar a microCT em benefício às necessidades petrolíferas atuais do Brasil aplicadas a rochas carbonáticas originárias de bacias carbonáticas e lagoas hipersalinas. O objetivo abrange aliar o uso das análises de microCT com uma técnica clássica de petrografia que é a análise de lâmina delgada. Essa etapa busca a identificação estrutural com projeções dessas estruturas ao longo das amostras. O estudo é completado com a obtenção de dados quantitativos de porosidade total, distribuição da mesma ao longo da amostra (perfil de porosidade) realizando uma identificação local dos minerais de maior contraste e distribuição dos ao longo das amostras.

A seguir, no capítulo II serão apresentadas as revisões bibliográficas do estado da arte da técnica de microCT na área geológica.

No capítulo III apresentar-se-ão os fundamentos teóricos necessários e utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Seguindo, o capítulo IV descreverá os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa de tese.

No capítulo V serão apresentados os resultados obtidos através da técnica de microCT e pelas análises das lâminas petrográficas, descrevendo as características encontradas em cada uma das amostras.

Por fim, o capítulo VI apresentará as conclusões obtidas e também algumas sugestões propostas para futuras pesquisas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo será apresentado o estado da arte da utilização da técnica de microCT nos estudos geológicos e petrofísicos.

A tomografia computadorizada (CT) foi inicialmente desenvolvida na Inglaterra pelo engenheiro Godfrey Newbold Hounsfield, o que lhe rendeu o prêmio Nobel de Medicina em 1979, juntamente com o físico sul africano, naturalizado americano, Allan Macleod Comarck. Desde a invenção do primeiro equipamento várias gerações de tomógrafos surgiram (WELLS, *et. al.*, 1994).

Com a evolução dos equipamentos surgiram os equipamentos de microCT, que permitiram análises da estrutura interna de objetos em redução de escala fornecendo informações tridimensionais atingindo resoluções da ordem micrométrica, permitindo um maior detalhamento nas imagens. Essa evolução proporcionou a disseminação da técnica de microCT para outras áreas abrindo um vasto leque de pesquisa e aplicações industriais.

HAILI LONG *et al.* (2009) estudaram a microCT aplicada a amostras de arenito deltaicos diageneticamente alterado da Bacia Campine, no nordeste da Bélgica. O objetivo foi a identificação tridimensional de minerais (quartzo, caulinita, anidrita, etc), a distribuição de porosidade e sua distribuição. Os dados de microCT foram comparados com resultados de ponto de contagem de manchas impregnadas em lâminas delgadas, a fim de qualificar a sensibilidade da técnica. Neste trabalho eles indicaram a

aplicação de microCT como uma ferramenta importante na caracterização petrográfica em reservatório de arenito. As vantagens e desvantagens desta técnica foram tratadas, bem como os problemas atuais da época inerentes a técnica. A microCT pôde ser utilizada para visualizar a distribuição e quantificar os constituintes da rocha em arenitos, especialmente para diferentes valores de atenuação, tais como anidrita, quartzo e pirita. No entanto, se a diferença nos valores de atenuação entre os minerais é baixa, como por exemplo, entre o quartzo, o feldspato e caulinita, a microCT não pôde discriminar com precisão esses minerais.

TSAFNAT *et al.* (2009) utilizaram a microCT para a visualização de microestrutura tridimensional de minerais e materiais, auxiliando a aplicação de micro-análise de elementos finitos no estudo de minerais porosos. Em seus resultados mostraram que a aplicação da microCT à mineralogia ainda é uma tecnologia muito emergente à época do estudo, tendo sido utilizada principalmente como uma modalidade de visualização que permite aos usuários ganhar medida da complexidade 3D de minerais, o que até então só havia sido analisada em um contexto 2D. Contudo, concluíram que é possível estudar a microestrutura da amostra e também de um mineral poroso, pela micro-análise de elementos finitos, com os modelos criados a partir das imagens de microCT.

YANBIN YAO *et al.* (2009) realizaram um estudo para demonstrar a capacidade da microCT para caracterização do carvão de maneira não destrutiva. A ênfase do estudo é mostrar um novo método na quantificação e visualização 3D da disposição espacial dos minerais, poros e fraturas. A disposição espacial dos poros, fraturas e minerais são muito importantes para avaliar o carvão como um reservatório. No processo, foram encontrados dois tipos principais de fraturas: fraturas de face e internas.

As fraturas foram medidas nos três planos, e, em seguida, a disposição espacial do objeto foi quantificada. Estas fraturas não estavam muito bem conectadas, e eram parcialmente cheia com alguns minerais lamelares. Foi difícil distinguir o tipo de mineral, devido à limitação de resolução de imagem, no entanto, inferiu-se que os minerais foram depositados pelo movimento da água através da camada de carvão mineralizado após o desenvolvimento das fraturas principais. A abertura, espaçamento e distribuição espacial das fraturas, juntamente com a morfologia dos minerais foram quantitativamente ou semi-quantitativamente avaliada pela microCT utilizando um desenho assistido por computador. A técnica de microCT apresentou algumas vantagens notáveis, tais como a detecção e caracterização não destrutiva e a visualização 3D da heterogeneidade de carvão. Isto faz com que seja possível desenvolver a técnica para estudar a migração dos fluidos em carvão e para avaliar a mudança da porosidade devido a redução da pressão do gás durante a produção.

SUGIYAMA *et al.* (2010) realizaram ensaios de microCT com Luz Síncrotron para estudar a matriz interna de cimento para identificar argamassas e pasta de cimentos deteriorados. As imagens foram adquiridas com alta resolução espacial (0,5 $\mu\text{m}/\text{voxel}$) usando o sistema (BL20XU / BL47XU) em Spring-8 (Super Photon ring-8 GeV), Hyogo, no Japão, que é uma das maiores instalações de Luz Síncrotron de terceira geração do mundo. Neste estudo, a energia dos fótons foi de 15 keV. Foram obtidas 1.500 imagens de projeção com um tempo de exposição de 0,30 s por projeção e passo angular de 0,12 °, rotação de 180 °. O detector de imagem consistiu em uma câmara CCD. O conjunto de dados reconstruídos era composto 1.300 imagens em tons de cinza contíguos. Para as análises foi utilizado o programa SLICE, e para a segmentação dos poros, foi usado o método global. Os resultados mostraram que a investigação por microtomografia de luz síncrotron revelou um aumento significativo no volume de

poros, derivando no aumento do grau de conectividade dos poros na matriz de cimento na pasta de cimento e argamassa deteriorada.

ROZENBAUM (2011) analisou as imagens tridimensionais, de pedras de construção (calcário), obtidas por microtomografia de raios X. A motivação foi que o intemperismo de pedras de construção é um fenômeno generalizado observada em todo o mundo, uma vez que duas pedras idênticas colocadas em dois ambientes distintos podem desenvolver duas diferentes faces de intemperismo. Os resultados obtidos neste estudo mostram que as análises de imagens 3D permitiram quantificar sílica, calcita e modificações de poros nas pedras. Estas modificações estão relacionadas com as diferenças morfológicas causadas pelo desgaste da pedra calcária na construção.

NETO *et al.* (2011) pesquisaram uma amostra de rocha carbonática heterogênea (brecha dolomítica) com auxílio da microCT integrada à petrografia para avaliar porosidade em rochas. O sistema utilizado foi o Skyscan 1173 calibrado para operar nas condições experimentais de potências variadas sendo as melhores imagens obtidas com corrente de 100 μ A e tensão de 100 kV. A análise de microporosidade demonstra o potencial da microCT integrada à petrografia para o estudo dos diferentes arcabouços porosos. Na amostra em estudo foi possível ver a distinção por microCT entre as fases ricas em calcita e as fases ricas em dolomita, permitindo verificar a associação de porosidade com a fase de dolomitização, e com maior incidência próxima à concentração de níveis de minerais opacos. A permeabilidade não pode ser medida diretamente nas análises de microCT, mas pode ser estimada por meio de cálculos e simulações a partir das imagens e dados gerados pela técnica.

OLIVEIRA *et al.* (2011) apresentaram a análise do sistema de espaço poroso de amostras de calcários, originários da Bacia de São José do Itaboraí, no estado do Rio de

Janeiro. As análises apresentadas foram desenvolvidas com base em duas técnicas: perfilagem nuclear e microCT . A utilização de microCT em rochas sedimentares permitiu uma avaliação quantitativa do sistema de poros e gerou imagens 3D de alta resolução. As imagens e os dados obtidos por microCT foram integrados com a resposta obtida pela perfilagem nuclear. Os resultados obtidos por estas duas técnicas permitem a compreensão da distribuição de tamanho de poro e conectividade, bem como os valores de porosidade. Ambas as técnicas são importantes e se complementam.

MUTINA *et al.* (2012) apresentaram uma avaliação experimental de mapeamento em microescalas de minerais em pó (quartzo, halita e calcita), mostraram que microCT permite imagens e identificação de micrômetro de tamanho de grânulos de minerais diferentes em 3D. No estudo discutiram também a possibilidade da aplicação da técnica de microCT para amostras naturais tais como rochas geológicas e as limitações da técnica. Os tamanhos dos grãos de pó eram principalmente na gama de 50 μm a 600 μm . A distribuição do tamanho de grão para um dos pós de teste foi determinada por meio da análise de microCT tridimensional. Uma operação de binarização foi aplicada à imagem para distinguir os grãos e o ar circundante. A operação de abertura morfológica foi aplicada em tridimensional para separar os grãos diferentes no espaço. Neste estudo foi utilizado um equipamento de microCT da Skyscan Bruker modelo 1172. As imagens da estrutura interna do objeto foram reconstruídas usando um algoritmo Feldkamp modificado para a geometria de aquisição de feixe cônico. Os resultados apresentados demonstram claramente que a técnica de microCT em conjunto com algoritmos apropriados para o processamento de imagem tridimensional e as informações sobre o conteúdo mineral total permite a caracterização da distribuição mineral dentro de muitos tipos de rochas naturais. No caso em que a imagem microCT apresenta um histograma com picos bem definidos, permite uma

simples segmentação dos minerais diferentes. Quando o resultado da microCT contém ruído significativo e / ou artefatos, é apropriado aplicar um pré-processamento para efetuar a segmentação da imagem adequada para o mapeamento.

MOREIRA *et al.* (2012) avaliaram o processo de binarização para caracterização estrutural de arenito por meio da microCT. Com base no manual de dados de configuração testaram a escolha do limiar para a binarização, ou seja, separar a matriz de material poroso. O sistema utilizado foi o SkyScan 1172 com tubo de raios X microfocado selado, com detector CCD (resolução 1K x 1K). Dois conjuntos de imagens foram obtidas com resolução espacial de 3,8 μm e 11 μm . Concluíram que a caracterização de um meio poroso, por análise de imagem, é diretamente influenciado pela resolução espacial e pela segmentação (*threshold*). As grandes diferenças entre os valores de porosidade mostram a dificuldade de definir o limiar de segmentação. Para o mesmo conjunto de limiar, foram determinados valores diferentes de parâmetros estruturais e físicos. Resaltam que é fundamental muito cuidado na definição no limiar de segmentação, mesmo quando se faz uso de algoritmos para limiarizar imagem. Imagens binárias devem ser fiéis aos originais em níveis de cinza, preservando além do poro e as fases de materiais e também a interface entre eles. Decisões erradas podem levar a caracterização da amostra para quantificação de dados incorretos. O algoritmo de Otsu foi o que apresentou bons resultados em comparação com demais operadores discutidos neste trabalho.

OLIVEIRA *et al.* (2012) apresentaram um estudo sobre o espaço poroso em rochas calcárias por microtomografia de raios X. A porosidade total, tipo de porosidade e distribuição de tamanho dos poros, foi avaliada a partir de imagens 3D de alta resolução. Foram escaneados três amostras de calcários com diferentes tamanhos e

formas sob as mesmas condições de operação e com resolução de 26 μm . As imagens de microCT mostraram poros, grãos e diferenças mineralógicas fornecendo uma abordagem detalhada e nova para a descrição da geometria do espaço poroso das amostras preservando a conectividade e a variação espacial de tamanhos de poros do corpo e dos poros-garganta. Também foi possível observar que os calcários variaram de estruturas porosas com longos *vugs* até estruturas fechadas com porosidade intercrystalina.

BHUIYAN *et al.* (2013) utilizaram dados obtidos através de microCT de amostras de minério de ferro de aproximadamente 12 mm diâmetro, que continham bolhas em seu interior. O volume reconstruído representou um conjunto de dados constituído por uma única distribuição tridimensional de objetos coaxiais correspondentes às cavidades das bolhas. Este conjunto de dados foi utilizado com sucesso para validar um método de estereologia para determinar a distribuição do tamanho de objetos esféricos dispersos em um determinado volume. Isto foi conseguido por meio da investigação de apenas algumas imagens transversais deste volume e medindo os perfis deixados por estes objetos nas imagens transversais. Observaram uma concordância excelente entre a distribuição do tamanho das cavidades das bolhas, bem como o seu volume.

MACHADO *et al.* (2014) utilizaram a microCT para avaliar o processo de quantificação de parâmetros geométricos, empregando diferentes resoluções espaciais. Para isto, uma amostra de rocha reservatório foi escaneada, no microtomógrafo SkyScan-Bruker, modelo 1173. Os tamanhos de pixel utilizados neste estudo foram 10, 20, 40 e 60 μm , a resolução espacial relacionada com esses tamanhos de pixel foram aproximadamente, 23, 44, 61 e 94 μm respectivamente. Os resultados constataram que a

técnica microCT é adequada para a caracterização de rochas reservatório, fornecendo parâmetros microestruturais que permitem o estudo petrofísicos da rocha. As diferenças apresentadas em todas as etapas (aquisição, reconstrução, processamento e análise) mostraram que para resoluções maiores um longo período de aquisição e reconstrução foi necessário e o processamento foi difícil, não justificando a utilização de uma resolução alta, como 23 μm . Também não recomenda-se uma resolução de 94 μm , mesmo que tenha menor aquisição e reconstrução e processamento de imagem mais rápido. Assim, a resolução de 44 μm apresentou-se mais apropriada para a experiência com amostras de rochas reservatório com diâmetro variando entre 25 e 38 μm .

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

III.1 – MicroCT

Desde a descoberta dos raios X pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen, no ano de 1895, eles vem sendo utilizados na área médica ocorrendo desde então uma significativa evolução tecnológica nos equipamentos de diagnósticos. Um dos fatores primordiais dessa evolução foi a introdução de computadores que realizavam cálculos matemáticos a partir da intensidade dos fótons de radiação (CARVALHO, 2007).

No ano de 1972, o engenheiro Godfrey Newbold Hounsfield apresentou um novo método de diagnóstico, onde seriam feitas diversas medidas de transmissão de fótons de raios X em diversos ângulos, e a partir desses valores, os coeficientes de absorção dos diferentes tecidos seriam calculados por um computador e apresentados como pontos luminosos em uma tela. Estes pontos variavam do branco ao preto, com tonalidades de cinzas variáveis, formando uma imagem correspondente a seção axial do tecido (CARVALHO, 2007).

Anterior a esse evento, no início do século XX, o matemático austríaco Johann Radon desenvolveu uma equação que seria a base matemática da CT, a “transformada de Radon”. Ele demonstrou que um objeto tridimensional poderia ser reproduzido a partir de um conjunto de projeções bidimensionais.

A microCT tem suas raízes na CT com a maioria das aplicações iniciais na área médica. Entretanto, os benefícios de se obter mapas tridimensionais de estruturas internas levaram a uma rápida adaptação da técnica em outros campos, incluindo os estudos geológicos. Atualmente a microCT está presente em importantes centros de pesquisas do país e do mundo e voltada para análise estrutural e morfológica, entre outras, nas mais diversas áreas do conhecimento.

Com resoluções na ordem de micrômetros os equipamentos de microCT de laboratório possuem um tubo de raios X e um detector de radiação fixos. A amostra é que sofre a rotação durante o processo de aquisição das imagens. A configuração médica também é possível, porém não usual no campo laboratorial. O tubo de raios X apresenta tamanho reduzido (microfoco) sendo uma das principais características do equipamento. Quanto menor o foco, melhor será a nitidez resultando em uma melhor qualidade nas imagens adquiridas. Por consequência de seu tamanho reduzido, a tensão e corrente também são menores que as encontradas em equipamentos de CT (LIMA *et al.*, 2007 e 2008).

III.1.1 – Princípios Físicos da microCT

A radiação eletromagnética, independente da posição do espectro onde se encontre, pode ser caracterizada pelo comprimento de onda (λ), frequência (ν) e energia (E). Os raios X, que são um tipo de radiação eletromagnética, são gerados quando elétrons são acelerados por um campo elétrico em direção a um alvo metálico e ao interagir com material são desacelerados. Nesse processo ocorre uma transformação

energética e a maior parte da sua energia cinética é dissipada em calor sendo o restante transformado em energia eletromagnética.

Quando um feixe de raios X, paralelo monoenergético, com intensidade I_0 incide em um material heterogêneo de espessura x , o efeito de atenuação desse feixe será a base para a formação da imagem de microCT. Essa atenuação é descrita pela lei de Lambert-Beer (Equação III.1) na qual verifica-se que a intensidade da radiação é exponencialmente inversa à espessura atravessada no material.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (Eq.III.1)$$

Na equação III.1 I_0 é a intensidade da radiação incidente, I é a intensidade da radiação que emerge do objeto, x é a espessura do material absorvedor e μ é o coeficiente de atenuação linear total e está relacionado à probabilidade dos fótons serem absorvidos.

Se considerar somente uma fatia do objeto em um plano (x,y) , esta atenuação pode ser descrita conforme a Equação III.2 (COMARK,1963):

$$I = I_0 e^{-\int_L \mu(y,x) dl} \quad (Eq.III.2)$$

Na equação III.2 (Eq. III.2) além de I e I_0 tem-se o $\mu(x,y)$ que representa o coeficiente de atenuação linear total bidimensional e dl o incremento do comprimento.

Os fótons incidem no objeto atravessando-o ao longo de um determinado caminho L em que será realizada a integração. Busca-se encontrar a função $\mu(x,y)$ a partir das atenuações que são medidas ao longo dos diferentes caminhos. Portanto reescrevendo a função $\mu(x,y)$:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_L \mu(x, y) dl \quad (Eq.III.3)$$

A função $\mu(x, y)$ pode ser redefinida em coordenadas polares (p, φ) , onde p é a distância perpendicular a partir da origem à linha L , e φ é o ângulo que a normal para L faz com o eixo ($\varphi = 0$). Assim, integrando a equação III.3 tem-se:

$$f(p, \varphi) = \int_{L(p, \varphi)} g(r, \varphi) dl \quad (Eq.III.4)$$

Para que se possa obter a imagem de uma seção de determinada amostra é necessário que se obtenham várias projeções, em passos angulares constantes (Figura III.1). A função $f(p, \varphi)$ é a projeção que representa a atenuação sofrida ao longo de cada uma das linhas. A Transformada de Radon representa a integral de linha que define cada projeção. Portanto, quanto mais projeções maior será a precisão de detalhes do objeto que será representado na imagem (NATTERER, 2001). A integral corresponde ao raio soma, sendo essa a soma de todos os coeficientes de atenuação em uma determinada direção (figura III.2).

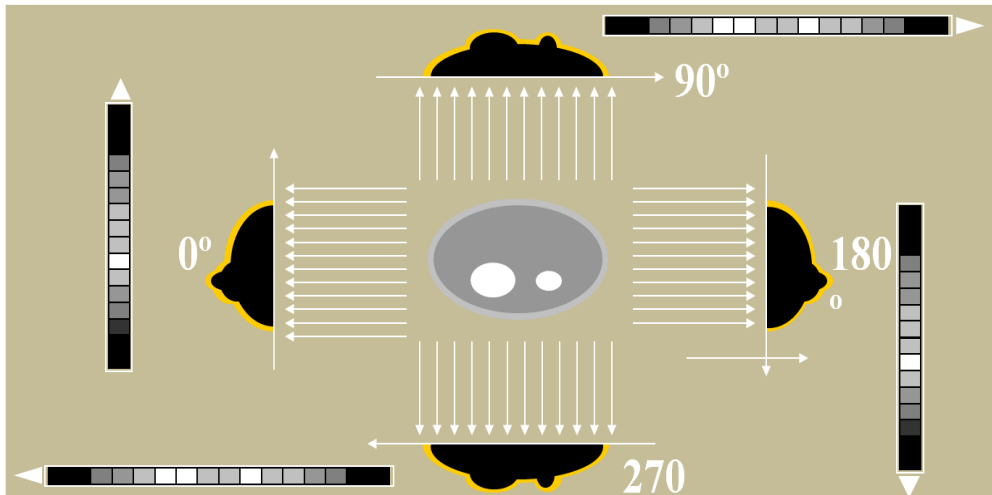


Figura III. 1: Esquema da obtenção de projeções em passos angulares constantes.

Alinhando todas as projeções ao longo de uma matriz, obtém-se um sinograma, que recebe este nome devido a uma estrutura que aparece como uma função seno (figura III.2). No sinograma, cada linha corresponde à projeção de uma seção obtida para um determinado ângulo, enquanto cada coluna indica a distância medida em relação ao centro da imagem.

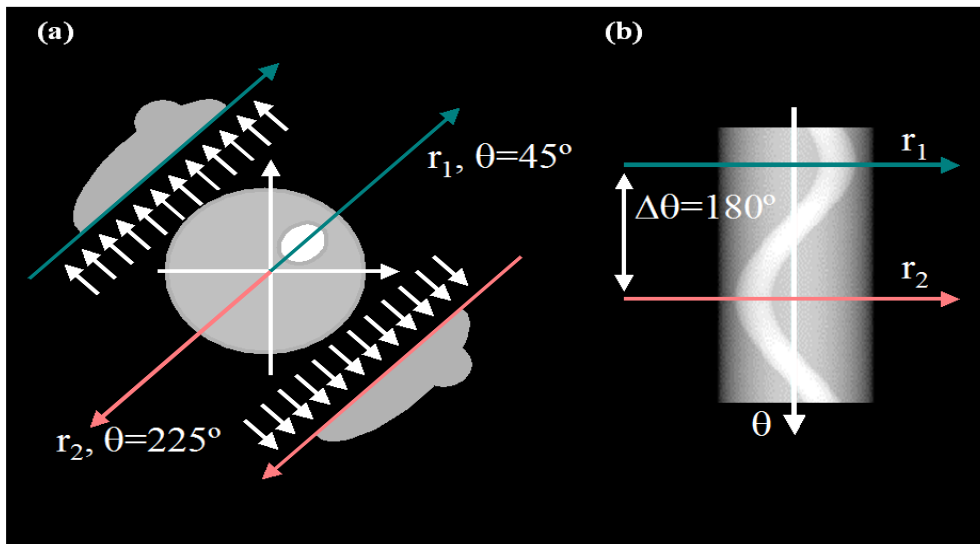


Figura III. 2: Esquema exemplificando (a) raio soma e (b) sinograma.

A reconstrução tomográfica pode ser através de vários métodos. Um deles é o método de retroprojeção filtrada, vulgarmente designados FBP, do inglês *filtered back-projection*. Um dos trabalhos mais referenciados e que até hoje muitos pesquisadores se baseiam para suas reconstruções é o estudo de retroprojeção filtrada 2D (FELDKAMP *et al.*, 1984). Porém a retroprojeção, por si só, não é suficiente para obter imagens tomográficas de boa qualidade.

III.1.2 – Feixe Cônico

A aquisição para feixe em paralelo necessita somente de projeções em um intervalo de 0° a 180° , pois as projeções opostas possuem informações idênticas. Para feixes cônicos (figura III.3) as projeções deverão ser adquiridas em uma varredura de 360° , já que as características da imagem dependerão da rotação. Nos equipamentos de microCT industrial, em geral, a geometria do feixe é cônica. Este tipo de feixe traz uma vantagem, pois permite a reconstrução de um espaço 3D diretamente dos dados de projeções 2D, ao invés de reconstruir fatia por fatia. Outro benefício é que não há necessidade de colimar o feixe, podendo ser feito o pleno uso da energia emitida (SALES, 2010). Nesse tipo de equipamento é o objeto que se movimenta (rotacionado no eixo Z), enquanto a fonte e o detector são fixos. A Figura III.3 ilustra o processo descrito anteriormente, que irá gerar uma sequência de imagens radiológicas, capturadas pela rotação da amostra em 360° em função do incremento de grau definido inicialmente.

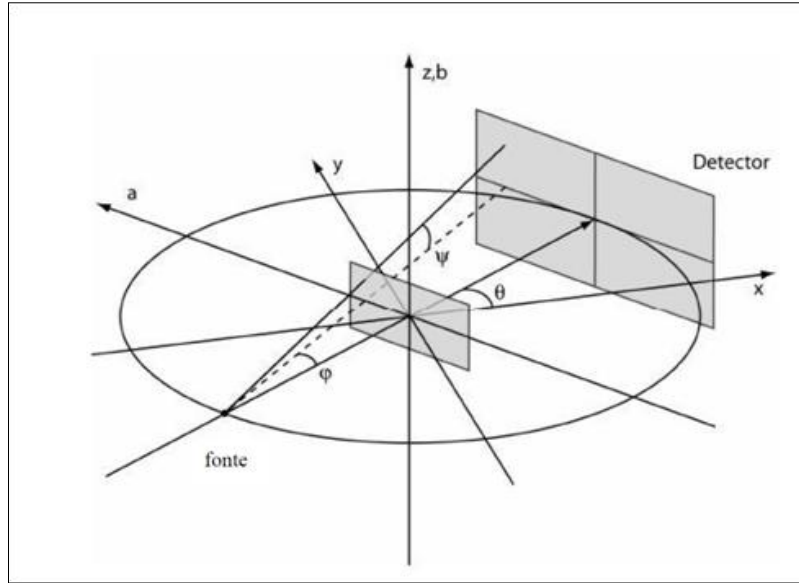


Figura III. 3: Geometria do feixe cônico (FORSBERG, 2008).

III.1.3 – Reconstrução

Várias técnicas para a reconstrução de projeções podem ser obtidas com feixe cônico, porém a técnica amplamente utilizada é baseada no trabalho de (FELDKAMP *et al.*, 1984) e conhecida como algoritmo de Feldkamp (FDK).

A equação III.5, apresenta uma expressão para as duas dimensões através da projeção tridimensional do objeto $f(x, y \text{ e } z)$.

$$P(\theta, a, b) = P(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, \theta)) = \int_L f(x, y, z) dl \quad (\text{Eq. III.5})$$

Na equação III.5 a e b são as coordenadas horizontais e verticais do detector, respectivamente. Como antes L é o comprimento geométrico que um raio se propaga através do objeto em seu caminho para o detector e θ é o ângulo da projeção. As coordenadas do detector a e b estão relacionadas à x, y, z e θ através:

$$a(x, y, \theta) = R \frac{-x \sin \theta + \cos \theta}{R + x \cos \theta + y \sin \theta},$$

(Eq. III.6)

$$b(x, y, z, \theta) = z \frac{R}{R + x \cos \theta + y \sin \theta}$$

Na equação III.6 R é o raio de trajetória da fonte. O sistema fonte-detector permanece fixo, enquanto o objeto que será rotacionado, contudo o momento angular relativo será o mesmo no caso em que fosse a fonte-detector que se movesse ao redor do objeto, o que é um parâmetro muito importante na reconstrução. Além disso, é possível observar que o sistema de coordenadas do detector aqui se desloca de modo que o eixo b coincide com a direção de z .

O procedimento de reconstrução de feixes cônicos torna-se mais complicado devido ao aumento da complexidade geométrica, que faz com que um número de fatores a ponderar seja necessário no algoritmo de reconstrução. O processo de filtração é dado por:

$$\tilde{P}(\theta, a, b) = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} P(\theta, a, b) \right) * g(a) \quad (\text{Eq. III.7})$$

Na equação III.7 denota convolução e $g(a)$ é o filtro rampa.

O fator na frente da projeção é chamado de pré-fator de peso e pode ser relacionado com a geometria do feixe através da relação

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} = \cos \varphi \cos \Psi \quad (\text{Eq. III.8})$$

Na equação III.8 φ e ψ são os ângulos leque e cônico, respectivamente. O pré-fator de peso e projeção filtrada $\tilde{P}(\theta, a, b)$ dada pela equação (III.7) são finalmente retroprojetadas no espaço tridimensional do objeto $f(x, y, z)$, e dado por:

$$f(x, y, z) \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{(R + x \cos \theta + y \sin \theta)^2} \tilde{P}(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, z, \theta)) d\theta \quad (\text{Eq. III.9})$$

III.2 – Imagem Digital

Uma imagem em duas dimensões (2D) pode ser definida como uma função $f(x, y)$, em que x e y são as coordenadas espaciais, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é a intensidade ou o chamado nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando os valores de amplitude de f para qualquer par de coordenada de x, y são finitos (quantidades discretas), tem-se a chamada imagem dita digital.

A imagem digital representará um conjunto de pontos ou pixels que formam uma matriz, onde cada *pixel* é definido como o menor elemento num dispositivo de exibição, de forma que o conjunto de *pixels* forma a imagem inteira e cada elemento é representado por um valor numérico em um tom de cinza (GONZALEZ & WOODS, 2013). A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados bits, cada bit pode admitir o valor 0 ou 1, um conjunto de 8 bits é denominado byte. Os bits ou bytes são usados para representar os pixels da imagem digital (OLIVEIRA, 2010). Cada configuração de bytes representará as diversas tonalidades de grau de cinza nos pixels, como mostra a figura III.4. O número de bytes da imagem determinará o espaço de armazenamento.

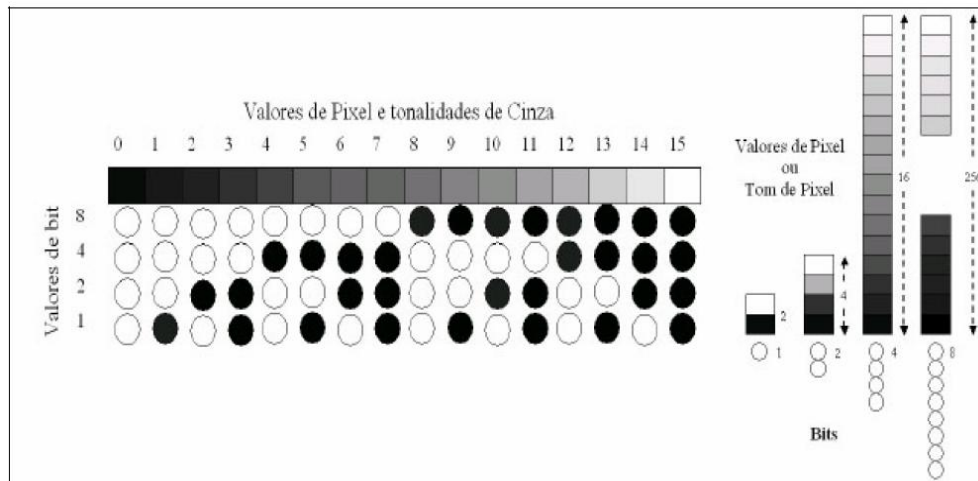


Figura III. 4: Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza (OLIVEIRA, 2010).

Quando se tem imagens em três dimensões (3D) a amostragem e quantização são representadas pelas coordenadas (x,y,z). Nesta situação a imagem será representada como uma sequência de imagens 2D ao longo do eixo z e o menor elemento nesse caso recebe o nome de *voxel*. Os *voxels* representam pontos de amostragem de fenômenos físicos e são usados para reconstruir no computador a função ou forma das estruturas 3D.

III.2.1 – Processamento de Imagem Digital

Processar uma imagem e transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair as informações nela contida é tão importante quanto obter a imagem, pois este processamento permitirá modificar, analisar e manipular as imagens digitais a partir de um computador. No processamento de imagens os dados de entrada são imagens brutas e os dados de saída são as imagens modificadas de acordo com o objetivo do processamento. A figura III. 5 apresenta um esquema com os passos fundamentais em processamento de imagens digitais.

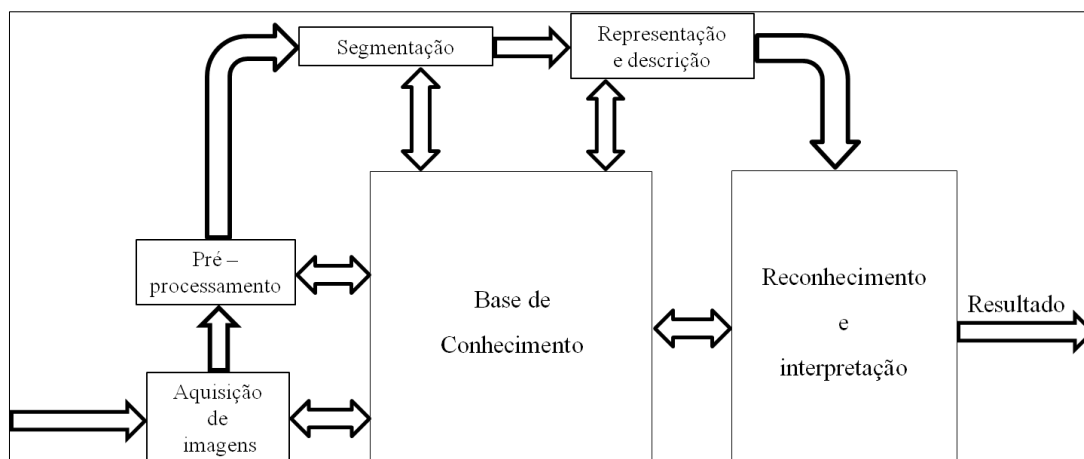


Figura III. 5: Passos fundamentais em processamento de imagens digitais, adaptado de (GONZALES & WOODS, 2013).

O primeiro passo nesse processo é a aquisição da imagem, isto é, adquirir a imagem digital. Para fazer isso é necessário dois elementos. O primeiro é um dispositivo físico que seja sensível a uma banda do espectro de energia eletromagnética (como os raios X) e que produza um sinal elétrico de saída proporcional a energia recebida. O segundo, chamado digitalizador, é um sensor com capacidade de digitalizar o sinal elétrico produzido pelo dispositivo. Dessa forma, para criar uma imagem digital é preciso converter os dados de tensão contínua em formato digital, que envolve os processos de amostragem e de quantização. Na conversão para o formato digital, ocorre o teste da função em ambas as coordenadas e em amplitude. A digitalização dos valores das coordenadas x e y é chamada de amostragem e a digitalização dos valores de amplitude é chamada quantização. A amostragem é o principal fator que determina a resolução espacial de uma imagem. GONZALEZ & WOODS (2013) deliberaram em termos gerais, que a resolução espacial pode ser descrita como sendo o menor detalhe discernível em uma imagem.

Após a obtenção da imagem digital, o próximo passo é pré-processar essa imagem. A função chave do pré-processamento é melhorar a imagem de forma a

aumentar as chances para o sucesso dos processos seguintes. Assim esse pré-processamento contemplará técnicas para realce de contraste, remoção de ruídos e isolamento de regiões cuja textura indique a probabilidade de informação alfanumérica (GONZALEZ & WOODS, 2013).

A próxima etapa trata-se da segmentação, que irá dividir a imagem de entrada em partes ou objetos constituintes, buscando identificar, localizar e separar certos predicados na imagem. A segmentação é uma das tarefas mais difíceis no processamento de imagem e será descrita de maneira mais completa no item IV.2.3.2 do capítulo IV.

A saída do estágio de segmentação é constituída tipicamente por dados em forma de pixels, correspondendo tanto a fronteira de uma região como a todos os pontos dentro da mesma. Em ambos os casos é necessário converter os dados para uma forma adequada ao processamento computacional. A primeira decisão que precisa ser tomada é se os dados devem ser representados como fronteiras ou como regiões completas. A representação de fronteiras é adequada quando o interesse for às características das formas externa (cantos e pontos de inflexão). A representação por regiões é indicada quando o interesse for às propriedades internas como textura e ou forma do esqueleto. Em algumas aplicações, entretanto, essas representações coexistem. Um método para descrever os dados também deve ser especificado, de forma que as características de interesse sejam destacadas.

O último estágio envolve o reconhecimento e interpretação. O reconhecimento é o processo que atribui um rótulo de um objeto, baseados na informação fornecida pelo descritor. A interpretação envolve a atribuição de significado a um conjunto de objetos

reconhecidos. Por exemplo, a identificação de um caractere c , requer a associação dos descritores para aquele caractere com rótulo c .

O conhecimento sobre o domínio do problema está codificado em um sistema de processamento de imagem na forma de uma base de conhecimento. Esse conhecimento pode ser tão simples quanto o detalhamento de regiões de uma imagem em que se sabe que a informação de interesse pode ser localizada, limitando assim a busca que precisa ser conduzida na procura pela aquela informação. Além de guiar a operação de cada módulo de processamento, a base do conhecimento também controla a interação entre módulos e auxilia a as operações de realimentação entre os módulos.

III.3 – Rochas Carbonáticas

As rochas carbonáticas são um tipo de rocha sedimentar de origem química e/ou bioquímica composta essencialmente por minerais carbonáticos. Segundo SUGUIO (2003), as rochas carbonáticas perfazem de 25 % a 35 % das seções estratigráficas. Entre os principais tipos de carbonatos, tem-se: calcita – CaCO_3 com densidade aproximada de $2,71 \text{ g/cm}^3$; dolomita – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ com densidade aproximada de $(2,86 - 3,10) \text{ g/cm}^3$; siderita – FeCO_3 com densidade aproximada de $3,95 \text{ g/cm}^3$; magnesita – MgCO_3 com densidade aproximada de $3,00 \text{ g/cm}^3$ e ankerita – $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)$ com densidade aproximada de $(2,86 - 2,93) \text{ g/cm}^3$. Os carbonatos mais estudados e mais comuns são os dois primeiros. Essas rochas são constituídas basicamente por três partes: grãos aloquímicos, matriz e cimento e para analisar e classificar os diversos tipos de rochas carbonáticas é indispensável à identificação de seus principais constituintes.

- **Grãos Aloquímicos** - são gerados no interior da bacia sedimentar que podem ou não sofrer transporte na própria bacia. Esses grãos são de origem orgânica ou inorgânica. Incluem oólitos, oncóides, bioclastos, “pellets” fecais, peloides, esferulitos e intraclastos (Figura III. 6).
- **Matriz** - denominada micrita, é um dos constituintes mais comuns e abundantes nas rochas carbonáticas (TERRA *et. al.*, 2010). Constitui a fração fina (tamanho silte e argila) de calcita depositada juntamente com outros grãos. Micrita é a denominação da partícula calcária, quando ela é microcristalina
- **Cimento** - também é um dos constituintes mais frequentes, normalmente ocorre em profundidades relativamente rasas. A cimentação ocorre quando os fluídos nos poros estão supersaturados com a fase cimentante; há fluxo desses fluídos e não ocorrem fatores cinéticos que inibam a sua precipitação (TERRA *et. al.*, 2010). O cimento é o material cristalino que precipita quimicamente e preenche os espaços porosos existentes na rocha, sendo composto por calcita espática e apresenta granulação maior que 10 μm . É um material indicativo de ambientes de energia moderada a alta. Os minerais carbonáticos mais importantes que cimentam são a aragonita, a calcita magnesiana, a calcita de baixo teor de magnésio e a dolomita (TERRA *et. al.*, 2010).



Figura III. 6: Principais constituintes das rochas carbonáticas (TERRA *et al.*, 2010).

III.3.1– Classificação das Rochas Carbonáticas

A classificação das rochas carbonáticas sempre foi um grande desafio. A complexidade e a variabilidade dessas rochas, além da diagênese, sempre dificultaram a criação de uma classificação que abrangesse todo o espectro de rochas carbonáticas

existente. Na grande maioria das vezes, as soluções foram adaptadas para atender demandas regionais ou problemas específicos (TERRA *et al.*, 2010).

As classificações mais utilizadas são as de (FOLK, 1959), (DUNHAM, 1962) e mais recentemente, a de (TERRA *et al.*, 2010).

A classificação de Folk é fundamentalmente composicional (Figura III.7), e a de Dunham é baseada na textura deposicional. (Figura III.8) As classificações publicadas após as de Folk e Dunham, empregaram ambas como base fundamental (TERRA *et al.*, 2010).

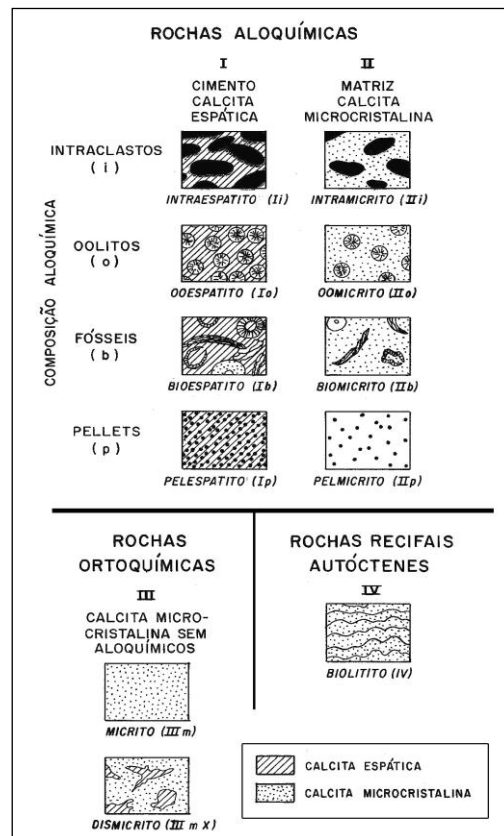


Figura III. 7: Classificação de rochas carbonáticas adaptado de (FOLK, 1959 apud TERRA *et al.*, 2010).





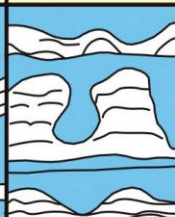
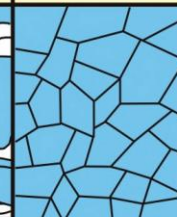
TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço é grão-suportado com matriz			
Menos de 10% de grãos	Mais de 10% de grãos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline
					

Figura III. 8: Classificação de rochas carbonáticas adaptado de (DUNHAM, 1962 apud TERRA *et al.*, 2010).

A disposição de (TERRA *et al.*, 2010) é uma classificação recente para as rochas carbonáticas. Essa categorização (figuras III.9 e III.10) está vinculada as diversas classificações anteriores, adequando e/ou modificando alguns termos, e também introduzindo novas denominações.

As rochas carbonáticas nesta classificação foram divididas devido a sua textura deposicional em quatro grupos:

- Grupo A – elementos não ligados durante a formação (mudstone, wackestone, packstone, grainstone, floatstone, rudstone, bioacumulado, brecha);

- Grupo B – elementos ligados durante a formação *in situ* (*boundstone*, estromatólito, estromatólito arborescente, estromatólito, arbustiforme, estromatólito dendriforme, trombolito, dendrolito, leiolito, esferulito, travertino e tufa);
- Grupo C – elementos ligados ou não durante a formação (laminito, laminito liso, laminito crenulado);
- Grupo D – textura deposicional irreconhecível (calcário cristalino, dolomito).

Todas as classificações acima citadas foram descritas para um maior esclarecimento e entendimento das rochas sedimentares em especial as carbonáticas. Porém, nesse estudo iremos adotar a classificação de (TERRA *et al.*, 2010) para identificar as amostras.









CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS CARBONÁTICAS APLICÁVEL AS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS					
	NOMENCLATURA PRINCIPAL	TEXTURA	DEFINIÇÃO	NOMENCLATURA COMPLEMENTAR	REFERÊNCIA OU MODIFICADO DE
Elementos não ligados durante a formação	MUDSTONE		Rocha suportada pela matriz com menos de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM (Caso ocorram grãos) oolitos, oncolitos, pelóides, peloides fecais, intraclastos, bioclastos, esferulitos ou CALCILUTITO A BIRDSEYES = rocha suportada pela matriz com porosidade fenestral ou lentes de calcita espática.	Dunham (1962)
	WACKESTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM (para os grãos) - oolitos, oncolitos, pelóides, peloides fecais, intraclastos, bioclastos, esferulitos.	Dunham (1962)
	PACKSTONE		Rocha suportada pelos grãos com matriz.	"+" (composição principal): oolítico, oncolítico, peloidal, peloidal fecal, intraclástico, bioclástico, esferulítico; com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitos, leiolito, dendrolito.	Dunham (1962)
	GRAINSTONE		Rocha suportada pelos grãos, sem matriz (< 5% de matriz).	"+" (composição principal): oolítico, oncolítico, peloidal, peloidal fecal, intraclástico, bioclástico, esferulítico; com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitos, leiolito, dendrolito.	Dunham (1962)
	FLOATSTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	COM (para os grãos) - oolitos, oncolitos, pelóides, peloides fecais, intraclastos, bioclastos, esferulitos. Com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitos, leiolito, dendrolito.	Embry&Klowan (1971)
	RUDSTONE		Rocha suportada pelos grãos com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	"+" (composição principal): oolítico, oncolítico, peloidal, peloidal fecal, intraclástico, bioclástico, esferulítico; com fragmentos de estromatolito, trombolito, laminito, leiolito, dendrolito, esferulítico.	Embry e Klowan (1971)
	BIOACUMULADO		Rocha constituída pela dominância de um tipo de organismo sem retrabalhamento (<i>in situ</i>) e granulometria areia ou maior.	"+" organismo formador: ex. ostracodes, bivalvos, macroforaminíferos, crinóides, etc....	Carozzi (1972)
	BRECHA		Rocha suportada pelos grãos com mais de 50% dos grãos angulosos maiores que 2 mm.	"+" (composição principal): intraclástica; com fragmentos de estromatolito, trombolito, laminito, leiolito, dendrolito, esferulítico.	Flügel (2004); Pettijohn (1974)

Figura III. 9: Classificação das rochas carbonáticas, (TERRA et al., 2010).














CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS CARBONÁTICAS APLICAVEL AS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS (Continuação)					
	NOMENCLATURA PRINCIPAL	TEXTURA	DEFINIÇÃO	NOMENCLATURA COMPLEMENTAR	REFERÊNCIA OU MODIFICADO DE
Elementos ligados durante a formação - <i>in situ</i>	BOUNDSTONE		Rocha formada <i>in situ</i> cujos componentes da trama original (fábrica original) foram ligados durante a deposição.	"+" principais organismos formadores: ex. coralgas, rudistas, estromatopórides, etc...	Dunham (1962)
	ESTROMATOLITO		ESTROMATOLITO		Riding (2000)
			ESTROMATOLITO ARBORESCENTE - os componentes internos se organizam de forma ramificada divergente e possuem comprimento maior que a largura.		
			ESTROMATOLITO ARBUSTIFORME - os componentes internos se ramificam ou não desde a base e a razão altura/largura é aproximadamente 1:1.		
			ESTROMATOLITO DENDRIFORME - os componentes internos se organizam de forma intensamente ramificada divergente em que o comprimento é muito maior que a largura.		
	TROMBOLITO		Depósito com textura macroscópica coagulada (clotted), maciça e dômica. Na maioria das vezes de origem microbiana.		
	DENDROLITO		Depósito microbiano de estrutura dendrítica formada por cianobactérias esqueléticas.		
	LEIOLITO		Carbonato microbiano dômico, sem laminação ou coágulos.		
	ESFERULITO		Rocha composta por partículas de formas esféricas ou subesféricas de contornos lisos ou lobados (esferulitos) de tamanho geralmente inferior a 2 mm e que podem ocorrer de forma amalgamada ou isolados.	Esferulito-suportado com argila (>10%)= ESFERULITO COM ARGILA; Argila-suportado, com esferulitos= ARGILITO COM ESFERULITOS; No caso da argila ocorrer em lamelas= ARGILITO LAMELAR COM ESFERULITOS	Este trabalho
Elementos ligados ou não	TRAVERTINO & (TUFA)		Rocha carbonática bandeada formada pela precipitação em superfície de soluções concentradas em CaCO ₃ ao redor de fontes (em geral quentes) devido a perda de CO ₂ por evaporação. A variedade mais esponjosa e menos compacta é denominada TUFA.		Riding (2000); Pettijohn (1957)
	LAMINITO		Rocha carbonática de granulação fina (lamosa e/ou peloidal) formada pela recorrência de laminações delgadas. As laminações tendem a ser plano-paralelas, com superfície lisa (origem microbiana ou não) ou crenulada (origem microbiana).	LISO CRENULADO	Demicco (1994)
textura original não reconstituível	CALCÁRIO CRISTALINO		Rocha carbonática totalmente recristalizada não sendo possível identificar sua textura original (deposicional). CALCÁRIO MICROCRISTALINO: cristais entre 5 e 50 µm		Folk (1962), Dunham (1962)
	DOLOMITO		Rocha carbonática totalmente dolomitizada não sendo possível identificar sua textura original (deposicional). MICRODOLOMITO: cristais entre 5 e 50 µm		

Figura III. 10: Classificação das rochas carbonáticas, (TERRA et al., 2010).

III.3.2 – Porosidade das Rochas Carbonáticas

A porosidade total em rochas carbonáticas tem origem complexa já que pode ter sido produzida antes, durante ou depois do processo de sedimentação. Em uma rocha a porosidade total (ϕ) é obtida pela a relação do espaço poroso total (V_p) pelo volume total da rocha (V_t), e é comumente apresentada como uma porcentagem, (Equação III.10).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (\text{Eq. III.10})$$

Essa porosidade resulta de processos geológicos, físicos e químicos (SHON, 2004). Elas podem ser ditas primárias ou secundárias. A primária é formada durante a deposição dos sedimentos (gerada durante a gênese da rocha), podendo ser inter ou intragranular. Ela tende a diminuir com o soterramento, pelo efeito da compactação mecânica e da diagênese. Já a porosidade secundária, que ocorre com mais frequência nas rochas carbonáticas, forma-se após a deposição, geralmente como processo da dissolução (SUGUIO, 2003).

III.3.2.1– Classificação da Porosidade

Há vários tipos de classificações da porosidade para as rochas carbonáticas. Entretanto, uma das mais utilizadas é a de (CHOQUETTE & PRAY, 1970) que classificam a porosidade em relação a sua textura petrográfica em três grupos: textura seletiva, textura não seletiva e textura seletiva ou não (Figura III.11).

O termo textura pode ser definido como o tamanho, a forma e o arranjo dos elementos que compõem uma rocha sedimentar. Nesse contexto, a porosidade total será classificada como textura seletiva quando for possível estabelecer uma relação de dependência entre a porosidade e os elementos que constituem a textura da rocha. E será dita de textura não seletiva quando não for possível estabelecer uma relação de dependência entre a porosidade existente e os elementos que constituem a textura da rocha (CHOQUETTE & PRAY, 1970)

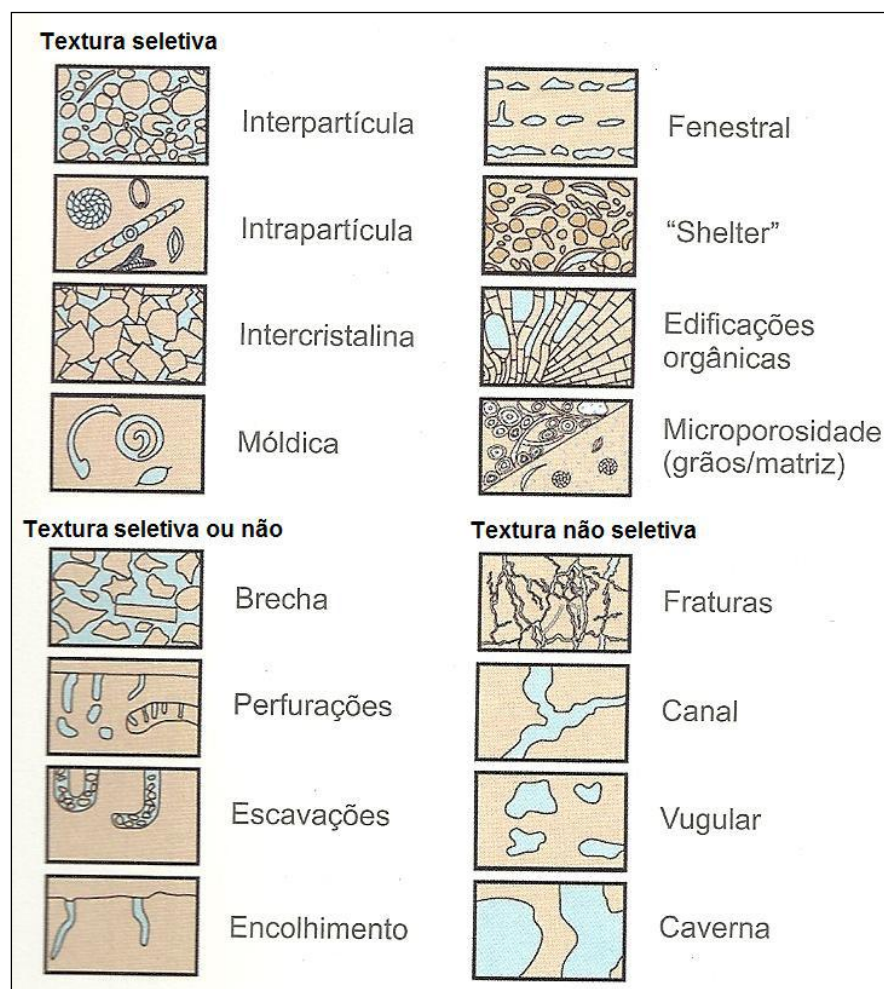


Figura III. 11: Classificação dos tipos de porosidade, (CHOQUETTE & PRAY, 1970).

Tipos descritivos de porosidade, segundo a classificação de (CHOQUETTE & PRAY, 1970):

- **Intergranular (interpartícula)** – é de origem primária, forma-se durante a deposição do sedimento. O tipo de empacotamento pode ser importante para controlar o espaço entre os poros.
- **Intrapartícula** – essa porosidade ocorre dentro do grão. Tal porosidade é comumente muito localizada e sua efetividade irá depender da micropermeabilidade do grão e da textura total da rocha.
- **Intercristalina** – é a porosidade que ocorre entre os cristais da rocha. Predomina nos carbonatos dolomitizados.
- **Móldica** – ocorre em grãos que possuem uma composição susceptível a dissolução (aragonita e calcita de alto teor em Mg) em águas subsaturadas, resultando uma textura seletiva altamente porosa.
- **Fenestral** – são pequenos poros que ocorrem comumente alinhados em carbonatos de ambiente de inter-maré e supra-maré.
- **“Shelter”** – pode ser chamador de poros de abrigo. São cavidades formadas abaixo de fósseis ou outras partículas. É um tipo raro de porosidade, mas pode complementar outros tipos de porosidades.
- **Fratura** – tipo canal vulgar e porosidade de caverna, Sua textura não é seletiva e corta elementos da textura da rocha. Resultam, normalmente, de deformações tectônicas ou colapso devido à dissolução.
- **Canal** – é normalmente desenvolvida pela percolação de águas subsaturadas em CaCO_3 . Desenvolve-se, mais comumente, ao longo das fraturas.

- **Caverna** – é originada por dissolução e está associada a processos cársticos.
- **Brecha** – é a continuação da porosidade do tipo fratura, onde os fragmentos possuem uma porosidade interpartícula. Resulta, geralmente, de quebraimento devido ao tectonismo.

Nos carbonatos a forma e o grau de conexão entre os poros não são facilmente classificados por possuírem uma geometria de espaços vazios muito complexos. Segundo, (GRATON & FRASER, 1935) quanto mais esféricos e arredondados os grãos, menores são os valores de porosidade, a porosidade aumenta com o incremento do grau de seleção e quanto maior a seleção, menor é o preenchimento dos espaços vazios por sedimentos mais finos.

Em resultado as descrições dos fatores que afetam e constitui a porosidade nas rochas, esta pode ser classificada como:

- **Porosidade Total** - é a relação entre o volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma;
- **Porosidade Efetiva** - A porosidade efetiva é a relação entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total da mesma. A porosidade efetiva é o valor que representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados do meio poroso.

As análises de porosidade realizadas para este estudo contemplarão apenas as quantificações de porosidade total calculada através da microCT e de macroporosidade medida através da lâmina petrográfica.

CAPITULO IV

MATERIAIS

IV.1. – Amostras

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos que foram realizados para caracterizar as amostras de rochas brasileiras.

As amostras utilizadas neste trabalho são originárias de diversas bacias sedimentares do Brasil e estão apresentadas na tabela IV.1. Esse grupo estudado são amostras isoladas de fácies típicas e significativas da localização escolhida. Entretanto, elas não são descritivas das formações geológicas as quais pertencem, sendo apenas um pequeno corpo de um montante. A tabela IV.1 apresenta as descrições dessas amostras.

Tabela IV. 1: Descrição das amostras de rochas

	Litologia	Formação	Idade	Procedência	Contexto Geológico
01	Calclutito	Cotinguiba	Cretáceo	Bacia SE/AL	Particulado
02	Calclutito Laminito Microbial	Salitre	Proterozóico	Bacia Irecê	Bioconstruído Microbiano
03	Calcarenito, grainstone	Riachuelo	Cretáceo	Bacia do SE/AL	Particulado
04	Pisolito Calcário	Paleoreno	Cenozoico	Bacia do Itaboraí	Particulado
05	Coquina, grainstone	Morro do Chaves	Cretáceo	Bacia SE/AL	Particulado
06	Estromatólito Silicificado	Aracaré	Permiano	Bacia SE/AL	—
07	Estromatólito Carbonático	Codó	Cretáceo	Bacia do Parnaíba	Bioconstruído Microbiano
08	Estromatólito Fosfático	Salitre	Proterozóico	Bacia do Irecê	—
09	Estromatólito Carbonático	Recente	Quaternário	Lagoa Salgada	Bioconstruído Microbiano
10	Estromatólito + Calcarenito	Salitre	Proterozóico	Bacia do Irecê	Bioconstruído Microbiano
11	Calcrete (paleossolo carbonático)	Caatinga	Pleistoceno	Bahia	Químico
12	Estromatólito I	Recente	Holoceno	Lagoa Vermelha	Bioconstruído Microbiano
13	Biolaminito	Recente	Holoceno	Lagoa Vermelha	Bioconstruído Microbiano
14	Estromatólito II	Recente	Holoceno	Lagoa Vermelha	Bioconstruído Microbiano
15	Matéria Orgânica	Recente	Holoceno	Lagoa Vermelha	Bioconstruído Microbiano

A seguir serão apresentadas as ilustrações das amostras escolhidas para o estudo deste trabalho de tese. A figura IV.1 apresenta as amostras de 01 à 06, já a figura IV.2 mostra as amostras de 07 à 12 e finalmente a figura IV.3 exibe as amostras de 13 à 15.

As amostras 01 e 02 representam calcilutitos que consistem em um calcário argiloso consolidado, que contém predominantemente partículas de calcita com granulometria similar ao silte ou argila. A amostra 02 é ainda classificada com o complemento de laminito microbial, por ser a primeira etapa do desenvolvimento de estromatólitos e os primeiros substratos fixos necessários para o crescimento estromatolítico (SILVA e SILVA, 2002). Ambas lidam com a ação de fatores físicos (luminosidade, temperatura, pressão, densidade, quantidade de água, fluxo de água) e de fatores químicos (pH, alcalização, oxidação, redução, salinidade e de compostos orgânicos) e apresentam lâminas litificadas de carbonato microcristalino (CAVALCANTI, 2005).

A amostra 03 representa um Calcarenito grainstone, que é uma rocha arenítica constituída por grãos de areia de carbonatos calcínicos. De acordo com a classificação de (DUNHAM, 1962) grainstones são suportes de grãos carbonáticos de rochas sedimentares que não contêm micrita. Os espaços entre os grãos são preenchidos com cimento espático.

A amostra 04 é um pisolito calcário que consiste em uma rocha carbonática calcária composta por concreção ou grânulo calcário do tamanho de um grão de ervilha, formado pela deposição de aragonita ou calcita.

A amostra 05 representa uma coquina que é uma rocha sedimentar composta na sua totalidade ou quase totalidade por fragmentos transportados das conchas de moluscos e outros invertebrados. Um sedimento para ser considerado coquina, necessita

que o tamanho médio das partículas que o compõem tenham no mínimo 2 mm. Coquinas podem variar em dureza de mal a moderadamente cimentada (NEUENDORF, 2005). As coquinas incompletamente consolidadas e mal cimentadas são consideradas grainstones no sistema de classificação Dunham para rochas carbonáticas.

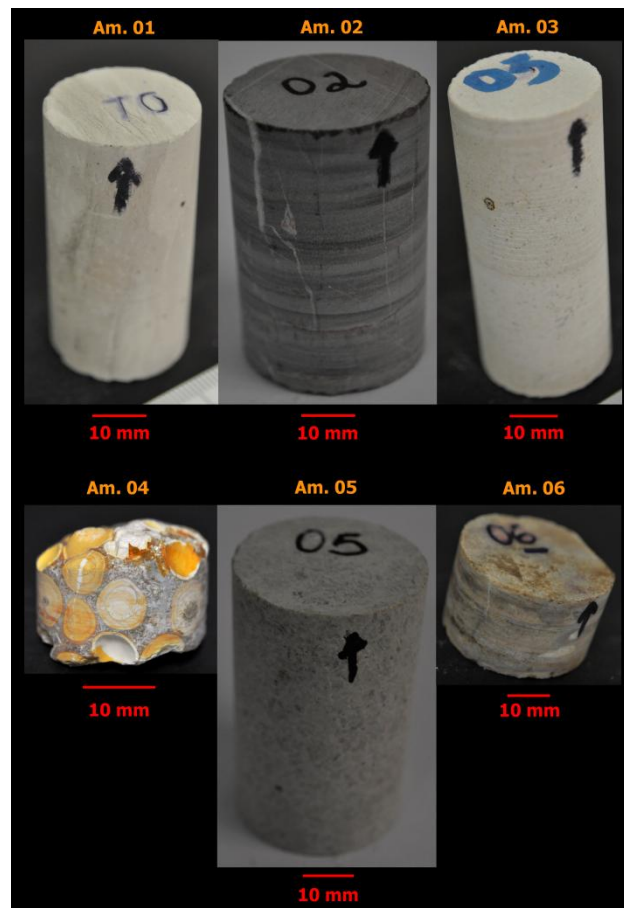


Figura IV. 1: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 01- Cacilutito, 02- Calcilutito Laminito Microbial, 03- Calcarenito, 04- Pisolito Calcário, 05- Coquina e 06- Estromatólito Silicificado.

As amostra 06, 07, 08, 09, 10, 12 e 14 representam estromatólitos. Esses podem ser definidos como rochas fósseis de estruturas biogênicas formadas pela união e aprisionamento de sedimentos, através da precipitação do carbonato de cálcio, por atividade de cianobactérias. As estruturas estromatolíticas estão presentes no registro geológicos de rochas antigas (VISSCHER & STOLZ, 2005). Os estromatólitos

desenvolvem-se a partir da ação de cianobactérias dependentes da luz solar para se alimentar e crescer. Durante o dia, quando ativas, segregam carbonato de Cálcio, que fixa e cimenta finas partículas dispersas na água, sobrepondo lâminas, o que faz surgir montículos que tendem a formar colunas verticalizadas. Já durante a noite, as cianobactérias recolhem-se em estado dormente nas porções mais internas do montículo por elas desenvolvido. A partir dessa atividade os estromatólitos surgem como formas similares aos recifes, geralmente colunares, de estrutura carbonática laminar que podem medir de um decímetro até geralmente um metro (CARVALHO *et al.*, 2004).

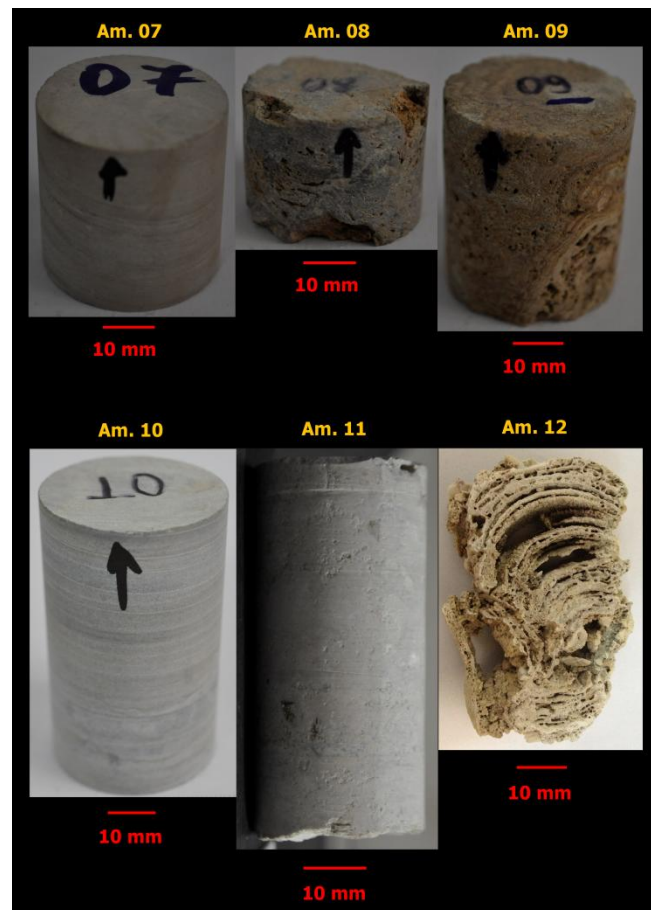


Figura IV. 2: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 07 e 09- Estromatólito Carbonático, 08- Estromatólito Fosfático, 10- Estromatólito + Calcarenito, 11- Calcrete e 12- Estromatólito Biscuit Microfacies I.

A amostra 11 representa um paleossolo carbonático, classificado como Calcrete tipo Beta (WRIGHT & TUCKER, 1991). WRIGHT (2007) definiu calcretes como a denominação geral de acumulações terrestres próximas da superfície, predominantemente de carbonato de cálcio, que ocorrem de forma variada: pulverulento, nodular, laminar e maciço.

A amostra 13 é um biolaminito que corresponde a esteiras microbianas compostas de lâminas escuras (ricas em matéria orgânica) intercalados com cinza claro, que corresponde à porção carbonática.

E por último a amostra 15 denominada de matéria orgânica que é formado por diferentes fases de decomposição de materiais microbianos apresentando também ostracodes.

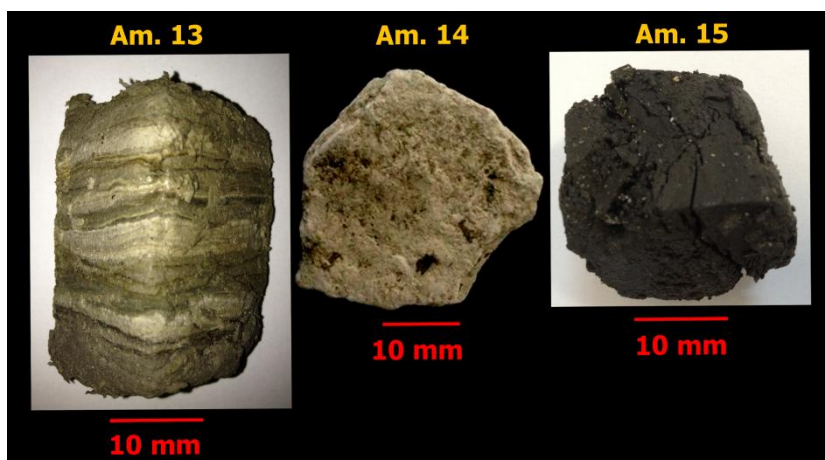


Figura IV. 3: Amostras de rochas carbonáticas utilizadas. 13- Biolaminito, 14- Estromatólito Biscuit Microfacies II e 15- Matéria Orgânica.

IV.1.2– Localização de Origem

- Bacia de Sergipe e Alagoas

A Bacia Sergipe-Alagoas situa-se na margem continental do nordeste brasileiro, ocupando uma faixa alongada na direção nordeste entre os Estados de Sergipe e Alagoas, com uma largura média de 35 km², dos quais dois terços estão em sua porção marítima (Figura IV.4). De todas as bacias da margem continental brasileira, esta é a que registra a sucessão estratigráfica mais completa, incluindo remanescentes de uma sedimentação paleozóica, um pacote jurássico a eocretácico pré-rifte amplamente desenvolvido e as clássicas sequencias meso-cenozóicas sinrifte e pós-rifte. Os limites da bacia são a Faixa Sergipana a noroeste, o Alto de Maragogi a norte, que a separa da bacia de Pernambuco-Paraíba, e a Plataforma de Estância a sul, que a separa das bacias do Recôncavo e Tucano Sul. O limite leste é inferido como a isóbata de 2.000 m, (MORAES *et al.*, 2005).

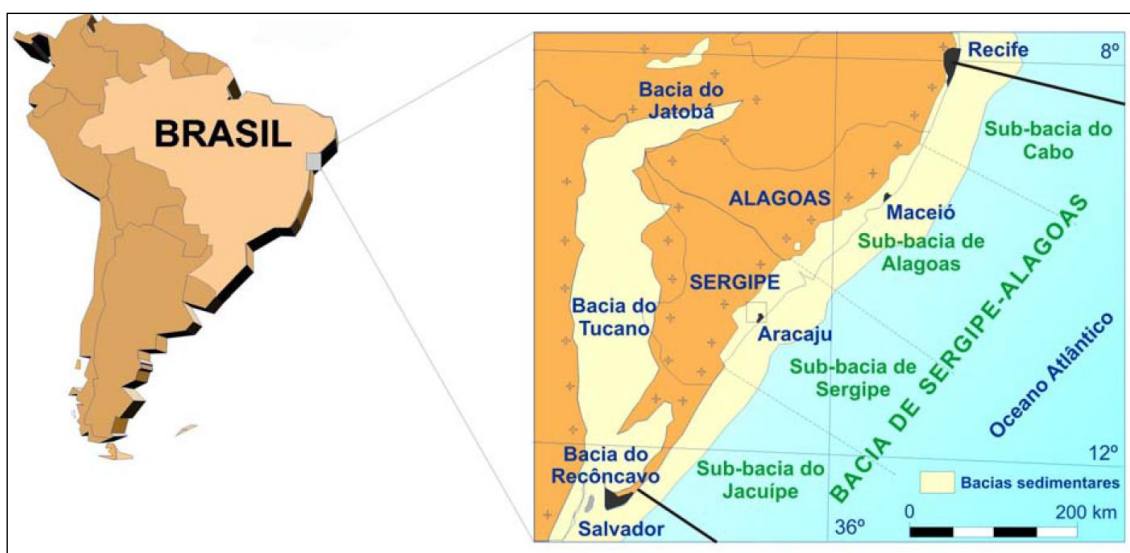


Figura IV. 4: Mapa de localização da Bacia de Sergipe e Alagoas (SOUZA LIMA, 2002).

- Bacia do Itaboraí

A Bacia do Itaboraí, é uma das menores bacias brasileiras, com aproximadamente 1 km². Ela está localizada no bairro São José, distrito de Cabuçu, Município de Itaboraí, distando cerca de 60 km do Município do Rio de Janeiro. A bacia é limitada, ao sul pelo maciço de Niterói e a norte pelas Serras dos Órgãos e sua profundidade máxima atinge em torno de 100 m (Figuras IV.5 e IV.6). Foi preenchida por uma sequência de calcários clásticos e químicos (travertinos), cortados verticalmente por canais de dissolução. Esta sequência foi recoberta por uma camada de sedimentos rudáceos (BERGQVIST *et al.*, 2008). Esta Bacia registra primeira fase (Paleoceno) na formação do rift continental sudeste do Brasil como resultado de processos tardios relacionados à ruptura do Gondwana, a separação do Brasil de África, e da abertura do Oceano Atlântico Sul. O calcário da Bacia de Itaboraí foi explorado por aproximadamente 50 anos para fabricação de cimento utilizado em inúmeras construções. A sequência de calcário é o mais grosso na parte sudoeste da bacia e se afina em direção ao norte e leste. A Bacia de Itaboraí contém os registros brasileiros mais antigos de animais e vegetais continentais posteriores à extinção dos dinossauros, no final do Cretáceo (SANTANNA *et al.*, 2004).



Figura IV. 5: Foto de satélite Bacia São José de Itaboraí (BERGQVIST *et al.*, 2008).

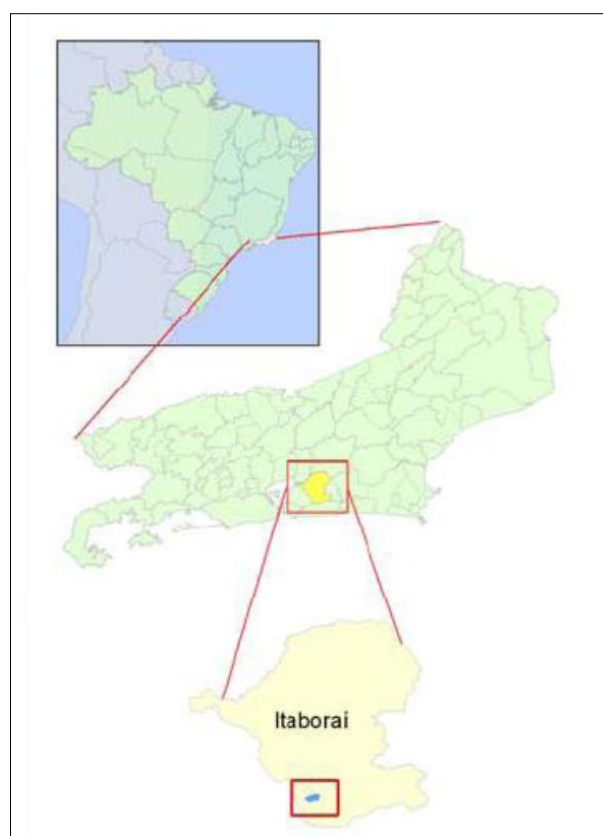


Figura IV. 6: Mapa de localização da Bacia de São José de Itaboraí (BERGQVIST *et al.*, 2008).

- Bacia do Parnaíba

A bacia do Parnaíba é uma bacia interior cratônica localizada na região Nordeste do Brasil, que ocupa uma área de aproximadamente 600.000 km² e cuja sucessão sedimentar, em seu depocentro, chega a mais de 3 km de espessura (Figura IV.7). Está limitada geologicamente a norte pelo arco Ferrer–Urbano Santos, que a separa das bacias de São Luís e Barreirinhas, na margem continental; ao sul pelo arco do Médio São Francisco, separando-a da bacia Sanfranciscana; e a nordeste, pelo arco de Tocantins, que a separa da bacia de Marajó. Pelo contexto de evolução geológica (tectônica) distinta, relacionada à desagregação do paleocontinente Gondwana, autores como PEDREIRA DA SILVA (2003) que inseriu a Formação Codó, em outra bacia (bacia do Grajaú). LISBOA (1935) descreveu a Formação Codó como uma unidade de folhelhos betuminosos associados a carbonatos e chamou os arenitos que ocorriam subordinados a ela de “arenitos Grajaú”.



Figura IV. 7: Unidades geotectônicas da Bacia Parnaíba, (PEDREIRA DA SILVA, 2003).

- Bacia do Irecê

A bacia de Irecê localiza-se no Cráton do São Francisco, o qual, de acordo com (ALMEIDA, 1977), faz parte de uma das porções da Plataforma Sul-americana não envolvida na orogênese do Brasileiro (Neoproterozóico). Esta Bacia é composta por uma sequência sedimentar carbonática depositada no contexto de um mar epicontinental em ambiente marinho raso. Esta sequência é constituída pela Formação Salitre, de idade Proterozoico Superior, de onde se originou a amostra em estudo (Figura IV.8).

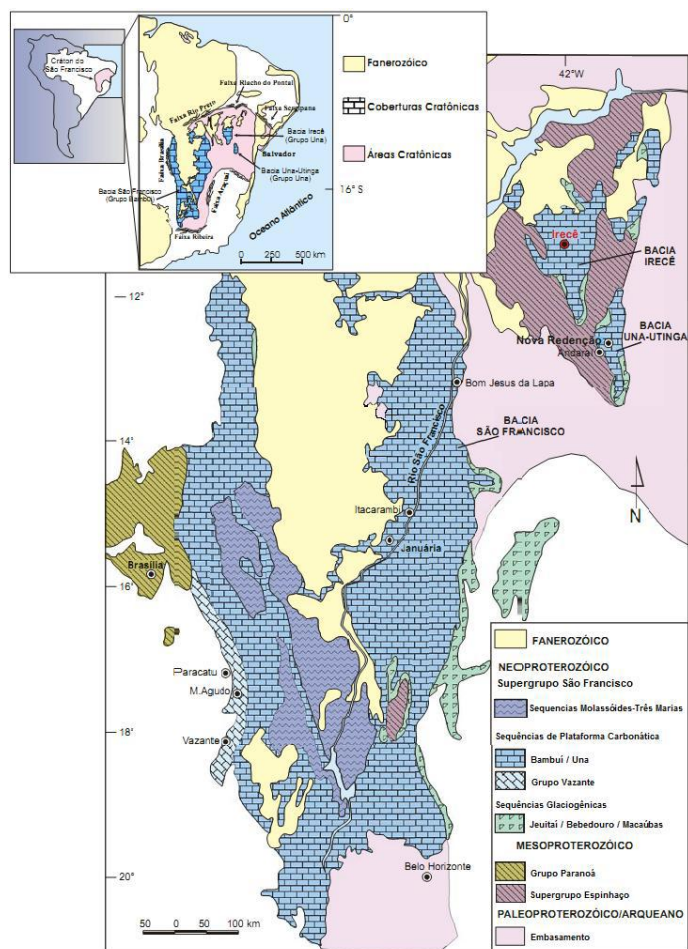


Figura IV. 8: Mapa de localização da Bacia de Irecê – Bahia, (FIGUEIREDO, 2011).

- Lagoa Salgada

A lagoa Salgada situa-se na região norte do estado do Rio de Janeiro, no litoral do município de Campos, próximo ao Cabo do São Tomé, e faz parte do complexo deltaico do Rio Paraíba do Sul e ocupa uma área total de cerca de 2500 km² e tomando parte da porção terrestre da Bacia de Campos (SILVA E SILVA, 2008). Em superfície na lagoa ocorrem grãos de quartzo e conchas de bivalvíos, gastrópodes, ostracodes e foraminíferos e em seu interior ocorrem os estromatólitos estratiformes e domal, oncoides, trombólitos e as esteiras microbianas. As paleomargens da lagoa estão distantes de 5 a 22 m da margem atual, com a presença dos estromatólitos domal e dos trombólitos. SRIVASTAKA (1999) disse que a lagoa abriga as únicas ocorrências de

estromatólitos carbonáticos colunares, domais, estratiformes, além de trombólitos e oncólitos, todos de idade holocênica tardia do Brasil e, provavelmente, de toda a América Latina. A figura IV.9 mostra o mapa da região onde está localizado a Lagoa Salgada.

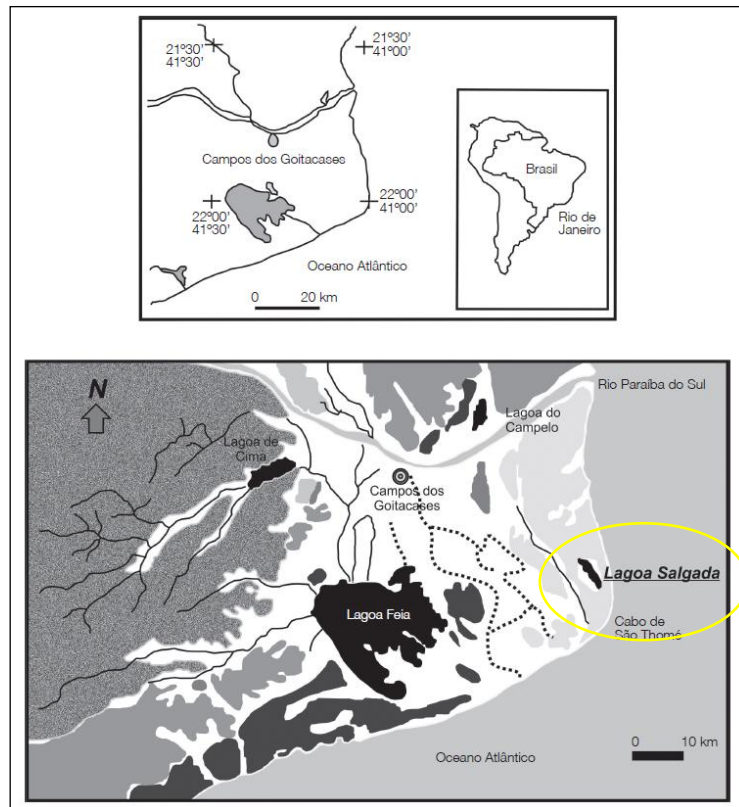


Figura IV. 9: Mapa da Região norte do estado do Rio de Janeiro, destaque para Lagoa Salgada. Modificado de (SILVA E SILVA, 2013).

- Lagoa Vermelha

O estudo de esteiras microbianas em lagunas é importante porque são excelentes ambientes para a integração da ecologia, microbiologia e geologia, permitindo a partir de observações prolongadas a implementação de novos modelos de interação sedimentológica nas estruturas das esteiras microbianas.

A Região dos Lagos, no estado do Rio de Janeiro, apresenta um conjunto de lagunas e lagoas costeiras que evoluíram desde o final do Pleistoceno até o Holoceno, as quais apresentam sedimentação orgânica (esteiras microbianas) associada a sedimentação carbonática, que inclui a formação de microbialitos (estromatólitos e oncólitos).

Dentre essas lagunas e lagoas costeiras, destaca-se a Lagoa Vermelha por apresentar registros de estromatólitos (tipo biscuit) e esteiras microbianas em formação, associadas a precipitação de diversos componentes minerais e dolomita *in situ* (VASCONCELOS *et al.*, 2006).

A Lagoa Vermelha (figura IV.10), localizada entre as coordenadas 22°55'49'' e 42°22'25'', é um corpo d'água hipersalino, pequeno (4,5 km de comprimento por 250-850 m de largura), pouco profundo (< 2 m) e de formato elíptico. Apesar de muita estudada em termos geomicrobiológicos, principalmente em relação a taxonomia de cianobactérias, a Lagoa Vermelha ainda carece de estudos sedimentológicos de detalhe. O fácil acesso a lagoa e a possibilidade de amostragem/testemunhagem, além do próprio registro de microbialitos e esteiras microbianas, a tornam um importante estudo de caso para o entendimento de modelos deposicionais análogos aos reservatórios compostos por rochas microbianas do intervalo Pré-Sal.



Figura IV. 10: Foto de satélite da Lagoa Vermelha no estado do Rio de Janeiro.

MÉTODOS

IV.2. Aplicação da MicroCT

As imagens de microCT foram obtidas em um sistema de alta energia - Skyscan/Bruker, modelo 1173 (figura IV.11). Este sistema utiliza geometria de feixe de raios X em forma de cone para aquisição das imagens. Durante a aquisição dos dados o objeto pode rotacionar 180° ou 360° com passos fixos. A cada passo uma imagem transmitida captura pelo detector é adquirida. As mesmas são salvas em arquivos de 16 bits formato TIFF. O equipamento opera efetivamente em uma faixa de tensão que varia entre 30 e 130 kV com corrente elétrica também variável até uma potência máxima de 8 W. Após o processo de aquisição, a imagem capturada é reconstruída usando um algoritmo de reconstrução FDK (FELDKAMP *et al.*, 1984). Quando a reconstrução é terminada, a imagem está pronta para ser processada e analisada.



Figura IV. 11: Foto do equipamento de microCT Skyscan/Bruker modelo 1173.

IV.2.1. – Aquisição das Imagens de microCT

Na aquisição de dados as amostras foram colocadas em um suporte de acrílico e fixadas dentro do equipamento (Figuras IV. 11 e 13) para evitar uma movimentação durante essa etapa. Um detector de tela plana (2240 x 2240 pixels) foi utilizado para registrar a transmissão do feixe de raios X. Foram obtidas projeções de 360°. De forma a reduzir a contribuição de fótons de baixa energia do feixe de raios X foi utilizado uma combinação de dois filtros: cobre (0,50 mm de espessura) e alumínio (1,0 mm de espessura). Os demais parâmetros utilizados podem ser visto na tabelas IV.2. Os filtros metálicos utilizados no momento da aquisição foram escolhidos dentre os materiais e as espessuras disponíveis buscando aumentar a energia efetiva do feixe sem diminuir a intensidade do mesmo. A figura IV.12 apresenta um exemplo de dois espectros simulados para a tensão de 130 kV: sem filtro e com a combinação de filtros utilizada neste trabalho. Note que o aumento da energia efetiva do feixe, que passou de 44,6 keV (sem filtro) para 71,7 keV (com a combinação de filtros).

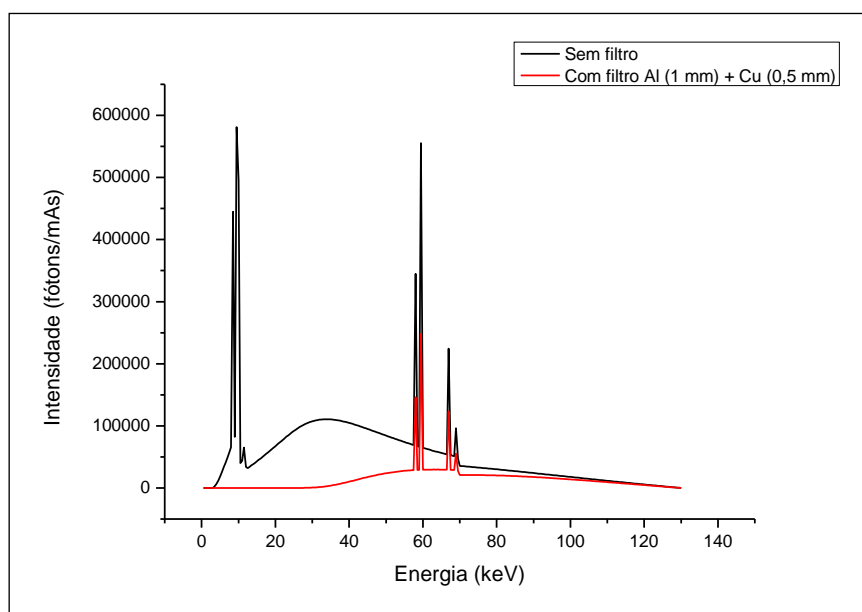


Figura IV. 12: Gráficos mostrando os espectros simulados para a tensão de 130 kV, sem filtro e com a combinação de filtros utilizada neste trabalho.

Tabela IV.2: Parâmetros de escaneamento.

Amostra	Tamanho de pixel (μm)	Tensão (kV)	Corrente (μA)	Nº de Quadros	Rotação (Graus)	Nº de escaneamento	Tempo (por escanemanto)
01	12,40	110	72	5	0,3	2	1h 08min 19s
02	18,05	130	61	5	0,3	2	2h 17min 22s
03	21,80	105	76	5	0,3	2	1h 21min 58s
04	18,05	105	76	5	0,4	2	1h 07min 33s
05	17,70	130	61	5	0,3	3	1h 32min 57s
06	13,80	130	61	5	0,4	2	1h 13min 15s
07	20,17	130	61	5	0,3	1	1h 46min 0s
08	15,57	130	61	5	0,4	1	2h 35min 15s
09	20,17	130	61	5	0,3	2	1h 46 min 0s
10	18,05	130	61	5	0,3	3	1h 22min 20s
11	18,07	130	61	5	0,3	3	1h 33min 05s
12	25,03	80	100	5	0,3	1	1h 21min 46s
13	22,91	80	100	5	0,3	1	1h 21min 46s
14	14,45	60	100	5	0,3	1	1h 21min 56s
15	23,97	75	100	5	0,3	1	1h 21min 43s

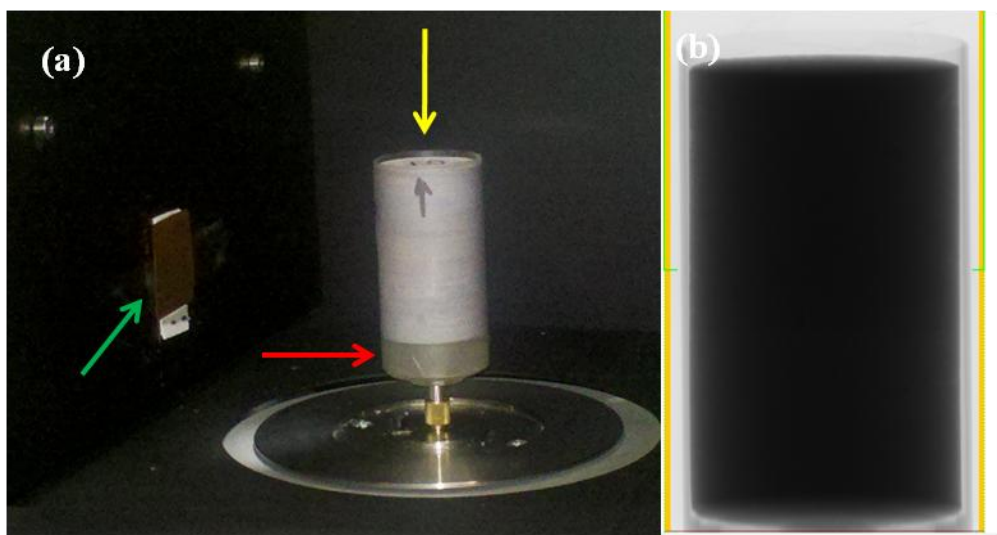


Figura IV. 133: (a) a seta amarela mostra o *plug* fixada dentro do equipamento, seta vermelha mostra o suporte de acrílico utilizado para fixar a amostra e a seta verde indica o filtro de Cu, posicionada na saída do feixe de raios X; (b) Projeção de um dos *plugs* de rocha carbonática.

IV.2.2 – Reconstrução das Imagens de microCT

A reconstrução, foi feita utilizando o software InstaRecon® versão 1.3.9.2. Nesse software de reconstrução parâmetros que podem ser ajustados para melhorar o resultado da imagem final antes do uso da mesma para quantificação e visualização. As fatias reconstruídas foram salvas como arquivos 8 bits em formato *.BMP.

Primeiramente foram estabelecidos os valores limites de mínimo e de máximo do histograma de distribuição do coeficiente de atenuação das imagens adquiridas. Ao estabelecer esses valores, o que esteve abaixo do valor mínimo foi convertido para tons de cinza com valor igual a 0 e o que esteve acima do valor máximo foi convertido para tons de cinza com valor igual a 255. Esse processo pode ser visto na figura IV.14.

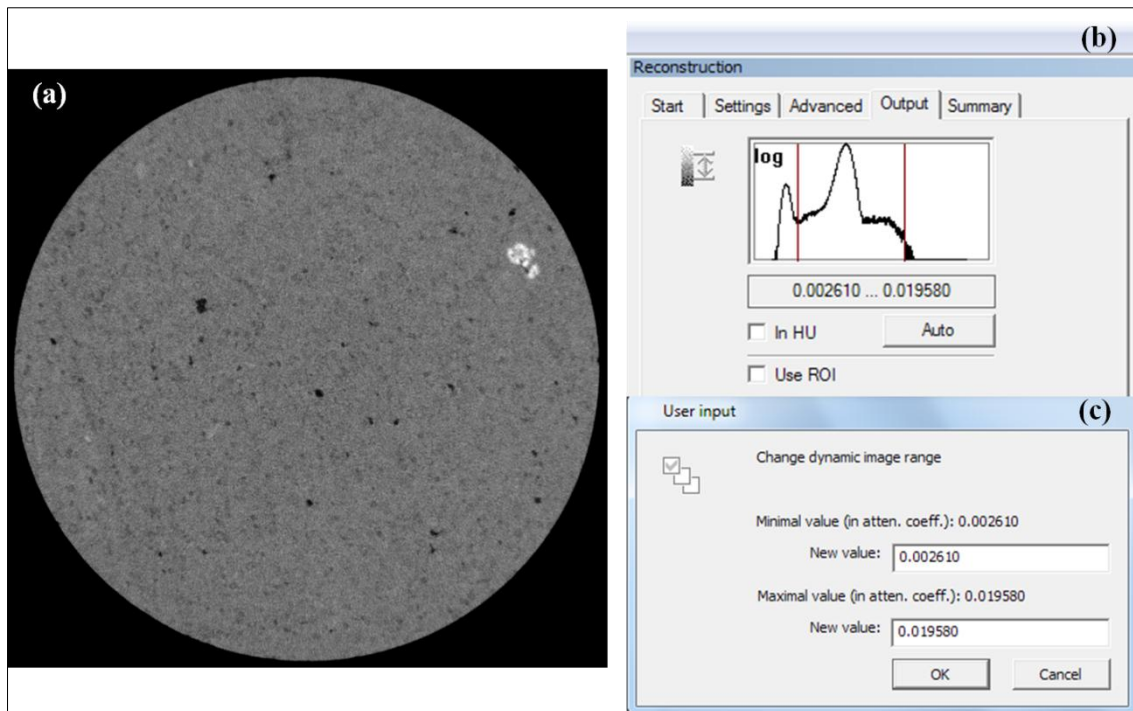


Figura IV. 14: (a) pré visualização de uma fatia transversal da amostra; (b) histograma de coeficiente de atenuação; (c) valores de máximo e mínimo para o coeficiente de atenuação.

Outros parâmetros de reconstrução foram ajustados manualmente na tentativa e erro usando a função de pré-visualização. Isso exigiu algum esforço para salvar as imagens de visualização, visualizá-los e, em seguida, tomar uma decisão. Porém o programa InstaRecon[®] apresenta a função de "*fine-tuning*" que foi designado para fazer este ajuste um pouco mais fácil com o lançamento de uma série de pré visualizações (*previews*), onde pode-se ajustar um parâmetro de cada vez mantendo todos os outros parâmetros fixos. Desta forma, podem ser sintonizados quatro parâmetros de correção: *Smoothing* (nível de suavização), *Misalignment compensation* (compensação de desalinhamento), *Beam hardening* (endurecimento do feixe) e *Ring artifacts* (artefatos de anel). Esses parâmetros estão destacados na Figura IV.15 (Manual INSTARECON, 2011).

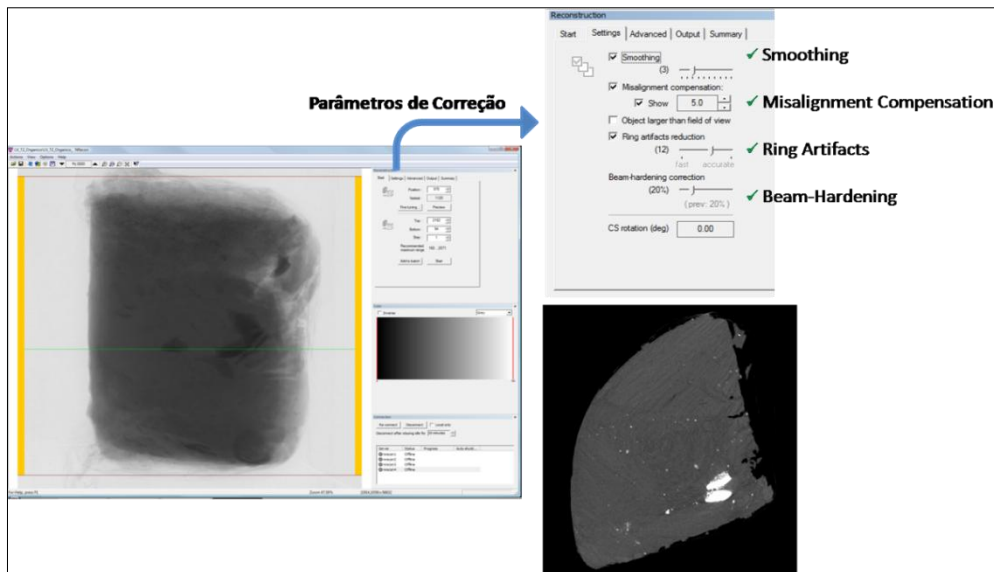


Figura IV. 15: Esquema apresentando os parâmetros de correção no processo de reconstrução.

IV.2.2.1 Smoothing

Este parâmetro é aplicado à projeção. Suaviza cada pixel de acordo com os seus vizinhos $M \times N$, onde M representa a dimensão horizontal e N é a dimensão vertical. Atua utilizando o calculo da média dos pixels vizinhos, de forma a manter um padrão. Contudo, não são utilizados pixels que tenham um valor muito diferente do analisado por certo desvio, pois fogem da distribuição ao redor do pixel avaliado. Esse parâmetro é capaz de reduzir o ruído, mas pode introduzir desfoque em estruturas finas.

IV.2.2.2 Misalignment compensation

Este parâmetro compensa possíveis desalinhamentos durante a aquisição. É um parâmetro importante, pois o alinhamento errado causaria sombras, dobrando ou embaçando a imagem reconstruída. Atua compensando quaisquer diferenças entre a projeção atual e a projeção imediatamente oposta a 180° .

IV.2.2.3 Beam hardening

Os fótons que compõe um feixe de raios X são de natureza polienergéticas, ou seja, correspondem a um valor de energia mínima até uma energia máxima que dependerá da tensão aplicada ao sistema. À medida que esse feixe interage com determinados materiais esse se torna "duro", isto é, sua energia efetiva aumenta, uma vez que os fótons de baixa energia são absorvidos mais rapidamente que os de alta energia. De tal modo, um feixe de raios X ao passar pelo centro de determinada amostra se tornará mais "duro" do que ao passar pelas bordas dessa mesma amostra, pois interagirá com mais materiais. Assim, por ser menos atenuado esse feixe chega ao detector de maneira mais intensa.

Esta opção atua compensando o efeito de endurecimento do feixe por uma transformação linear (compensando a atenuação que ocorre no centro em relação às bordas). O range de correção vai de 0 à 100 % e pode ser selecionada de acordo com a densidade do objeto. A utilização de filtros físicos na saída do feixe de raios X também ajuda na correção desse parâmetro de endurecimento do feixe.

IV.2.2.4 Ring artifacts

A maioria dos artefatos de anel são devido a pequenas variações de sensibilidade entre os pixels do detector, pelo fato de alguns pixels terem sensibilidade significativamente diferente de seus pixels vizinhos, por exemplo, um pixel morto (0 sensibilidade), ou um pixel muito brilhante. Esse erro surge em cada posição angular medida, o que resulta em um artefato circular. Ocasionalmente observam-se anéis parciais, que são muito provavelmente devido a defeito de pixels que só mostram

sensibilidade anormal em determinados ângulos de projeção (por exemplo, devido à diferente efeito endurecimento do feixe de vista diferente).

Um valor médio é obtido em uma vizinhança definida pelo grau de correção do anel (com um mínimo de 7x7 pixels). Cada pixel com defeito é então substituído por uma média ponderada dos seus "bons" vizinhos. Na prática, esse fator de correção é bastante eficaz em reduzir substancialmente anéis causados por pixels quase mortos. Mas infelizmente, não irá garantir uma remoção de 100% dos anéis. Atualmente este equipamento de microCT apresenta a opção de escaneamento em forma espiral, com isso, teoricamente estes artefatos circulares em anel serão eliminados.

A tabela IV.3 apresenta os valores de ajustes utilizados nesse trabalho para cada um dos quatro parâmetros. E a figura IV.16 exemplifica todos esses parâmetros de correção.

Tabela IV. 3: Valores dos parâmetros de correção utilizados antes do processo de reconstrução das imagens microtomográficas.

Amostras	<i>Misalignment compensation</i>	<i>Smoothing</i>	<i>Ring artifacts</i>	<i>Beam hardening (%)</i>
01	4,00	4	15	9
02	3,50	3	17	15
03	5,00	4	10	12
04	2,00	3	9	10
05	3,00	3	22	18
06	2,50	4	12	9
07	2,00	4	11	15
08	3,00	4	11	15
09	4,5	3	14	20
10	5,50	2	14	16
11	6.50	3	26	18
12	4,50	3	12	20
13	2,50	3	17	5
14	0,50	2	17	0
15	2,50	3	8	11

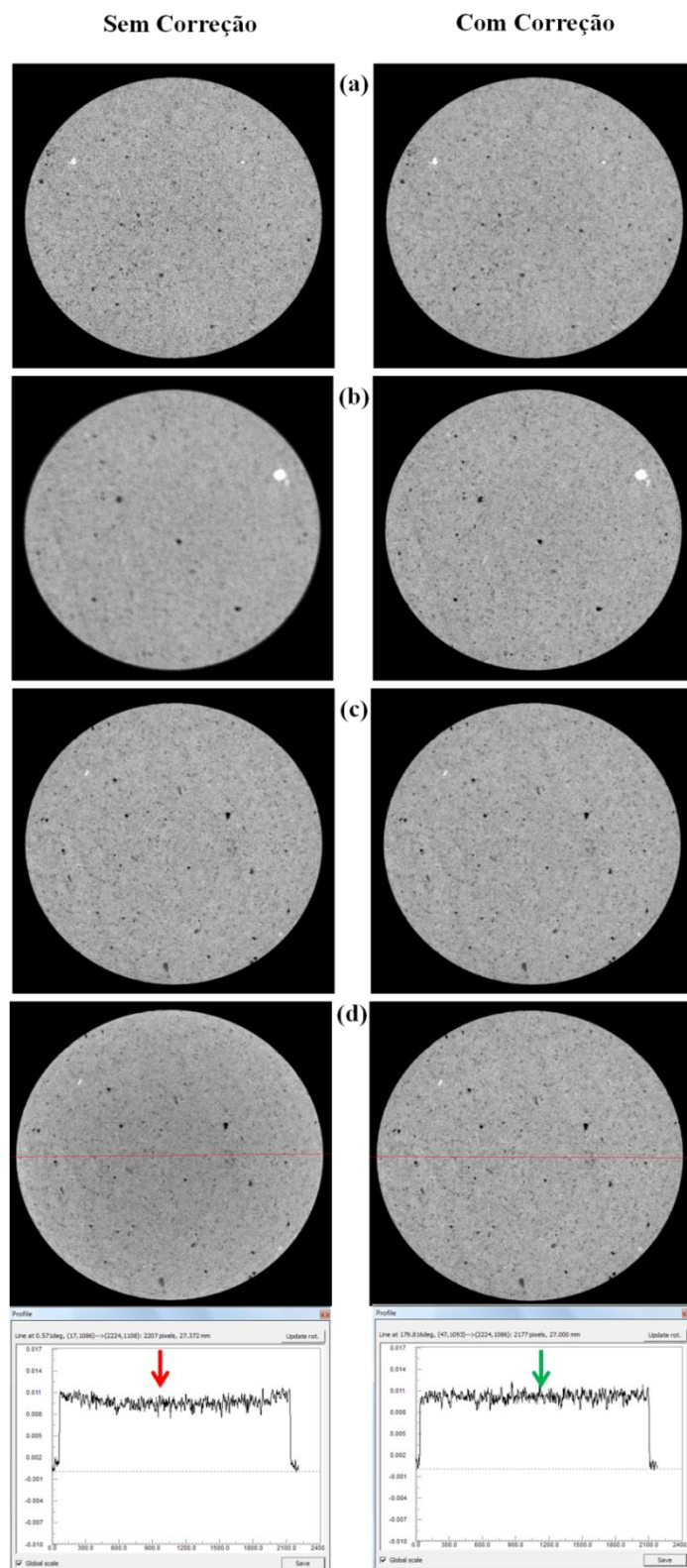


Figura IV. 16: Aplicação parâmetros de correção; (a) Correção do *smoothing* (suavização); (b) Correção do alinhamento; (c) Efeitos de anel, nota-se principalmente no centro da amostra; (e) Correção do endurecimento do feixe, é possível notar a linearização nos gráficos (indicados seta verde e vermelha), após a correção.

IV.2.3 – Análises quantitativas e qualitativas de microCT

Posteriormente as reconstruções foram feitas as análises quantitativas. Para isso foi empregado o programa CTAn[®] versão 1.13.5.1. Este software é desenvolvido e comercializado pelo próprio fabricante do equipamento de microCT e permite quantificar os parâmetros referentes às imagens. Nesse estudo ele foi utilizado para calcular: volume total contido no volume de interesse (VOI), a porosidade total (ϕ), o perfil de porosidade, a distribuição do tamanho dos poros, o percentual do volume dos minerais de maior densidade e a distribuição destes últimos. A figura IV.17 apresenta um esquema evidenciando o organograma de aquisição, reconstrução e visualização das amostras.

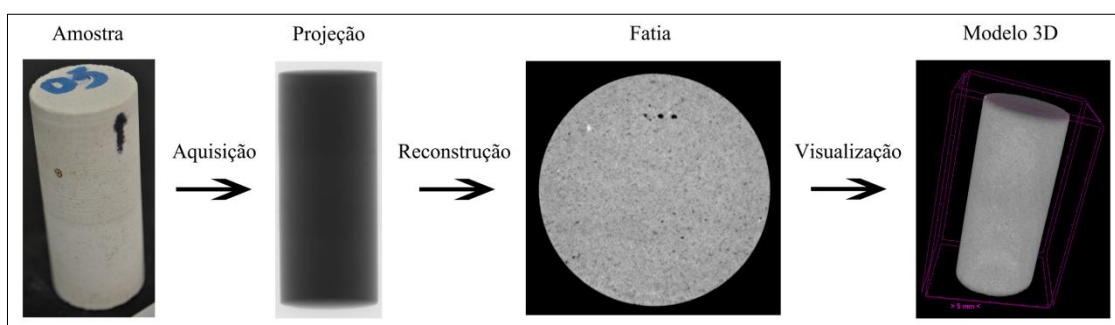


Figura IV. 17: Esquema mostrando aquisição, reconstrução e visualização de amostra 03 (Calcarenito).

Para a quantificação das imagens de microCT é primordial determinar uma região de interesse (ROI). Neste estudo, o ROI se refere a uma fatia transversal enquanto que o VOI se refere à soma de todas as fatias transversais representando um volume e é a partir desse volume que as avaliações foram feitas, (Manual SKYSCAN 1173b, 2011).

IV.2.3.1 – Segmentação (binarização)

A segmentação de imagens consiste em particionar uma imagem, de acordo com algum critério de uniformidade, em regiões ou partes homogêneas, o que pode representar um ou mais objetos de interesse. Aqui, uma região de interesse (ROI) no plano transaxial reconstruído (x-y) deve ser designada, tornando possível a avaliação. Os métodos mais simples de limiarização utilizam um único ponto de corte também conhecido como *threshold* (TH). Em alguns casos, no entanto, não se consegue apenas um limiar que resulte em uma boa segmentação para toda a imagem. Para esses casos existem técnicas de limiarização variáveis e multiníveis baseadas em medidas estatísticas. No caso deste trabalho, estamos interessados em identificar e quantificar, tanto regiões que correspondem aos poros, assim como regiões que correspondem ao mineral de alta densidade. Logo, interesse maior é em separar duas únicas fases, escolhendo dois valores de TH distintos e, assim separando os dois objetos de interesse dentro do ROI.

Existem várias abordagens para segmentação das imagens digitais. No entanto, não existe um método consagrado. A metodologia mais usual e rotineira para atribuir valores aos pixels na imagem 2D (secções transversais) é o baseado na estimativa de um TH (limiar) global a partir do histograma de intensidade da imagem, sendo um processo dos mais rápidos. Este método foi o utilizado neste trabalho.

Na escolha do TH global um estudo comparativo é realizado entre as imagens originais, em tons de cinza, e as novas imagens já binarizadas, em preto e branco. Matematicamente, o TH global pode ser definido pela equação (Eq. IV.11) em que $f(x,y)$ representa a imagem de entrada, enquanto que T representa o valor de limiar (TH) e $G(x,y)$ está relacionada com a imagem de saída (segmentada). Aqui, quando T for

encontrado é que a imagem será transformada numa imagem binária, e assim o conjunto de dados será capaz de ser avaliado, (GONZALES & WOODS, 2010).

$$G(x,y)=\begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) \geq T \\ 0, & \text{contrário.} \end{cases} \quad (\text{Eq. IV.11})$$

onde: $f(x,y)$ = imagem de entrada, T = valor do limiar (TH) e $g(x,y)$ = imagem de saída (segmentada).

Dessa forma, foi possível separar os poros (pretos) da matriz da rocha (branco), permitindo assim a quantificação da porosidade, um exemplo desta segmentação pode ser visto na figura IV.18 (MACHADO *et al.*, 2015).

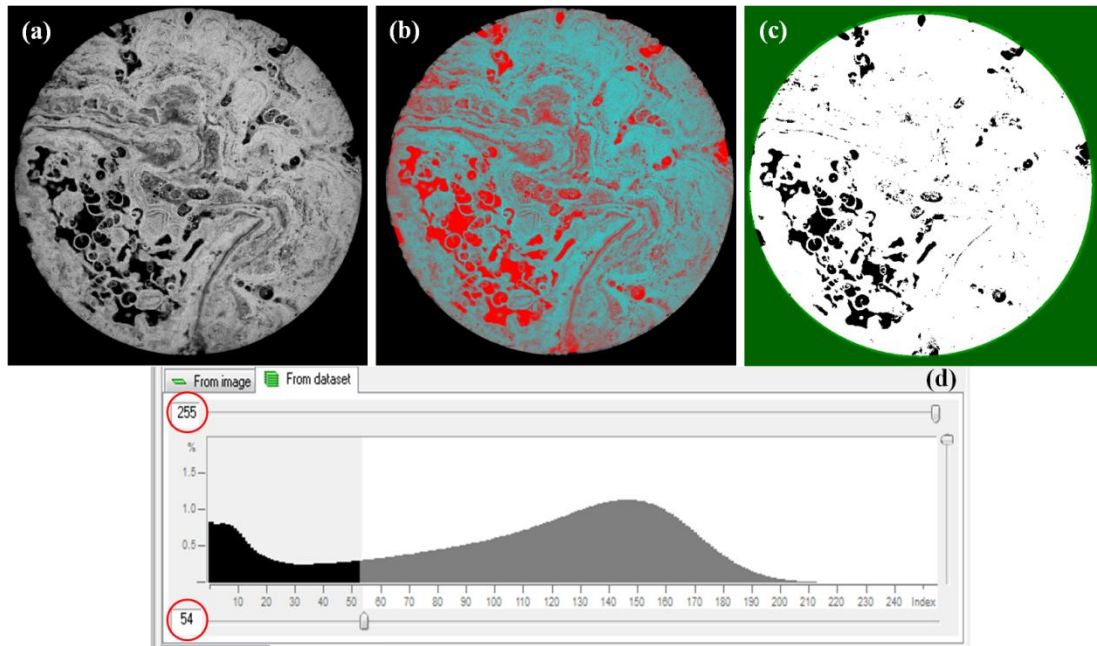


Figura IV. 18: Esquema para as análises quantitativas. (a) fatia 1731 da amostra 09, (b) em vermelho a ROI determinada, (c) segmentação da amostra para quantificação dos poros (pretos) e matriz da rocha (branco), (d) histograma de intensidade dos tons de cinza de todas as secções transversais.

Qualquer objeto pode ser escolhido para ser evidenciado na binarização através do método global, desde que tenha contraste suficiente na imagem. Dessa forma, além da porosidade foram destacados os minerais de maior densidade (apresentados através dos pixels brancos) e o restante da imagem foi representada por pixels pretos, sendo estes a matriz remanescente. Um exemplo dessa segmentação está mostrado na figura IV.19 (MACHADO *et al.*, 2015).

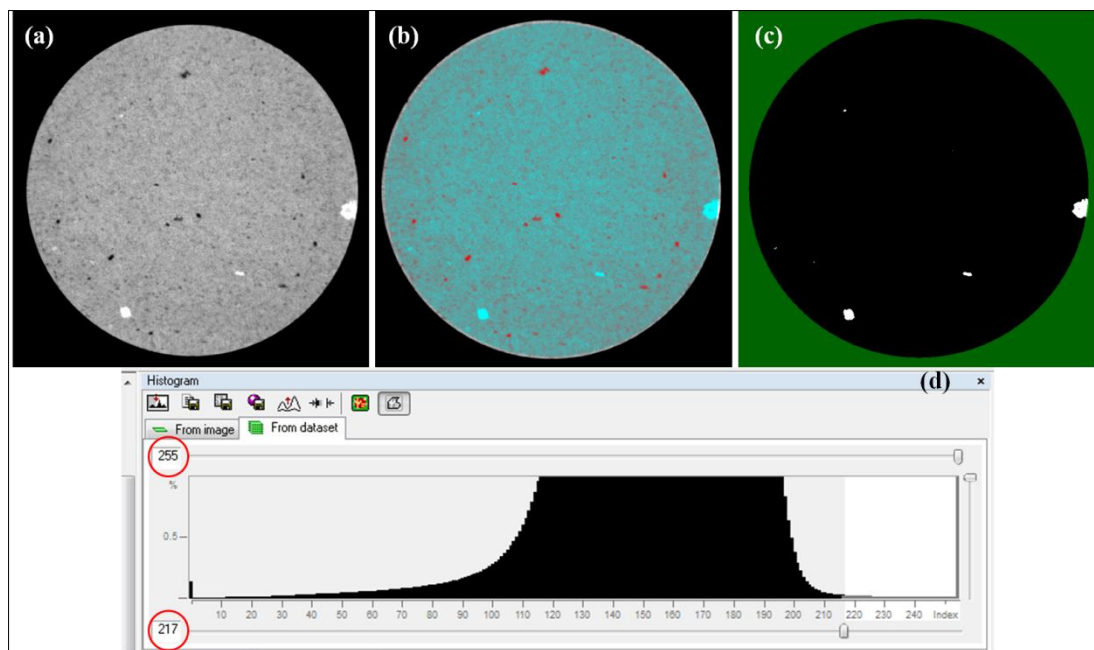


Figura IV. 19: Esquema para as análises quantitativas. (a) fatia 2661 da amostra 03 , (b) em vermelho a ROI determinada, (c) segmentação da amostra para quantificação dos minerais de maior densidade (branco) e poros e matriz da rocha (preto), (d) histograma de intensidade dos tons de cinza de todas as secções transversais.

IV.2.3.2 – Parâmetros Morfométricos

Os parâmetros morfométricos que foram calculados pelo programa CTAn[®] se encontram listados a seguir.

- Volume total contido no VOI (TV, mm³): Volume total do volume de interesse (VOI);
 - Percentual de VOI ocupado pelos objetos binarizados (Obj.V/TV, %): A proporção do VOI ocupada por objetos sólidos binarizados (poros ou minerais). Este parâmetro depende do volume estudado ser totalmente contido dentro de uma região bem definida (material e espaço vazio). O significado do volume medido em percentagem depende dos critérios aplicados na escolha do volume de interesse. Nesse estudo, a porosidade total é complemento deste parâmetro para a totalização de 100 % de volume de amostra analisado, ou seja, $\phi + (\text{Obj.V}/\text{TV}) = 100\%$.
 - Os dados de perfil de porosidade, distribuição de tamanho de poros e distribuição dos minerais de maior densidade foram obtidos com análises em 2D.

Foi criada uma lista de tarefas (*task list*), onde constam todos os passos para a obtenção de todos os dados de quantificação. A figura IV.20 apresentam essas *task lists* utilizado nesse trabalho.

Neste ponto é importante ressaltar que para as amostras de 12 a 15, por serem irregulares, utilizou-se o *plug-in "shrink wrap"*. Esse *plug-in* oferece uma maneira de fazer a ROI/VOI exatamente seguindo o contorno do objeto sólido segmentado. Isto permite, em seguida, usar o perímetro do objeto como a região de referência, como por exemplo, para o estudo do percentual porosidade interna da amostra e outros parâmetros, (Manual SKYSCAN 1173b, 2011).

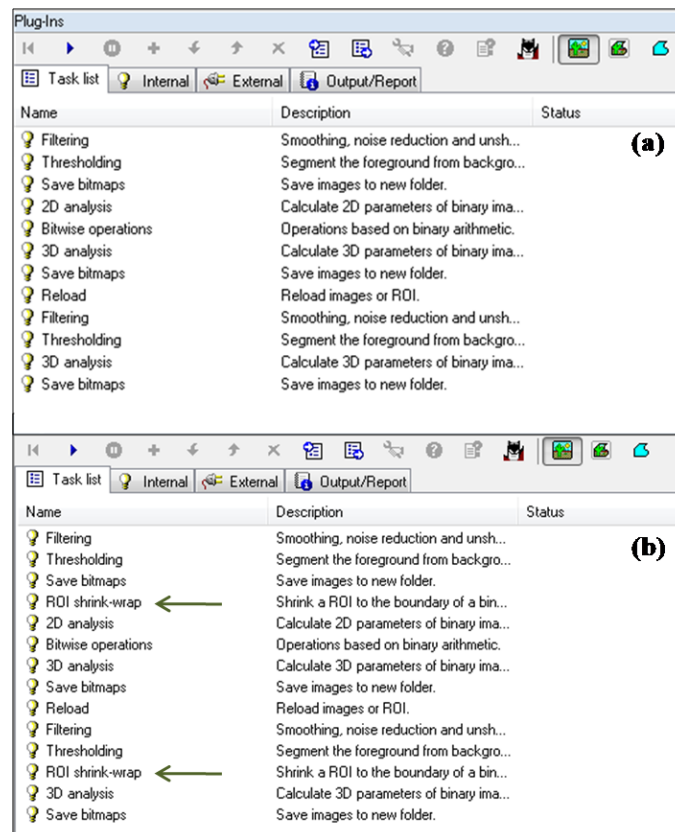


Figura IV. 20: *Task list* utilizado para as quantificações, as setas verdes na (b) indicam o *plug-in ROI shrink wrap* utilizados para as amostras de 12 a 15.

IV.2.3.3 – Modelos em três dimensões (3D)

Os modelos 3D para as análises qualitativas foram gerados utilizando o programa CTVox® versão 2.7.0. Esse programa opera com a renderização de volume, que é uma técnica de visualização 3D que trabalha diretamente sobre os dados de volume (dados reconstruídos), ao invés de utilizar um modelo geométrico extraído a partir destes dados. Ele permite fazer interativamente partes selecionadas dos dados mais ou menos transparente, proporcionando uma maneira de ver através dos dados e, assim, revelar estruturas complexas de determinado objeto em 3D, MANUAL CTVox® (versão 2.7.0).

IV.3 – Lâmina Petrográfica

Com o objetivo de auxiliar os dados estruturais obtidos pela microCT foram utilizados neste trabalho resultados obtidos a partir da descrição de lâminas delgadas, confeccionadas em algumas amostras após a realização dos ensaios de microCT, podendo-se assim traçar um paralelo entre as duas técnicas.

As lâminas petrográficas ou seções delgadas são uma importante fonte de informação sobre as propriedades físicas, processos de cristalização e evolução das rochas. Elas são preparadas em laboratório, a partir de amostras de rochas e são observada com auxílio de um microscópio petrográfico. Uma pequena porção da rocha é cortada com uma serra adiamantada (ou a laser), montada numa lâmina de vidro e polida com pó abrasivo até se obter uma espessura de aproximadamente igual a 0,03 mm. A figura IV.21 apresenta lâminas petrográficas das amostras 02 e 09.

O microscópio eletrônico utilizado para as descrições das lâminas foi do modelo AXIO Imager.A2m fabricado pela Zeiss® e a análise foi feita com polarização cruzada.

A partir da observação visual da lâmina petrográfica foi estimada sua porosidade. Nesse momento é importante ressaltar que a porosidade ϕ_{delgada} estimada na lâmina delgada é um resultado em duas dimensões. A porosidade através dessa abordagem foi estimada através da contagem direta sob o microscópio eletrônico de varredura com auxílio de um corante de alto contraste.

Considerando a lâmina com uma espessura unitária, a porosidade pode ser expressa por uma razão de áreas. Por motivos de qualidade, em termos da visualização, na maioria dos casos, a ϕ_{delgada} é estimada a partir da individualização dos grãos, que são

melhor individualizados sob um reticulado em que os poros são preenchidos pelo corante (TUCKER, 1989).

Explicitando um pouco mais ϕ_{delgada} , seja A_m a área dos grãos (número de células do reticulado preenchidas por grãos) e A a área total da lâmina (número total de células do reticulado preenchidas pela lamina), a porosidade (ϕ_{delgada}) pode ser estimada pela Eq. IV.12:

$$\phi_{\text{delgada}} = 1 - \frac{A_m}{A} \quad (\text{Eq. IV.12})$$

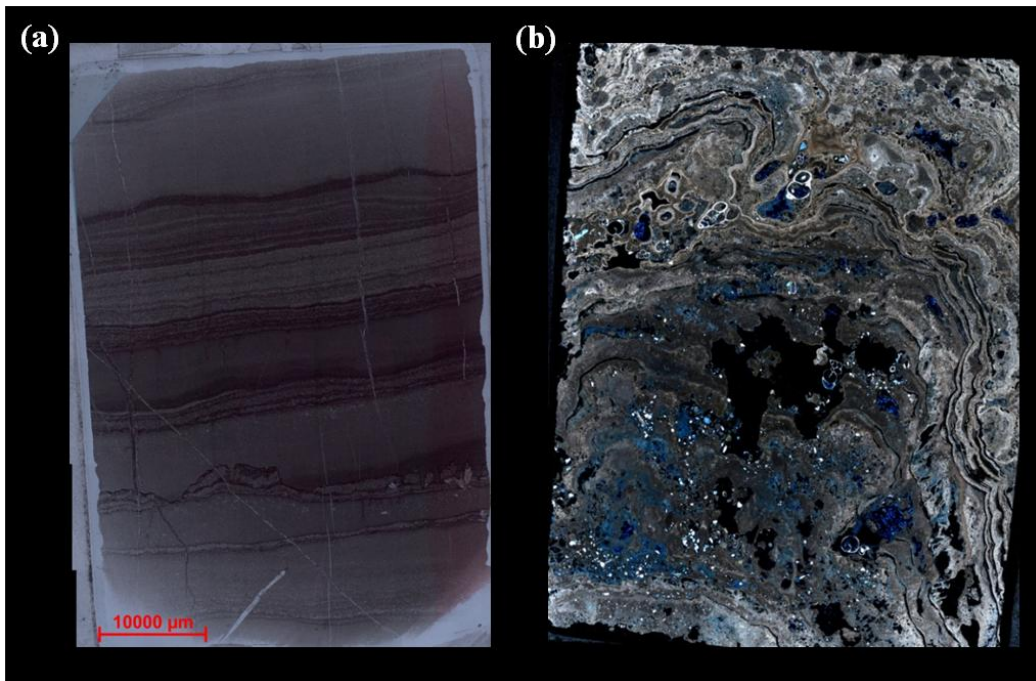


Figura IV. 21: Fotomicrografia da Lâmina petrográfica feita a partir das amostras 02 (calcilutito laminito microbial) e 09 (estromatólito carbonático).

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos neste estudo. Serão apresentadas as descrições de lâmina delgada, os resultados de obtidos através da microCT, tais como a quantificação da porosidade total, o perfil de porosidade, a identificação de estruturas e a quantificação da identificação dos minerais de maior densidade que se destacam devido ao alto contraste em relação o restante da matriz carbonática. Como os minerais constituintes das amostras apresentam uma similaridade no valor coeficiente de atenuação, nesse estudo limitou-se em apenas quantificar o volume dos de maior densidade sem diferenciá-los. A identificação da densidade dos minerais e sua posterior quantificação mineralógica requer a utilização de metodologias mais avançadas, tais como a encontrada em (ALVES *et al.*, 2014).

V.1 – Amostras da Lagoa Vermelha

Os primeiros estudos com microCT para este trabalho foram feitos em amostras de microbialitos retirados de testemunhos extraídos de Lagoa Vermelha - RJ. Estas amostras correspondem a depósitos de microbialitos organosedimentar, formados por aprisionamento de sedimentos, tendo a ligação e/ou a precipitação como um resultado do crescimento e a atividade metabólica dos microrganismos, principalmente cianobactérias, (ARMS, 2005). Dessa procedência quatro amostras foram analisadas e são de formação recente de idade Holoceno. Nessas amostras foram analisados

parâmetros como porosidade total, perfil de porosidade, identificação de algumas estruturas, assim como quantificação dos minerais de maior contraste.

As análises de microCT permitiram identificar estruturas internas (ostracodes, laminações, grãos de carbonato), diferente mineralogia (dolomita, calcita e quartzo), bem como quantificação e distribuição de poros fornecendo uma descrição sobre os microbialitos sedimentares. As Figuras V.1 à V.5 mostram os resultados da microCT respectivamente para as seguintes amostras:

Amostra 12 – As diferentes mineralogias (calcita e Calcita-Mg) podem ser vistas na Figura V.1 (b). A porosidade total da amostra foi de 11 % e a distribuição espacial dos poros é mostrado na Figura V.5 (a).

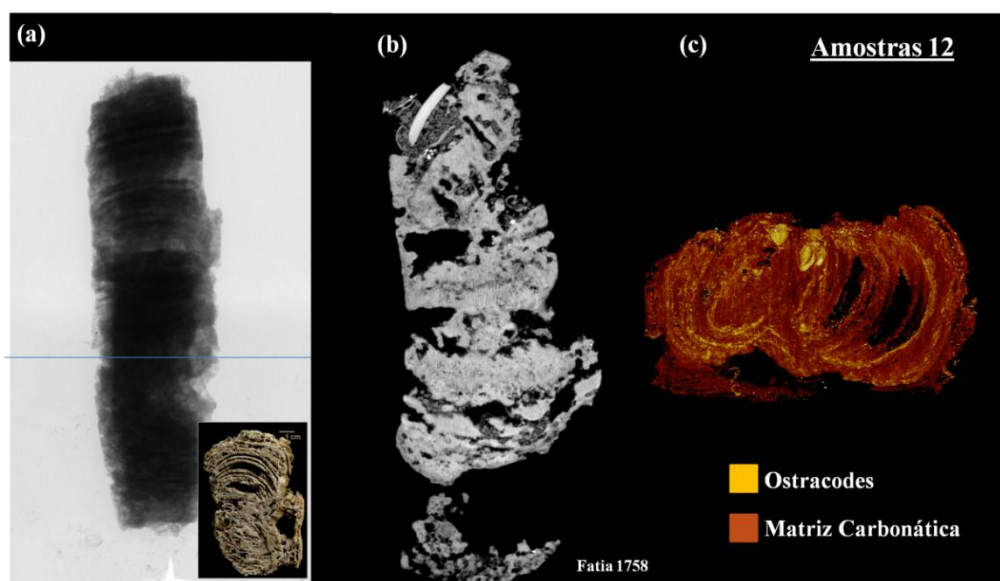


Figura V.1: Imagens microtomográficas da amostra 12 (Estromatólito I), (a) Projeção (b) fatia 1758 e (c) imagem 3D, nota-se os otracodes destacados em amarelo em meio a matriz carbonática na cor laranja.

Amostra 13 – Nesta amostra, os resultados das diferenças de composição (presença de calcita, dolomita, matéria orgânica e grãos brilhantes, possivelmente

quartzo) são mostrados na Figura V.2 (c - f). Foi possível quantificar 0,01 % de quartzo e dolomita e mais de 14 % de calcita. A distribuição de poros ao longo da amostra pode ser vista na Figura V.5 (b); as análises quantitativas resultaram em uma porosidade total de 0,46 %.

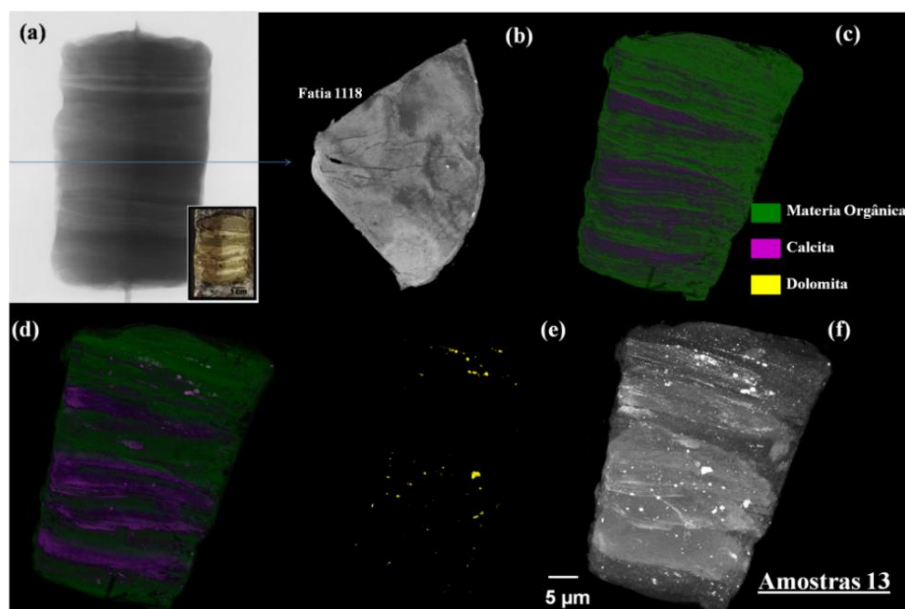


Figura V. 2: Imagens microtomográficas da amostras 13 (Biolaminito), (a) Projeção (b) fatia 1118 e (c, d, e e f) imagens 3D.

Amostra 14 – A figura V.3 (c e d) mostra que o estromatólito II apresenta uma massa difusa de maior densidade de material carbonato. Isto ocorre possivelmente como um subproduto do processo de dolomitização associado a uma distinta colônia de cianobactérias e correspondendo a 0,97%. A porosidade total da amostra foi de 0,35%. A Figura V.5 (c) apresenta o perfil de porosidade para essa amostra.

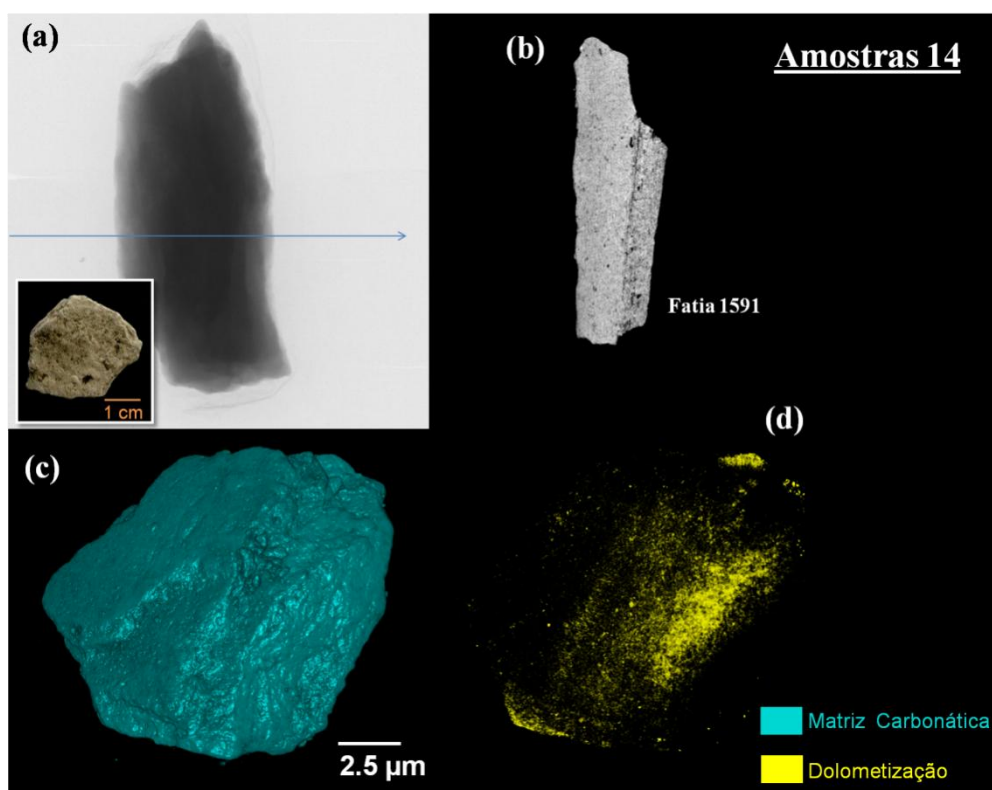


Figura V. 3: Imagens microtomográficas da amostras 14 (Estromatólito II), (a) Projeção (b) fatia 1591 e (c e d) imagem 3D.

Amostra 15 – A laminação é vista pela concentração dos grãos carbonáticos (0,74%) no interior da matéria orgânica (tapete microbiano) através de linhas brilhantes apresentadas na Figura V.4 (e). Na Figura V.4 (f), ostracodes (0,39%) estão presos nos tapetes microbianos, alguns ocorrendo com as valvas fechadas e outros fragmentados (transportados por tração / suspensão em baixa energia). Assim, os elementos de maior densidade totalizam 1,13 % do volume total. A porosidade total da amostra é de 0,75%. O gráfico de distribuição de poros pode ser visto na Figura V.5 (d).

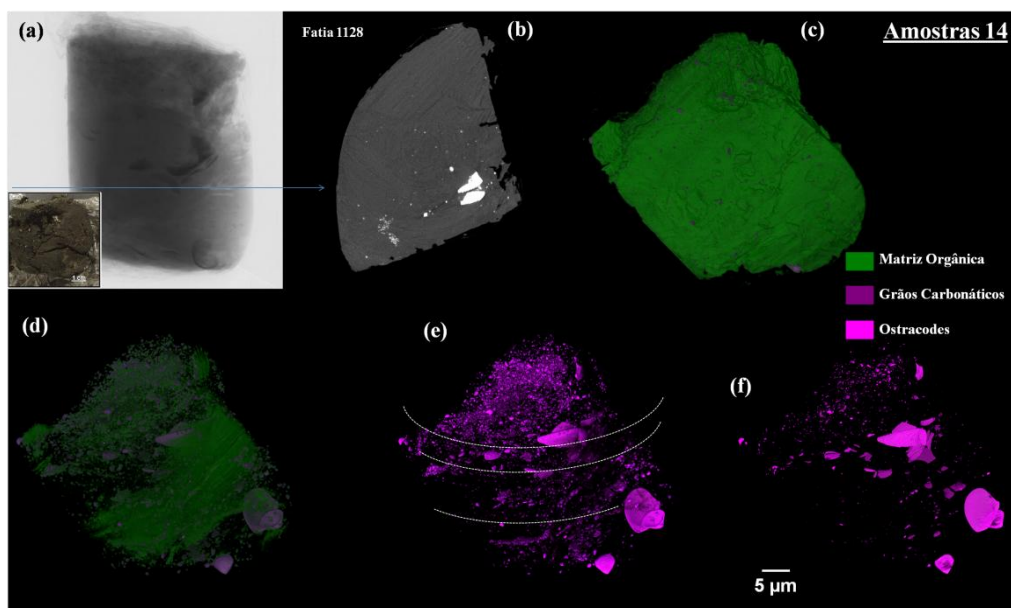


Figura V. 4: Imagens microtomográficas da amostras 13 (Material Orgânico), (a) Projeção (b) fatia 1128 e (c, d, e e f) imagens 3D.

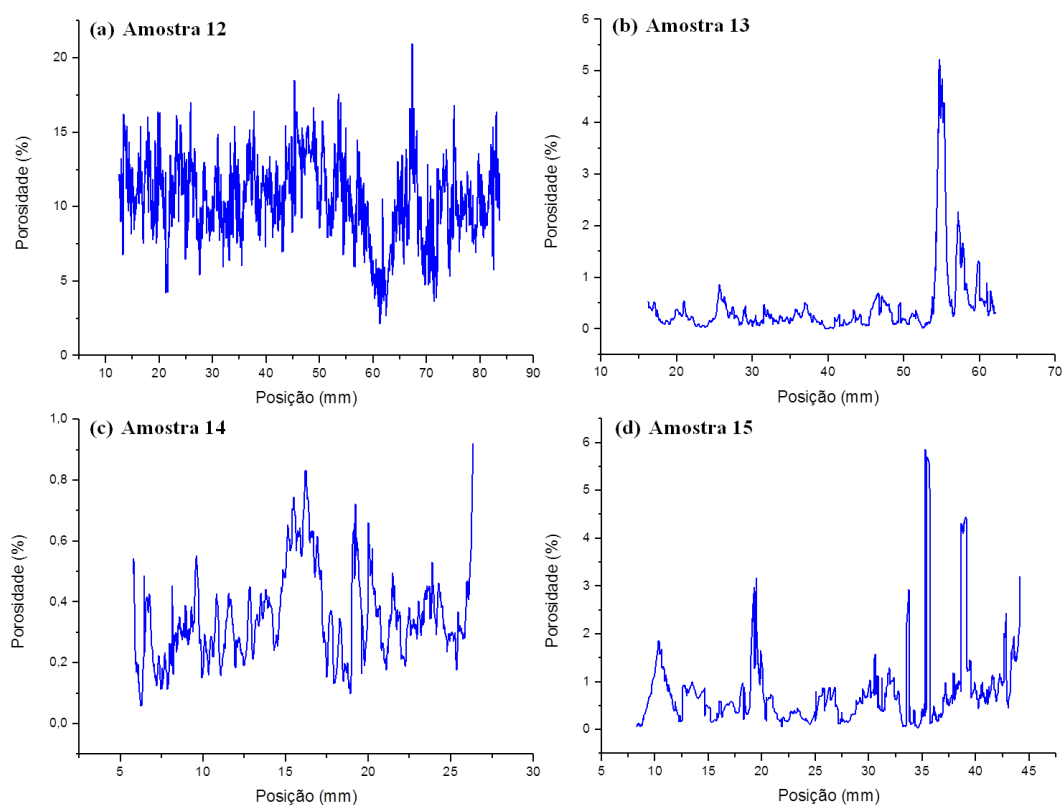


Figura V. 5: Gráfico do perfil de porosidade ao longo das amostras (12, 13, 14, e 15).

V.2 – Amostras Bacia do Irecê - Formação Salitre

A bacia do Irecê teve três amostras estudadas, todas da Formação Salitre idade Proterozóica. A primeira foi a amostra 02 que corresponde ao calcilito laminado microbiano. A segunda foi denominada de amostra 10 que é um estromatólito (calcarenito). Para essas duas amostras foram feitas a descrição das estruturas através da lâmina petrográfica, identificação de estruturas através dos 3D, porosidade total, perfil de porosidade, quantificação dos minerais de maior contraste e distribuição desses minerais ao longo da amostra. A terceira amostra foi a amostra denominada de amostra 08 que representa um estromatólito fosfático. Nessa última amostra, após a confecção da lâmina delgada, verificou-se que se tratava de um estromatólito totalmente fosfatizado, sem nenhum resquício carbonático. Por esse motivo a amostra 08 não se encontra nesta seção de resultados, pois fugiu do escopo do trabalho que visou caracterizar somente rochas carbonáticas.

Amostra 02 – Os resultados da lâmina delgada para amostra de Calcilito laminado de composição calcítica/dolomítica, apresentou níveis ricos em matéria orgânica, marcando a laminação (Figuras V.6 e V.7). Os níveis microbianos são opulentos em matéria orgânica, servindo de catalisadores para a dissolução química quando a rocha passa a condições de compactação mais avançada (estilólitos), além de contribuir no aumento dos cristais na recristalização. Observam-se fraturas pós-deposicionais preenchidas por calcita cortando a rocha em diversas direções. Estruturas de ressecamento (*Tepees*, Figura V.8) são observadas na porção inferior da lâmina delgada pela quebra dos níveis microbianos e pelos nódulos de sílex (Figuras V.9 e V.10) que são precipitados em condições áridas. Os níveis com ausência ou presença de

níveis microbiais indicam a ciclicidade do ambiente, que por vezes possui condições físicas e químicas propícias para o crescimento desses organismos.

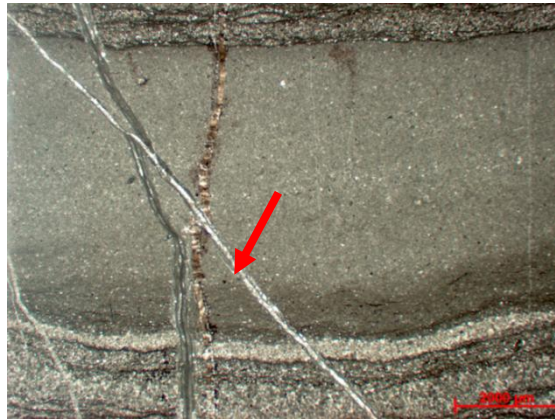


Figura V. 6: Calcilutito com níveis ricos em matéria orgânica (estilolitos) intercalados com calcita/dolomita. Fraturas pós-deposicionais preenchidas por calcita cortam a rocha em diversas direções (seta).

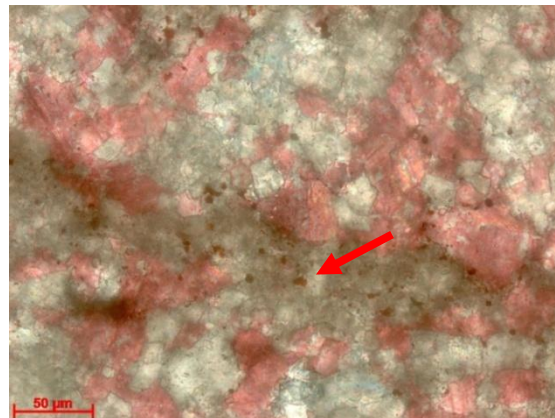


Figura V.7: Dolomita (seta) substituindo calcita (cor rosa, tingida com uma solução de Alizarina-S+HCl).

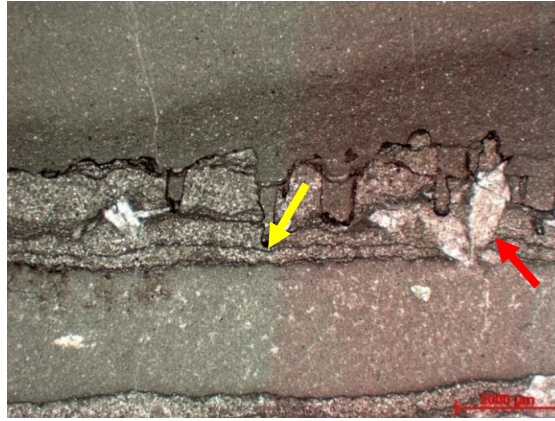


Figura V. 8: *Teepes* com nódulos de sílex (seta vermelha) com estilolitização sobreposta (seta amarela).

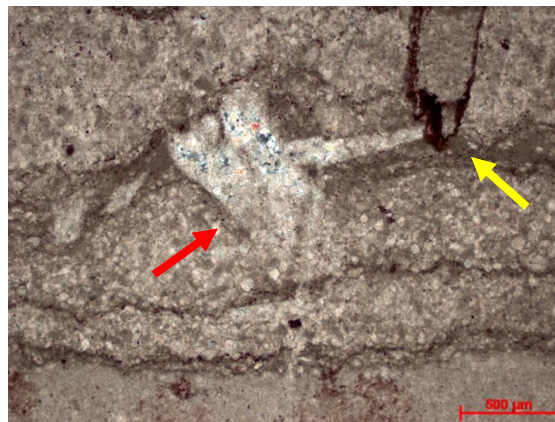


Figura V. 9: Nódulo de sílex (seta vermelha) e estilolitos nos níveis microbianos (seta amarela). Polarizadores cruzados.

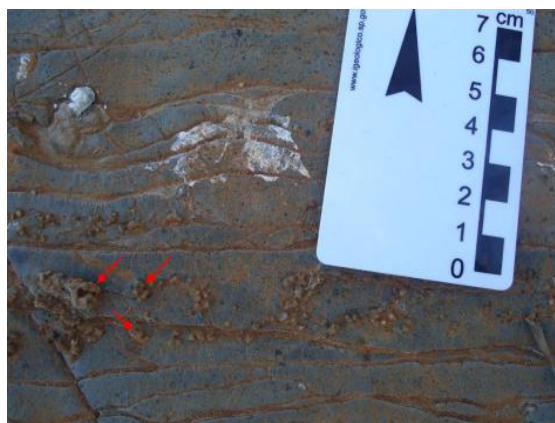


Figura V. 10: Nódulos de sílex (setas vermelhas) em macroescala, Unidade Nova América.

A porosidade total através da microCT foi de 0,13%. A figura V.11 apresenta o modelo 3D dos espaços porosos encontrados nesse calcilutito e a figura V.12 apresenta o gráfico de perfil de porosidade ao longo da amostra. As figuras V.13 e V.14 mostram modelos 3D onde é possível observar, na figura V.13 (a), indicado pela seta vermelha às estruturas de ressecamento "Tepees", na porção inferior da amostra. Notam-se elementos de maior densidade evidenciados na cor branca na figura V.13 (b) que totalizam 0,13 % do volume da amostra. A distribuição desses elementos pode ser vista na figura V.14 e no gráfico da figura V.15. Na figura V.16 (a) a seta verde evidencia o calcilutito com níveis de matéria orgânica (estilolitos) intercalados com calcita/dolomita recristalizadas (tons mais claros) marcando a laminação. Já na figura V.16 (b) as setas azuis exemplificam as fraturas pós-deposicionais.

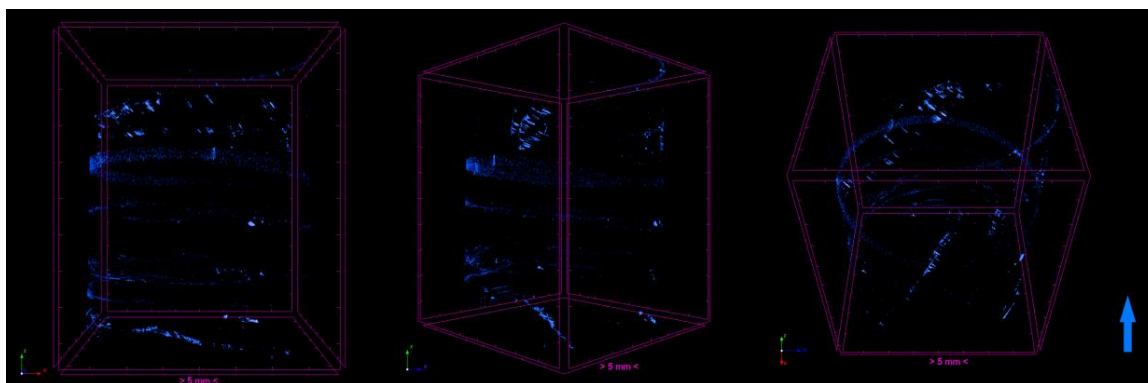


Figura V. 11: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 02.

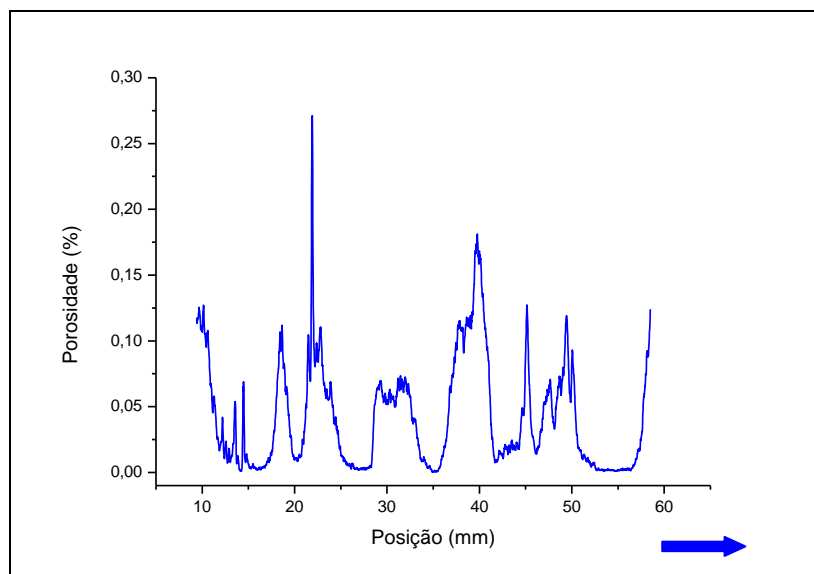


Figura V. 12: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 2.

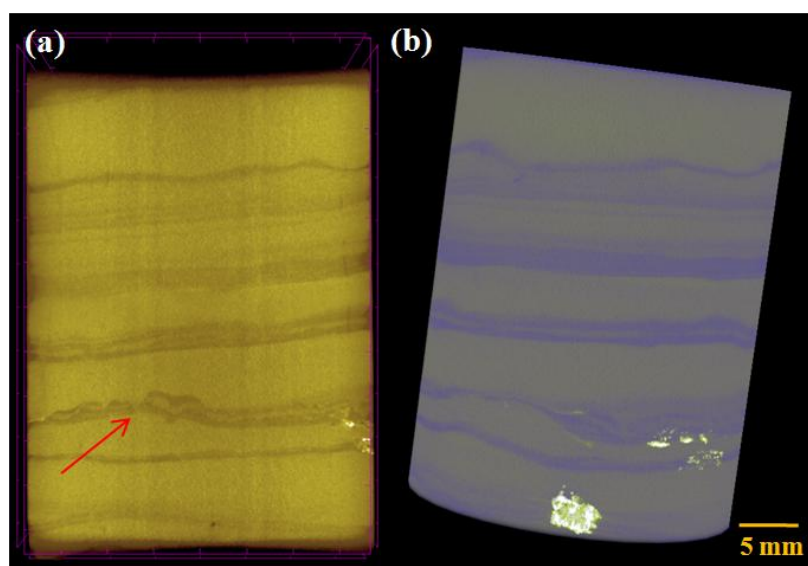


Figura V. 13: Imagens 3D da amostra 2, (a) a seta vermelha indicando estruturas de ressecamento e (b) pontos branco evidenciando a presença de sílica.

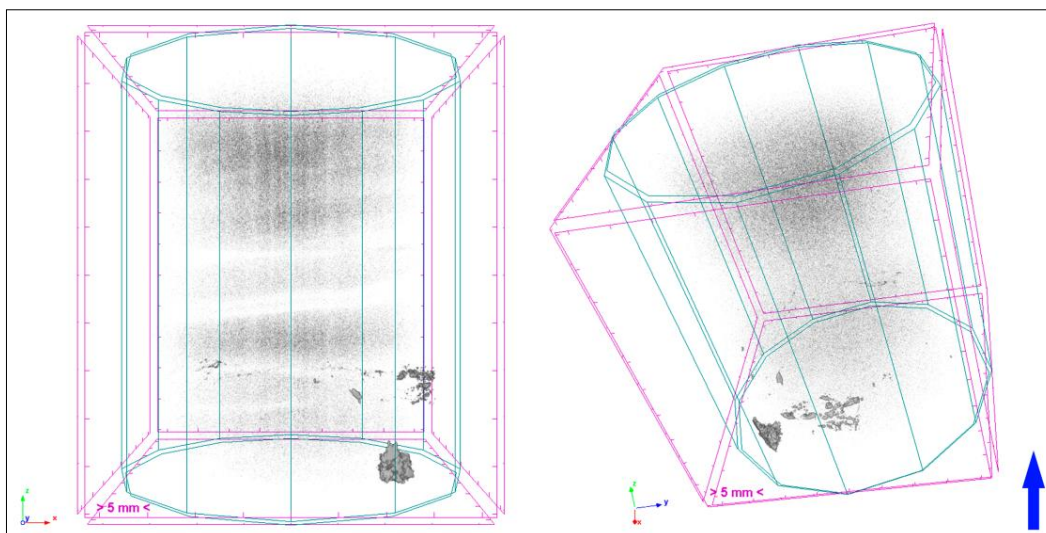


Figura V. 14: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 2.

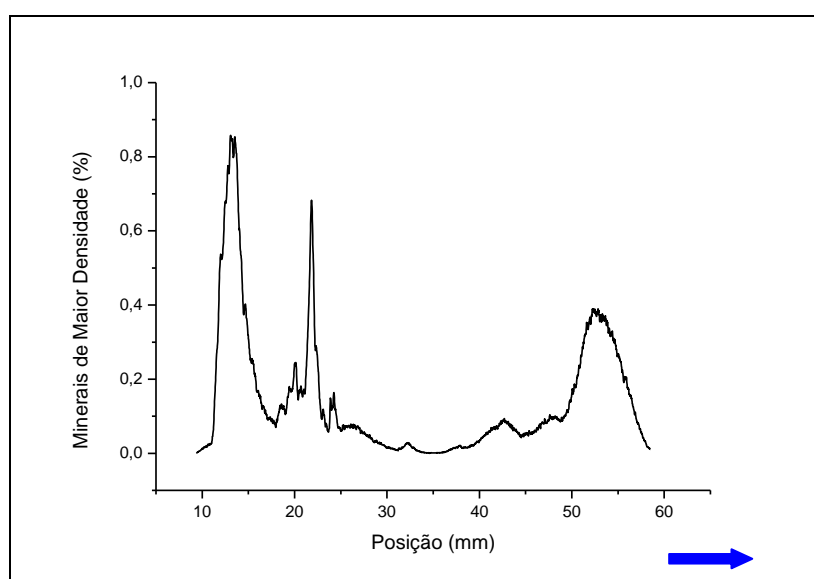


Figura V. 15: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 2.

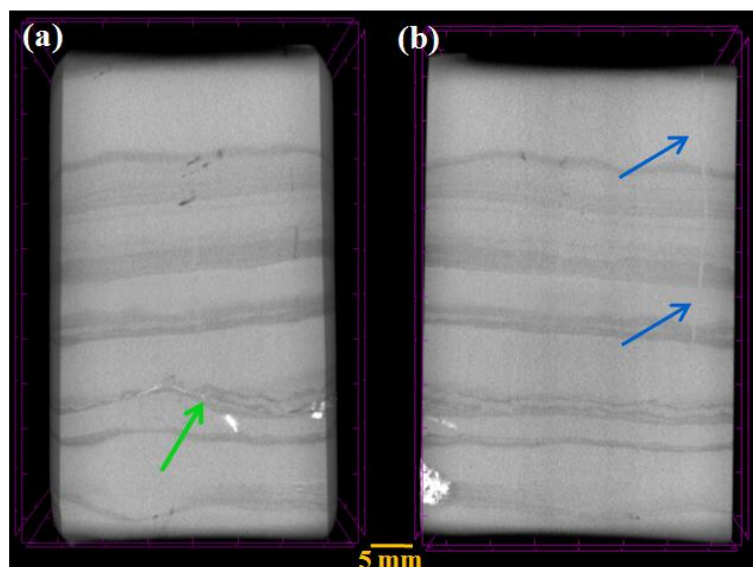


Figura V. 16: Imagens 3D da amostra 2, (a) seta verde evidencia os níveis ricos em matéria orgânica, formando estilólitos intercalados com níveis calcícticos substituídos por dolomita e (b) as setas azuis indicam as fraturas pós-deposicionais.

Amostra 10 – A amostra denominada de amostra 10 recebe o nome de Calcarenito, por apresentar um tamanho de grão entre 2 mm e 0,062 mm, (PETTIJOHN, 1957). A descrição microscópica da amostra a apresenta como calcarenito calcítico laminado, composto por pelóides (média 0,04 mm), intraclastos carbonáticos e 5-8% de siliciclásticos: quartzo, ortoclásio. Foram observados ainda fragmentos carbonosos dispersos, fraturas horizontais e verticais preenchidas por calcita blocosa, níveis com estilólitos desenvolvidos pela presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal associada. Notou-se ainda presença de calcita blocosa preenchendo poros interpartículas. Oncoides e aglomerados oncolíticos na base (até 3 mm) cimentados por calcita. Nessa amostra não foi possível quantificar a macroporosidade em lâmina delgada. A figura V.17 mostram detalhes observados na lâmina petrográfica; (a) destaca os oncoides e os aglomerados oncolíticos na base da amostra, (b) estilólitos desenvolvidos pela presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal e (c) o escâner da lâmina petrográfica inteira feita em microscópio.

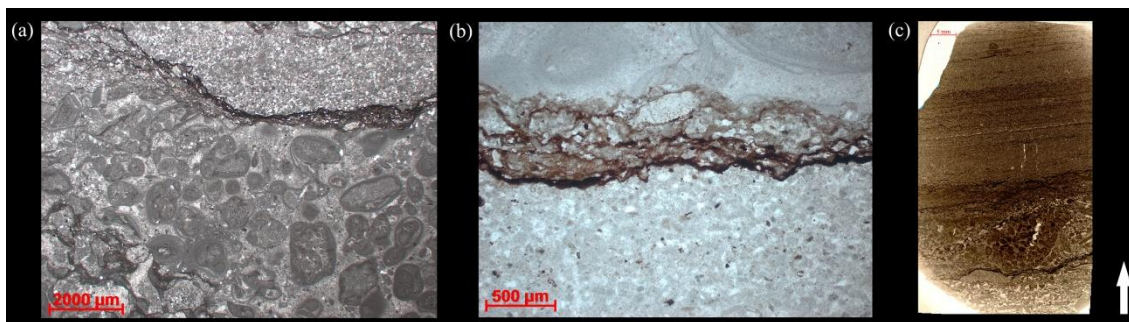


Figura V. 17: Fotomicrografia da Lâmina petrográfica, (a) destaca os oncoides e os aglomerados oncolíticos na base da amostra, (b) estilolitos desenvolvidos pela presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal e (c) o escâner da lâmina petrográfica inteira, onde é possível notar-se com clareza a diferença estrutural entre o topo e a base da amostra 10.

Na análise de microCT foi possível verificar que a porção de baixo da amostra (base) apresentava uma diferença estrutural, porém não foi possível identificar claramente os oncoides, conforme é visto claramente na lâmina petrográfica. Esses oncoides correspondem a aloquímicos compostos de envelopes irregulares de calcita micro-cristalina de origem microbial (calcita de grão diferenciado). Nos modelos 3D da figura V.18 (setas azuis) é possível ver que a base da amostra apresenta coloração diferente do topo (setas vermelhas). Isso ocorre justamente pela presença dos oncoides e aglomerados oncolíticos, mas não é possível observá-los claramente segundo é visto na lâmina, conforme é mostrado na figura V.17 (a e c). As setas verdes na figura V.18 destaca os estilolitos que aparecem claramente em todos os modelos 3D apresentados na nessa figura. O motivo de se destacarem é justamente pela maior densidade física, uma vez que resultam da presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal e isso faz com que tenham um grande contraste em relação ao restante da amostra.

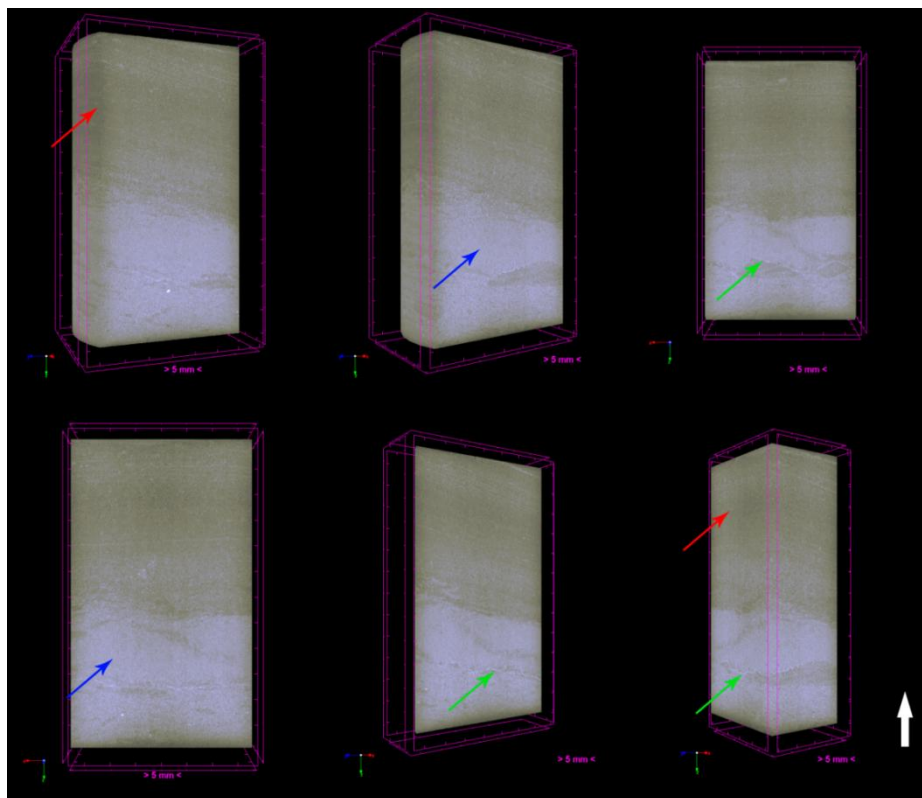


Figura V.18: Modelos 3D gerados para amostra 10, onde é possível observar a diferença estrutural do calcarenito, as setas azuis destacam os tons mais claros que compõem a base da amostra, diferente do topo (setas vermelhas) que apresenta uma coloração mais escura. Isso ocorre justamente pela presença dos oncoides e aglomerados oncolíticos. A seta verde destaca os estilólitos que aparecem claramente devido a maior densidade física, uma vez que resultam da presença de fragmentos carbonosos e pirita framboidal, contrastando com o restante da amostra.

Essa amostra apresentou uma porosidade total de apenas 0,12 %, as figuras V.19 e V.20 apresentam os modelos 3D do espaço poroso e o gráfico de perfil de porosidade para a amostra 10 respectivamente. Os resultados mostram que a porosidade além de baixa, encontra-se preferencialmente na região superior da amostra. Os elementos de maior densidade foram quantificados coincidentemente nos mesmos 0,12 %, e abrangem os siliciclásticos (quartzo), pirita e os fragmentos carbonosos. Na figura V.21, é possível verificar concentração desses elementos que se encontram em maior

proporção justamente na base da amostra. A figura V.22 mostra o gráfico de distribuição desses ao longo do calcarenito.

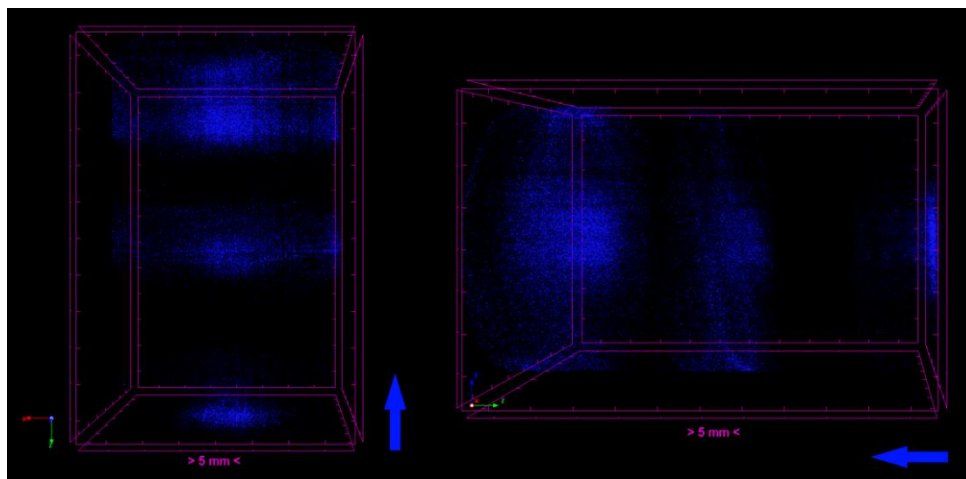


Figura V. 19: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 10.

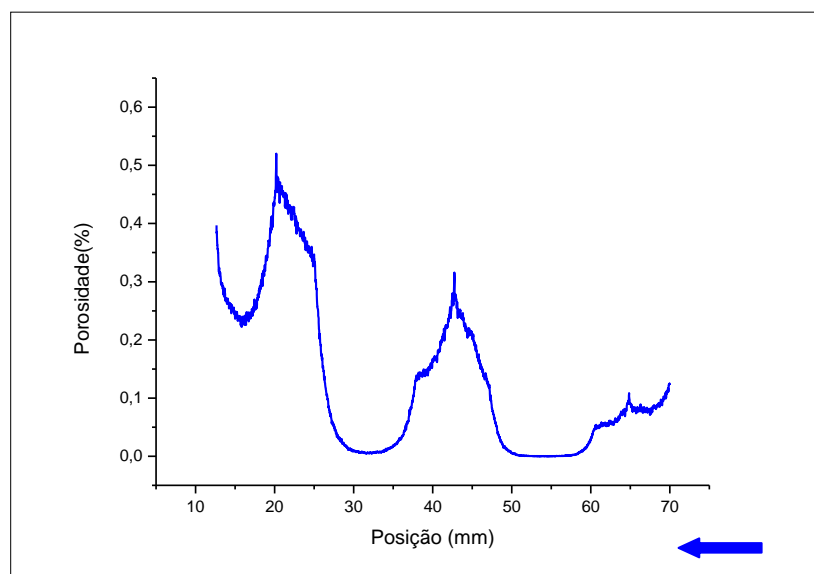


Figura V. 20: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 10.

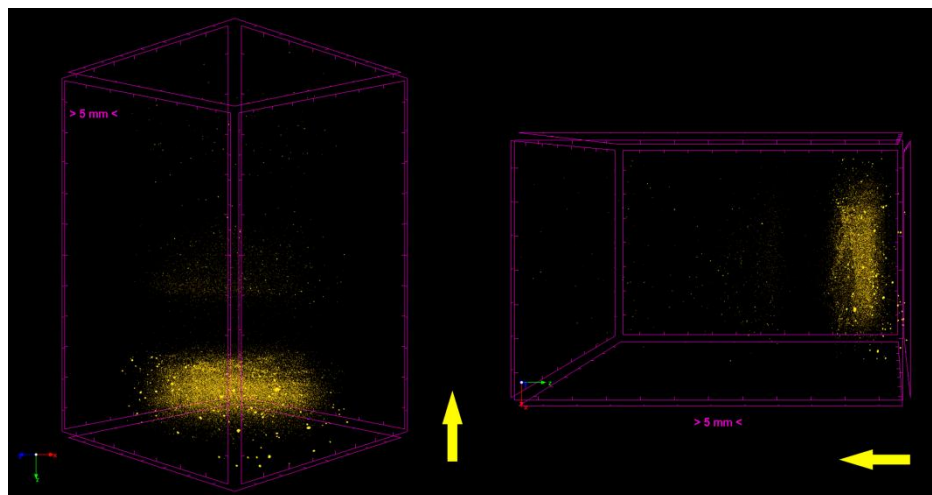


Figura V. 21: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 10, esses minerais compreendem siliciclásticos (quartzo), pirita e fragmentos carbonosos.

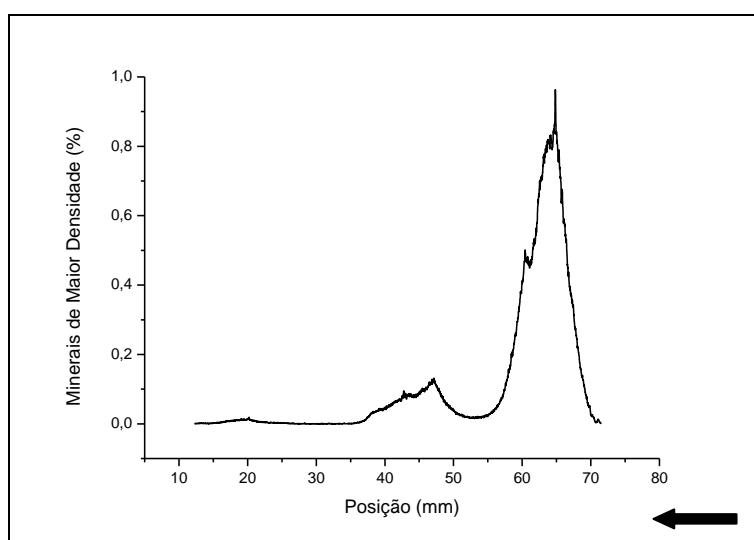


Figura V. 22: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 10.

V.3 – Amostras Bacia de Sergipe e Alagoas

A bacia de Sergipe e Alagoas teve quatro amostras estudadas (01, 03,05 e 06), que terão seus resultados descritos a seguir, com exceção da amostra 06 que representa um estromatólito silicificado da Formação Aracaré. Nesta amostra, após a confecção da lâmina delgada verificou-se que a composição carbonática não existia mais, pois a rocha

já havia sido totalmente silicificada. Foram encontrados apenas alguns pseudomorfos com hábito romboédrico, possivelmente carbonato (calcisferas ou dolomita). Assim, a amostra 06 não aparece nos resultados, pois foge da intenção do trabalho que visa caracterizar somente rochas carbonáticas.

Para as demais amostras foram feitas a descrição das estruturas através da lâmina petrográfica, identificação de estruturas através dos 3D, porosidade total, perfil de porosidade, quantificação dos minerais de maior contraste e distribuição desses minerais ao longo da amostra. Para a amostra 05 também foi apresentado o gráfico de tamanho de poro por intervalo de tamanho.

V.3.1 Formação Cotinguiba

Amostra 01 – Calcilutito calcítico rico em calcisferas (figura V.23 a), com laminação paralela marcado pelos estilólitos desenvolvidos devida a presença de fragmentos carbonosos, geralmente piritizados. Foi observada a presença de foraminíferos, bioclasto fosfático (possivelmente peixe fossilizado), romboedros de dolomita que substituem micrita, intraclastos carbonáticos e raros clastos de quartzo e feldspato no tamanho silte (5%). A figura V.23 b mostra a pirita framboidal que substitui micrita, os fragmentos carbonosos e a dolomita. Não foi possível quantificar a porosidade através da lâmina delgada.

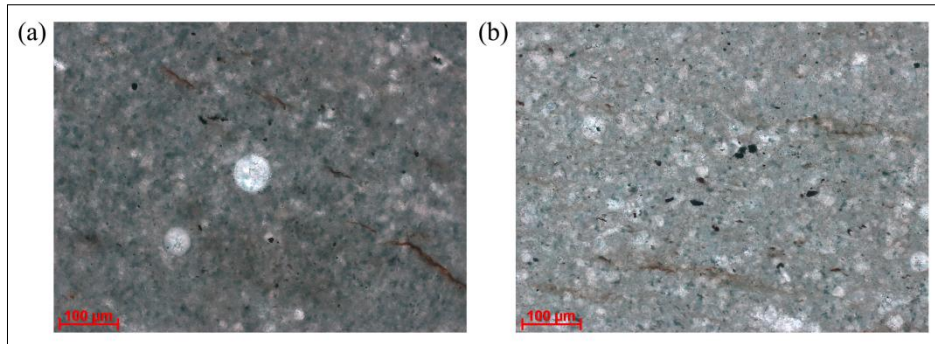


Figura V. 23: Fotomicrografia da lâmina petrográfica mostrando (a) calcisferas e (b) dolomitas.

Em termos estruturais os resultados da microCT foram bastante discretos. Por ser uma amostra bastante homogênea, não foi possível distinguir as delicadas nuances de sua estrutura. O que mais se destacou foram os elementos de maior densidade, tais como as calcisferas, grãos de dolomita e pirita, porém não foi possível distingui-los. A figura V.24 apresenta os modelos 3D gerados pela microCT para essa amostra de calcilutito. Nota-se que a seta verde indica elementos de maior densidade e a seta vermelha indica uma fratura ao longo da amostra.

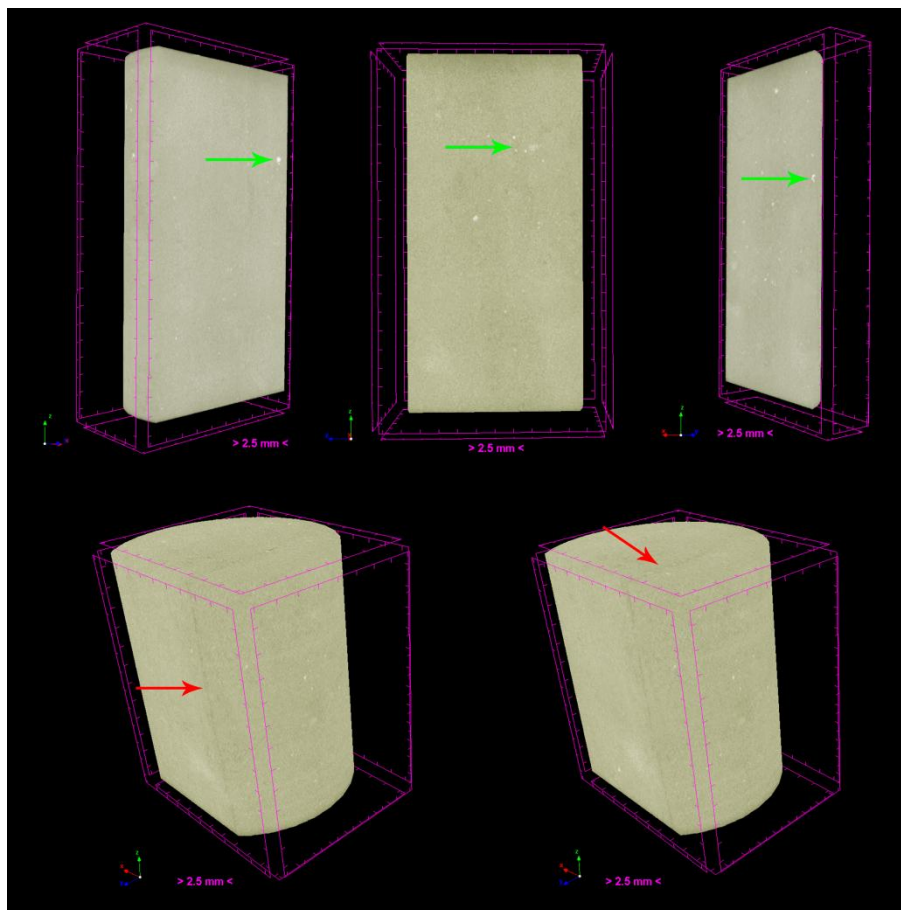


Figura V. 24: Modelos 3D mostrando estrutura da amostra 01, a seta verde indica elementos de alta densidade e a seta vermelha indica fratura ao longo da amostra.

O valor de porosidade obtido pela microCT para essa amostra de calcilito foi de apenas 0,51 %. A figura V.25 mostra o modelo 3D evidenciando apenas o espaço poroso. Nota-se que a porosidade é maior ao longo da região onde se observou a fratura. A figura V.26 apresenta o gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 01. Os elementos de maior densidade, já mencionados anteriormente, totalizaram 0,17 %, sua distribuição espacial pode ser vista na figura V.27 e o gráfico do perfil dessa distribuição é mostrado na figura V.28.

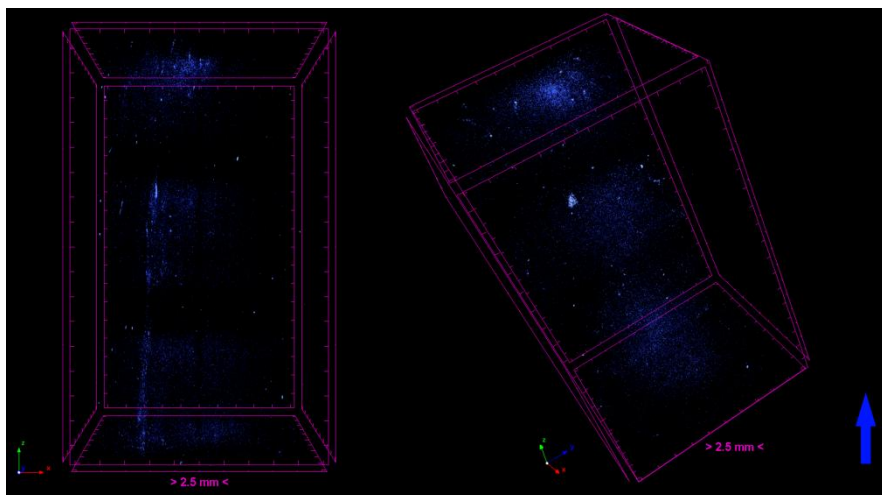


Figura V. 25: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 01.

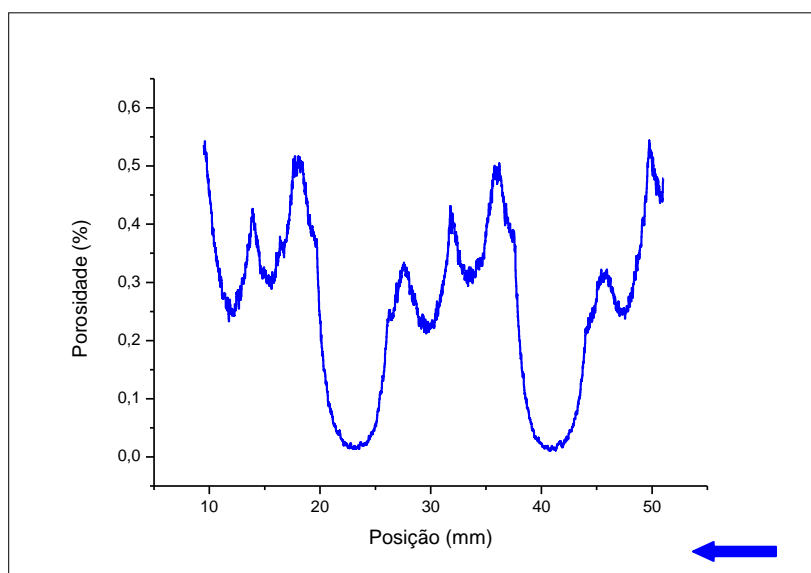


Figura V. 26: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 01.

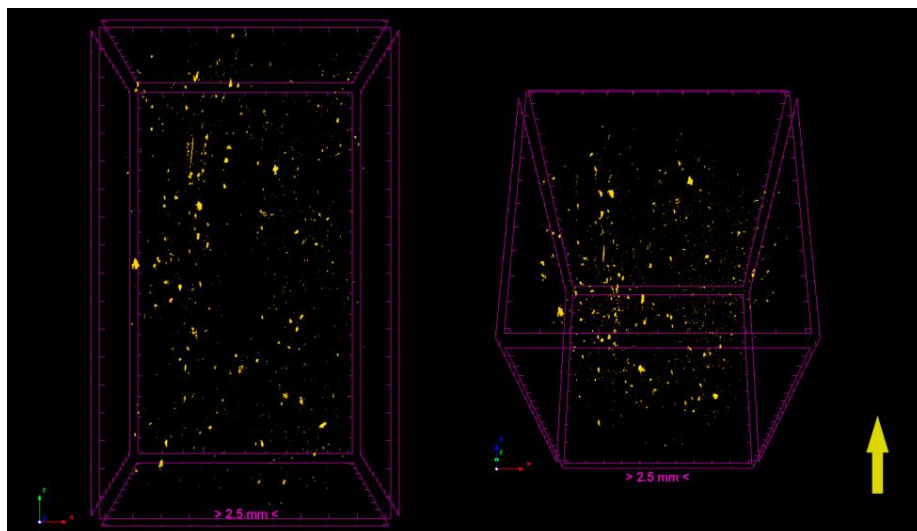


Figura V. 27: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e pirita) ao longo da amostra 3.

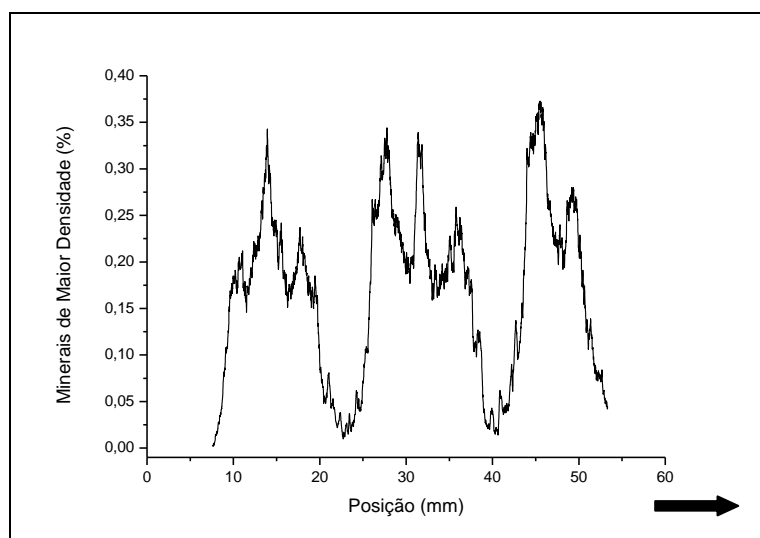


Figura V. 28: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 01.

V.3.2 Formação Riachuelo

Amostra 03 – Essa amostra de calcarenito apresenta na sua estrutura oólitos, que são grânulos ovóides que apresentam camadas concêntricas de crescimento, em consequência de deposição química em águas rasas, PEIXOTO (1998). Através da

análise da lâmina delgada da amostra 3, foi possível descrevê-la como um calcarenito oolítico, calcítico. Ooides com tamanho médio 0,1 mm, por vezes ocorrem fragmentados, alguns com núcleo de bivalve (comum) e de quartzo (raro) e com rara presença de microclínio e quartzo. São comuns alguns envelopes dos ooides estarem dissolvidos. Observou-se abundante cimento calcítico mosaico fino preenchendo os poros interpartículas. Pirita framboidal substitui ooides (raro) e calcita mosaico fino (não seletiva), substituída por hematita. Na figura V.29 são apresentadas fotos da lamina petrográfica destacando (a) textura, (b) a dissolução dos ooides e (c) porosidade vulgar. A macro porosidade medida na lâmina foi menor que 2 % e corresponde principalmente a dissolução de envelopes dos ooides, sendo raras as porosidades vulgares por dissolução do cimento.

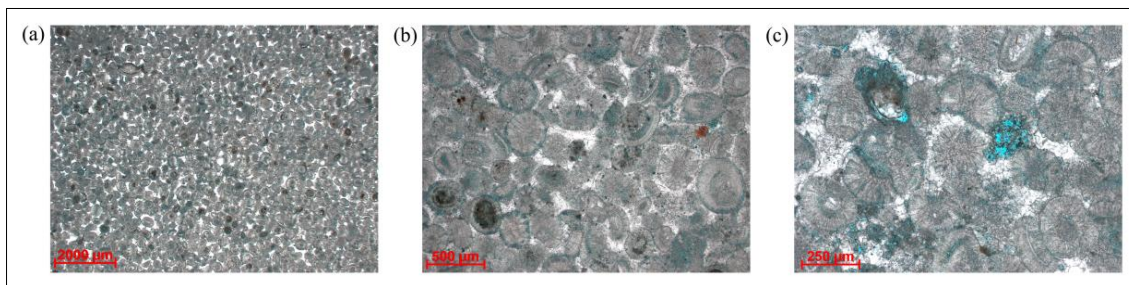


Figura V. 29: Fotomicrografia da lamina petrográfica destacando (a)textura, (b) a dissolução dos ooides e (c) porosidade vulgar.

As imagens de microCT não permitiram visualizar claramente as estruturas da rocha conforme visto ao analisar a lâmina. Por exemplo, não foi possível identificar a textura compostas pelos ooides. Não foram identificados os processos de dissolução devido a limitação da técnica, pois as dissoluções apresentava um baixo contraste em relação ao meio. O que ficou mais evidente foram os elementos de alta densidade e a

porosidade vulgar disseminados pela amostra, conforme pode ser visto na figura V.30 que exibe os modelos 3D gerados para essa amostra de calcarenito.

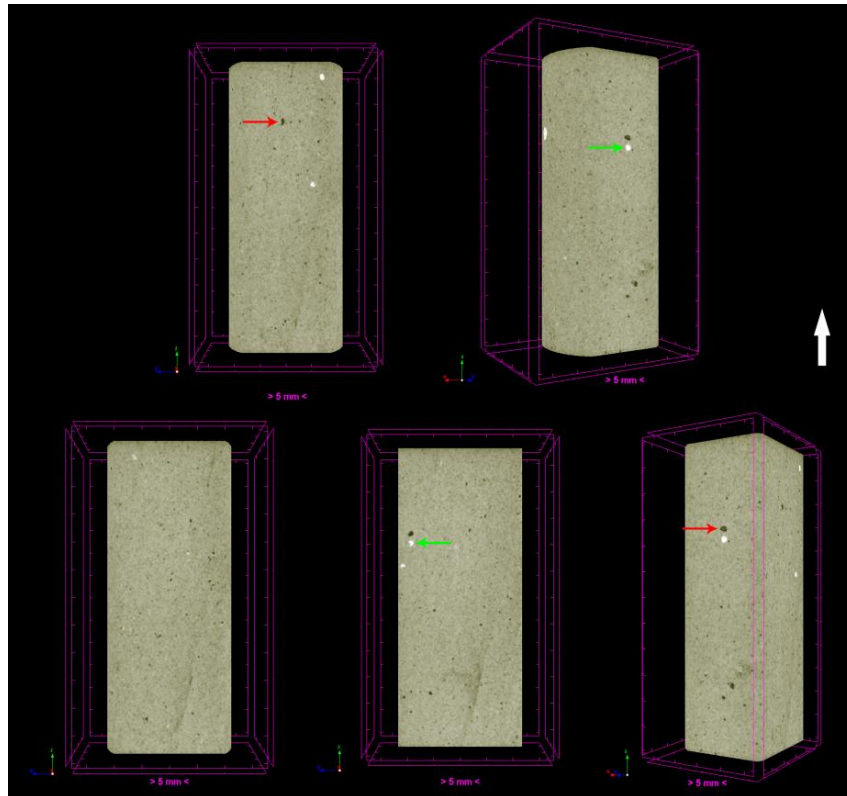


Figura V. 30: Modelos 3D mostrando cortes transversais para a amostra 03. As setas vermelhas indicam porosidade vulgar e setas verdes elementos de maior densidade (bivalves e quartzo e pirita).

Nas análises quantitativas desta amostra utilizando a microCT, foi verificada uma porosidade total de 0,80 %. Esse valor de porosidade obtido pela microCT foi menor do que a observado na lâmina petrográfica. Isso se justifica pelo fato que a lâmina representa apenas um corte em duas dimensões (2D), já a microtomografia calcula a porosidade em todo um volume de interesse, ou seja, em três dimensões (3D). A figura V.31 apresenta o perfil de porosidade e a figura V.32 apresenta o modelo 3D, através do qual é possível verificar como os poros estão distribuídos ao longo da amostra.

Os minerais de maior densidade, que são evidenciados na figura V.33, equivalem a aproximadamente 0,10 % do total. Esses minerais consistem preferencialmente por quartzo e pirita. A figura V.34 mostra o gráfico que apresenta a distribuição destes minerais ao longo da amostra de calcarenito.

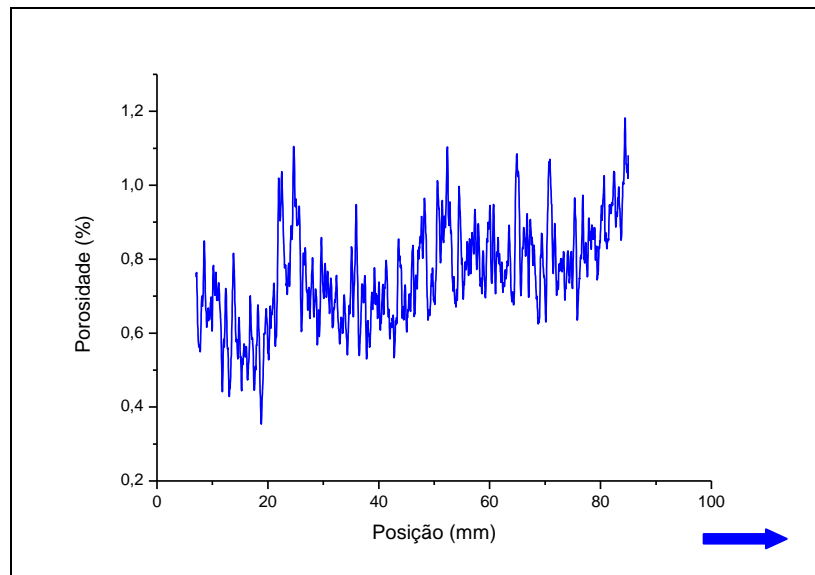


Figura V. 31: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 03.

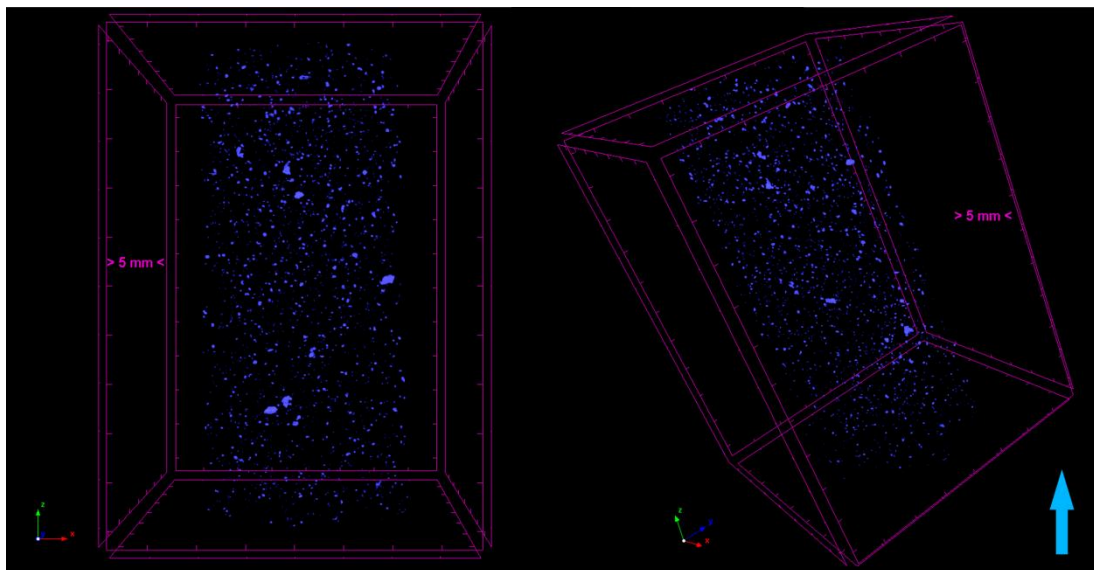


Figura V. 32: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 03.

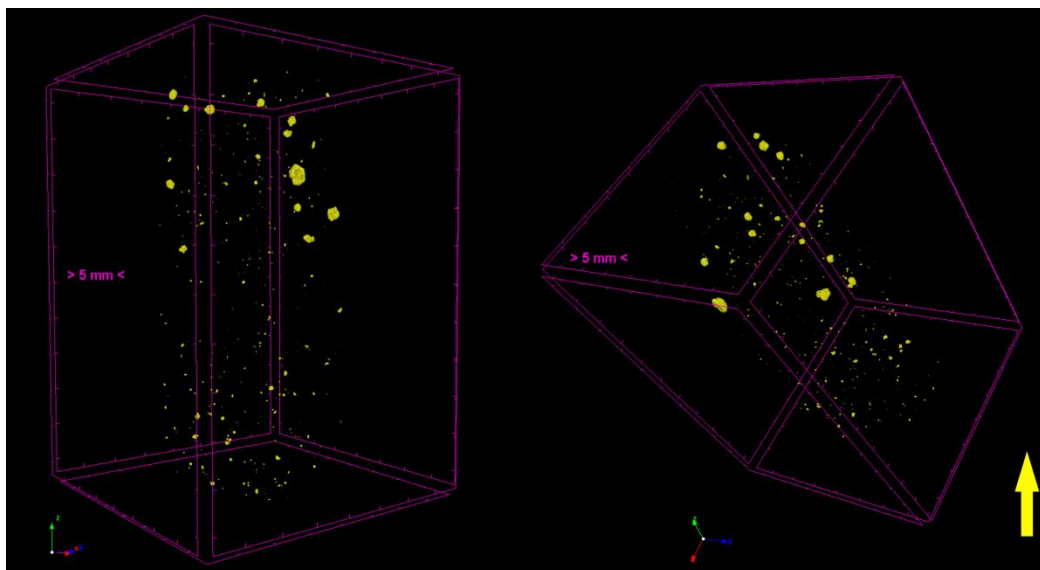


Figura V. 33: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e pirita) ao longo da amostra 03.

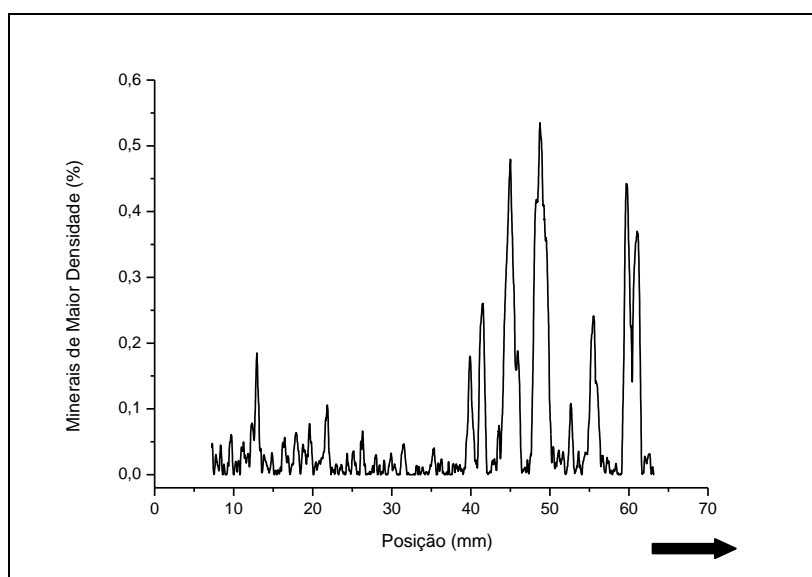


Figura V. 34: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 03.

V.3.3 Formação Morro do Chaves

Amostra 05 – O estudo dessa amostra originária da bacia de Sergipe e Alagoas da Formação Morro do Chaves, foi importante principalmente devido a descoberta de petróleo em rochas carbonáticas lacustres, em especial coquinas nas margens brasileira.

Por esse motivo vem crescendo o interesse no estudo desse material, sobretudo para o melhor entendimento desses complexos reservatórios.

Neste contexto a formação Morro do Chaves apresenta-se como um importante análogo para reservatórios dessa natureza, como por exemplo os encontrados nas bacias do Espírito Santo, Campos e Santos, CÂMARA (2013).

A análise da lâmina petrográfica (figura V.35) descreve esta amostra como uma coquina composta praticamente por bivalves parcialmente fragmentados, raramente articulados, de diversos tamanhos de 0,1 a 0,8 mm. A estrutura original das conchas não está preservada, pois elas foram micritizadas, neomorfizadas e substituídas por calcita mosaico grosso e por vezes poiquilotópica. Observou-se também rara micrita recristalizada preenchendo os poros intrapartículas e raros ostracodes.



Figura V. 35: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 05, nota-se que a composição é composta praticamente por bivalves parcialmente fragmentados e raramente articulados.

Nos resultados qualitativos de microCT foi difícil a identificação clara das estruturas, devido a composição muito homogênea da rocha, composta praticamente por carbonato de cálcio. No entanto, foi possível identificar camadas com bioclastos fragmentados e articulados calcitizados (figura V.36 indicadas pelas setas vermelhas e azuis, respectivamente). Através da figura também é possível notar que os bivalves articulados, aparecem em maior número distribuídos ao longo da amostra, não sendo tão raros como descritos pela lâmina petrográfica. Os pontos brilhantes na figura V.36, apontados pelas setas verdes, representam minerais de maior densidade. Esses minerais tornam-se evidentes por representarem cristais de calcita com maior grau de pureza, e aparecem preferencialmente preenchendo os bivalves articulados. Esses cristais foram quantificados e totalizam apenas 0,10 % dos elementos que compõem a amostra, e suas localizações na amostra podem ser vistas nos modelos 3D da figura V.37. O gráfico da figura V.38 mostra como eles estão distribuídos ao longo amostra.

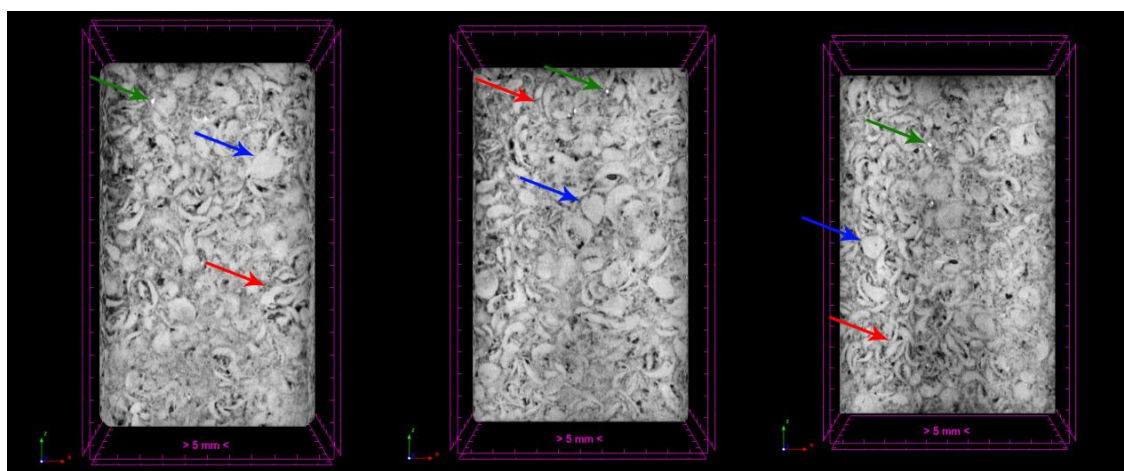


Figura V. 36: Modelos 3D da amostra 05, mostrando três diferentes cortes transversais, setas azuis mostram bioclastos articulados, setas vermelhas apresenta aglomerados de bioclastos fragmentados e setas verdes elementos de alta densidade que correspondem a cristais de calcita com maior grau de pureza.

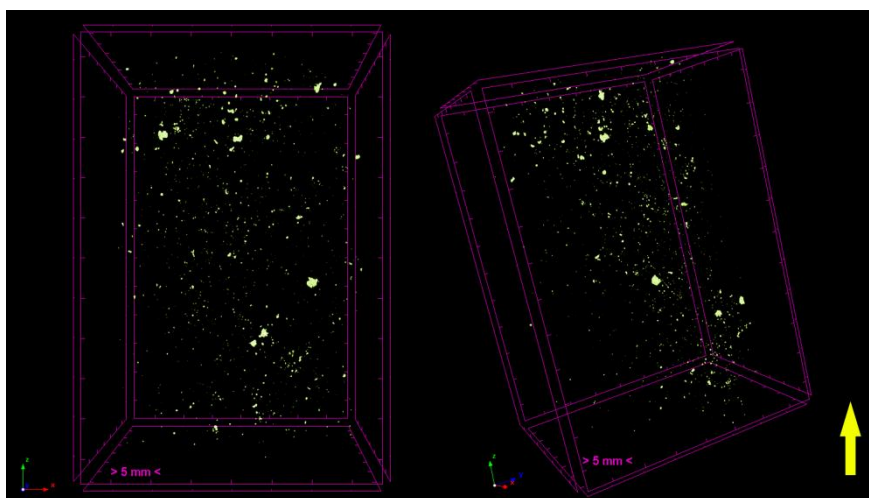


Figura V. 37: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 05.

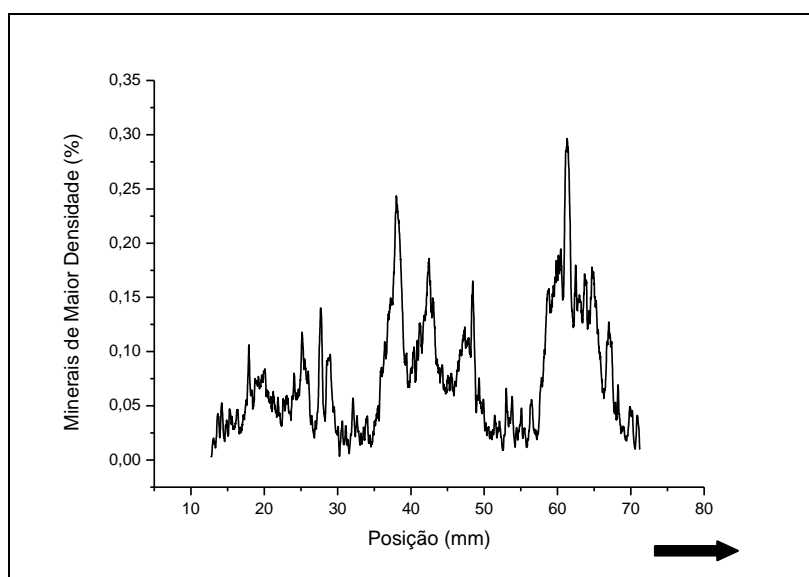


Figura V. 38: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade (cristais de calcita com maior grau de pureza) da amostra 05.

A porosidade total obtida foi de aproximadamente 1,98%. Essa baixa porosidade pode ser explicada justamente pelo que já foi mencionado anteriormente que é a presença de calcita como cristal discreto e como mosaico grosso preenchendo os espaços interpartículas. Porém é muito menor quando comparada ao valor obtido na

análise visual da lâmina que apresentou uma porosidade em torno de 5 %, devido ao mesmo motivo já justificado para amostra 3. As figuras V.39 e V.40 mostram a distribuição dos poros ao longo da amostra e o gráfico de perfil de porosidade respectivamente. A figura V.41 exibe o gráfico de número de poros por intervalo de tamanho, medido em 2D (fatia/fatia). Nesse gráfico é possível observar que a maioria dos poros possuem tamanho de até 0,07 mm.

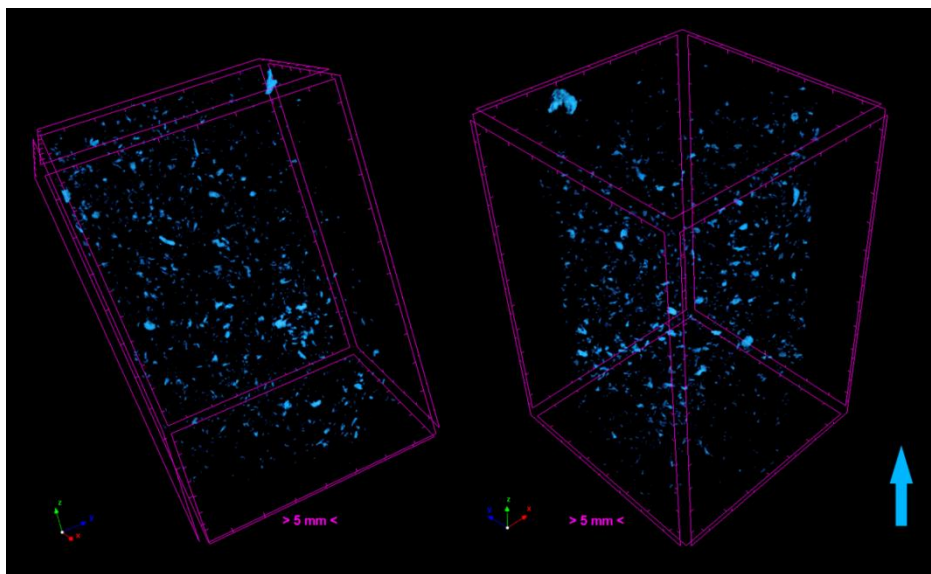


Figura V. 39: Modelos 3D mostrando a distribuição do espaço poroso da amostra 05.

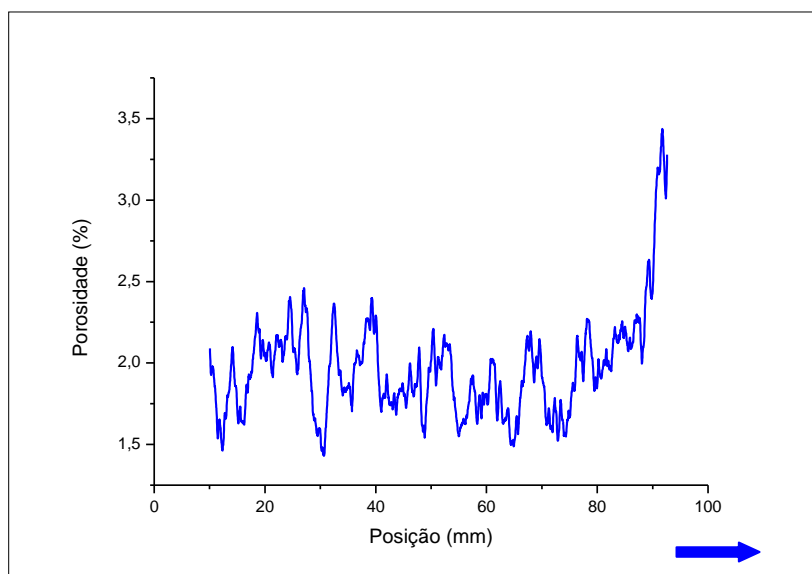


Figura V. 40: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 05.

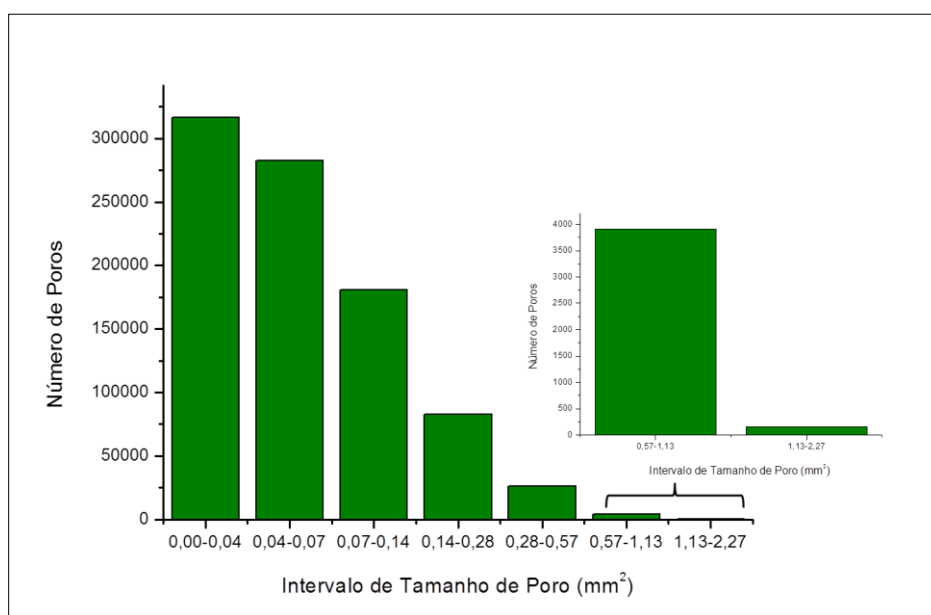


Figura V. 41: Gráfico de número de poros por intervalo de tamanho dos poros (2D, fatia/fatia) para amostra 05. Nota-se que a maioria dos poros possuem tamanho menor que 0,07 mm.

V.4 – Amostra Bacia de Itaboraí - Formação Itaboraí

A bacia do Itaboraí teve apenas a amostra 04 estudada. Para essa amostras foi feita a identificação de estruturas através da microCT (modelos 3D), porosidade total, perfil de porosidade.

Amostra 04 – Nessa amostra é possível observar claramente os grânulos calcário do tamanho de um grão de ervilha com diâmetro aproximado de 7,56 mm (figura V.42). A figura V.43 expõe o modelo 3D da amostra. Os elementos de maior densidade evidenciados na cor branca na figura V.43 (a e c) totalizam 0,02 % do volume e a seta verde apresenta regiões de baixa densidade, devido à concentração de porosidade (b). Em amarelo (seta vermelha), são identificadas regiões de densidade intermediária que correspondem aos grânulos calcários. Segundo (KINSLEY, 1998) os grânulos calcários são basicamente formados pela deposição de aragonita ou calcita.

Essa amostra de pisólito calcário apresentou uma porosidade total de aproximadamente 1,50 %. A figura V.44 mostra uma imagem 3D evidenciando apenas o espaço poroso encontrado nessa amostra. Através da figura é possível ressaltar que a amostra apresenta regiões onde os poros estão concentrados, mas aparentemente essas regiões não estão conectadas. Na figura V.45 pode-se ver como essas regiões de poros estão distribuídas ao longo da amostra (perfil de porosidade). Nota-se que a porosidade é maior na porção superior da amostra (topo).

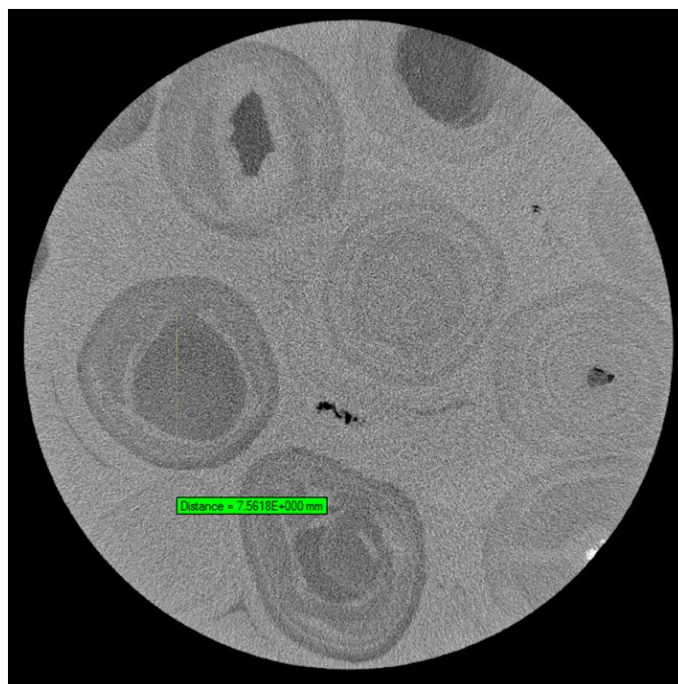


Figura V.42: Imagem do eixo mostrando transaxial da amostra 4 mostrando o diâmetro aproximado (7,56 mm) de um grânulo calcário.

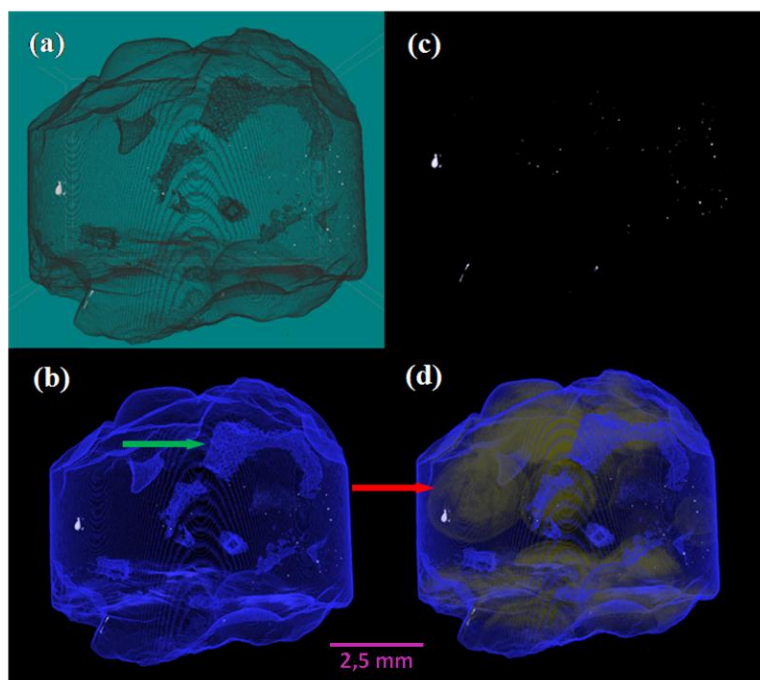


Figura V.43: (a) imagem 3D da amostra 04, (b) seta verde apresentam regiões de baixa densidade, devido a concentração de porosidade (c) pontos brilhantes são material de alta densidade e (d) a seta vermelha indica (em amarelo) regiões de densidade intermediária que correspondem aos grânulos calcário.

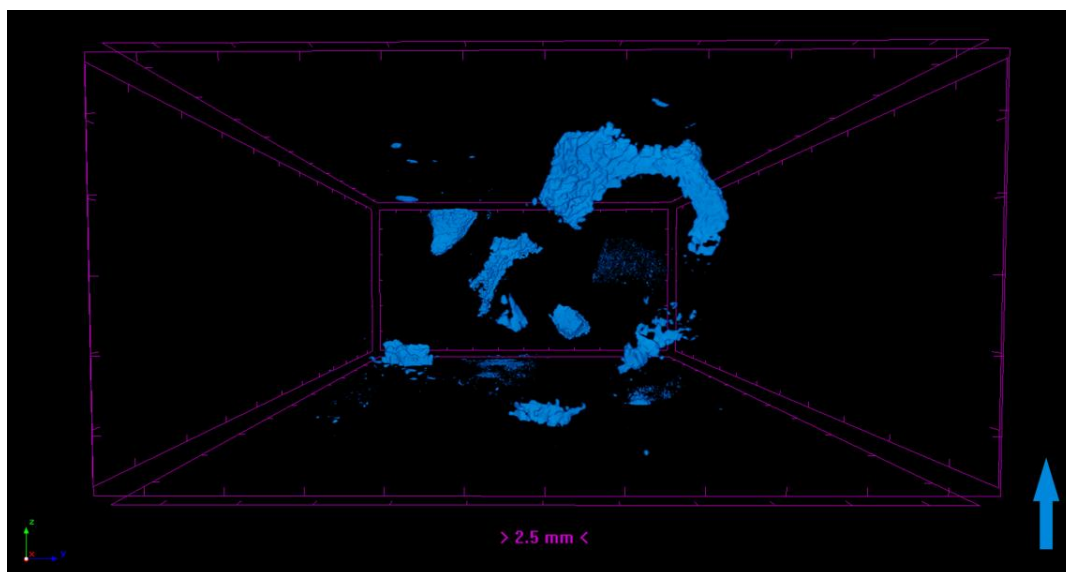


Figura V. 44: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 04 nota-se que amostra apresenta regiões onde os poros estão concentrados, mas aparentemente essas regiões não estão conectadas.

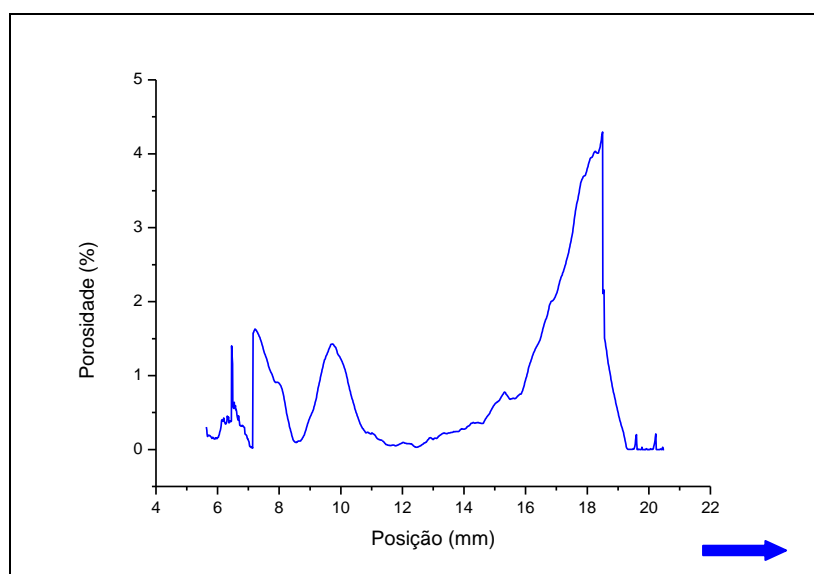


Figura V. 45: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 4.

V.5 – Amostra Bacia do Parnaíba - Formação Codó

A bacia do Parnaíba teve apenas a amostra 07 estudada. Para essa amostra foi feita descrição da lâmina petrográfica, a identificação de estruturas através da microCT (modelos 3D), porosidade total, perfil de porosidade e quantificação dos minerais de maior contraste e distribuição desses minerais ao longo da amostra.

Amostra 07 – As recentes descobertas de hidrocarbonetos nas bacias da margem sudeste brasileira em depósitos de microbialitos carbonáticos vêm despertando um crescente interesse no entendimento de estromatólitos. A Formação Codó apresenta-se como um importante estudo de caso, uma vez que registra, no mesmo intervalo de tempo, um sistema lacustre hipersalino na bacia do Parnaíba, sendo um potencialmente análogo, auxiliando nas pesquisas de reservatórios de hidrocarbonetos. A amostra 07 representa um clássico estromatólito carbonático e na figura V.46 é apresentada o modelo 3D e o corte em 3 eixos obtidos pelas imagens de microCT.

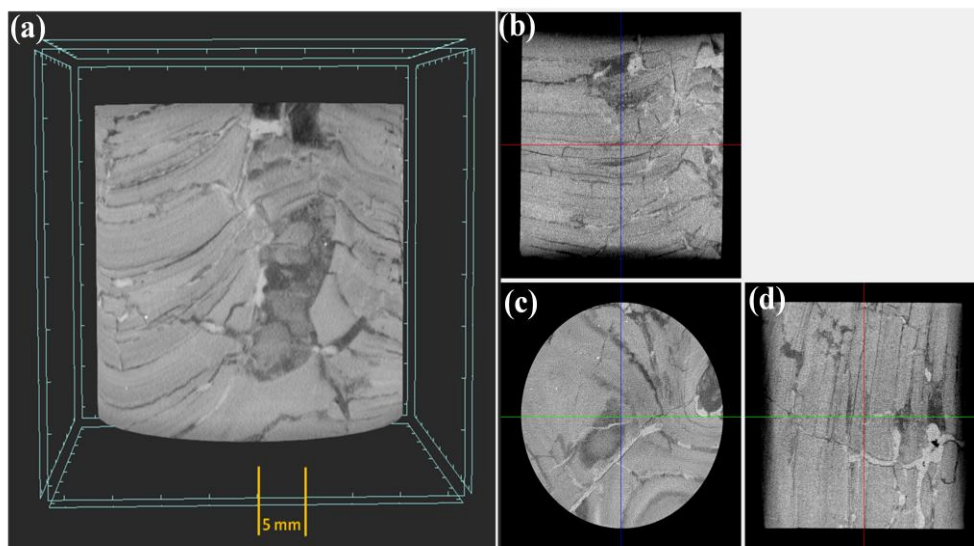


Figura V. 46: (a) Modelo 3D da amostra 07 de Estromatólito carbonático, (b) imagem de uma fatia do eixo coronal, (c) imagem de uma fatia do eixo transaxial e (d) imagem de uma fatia do eixo sagital.

Através da lâmina delgada pode-se descrever a amostra como um estromatólito carbonático, com laminação paralela marcada pela intercalação de microesparita e níveis ricos em pelóides, sendo zonas preferenciais de faturamento. As fraturas, por vezes, são preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro dendriformes. A macroporosidade foi medida em torno de 1 % e é observada principalmente em fraturas. A amostra apresenta ainda microporosidade que não foi possível ser estimada na lâmina. A figura V.47 exhibe o escaneamento da lâmina delgada dessa amostra de estromatólito carbonático.

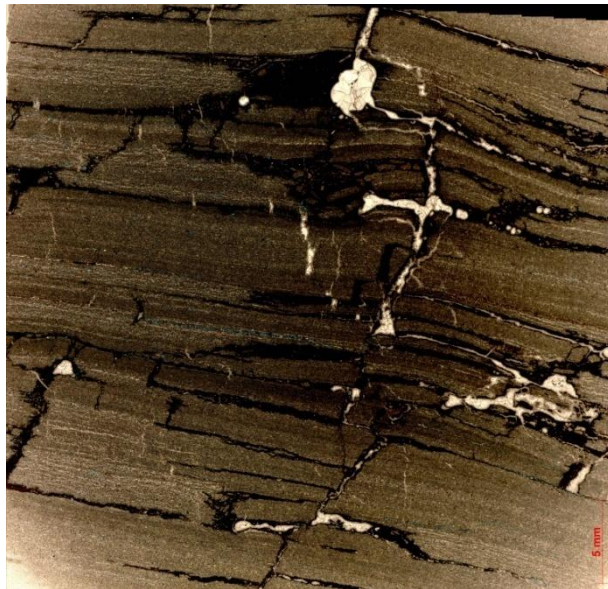


Figura V. 47: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 07. Notam-se os níveis ricos em pelóides, sendo zonas preferenciais de faturamento e também as fraturas que por vezes são preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro.

Nas análises estruturais feitas através dos dados de microCT, foram identificados visivelmente a presença dos pelóides em várias regiões dessa amostra de estromatólito carbonático. Isso está exemplificado na figura V.48, onde (a - b) representam modelos 3D mostrando cortes transversais, sendo possível ver os pelóides indicados pela seta

verde. E como já foi dito anteriormente na análise da lâmina, eles apresentam-se como zonas preferenciais para fraturamento. A figura V.48 (c) exibe em destaque a região da lâmina delgada onde foi observado o pelóide. Seguindo com as análises estruturais observou-se que as imagens de microCT também permitiram identificar as fraturas descritas anteriormente na apreciação da lâmina delgada. Na figura V.49 (a-b) as setas amarelas mostram que essas fraturas, por sua vez, apresentam-se parcialmente (a) ou totalmente (b) preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro. Ainda na figura V.49 (c) a seta vermelha indica a zona da lâmina onde uma fratura aparece totalmente preenchida.

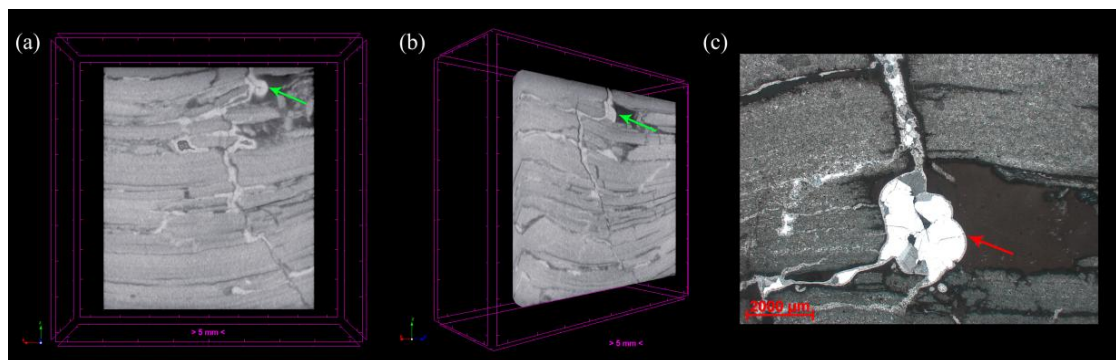


Figura V. 48: (a) e (b) representam modelos 3D mostrando cortes transversais da amostra 07 onde é possível ver os pelóides indicados pela seta verde. E (c) exibe em destaque a região da lâmina delgada onde foi observado o pelóide.

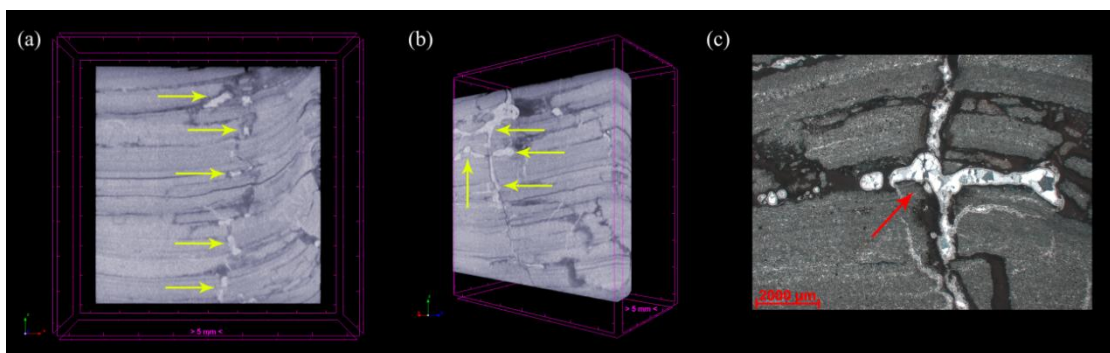


Figura V. 49: Modelos 3D mostrando cortes transversais da amostra 07, onde as setas amarelas mostram algumas fraturas, (a) parcialmente preenchidas e (b) totalmente preenchidas por calcita mosaico grosso e óxidos/hidróxidos de ferro. E (c) imagem da fotomicrografia da lâmina petrográfica em que a seta vermelha evidencia a zona onde uma fratura aparece totalmente preenchida.

As análises quantitativas para os elementos de maior densidade totalizaram 1,23 % do estromatólito carbonático. Podem ser observados na figura V.50 (a) os pontos brilhantes na cor rosa que representam os óxidos/ hidróxidos de ferro, em (b) a cor amarela que representa as regiões preenchidas pela calcita mosaico grosso e (c) em azul/roxo tem-se a região de menor densidade. Essa é a região preferencial onde se encontram a maioria dos poros dessa amostra. A figura V.51 apresenta o gráfico de distribuição desses elementos mais densos.

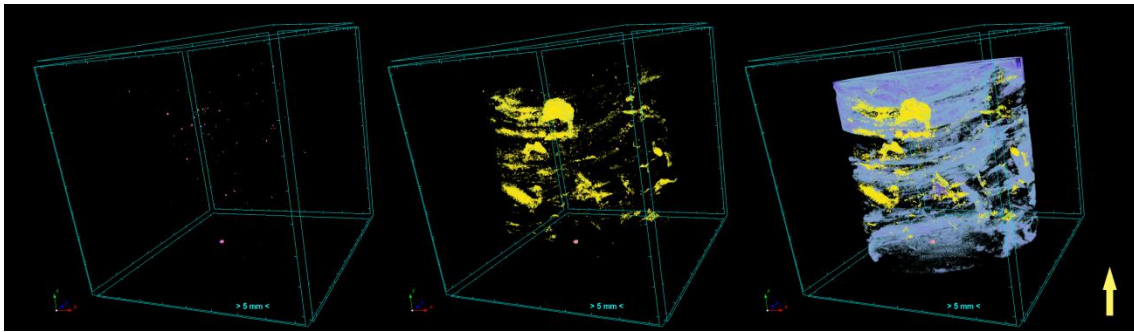


Figura V. 50: Modelos 3D da amostra 07, (a) pontos brilhantes rosa que representam os óxidos/hidróxidos de ferro, (b) cor amarela representa as regiões preenchidas pela calcita mosaico grosso e (c) em azul/roxo tem-se a região de menor densidade, região preferencial dos poros.

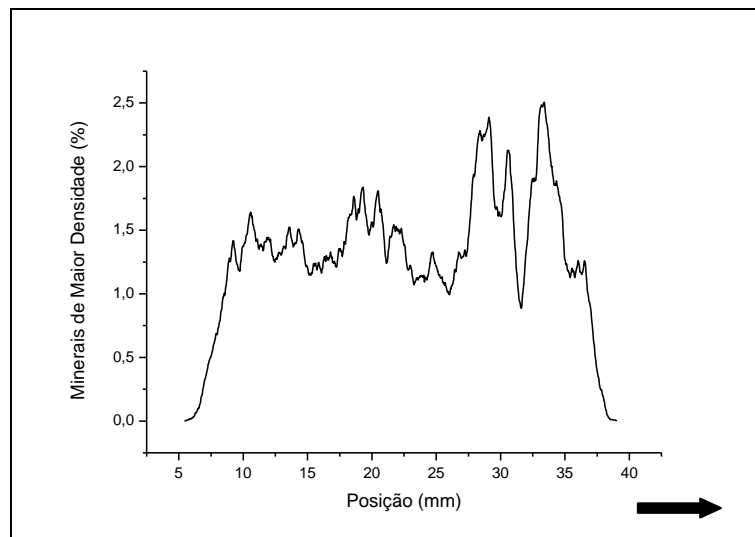


Figura V. 51: Gráfico da distribuição dos elementos de maior densidade na amostra 7.

Esta amostra de estromatólito apresentou uma porosidade total de aproximadamente 3 %, praticamente 3 vezes mais que a observada na lâmina petrográfica. As figuras V.52 e V.53 apresentam os modelos 3D e o gráfico de distribuição dos poros ao longo da amostra 07 respectivamente.

A figura V.54 apresenta modelos 3D da amostra 07, onde se pode observar em amarelo os elementos de maior densidade, em roxo a região de menor densidade onde são encontrados os poros e em verde a matriz carbonática. As setas vermelhas indicam porosidade vulgar.

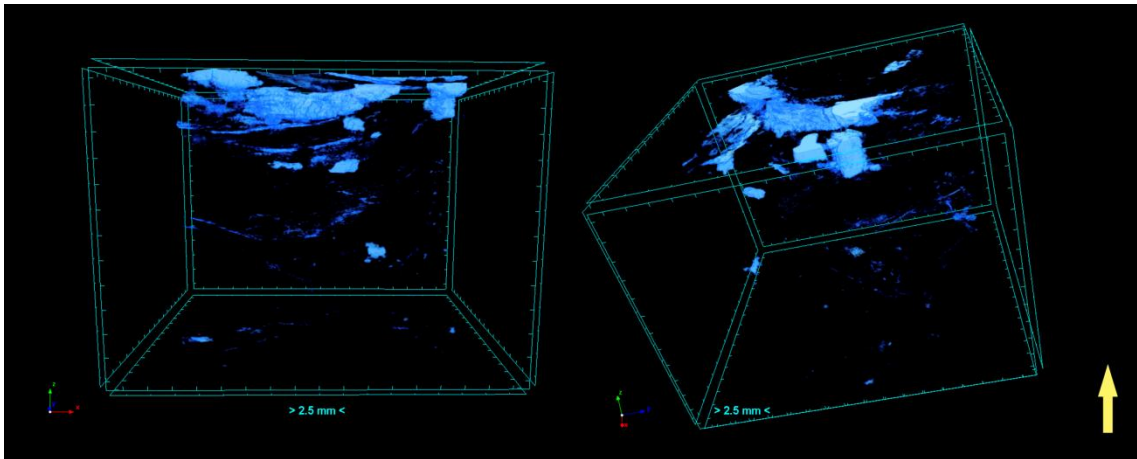


Figura V. 52: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 07.

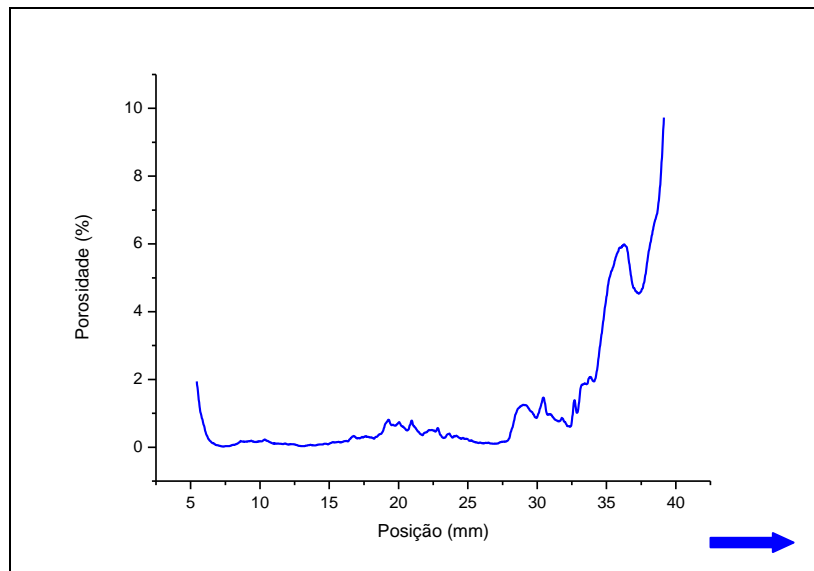


Figura V. 53: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 07.

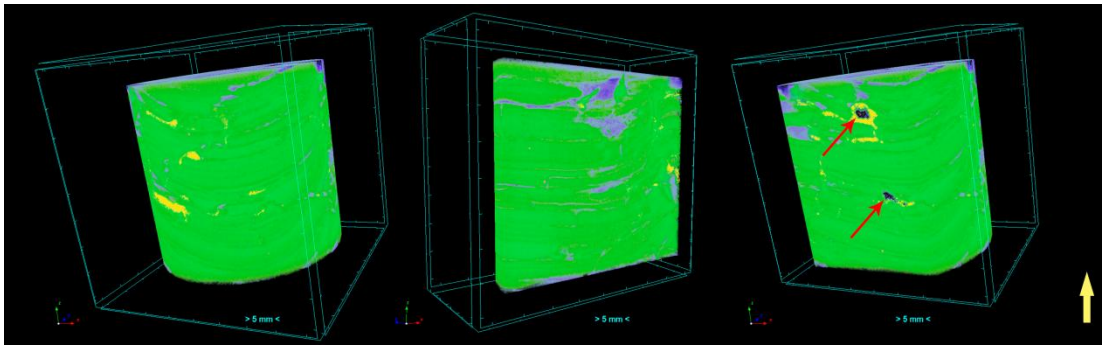


Figura V. 54: Modelos 3D da amostra 07 nota-se em amarelo os elementos de maior densidade, em roxo a região de menor densidade onde são encontrados os poros e em verde a matriz carbonática. As setas vermelhas indicam porosidade vulgar.

V.6 Amostra Lagoa Salgada - Recente

A Lagoa Salgada obteve apenas a amostra 09 estudada. Para essa amostras foi feita descrição da lâmina petrográfica, a identificação e projeção das estruturas através da microCT (modelos 3D), porosidade total, perfil de porosidade, número de poros por intervalo de tamanho e quantificação dos minerais de maior contraste e distribuição desses minerais ao longo da amostra.

Amostra 09 – O estromatólito Carbonático (domal) estudado consiste de um Plexo Estromatólito-Trombólito-Oncoide, pois se trata de vários estágios morfológicos diferentes que são caracterizados por diferentes intervalos. Em termos composicionais, foi observado na lâmina petrográfica que os constituintes não-carbonáticos são quartzo, ortoclásio, biotita, pelóides fosfáticos. Os constituintes carbonáticos são pelóides, oóides, grumos e micrita. Já os bioclastos são gastrópodes, ostracodes e tubos calcificados de serpulídeos (Serpulidae, Filo Annelida – Classe Polychaeta) e aparecem mais no meio para o topo da lâmina. Além disso, há registros de cianobactérias filamentosas. Em termos texturais/estruturais há níveis bem marcados, laminações contínuas e descontínuas, bioerosão, textura grumosa, poros agigantados e vulgares.

A base é constituída de textura grumosa que tem sua origem relacionada à calcificação de cianobactérias esféricas associadas com grãos siliclásticos (quartzo, feldspatos e raras micas). No segundo nível sobreposto há predominância de elementos peloidais, grumos, micrita e predominam processos de dissolução, bioerosão e alta porosidade. No topo a estrutura interna é organizada pelo desenvolvimento de microdomos e domos com laminações contínuas e descontínuas de calcita, havendo diminuição dos elementos peloidais e na porosidade.

A macroporosidade medida em lâmina para essa amostra ficou em torno de 15% e correspondem a poros vugulares, poros interpartículas, tubos de serpulídeos e porosidade por dissolução das lâminas micríticas. A figura V.55 exibe o escaneamento da lâmina petrográfica dessa amostra de estromatólito carbonático.

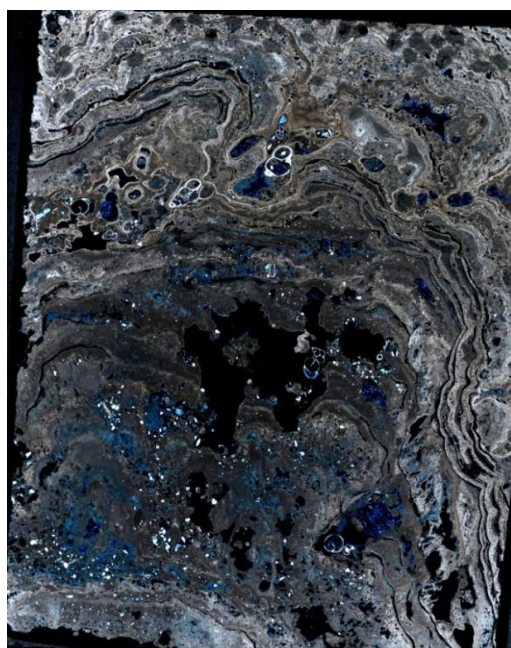


Figura V. 55: Fotomicrografia da lâmina petrográfica da amostra 09. Nota-se a presença de gastrópodes, laminações, porosidade vugular e a base constituída de textura grumosa que tem sua origem relacionada a calcificação de cianobactérias esféricas associadas com grãos siliclásticos.

As análises feitas através das imagens de microCT permitiram identificar estruturas bastante heterogêneas com dimensões aproximadamente iguais a 55 mm de altura. Foi identificada a presença de gastrópodes que puderam ser vistos em contes longitudinais e perpendiculares e ostracodes fragmentados, conforme mostrado na figura V.56. Foi possível identificar também (figura V.57) as laminações de calcita contínuas e descontínuas localizadas no topo da lâmina, poro vulgar e presença de pelóides e grãos siliciclásticos associados. Os registros de cianobactérias filamentosas não foram visíveis nas imagens microtomográficas, por apresentarem baixo contraste em relação a matriz carbonática (figura V.58 a), assim como os tubos calcificados de serpulídeos (figura V.58 b).

As análises das imagens de microCT permitiram ainda medir em profundidade o comprimento dos gastrópodes e a distribuição desses organismos no interior da amostra. Por exemplo, a figura V.56 (b) indicado pela seta vermelha com comprimento de 3,54 mm e da figura V. 57 (a) indicado pela seta azul com 5,21 mm de comprimento.

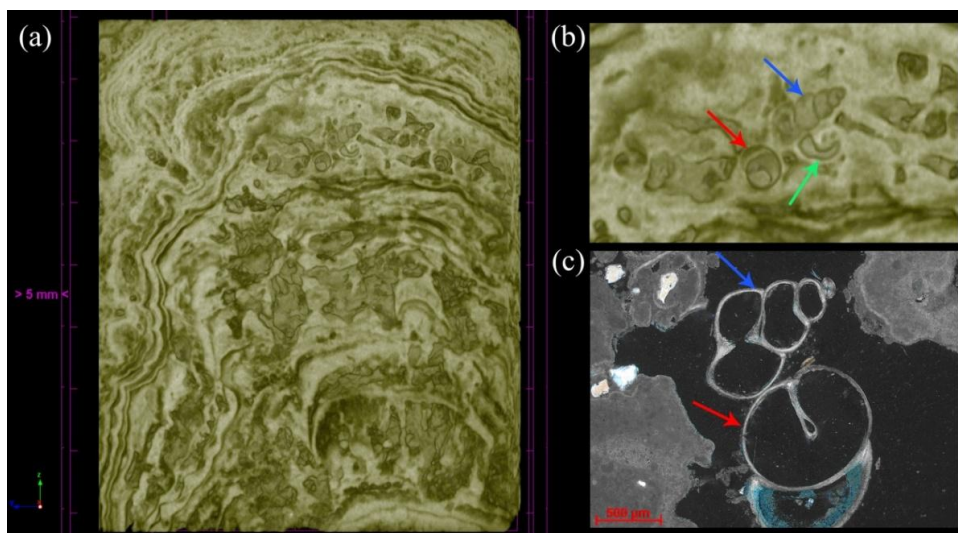


Figura V. 56: (a) Modelo 3D da amostra 09 apresentando um corte transversal, nota-se a grande heterogeneidade da amostra. (b) Modelo 3D destacando a região onde pode ser vistos os gastrópodes, seta verde destaca ostracode fragmentado. (c) Detalhe da fotomicrografia da lâmina delgada destacando a presença dos gastrópodes. Em ambos (b-c) as setas azuis mostram o corte longitudinal e as vetas vermelhas o corte perpendicular.

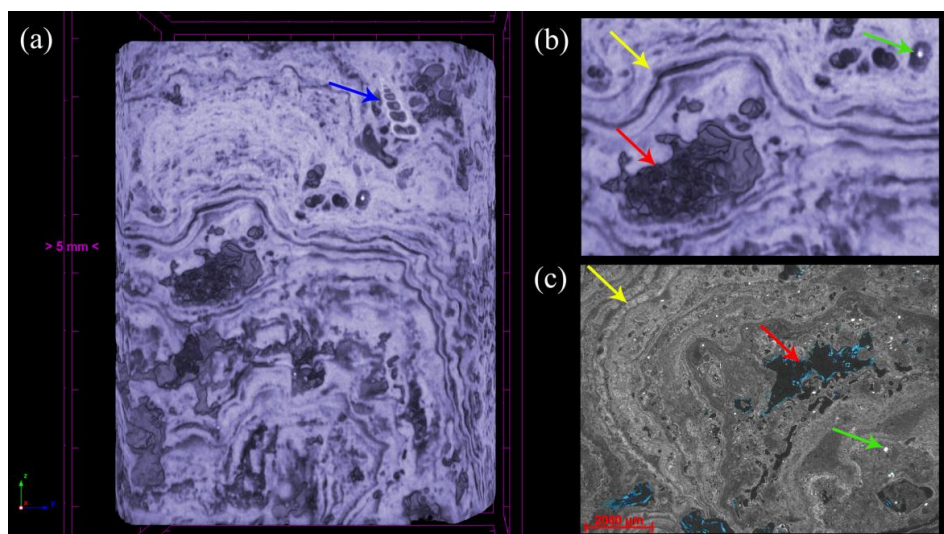


Figura V. 57: (a) Modelo 3D da amostra 09 apresentando um corte transversal, (b) modelo 3D destacando as laminações de calcita contínuas e descontínuas no topo da lâmina apontadas pela seta amarela, poro vugular mostrado pela seta vermelha e grãos siliciclásticos associado identificados pela seta verde, essas estruturas podem ser comparadas com a lâmina delgada (c).

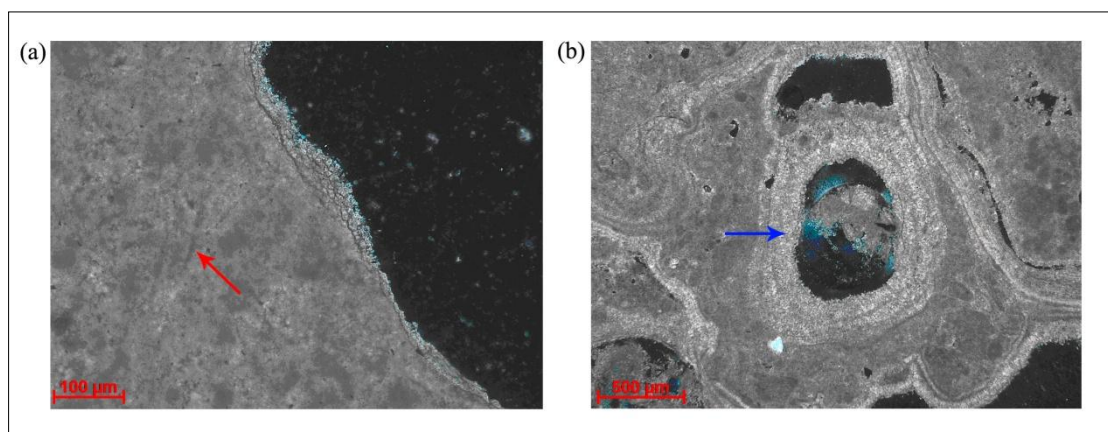


Figura V. 58: Imagens da lâmina petrográfica mostrando (a) registros de cianobactérias filamentosas indicadas pela seta vermelha e (b) tubos calcificados de serpulídeos evidenciado pela seta azul.

Nas análises quantitativas utilizando a microCT, foi verificada uma porosidade total de 17,15 %. Entre todas as amostras analisadas, essa foi a que apresentou a maior porosidade. A figura V.59 apresenta o gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra e a figura V.60 exibe o gráfico de número de poros por intervalo de tamanho. Nesse gráfico é possível observar que o maior número de poros é encontrado para tamanhos menores que 0,14 mm. A figura V.61 apresenta o modelo 3D, através do qual é possível verificar como esses poros estão distribuídos ao longo da amostra 09.

Os minerais de maior densidade, que são evidenciados na figura V.62, equivalem a aproximadamente 0,07 % do total. Esses minerais correspondem preferencialmente por grãos siliciclásticos como quartzo e feldspato e se concentram preferencialmente na base da amostra, região de menor porosidade.

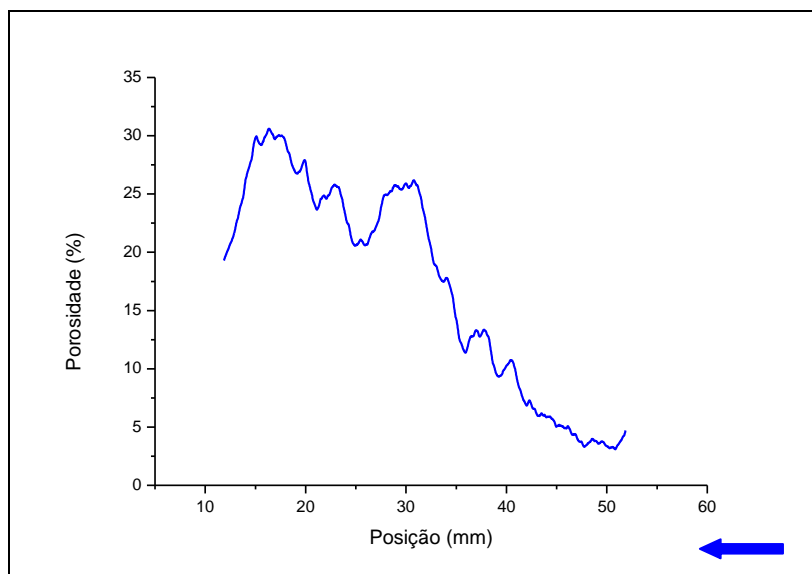


Figura V. 59: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 09.

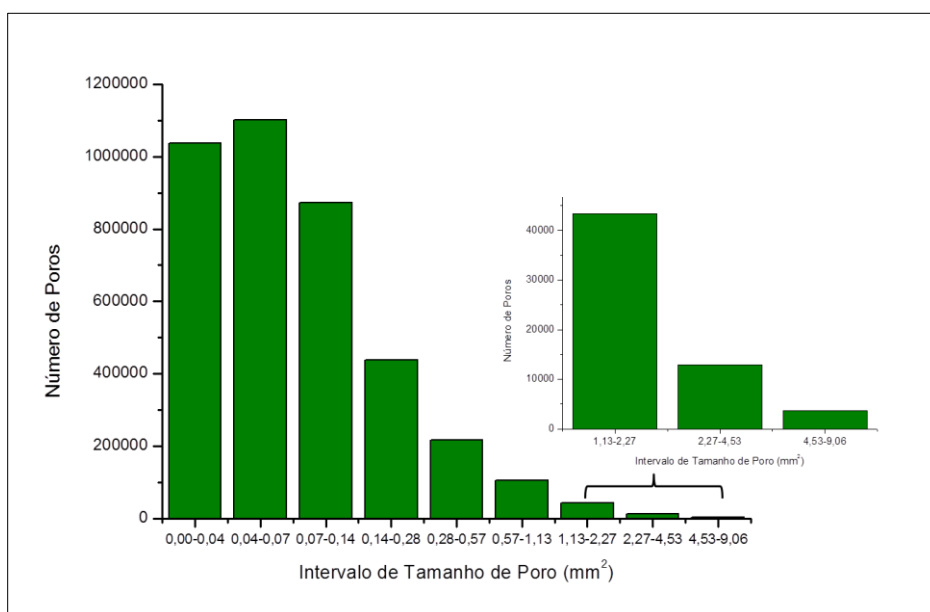


Figura V. 60: Gráfico de número de poros por intervalo de tamanho dos poros para amostra 09
nota-se que a maioria dos poros encontra-se no intervalo de tamanho menor que 0,14 mm.

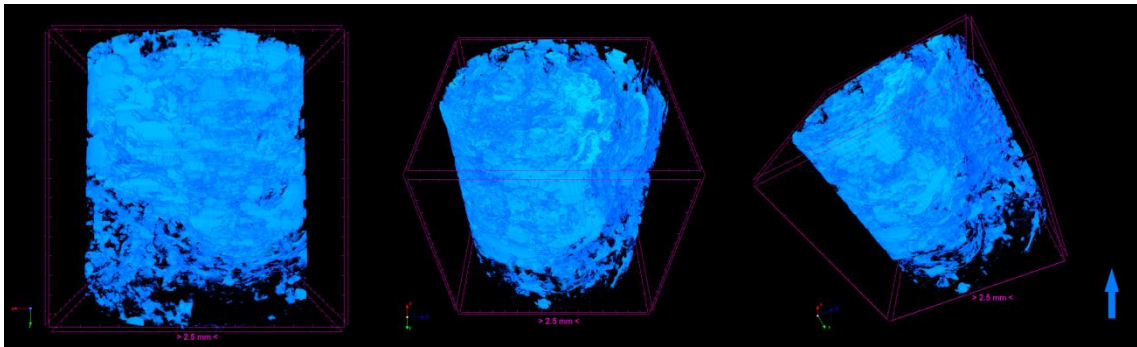


Figura V. 61: Imagem 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 09.

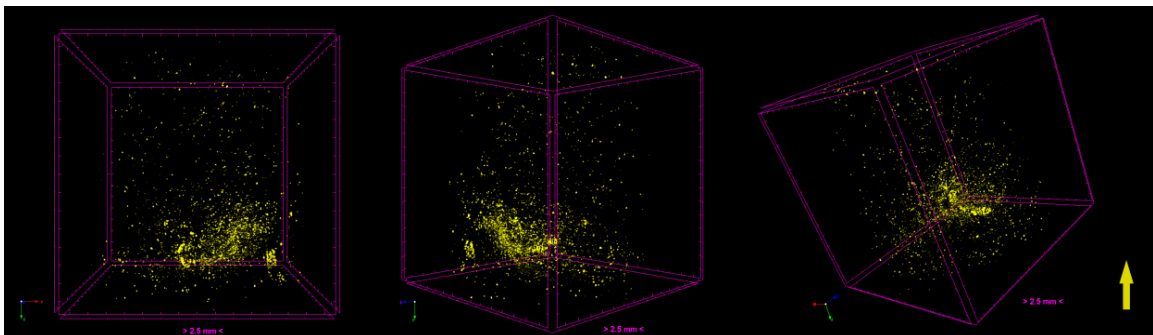


Figura V. 62: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade ao longo da amostra 09.

V.7 Amostra Bahia - Formação Caatinga

A formação Caatinga teve apenas a amostra 11 estudada. Nessa amostra foi feita descrição da lâmina petrográfica, a identificação e projeção das estruturas através da microCT (modelos 3D), porosidade total, perfil de porosidade e quantificação dos minerais de maior contraste e distribuição desses minerais ao longo da amostra.

Amostra 11 – Através da observação da lâmina petrográfica foi possível identificar que essa amostra de calcrete (paleossolo carbonático) é composta por micrita calcítica, ocorrendo calcita mosaico fino preenchendo cavidades e fissuras. Há também presença de uma série de feições como gretas circungranulares, rizoides, tubos e moldes de raízes. Notou-se ainda grumos com estrutura microbial, raros ostracodes

desarticulados, grãos de quartzo, caulinita substituindo ortoclásio e fragmentos de rocha plutônica. Não foi identificado macro porosidade na lâmina petrográfica, apenas microporosidade impossível de ser quantificada visualmente.

A análise das imagens de microCT permitiu identificar estruturas como os grumos com estruturas microbias, que estão destacados pela seta verde na figura V.63 (a-b-c) com tons de cinza mais escuro e podem ser comparados aos evidenciados fotomicrografia da lâmina petrográfica figura V.63 (d). Nota-se que através do modelo 3D (imagens de microCT) é possível ver a projeção dos grumos em profundidade no interior da amostra como é indicado pela seta verde no modelo 3D da figura V.63 (b). Foi possível também identificar as feições das gretas circunplanulares, indicadas pela seta vermelha na figura V.63.

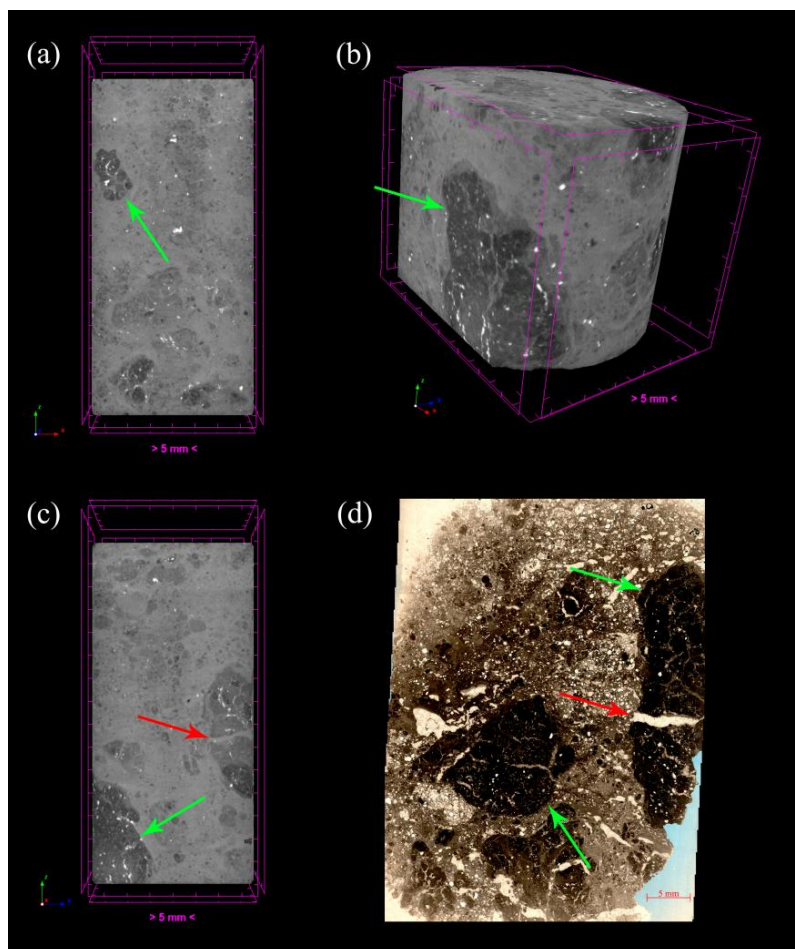


Figura V. 63: (a-b-c) Modelos 3D da amostra 11 apresentando cortes transversais, (d) fotomicrografia da lâmina petrográfica, setas verdes indicam os grumos com estruturas microbias e a setas vermelhas indicam as feições das gretas circunplanulares. Nota-se que a seta verde no modelo (b) mostra a projeção do grumo em profundidade no interior da amostra.

Os dados quantitativos obtidos revelaram que a amostra apresenta uma porosidade total de somente 0,23 %. A figura V.64 exibe os modelos 3D com o espaço poroso distribuído no volume do plug e a figura V.65 exibe o perfil de porosidade total ao longo da amostra. Seguindo com os dados quantitativos, os minerais de maior densidade que compreendem principalmente grãos de quartzo e fragmentos de rochas plutônicas, totalizaram 0,42 % do volume total da amostra e sua distribuição está apresentada nos modelos 3D da figura V.66 e no gráfico da figura V.67.

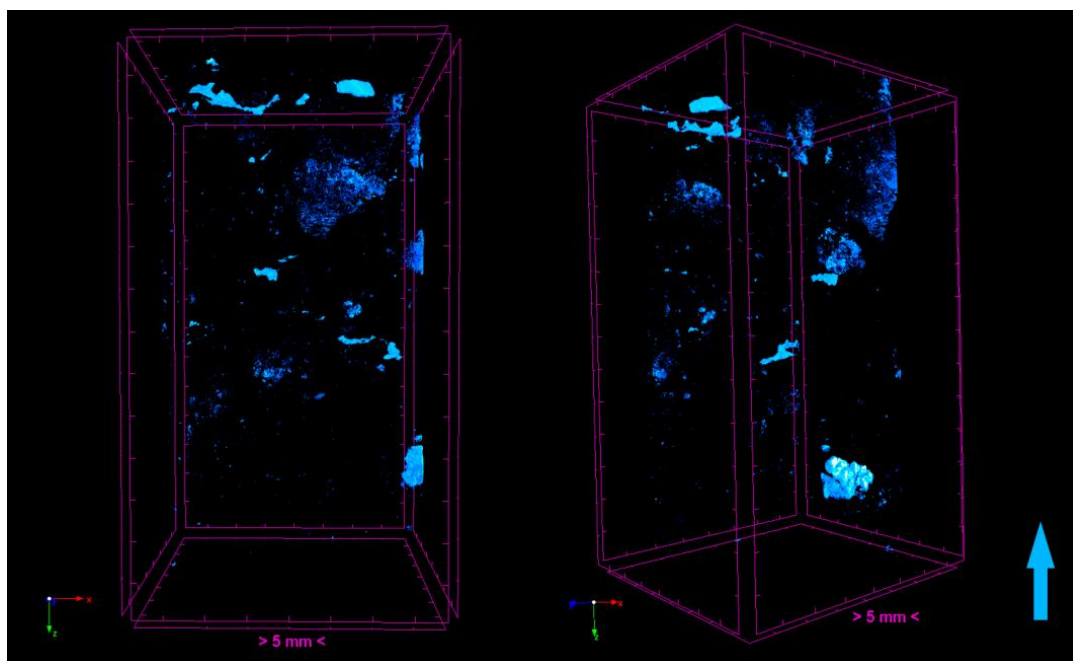


Figura V. 64: Modelos 3D evidenciando o espaço poroso da amostra 11.

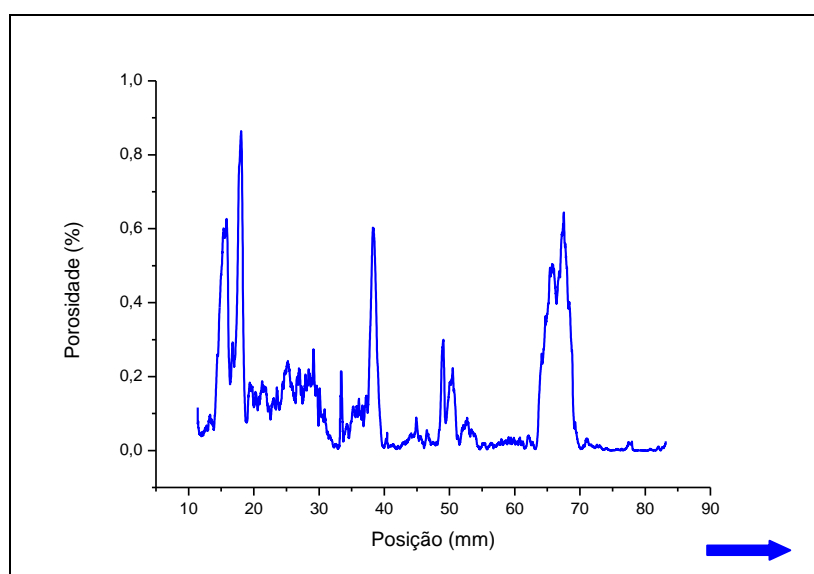


Figura V. 65: Gráfico do perfil de porosidade ao longo da amostra 11.

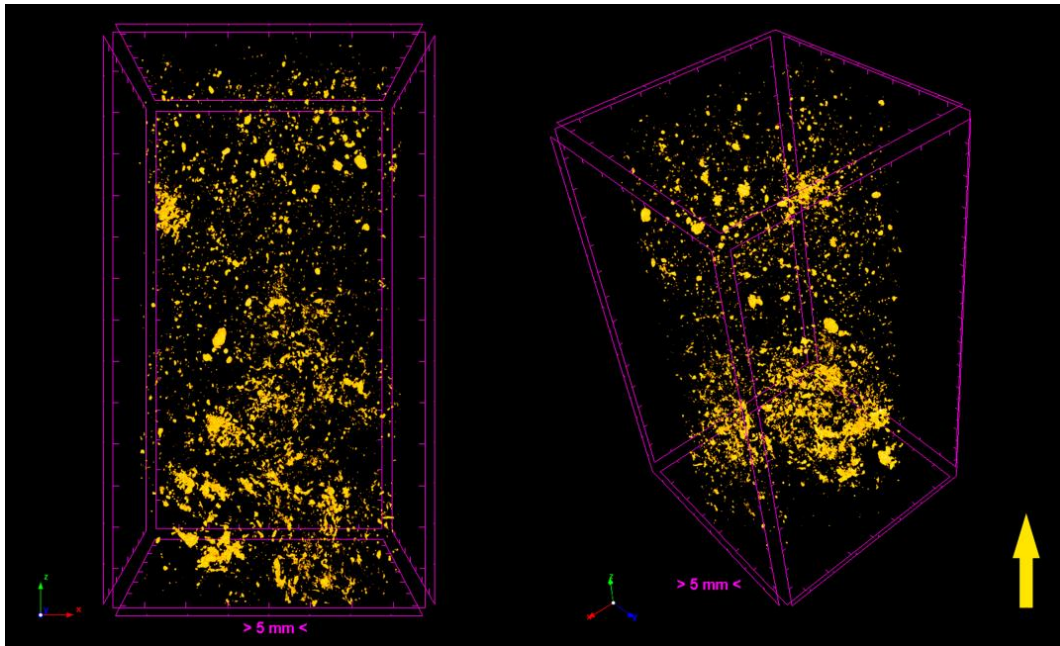


Figura V. 66: Modelos 3D mostrando a distribuição dos minerais de maior densidade (quartzo e fragmentos de rochas plutônicas) ao longo da amostra 11.

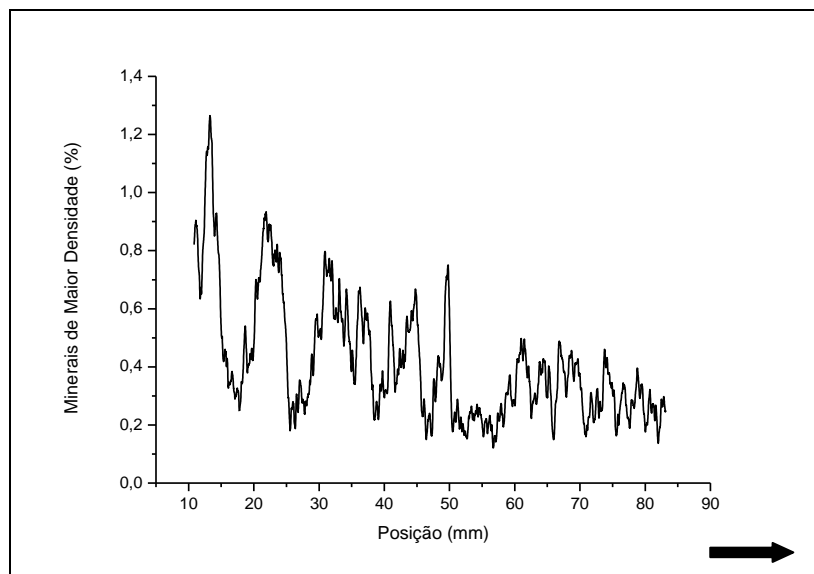


Figura V. 67: Gráfico da distribuição dos minerais de maior densidade na amostra 11.

RESUMO QUANTITATIVO

A tabela V.1 apresenta o resumo dos resultados quantitativos obtidos. Estão exibidos os valores para o volume total utilizado para as obtenções da porosidade total obtida diretamente em 3D e percentual volumétrico de minerais de maior densidade presentes nas amostras de rocha. Ambos os referidos parâmetros foram obtidos através da técnica de microCT. Além destes, a tabela V.1 expõe a porosidade 2D adquirida através da lâmina delgada. As apreciações dos resultados alcançados permitiram chegar às resenhas descritas a seguir.

Nas amostras de depósitos de microbialitos originários de lagoas hipersalinas, como é o caso das amostras denominadas pelos números 09 (Lagoa Salgada), 12, 13, 14 e 15 (Lagoa Vermelha), foi possível a distinção de diferentes fases minerais e a caracterização do comportamento do espaço poroso através da porosidade total e seu perfil ao longo da extensão de todas as amostras. Também foi possível evidenciar a presença de bioclastos e componentes siliciclásticos. Especificamente na amostra 09, estromatólito carbonático de Formação Recente de Lagoa Salgada/RJ, praticamente todas as estruturas identificáveis na lâmina petrográfica também foram identificadas nas imagens de microCT, com apenas duas exceções: as cianobactérias filamentosas e os tubos de serpulídeos, devido ao baixo contraste em relação ao meio onde se encontravam. Em contra partida, as análises de microCT permitiram ainda mensurar a profundidade de certas estruturas, como por exemplo, comprimento em profundidade dos gastrópodes contidos nas rochas.

Ainda em relação ao grupo hipersalino, estão os valores de maior valor de porosidade total - amostras 09 ($\phi=17,15\%$) e 12 ($\phi=11,00\%$); ambas estromatólitos. É

importante ressaltar que a porosidade obtida pela microCT consiste na porosidade total e que é limitada pelo tamanho do pixel utilizado durante o processo de aquisição e que este, por sua vez, está ligado ao tamanho da amostra investigada. Dessa forma, poros com dimensões menores que a resolução espacial empregada não serão contabilizados.

Das amostras provenientes da Bacia de Sergipe e Alagoas, as atenções voltaram-se para amostra 05 (coquina) da Formação Morro do Chaves em que a porosidade total encontrada foi de apenas 1,98 %, ficando bem abaixo da medida na lâmina petrográfica que foi em torno de 5 %. Não podemos esquecer que a lâmina delgada foi avaliada apenas em 2D enquanto a microCT em 3D. Além disso, essa última técnica tem as limitações explicitadas no parágrafo anterior. Dessa forma, pode ser sugerido que o tamanho dos poros dessa amostra é menos que a resolução espacial empregada nesse ensaio, o que pode ter contribuído para a obtenção de diferentes valores de porosidade entre as duas técnicas.

Para as amostras 04 e 07 o espaço poroso está aparentemente bastante fragmentado, apresentado um comportamento diferente das demais amostras nesse quesito.

Tabela V. 1: Resumo dos Resultados quantitativos.

Denominação	Porosidade		Volume total Avaliado (mm ³)	Percentual volumétrico de minerais de maior densidade (%)
	Por MicroCT (ϕ) – 3D (%)	Pela Lâmina ($\phi_{Delgada}$) – 2D (%)		
01 - Calcilutito	0,51	-	24293,00	0,17
02 - Calcilutito Laminito Microbial	0,13	-	58521,50	0,13
03 - Calcarenito, grainstone	0,80	< 2	27513,00	0,10
04 - Pisolito Calcário	1,50	X	7043,31	-
05 - Coquina, grainstone	1,98	± 5	67724,84	0,08
07 - Estromatólito Carbonático	3,00	± 1	36928,00	1,23
09 - Estromatólito Carbonático	17,15	> 15	43141,00	0,07
10 - Estromatólito + Calcarenito	0,12	-	64541,00	0,12
11 - Calcrete (Paleossolo Carbonático)	0,23	-	79527,68	0,42
12 - Estromatólito I	11,00	X	36621,00	1,13
13 - Biolaminito	0,46	X	35568,00	-
14 - Estromatólito II	0,35	X	28602,00	0,97
15 - Matéria Orgânica	0,75	X	63203,00	0,39

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou o emprego da técnica de microCT na investigação interna de exemplares de rochas carbonáticas brasileiras sendo efetivo na criação de um banco de dados de imagens refinadamente detalhadas.

Os resultados expuseram a técnica de microCT como uma ferramenta adequada e capaz de auxiliar e agregar informações na caracterização das rochas carbonáticas, mostrando em três dimensões as estruturas que as compõem com a vantagem de ser uma técnica não-destrutiva e que não precisa de preparo prévio.

A técnica de microCT apresentou uma certa limitação em função dos tamanhos de pixels (resoluções), e baixo contraste de determinadas estruturas e minerais. Em contra partida, possibilita visualizações em três dimensões de estruturas, permitindo fornecer comprimentos e diâmetros.

A técnica também forneceu de maneira eficiente valores de porosidade total, distribuição espacial da porosidades, assim como as quantificações dos minerais de maior densidade e sua distribuição ao longo das amostras.

SUGESTÕES

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar:

- Continuar o estudo e buscar caracterizar de maneira mais detalhada o complexo poroso das rochas carbonáticas, tal como a avaliação da conectividade e da anisotropia;
- Determinar um padrão metrológico de controle de qualidade para a caracterização de porosidade e comparar com técnicas petrofísicas clássicas visando o melhor custo benefício entre elas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F., 1977. *O Cráton do São Francisco*. Revista Brasileira de Geociências, Vol. 4, pp. 349-364.

ALVES, H., 2014. *Methodology for attainment of density and effective atomic number through dual energy technique using microtomographic images*. Applied Radiation and Isotopes, Vol. 89, pp. 06-12.

ARMS, C.H., 2005. *Pore scale characterization of carbonates using X-ray microtomography*, SPE90368-MS, Society of Petroleum Engineers Journal, pp. 146-157.

BERGQVIST, L.P., 2008. *Bacia São José de Itaboraí, RJ Berço dos mamíferos no Brasil*. SIGEP, Vol. 123 pp. 413-432.

BHUIYAN, I.U., 2013. *Consideration of X-ray microtomography to quantitatively determine the size distribution of bubble cavities in iron ore pellets*. Powder Technology, Vol. 233, pp. 312-318.

CÂMARA, R. N., 2013. “*What is the m for the coquinas of the Morro do Chaves Fm.*”. 114ª Reunião Mensal da Seção Brasil da SPWLA, Rio de Janeiro, RJ.

CARVALHO, A. C. P., 2007. *Historia da Tomografia Computadorizada*. Revista Imagem, Vol. 29(2), pp. 61-66.

CARVALHO, I. S., 2004. *Paleontologia*. Editora Interciência, 2ª Edição, Vol.1, ISBN 85-7193-107.

CAVALCANTI, A. A., 2005. *Laminitos Microbianos e Cianobacétias na Lagoa Pernambuco, Neógeno do Rio de Janeiro, Brasil* - Geociências, Vol. 6, pp. 5-10.

CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C., 1970. *Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates*. AAPG; Vol. 54/2, pp. 207-244.

- COMARK, A. M., 1963. *Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications*. Journal of Applied Physics, Vol. 34.
- DUNHAN, R. J., 1962. *Classification of Carbonate Rocks According to Depositional texture*. Memoir AAPG, Vol. 1, pp. 108-121.
- ERTRELLA, G. O., 2008. *Pré-Sal: conhecimento, estratégia e oportunidade*. In: Forum Nacional/INAE, 20. Edição Extraordinária, 3 dez, Rio de Janeiro.
- FELDKAMP, L. A., 1984. Davis L. C.;Kress J. W. “*Practical cone beam algorithm*”, Journal of Optical Society of America, Vol. 1(6), pp.612-619.
- FIGUEIREDO, A. L., 2011. *Fácies Carbonáticas e Potencial Reservatório da Formação Salitre Neoproterozóica, na Bacia do Irecê – Bahia, Brasil*. Salvador.
- FOLK, R.L., 1959. *Practical Petrographic Classification of Cimestones*. Bulletin AAPG, Vol. 43, pp. 1-38.
- FORSBERG, F., 2008. *X Ray Microtomography and Digital Volume Correlation for Internal Deformation and Strain analysis*. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Experimental Mechanics.
- GONZALES, R., & WOODS, R. 2010. *Digital Images Processing*. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 74, pp. 51-66.
- GRATON, L. C., & FRASER, H. J., 1935. *Systematic Packing of Spheres: With Particular Relation to Porosity and Permeability*. The Journal of Geology. Vol. 43, pp. 785-909.
- HAILI LONG, 2009. *3D quantification of mineral components and porosity distribution in Westphalian C sandstone by microfocus X-ray computed tomography*. Sedimentary Geology Vol. 220, pp. 116–125.
- INSTARECON, ®, CBR Premium 12-8KTM, InstaRecon, Champaign, IL, USA, 2011.

- KINGSLEY, R., 1998. *Rocks & Minerals - A Pocket Companion*. Quantum Books Ltd. pp. 20-2, São Paulo.
- KNOLL, G.F., 1989. *Radiation Detection and Measurement*, 2^a ed., New York, John Willey & Sons.
- LIMA, I., 2008 . *Ethanol bone evaluation using 3D*. Micron, Vol. 39, pp. 622.
- LIMA, I., 2007. *Characterization of osteoporotic bone structures by bidimensional images through x-ray microfluorescence with synchrotron radiation*. X-Ray Spectrometry, Vol. 37, pp. 249-254.
- LISBOA M. A. R., 1995. *The Permian geology of Northern Brazil*. Am. Jour of Sci. Ser. New Haven, Vol. 37, pp. 221.
- MACHADO, A. C., et al., 2014. *Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks*. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 95, pp. 405-407.
- MACHADO, A. S., et al., 2015. *X-ray microtomography characterization of carbonate microbialites from a hypersaline coastal lagoon in the Rio de Janeiro State - Brazil*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.107i>
- MORAIS, E. R. & MENEZES, T. L., 2005. *Estratigrafia Geoelétrica da Seção Carbonática da Bacia de Sergipe-Alagoas, Região do Campo de Riachuelo, Sergipe* - Revista de Geologia, Vol. 18/2, pp.175-185.
- MOREIRA, A.C., 2012. *Effects of manual threshold setting on image analysis results of a sandstone sample structural characterization by X-ray microtomography*. Applied Radiation and Isotopes Vol.70, pp. 937–941.
- MUTINA, A., 2012. *Using X-Ray Microtomography for the Three Dimensional Mapping of Minerals*. MICROSCOPY AND ANALYSIS, pp. 7-12.
- NATTERER, F., 2001. *The Mathematics of Computerized Tomography*. Classics in Applied Mathematics, Philadelphia: SIAM.

NETO, J., 2011. *A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas*. Revista Brasileira de Geociências Vol. 41, pp. 498-508.

NEUENDORF, K.K.E., 2005. *Glossary of Geology* (5th ed.). American Geological Institute. ISBN 0-922152-76-4.

OLIVEIRA, D. F., 2010. *Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, M. S. F., 2011. *Petrophysical analysis of limestone rocks by nuclear logging and 3D high-resolution X-ray computed microtomography*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol.652, pp. 905–910.

OLIVEIRA, M. S. F., 2012. *X-ray microtomography application in pore space reservoir rock*. Applied Radiation and Isotopes, Vol.70, pp.1376-1378.

PAPATERRA, G. E. Z., 2010. *Pré-Sal: Conceituação Geológica sobre uma Nova Fronteira Exploratória no Brasil*. Dissertação de M.Sc., Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PEDREIRA DA SILVA, J.A., 2003. CPRM – *Serviço Geológico do Brasil - Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores* – Cap. III, pp.55-85.

PEIXOTO, A. M., 1998. *Enciclopédia Agrícola Brasileira*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, Vol. 2, pp. 82.

PETTIJOHN, F. J., 1957. *Sedimentary Rocks*. Editora Harper and Brothers, Segunda edição. Nova Iorque, XVI 718, pp. 119.

REMEYSEN, K. & SWENNEN, R., 2008. *Application of Microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations*. Marine and Petroleum Geology, Vol. 25, pp. 486-499.

ROZENBAUM, O., 2011. *3-D characterization of weathered building limestones by high resolution synchrotron X-ray microtomography*. Science of the Total Environment, Vol. 409, pp. 1959–1966.

SALES, E. S., 2010. *Estudo da qualidade óssea através das técnicas de microtomografia e microfluorescência de raios X*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTANNA, L.G., 2004. *The Paleocene travertine system of the Itaboraí basin, Southeastern Brazil* - Journal of South American Earth Sciences, Vol.18, pp. 11-25.

SCHON, J.H., 2004. *Physical properties of rocks: Fundamentals and Principles of petrophysics*, Handbook of Geophysical exploration, Seismic Exploration, Elsevier.

SILVA E SILVA, L. H., 2002. *Contribuição ao conhecimento da composição microbiana e química das estruturas estromatolíticas da Lagoa Salgada*, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA E SILVA, L. H., 2008. *Composition of the stratiform stromatolites of lagoa Salgada, Rio de Janeiro, Brazil*. Anuário do Instituto de Geociência, Vol. 31/2, pp. 42-49.

SILVA E SILVA, L. H., 2013. *Cyanobacterial and chemical composition of the stromatolites in Salgada lagoon, Neogene of Rio de Janeiro state, Brazil*. Geologia USP, Série científica, Vol.13/1, pp. 95-106.

SKASCAN, CTvox Quick Start Guide, versão 2.7. Fonte: <http://www.skyscan.be>

SKYSCAN 1173b, 2011. NRecon User Guide. Fonte: <http://www.skyscan.be>

SKYSCAN 1173b, 2013. Morphometrics Parameters in CT-Analyser. Fonte: <http://www.skyscan.be>

SRIVASTAVA, N.K. 1999. *Estromatólitos Recentes, Lagoa Salgada, RJ*. SIGEP 41.

SUGIYAMA, T., 2010. *Application of synchrotron microtomography for pore structure characterization of deteriorated cementitious materials due to leaching*. Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1265–1270.

SUGUIO, K., 2003. *Geologia Sedimentar*. Ed. Edgar Blücher Ltda.

TERRA, G. J. S. *et. al.*, 2010. *Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras*. Boletim de Geociências Petrobras, Rio de Janeiro, Vol. 18/1, pp. 9-29.

TSAFNAT, N., 2009. *Automated mineralogy using finite element analysis and X-ray microtomography*. Minerals Engineering, Vol. 22, pp. 149–155.

TUCKER, M. E., 1989. *Techniques in Sedimentology*. Geological Magazine, Vol. 126, pp. 307.

VASCONCELOS, C., *et. al.*, 2006. *Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics?* Sedimentary Geology, Vol. 185, pp. 175-183.

VISSCHER, P.T. & STOLZ, J.F., 2005. *Microbial mats as bioreactors: populations, processes and products*. Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology, Vol. 219, pp. 87-100.

WELLS, P., 1994. *Computed Tomography*. Materials Forum, Vol. 18, pp. 111-113.

WRIGHT, V. P. & TUCKER, M. E., 1991. *Calcretes: an introduction*. International Association of Sedimentologists Reprint Series, Vol. 2, pp. 1-22.

WRIGHT, V. P. 2007. *Calcretes*. In: Nash D.J. & McLaren S.J. (eds.) *Calcretes in Geochemical Sediments and Landscapes*. Oxford, Blackwell, pp. 10-45.

YANBIN Y., 2009. *Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocus X-ray computed tomography*. International Journal of Coal Geology, Vol. 80, pp. 113–123.

YOUNG, I.T., 1998. *“Fundamentals of Image Processing”*, Delft University of Technology. ISBN 90–75691–01–7.

ANEXO

Please cite this article as: A.S. Machado, et al., Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.107i>

X-ray microtomography characterization of carbonate microbialites from a hypersaline coastal lagoon in the Rio de Janeiro State – Brazil

A.S. Machado^{1,2}, P.F.F. Dal Bó¹, I. Lima², L. Borghi¹, R. Lopes²,

1 Laboratório de Geologia Sedimentar – IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;

2 Laboratório de Instrumentação Nuclear – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;

Abstract

The objective of the present study is to apply the micro-CT technique to assess recent microbialite samples from a hypersaline coastal lagoon in the Rio de Janeiro State. The study comprises structural assessment, mineralogical characterization and porosity distribution of each sample. Micro-CT is increasingly present in geological reservoir analyses, and has advantages over other laboratory techniques since it is non-invasive and allows 2D/3D visualization of inner structures without previous preparation method, such as slabbing, polishing, thinning or impregnation. This technique renders structural analyses which can be spatially resolved to a scale of micrometers. Results show that micro-CT technique is also adequate for the characterization of carbonate microbialites, providing excellent high resolution 3D images, that enabled to distinguish different mineralogies and porosity distribution beyond its inner structure.

Keywords: X-ray computed microtomography, Carbonate microbialites, Mineralogical characterization and Porosity

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

X-ray Computed Microtomography (micro-CT) is a non-invasive technique that allows 2D/3D visualization of inner structures and does not need to be subjected to a preparation method such as impregnation, thinning or polishing [1], what is an advantage. It is a highly reliable and established technique that inspired its use for geological research and industry [2]. Some manufacturers developed

desktop micro-CT systems according to the international demand for fast and accurate results in a laboratory environment. The 3D micro-CT allows full composition analyses, which can be spatially resolved to a scale of micrometers. Micro-CT physical principle is based on the attenuation of X-rays when they interact with the sample. The intensity of the photons crossing the object depends on the number of atoms by volume unit (density) and on the type of the atoms throughout the beam. In geological research it can be used in order to study rocks and their porosity network [3 and 4].

Microbialites are organosedimentary deposits formed by sediment trapping, binding and/or precipitation as a result of the growth and metabolic activity of micro-organisms, mainly cyanobacteria. The study of carbonate sediments formed by microbial induction, as well as of microbial carbonate rocks, is becoming very important in the Brazilian exploratory scenario of hydrocarbons, due to possible analogies with the Pre-salt reservoirs of the Eastern Brazilian margin sedimentary basins. In carbonate rocks, sedimentation and diagenesis produce a wide range of pore sizes, resulting in a complex spatial distribution of pores and pore connectivity [5].

The hypersaline coastal lagoons from the Rio de Janeiro State (Brazil) were chosen for this study because they present carbonate sediments formed by microbial induction and stromatolites with varied morphologies. Characterizing microbialite pore space is a great challenge for oil field development because of the high degree of its heterogeneity. In this context, the objective of the present study is to apply the micro-CT technique to assess four samples of recent microbialites from one of those hypersaline lagoons. The study comprises structural assessment, mineralogical characterization, total porosity and porosity distribution of each sample.

2. Method

The lagoons are hypersaline water bodies that occur in the coastal area of the state of Rio de Janeiro. Together with other coastal lagoons, they form the Araruama Lake System, which represents a series of coastal lagoons, characterized by fresh to hypersaline waters, which enabled microbial mat development and carbonate precipitation [6]. Microbialites used in the present study were collected by the authors in the interior of one of the hypersaline lagoons, in places which remain underwater most part of the year. Four different samples were analysed (Figure 1):

Sample 1: Biscuit stromatolite – microfacies I . This microfacies is characterised by corrugated and very irregular carbonate laminae and the conspicuous presence of vuggy porosity.

Sample 2: Biolaminite. Microbial mats composed of dark laminae (rich in organic matter) interbedded with light gray, carbonatic, stratiform to crenulated laminae, finely laminated.

Sample 3: Biscuit stromatolites – microfacies II. This microfacies occur as carbonate plates composed by thin, irregular, discontinuous and distinct laminated carbonates, forming hardened crusts.

Sample 4: Organic matter. Formed by different stages of decomposition of microbial mats (organic matter), which also contains ostracods.

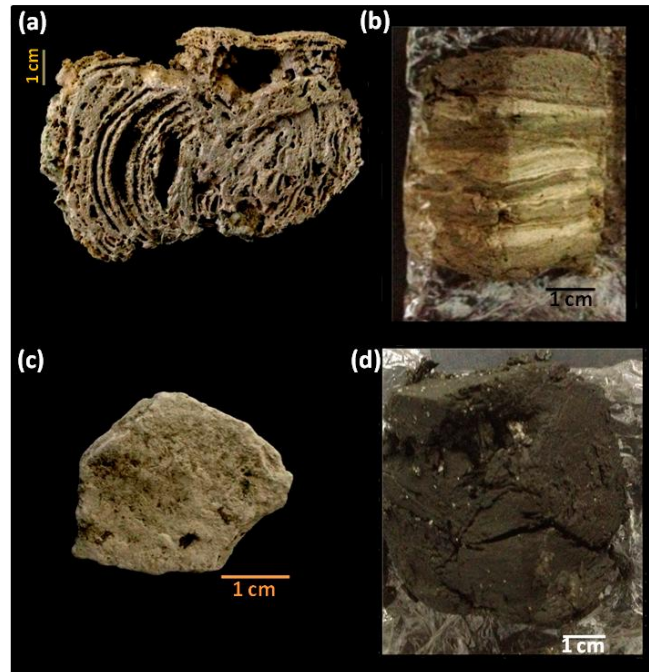


Figure 1. Samples used. (a) Biscuit stromatolite/microfacies I, (b) Biolaminite (c) Biscuit stromatolites/microfacies II and (d) Organic matter.

X-ray computed microtomography (micro-CT) provides high-resolution images by a volume data sets of an inspected object which doesn't need to be previously modified, i.e., the object inspected doesn't need to be subjected to a preparation method. Its physical principle is based on the X-rays attenuation when they interact with the object and are modulated according one physical characteristics (atomic number, density and thickness), [4 and 7].

In order to obtain micro-CT images it is necessary to acquire many projections in constant angular steps and the reconstruction is performed with an appropriate algorithm based on filtered back-projection [8]. The first step to achieve 3D data information is to perform segmentation on 2D Micro-CT images, which can be carried out with different approaches depending on the nature/geometry of the investigated structures. The Figures 2 and 3 show basic scheme and workflow of μ CT procedure, respectively.

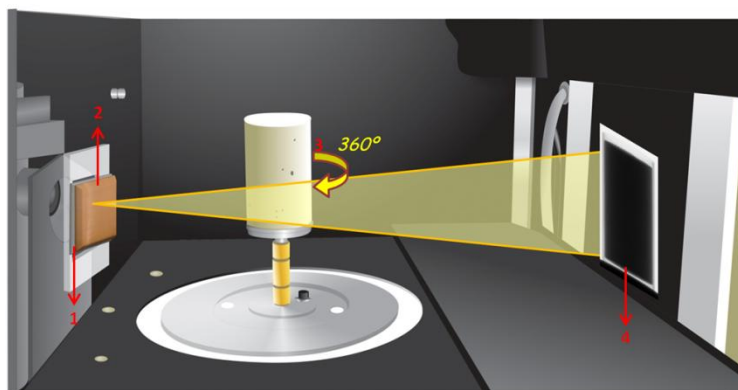


Figure 2. Internal scheme of microtomography, where: 1- Aluminum filter, 2- Copper filter, 3- The projection images 360° at each step (0.30° rotation) and 4- flat panel detector.

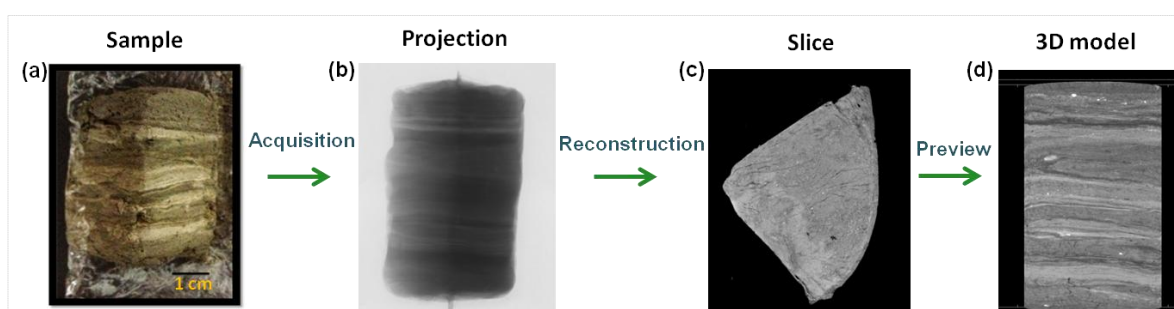


Figure 3. Micro-CT workflow: (a) sediment sample, (b) example of one x-ray projection, (c) example of transaxial 2D reconstruction slice and (d) 3D μ CT visualization of the 3D model.

Micro-CT images were obtained in a high energy microtomography system – Skyscan / Bruker, model 1173 HE. Samples were placed in a polystyrene support. The system operated in an energy and current range of 60–100 kV and 100–133 μ A, respectively. In order to reduce the contribution of low energy photons (beam hardening effect), a combination of two filters was used: copper (0.10 mm of thickness) and aluminum (1.0 mm of thickness). The pixel sizes corresponding to range 14 μ m - 25 μ m, these values correspond to a range of spatial resolution of approximately 32 μ m - 58 μ m. A flat panel detector was used (2240 x 2240) to register the cone X-ray beam transmission. The projection images were taken over 360° at each step of 0.30° rotation.

After scanning, the samples were analyzed using two softwares. The first was CTVox ® software, version 2.7.0 r990, aiming studies of structural assessment and mineralogical characterization. This software allows you to create 3D models. By analysis of these models has been possible to identify the structures and describe the mineralogy.

Then the images were analyzed using the CTAn ® software, version 1.13.5.1, aiming to quantify the compositional elements, total porosity and porosity distribution, for this the following image processing was necessary:

The first step was to choose an appropriate filter, which afterwards would facilitate image segmentation. The Unsharp Mask filter, which is used for edge enhancing, was selected. This filter acts

isolating the edges of an image, amplifying them, and subsequently placing them back in the image, and for this reason it was chosen in this study, because it would highlight the pores edges.

Following was necessary to segment the images, this process consists in partitioning an image, according to some uniformity criterion, into homogeneous regions or parts, which can represent one or more objects of interest, and is considered the first step in image analysis. When performing a quantitative analysis of the microtomographic images the first step is to determine a region of interest (ROI) and/or a volume of interest (VOI), represented respectively in 2D and 3D. ROI refers to a cross section where the 2D analysis will be carried out, whereas VOI refers to the sum of all the cross sections that represent a 3D volume, where the 3D analysis is performed. However, there is no rule of the thumb used to determine the segmentation /thresholding (TH). In the present study, we chose to use a global segmentation for a range from 0 to 255. Such a choice is justified because we have successfully used this segmentation method in previous studies on porous media [3 and 4]. Global segmentation is the simplest kind and aims to separate the image into two categories (background and object). This separation is carried out by scanning the image point by point, and identifying them as points of the object or of the background, according to a threshold T . In this manner, a binary image is obtained, with the objects in black (0) and the background in white (255),[9]. Thus, it was possible to separate carbonate The schematic of this segmentation is shown in Figure 4.

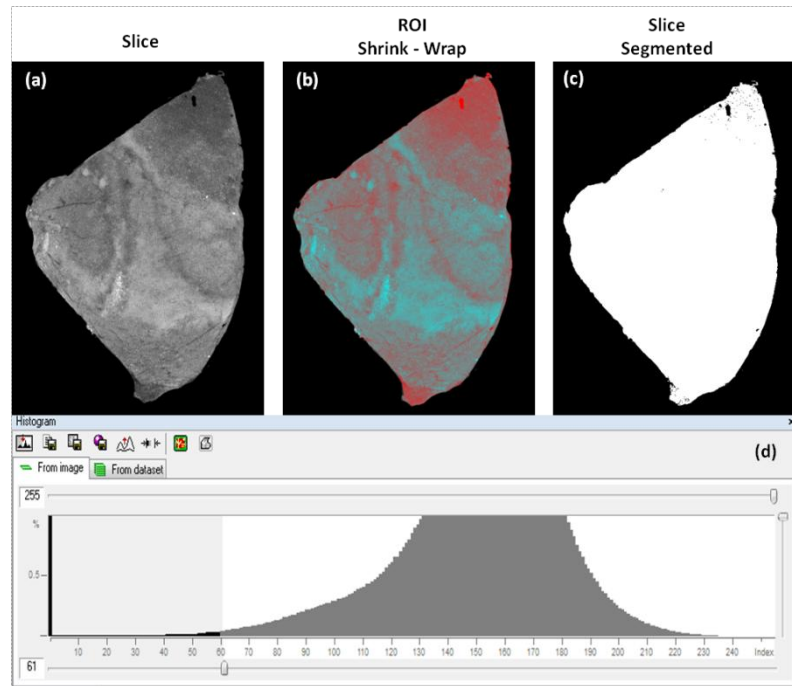


Figure 4. Image segmentation: (a) represents a slice; (b) the same slice with the ROI highlighted in red; (c) segmented image and (d) shows the histogram where from 0 to 61 is what we considered as pores (black) and from 62 to 255 is the carbonate matrix (white).

3. Results

The objective of this study was to characterize carbonate microbialites from a hypersaline lagoon and the results shows that micro-CT analyses allowed to identify inner structures (ostracods, laminations, carbonate grains), different mineralogy (dolomite, calcite and quartz), as well as pore space distribution and quantification, providing a detailed description about microbialites sediments. This description will be given below:

3.1 Structures and Mineralogical Characterization

By 3D models analysis of sample 1 was observed the different mineralogies and the compositional laminations (calcite and Mg-calcite) which comprise the structure can be seen in Figure 5.

In the biolaminate analysis, it is possible to identify compositional differences with presence of dolomite, calcite, organic matter and bright quartz grains are shown in Figures 6 and 7 . It was possible to quantify about 0.01% dolomite plus quartz and 14% calcite.

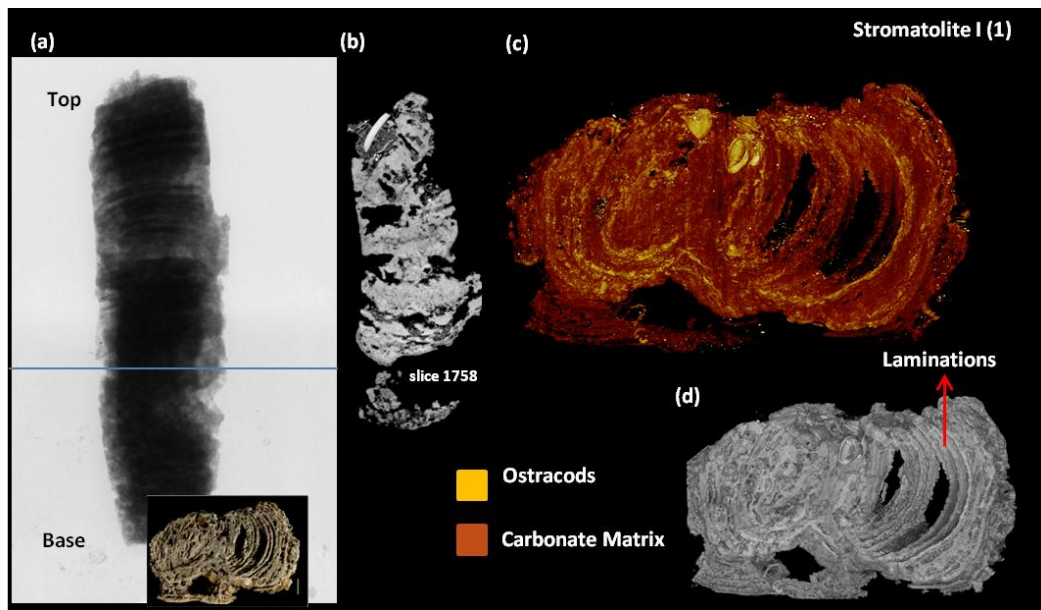


Figure 5. Sample 1 - Biscuit Stromatolite I; (a) Projection of the sample ; (b) slice number 1758, and (c) 3D model shows carbonate matrix and the ostracods (d) 3D model, the arrow identify the compositional laminations.

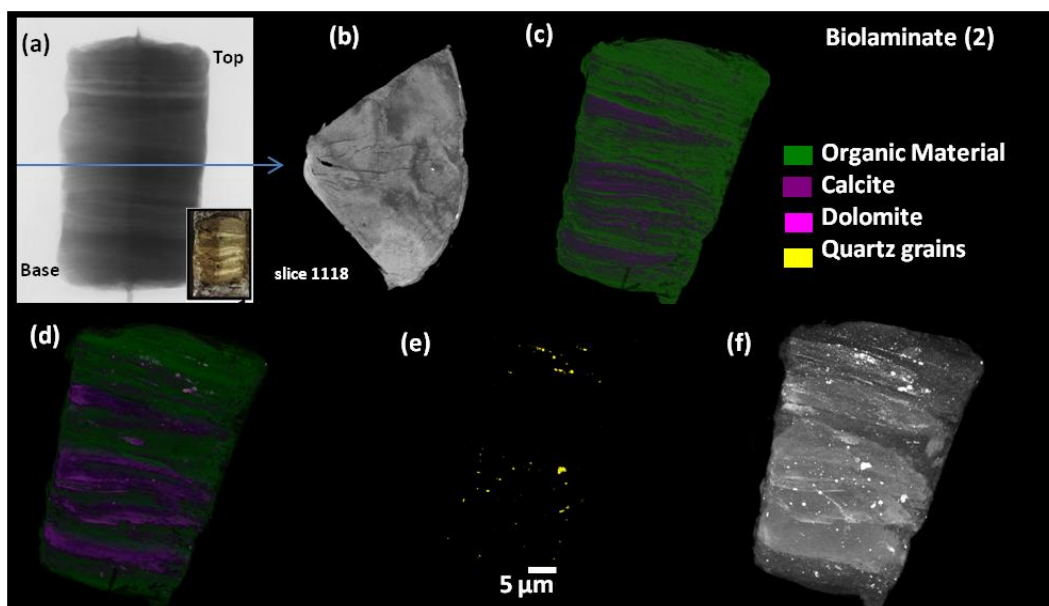


Figure 6. Sample 2 - Biolaminate; (a) Projection of the sample ; (b) slice number 1118, (c)/(d) 3D model shows carbonate matrix and (e)/(f) 3D model, emphasizing the quartz grains.

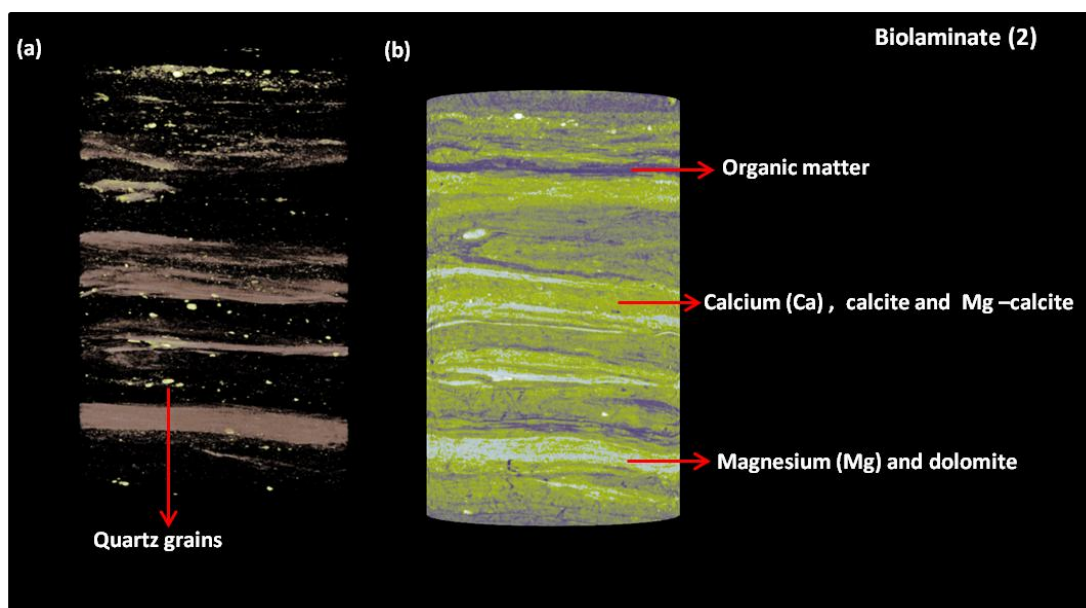


Figure 7. Sample 2 - Biolaminate; (a) 3D model, emphasizing the quartz grains and (b) 3D model shows the compositional differences in the structure.

Regarding sample 3 analysis was checked a diffuse mass of higher density carbonate material (dolomite) in the biscuit stromatolite. This possibly occurs as a byproduct of dolomitisation associated with a distinct colony of cyanobacteria and was measured with 0.97% (Figure 8).

MicroCT results in the sample 4 (organic matter) showed a lamination identified by the concentration of carbonate grains (0.74%) inside the organic matter (microbial mat) as brighter lines in Figure 9. Analyses also showed ostracods, quantified 0.39%, that are trapped in the microbial mats, some

occurring with closed valves (intact) and some fragmented valves, due to transported by traction / suspension at low energy. This ostracods are given in Figure 10.

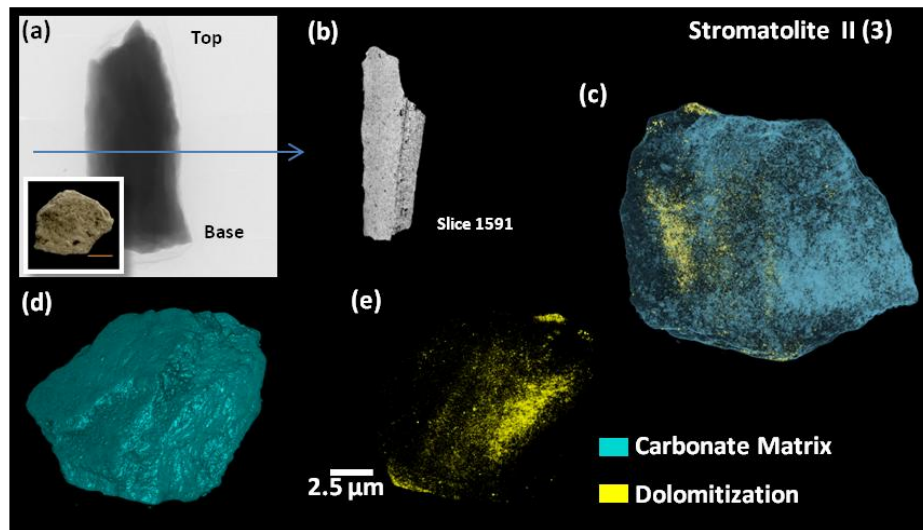


Figure 8. Sample 3 - Biscuit Stromatolite II; (a) Projection of the sample ; (b) slice number 1118, (c)/(d) 3D model shows carbonate matrix and (f) 3d model, emphasizing the dolomitization .

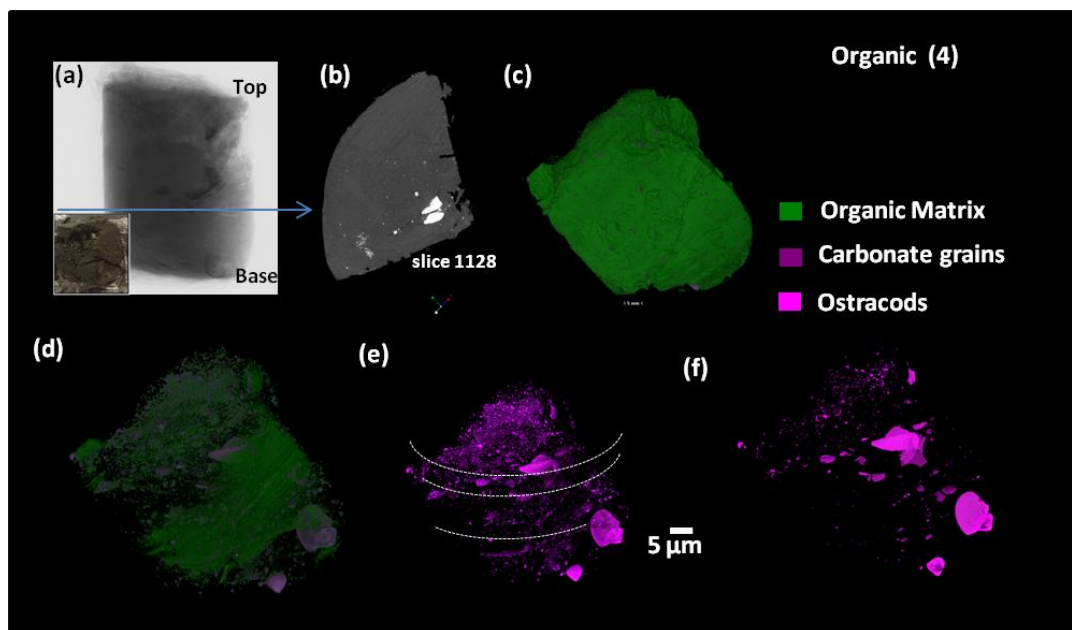


Figure 9. Sample 4 - Organic Matter; (a) Projection of the sample ; (b) slice number 1128, (c)/(d) 3D model shows carbonate matrix; (e) 3D model stressing carbonate grains and the ostracods and (f) 3D model, highlighting just the ostracods.

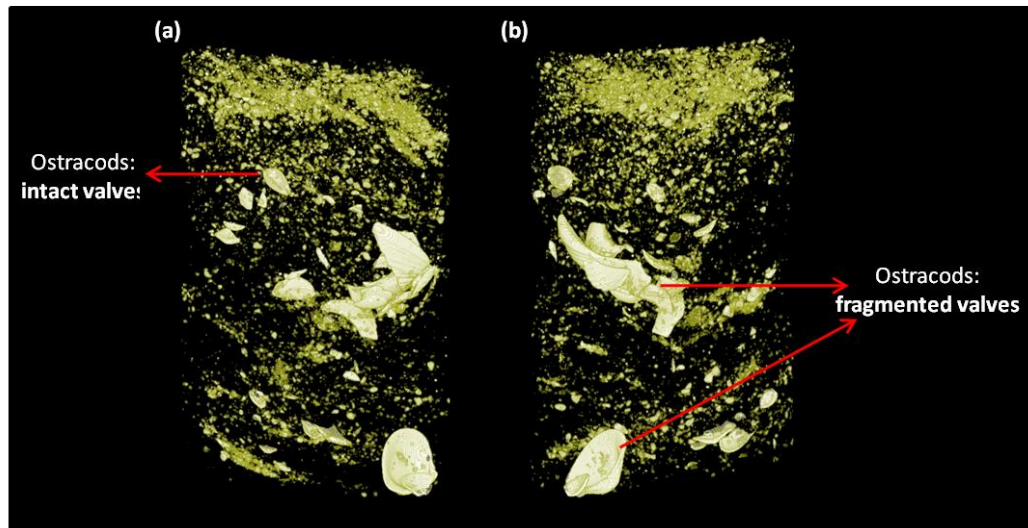


Figure 10. Sample 4 - Organic Matter; (a) ostracods occurring with intact valves and (b) ostracods occurring with fragmented valves.

3.1 Total Porosity and Pore Distribution

Carbonate rocks have complex porosity distribution with great heterogeneity in low distances. The porosity quantification procedure was performed isolating the rock matrix from the porous network. The total porosity and the pore size distribution were the parameters studied. The Table 1 shows a 3D micro-CT total porosity results. Total porosity was evaluated as the volume of all open plus closed pores as a percent of the total VOI volume, both 2D and 3D analyzes were performed over the same selected region for each sample [10].

Table 1. Micro-CT porosity results.

Samples	Pixel size (μm)	Resolution (μm)	3D Total Porosity (%)
Biscuit stromatolite – microfacies I	25	58	11
Biolaminite	23	54	0.40
Biscuit stromatolite – microfacies II	14	32	0.35
Organic Matter	24	56	0.75

Figure 11 shows 2D pore distribution slice by slice for all analyses samples. In this case the porosity parameter was calculated in 2D from individual binarised cross-section images. Observing the graphics, it is possible to verify that sample 1 and 3 show homogeneous porosity distributed throughout the sample, while in samples 2 and 4 the porosity is larger at the base than at the top. According to [11], only sample 1 had classified as regular porosity (range 10% - 15%). The rest of the samples showed negligible porosity (range 0-5%) to hydrocarbon exploration.

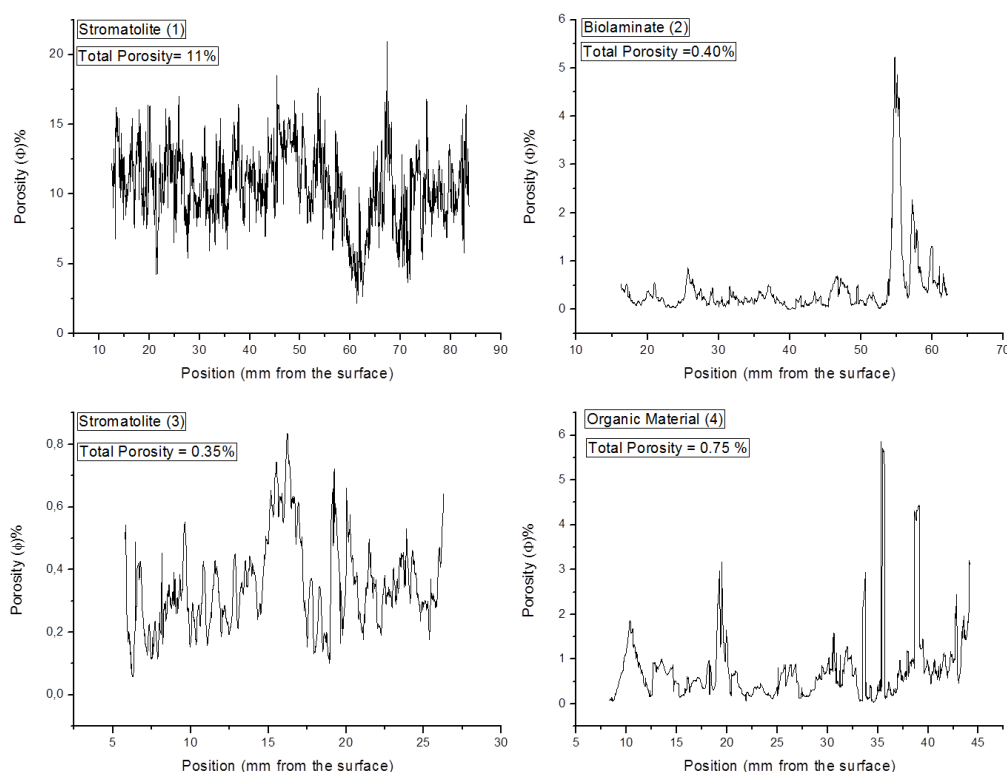


Figure 11: Pore distribution of all analyses samples. (a) Biscuit stromatolite – microfacies I; (b) Biolaminite; (c) Biscuit stromatolites – microfacies II and (d) Organic matter.

4. Conclusions

The results proved that Micro-CT technique was adequate and efficient for the characterization of recent carbonate microbial sediments of microbialite with an advantage of non-destructive approach. It is possible to note an 3D images with high resolutions, which permit distinguish different mineral phases (compositional variations), as well as the identification of bioclasts and sliiclastic components and microstructures.

The total porosity results were satisfactory only for sample 1. At this stage, it is important to mention that the porosity obtained by Micro-CT is total porosity and it is limited by the scanning spatial resolution. Thus, pores with diameters smaller than the spatial resolution used will not be identified and therefore not be quantified. The other samples showed a very low porosity, which would not be relevant to hydrocarbon exploration. One of the advantages of micro-CT technique is the possibility of study pore network in 3D, which provide a foreknowledge of the connectivity of the pores.

However, the Micro-CT show is suitable for studies of carbonate microbialites. Shown to be a technique that should be increasingly present in geological analysis.

5. Acknowledgments

The authors would like to thank Petrobras S.A., CNPq and FAPERJ for the financial supports.

References

- [1] Remeysen, K. and Swennen, R., 2008. Application of Microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations. *Marine and Petroleum Geology* 25, 486-499.
- [2] Landis, E.N. and Keane, D.T., 2010. X-ray Microtomography. *Materials. Characterization* 61, 1305–1316.
- [3] Oliveira, M.S.F., et al., 2012. X-ray microtomography application in pore space reservoir rock. *Applied Radiation and Isotopes* 70, 1376-1978.
- [4] Machado, A.C., Lima, I., Lopes, R.T. 2014. Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks. *Radiation Physics and Chemistry*. v. 95. p. 405-407.
- [5] Arms, C.H., et al., 2005. Pore scale characterization of carbonates using X-ray microtomography, SPE90368-MS, Society of Petroleum Engineers Journal, 146-157.
- [6] Vasconcelos, C., et al., 2006. Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: modern Precambrian relics?. *Sedimentary Geology* 185, 175-183.
- [7] Lima, I., et. al., 2007. Characterization of osteoporotic bone structures by bidimensional images through x-ray microfluorescence with synchrotron radiation. *X-Ray Spectrometry*. v. 37, p. 249-254.
- [8] Feldkamp, L.A., Davis, L.C., Kress, J.C. 1984. *Journal of the Optical Society of America*. 1: 612-619.
- [9] Gonzalez, R.C. & Woods, R.E., 2002. *Digital Image Processing*, 2nd Ed. Prentice Hall, USA.
- [10] User manual for SkyScan CT-Analyser v. 1.10, Belgium; 2013.
- [11] PGT - Petroleum Geoscience Technology. *Petroleum Geology*, available in <http://pt.slideshare.net>