

**Lorena da Fonseca Sampaio**

**ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS POR ATIVIDADES  
MICROBIANAS EM SEDIMENTOS DA LAGOA VERMELHA (REGIÃO  
DOS LAGOS, RJ)**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2014



UFRJ

**Lorena da Fonseca Sampaio**

**ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS POR ATIVIDADES MICROBIANAS  
EM SEDIMENTOS DA LAGOA VERMELHA (REGIÃO DOS LAGOS, RJ)**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador:

Patrick Führ Dal’Bó

Rio de Janeiro

Janeiro de 2014

LORENA, da Fonseca Sampaio

**Estruturas Sedimentares Induzidas por Atividades Microbianas em Sedimentos da Lagoa Vermelha (Região dos Lagos, RJ)** / Lorena da Fonseca Sampaio - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2014.

xiv, 70 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2014.

Orientador: Patrick Führ Dal’Bó

1. Geologia. 2. Paleontologia e Estratigrafia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Patrick, Führ Dal’Bó. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Lorena da Fonseca Sampaio

ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS POR ATIVIDADES MICROBIANAS  
EM SEDIMENTOS DA LAGOA VERMELHA (REGIÃO DOS LAGOS, RJ)

Trabalho Final de Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador:

Patrick Führ Dal'Bó

Aprovada em:

Por:

---

Orientador: Patrick Führ Dal'Bó (UFRJ)

---

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ)

---

Patrick W M Corbett (Heriot-Watt University)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2014

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2014

À minha família, que sempre apoiaram e  
incentivaram minhas escolhas.

## Agradecimentos

Ao professor Dr. Patrick Fürh Dal´Bó (UFRJ) pela orientação, incentivo e confiança, os quais foram essenciais para realização desse trabalho.

Ao professor Dr. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ), pelo ensinamentos e oportunidades, os quais foram muito importantes para a formação do meu conhecimento geológico.

À PETROBRÁS pela bolsa de iniciação científica (convênio PRH-PB 218).

À UFF por realizar a coleta dos testemunhos.

Ao Centro de Pesquisas Schlumberger (BRGC) pela confecção de lâminas delgadas.

Ao graduando em geologia Luciano Dias de Oliveira Pereira pelo apoio e auxílio na descrição dos testemunhos.

À Alessandra Silveira Machado pelas análises de  $\mu$ -CT.



*“O salário do nosso esforço nunca será o fracasso.” - Autor desconhecido.*

## Resumo

SAMPAIO, Lorena. **Estruturas Sedimentares Induzidas por Atividade Microbiana em Sedimentos da Lagoa Vermelha – Sudeste do Brasil**. 2014. xiv, 70 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Lagoa Vermelha é um corpo de água pertencente ao complexo lagunar de Araruama, formada durante a última transgressão da linha de costa (Holoceno), e está localizada na região dos lagos, no estado do Rio de Janeiro. Essa lagoa vem sendo historicamente estudada devido a vasta ocorrência de estromatólitos do tipo biscuit e de esteiras microbianas. Contudo, as estruturas sedimentares formadas por indução microbiana (MISS) nunca foram objeto de estudos. As MISS são estruturas pouco conhecidas e estudadas na literatura geocientífica. O desconhecimento da gênese e morfologia tem impossibilitado seu reconhecimento nos ambientes deposicionais, tendo sido por vezes confundidas com estruturas físicas de deposição ou mesmo com icnofósseis. O objetivo do presente estudo foi realizar a análise e caracterização das MISS que ocorrem em sedimentos nas margens da Lagoa Vermelha, a partir de testemunhos rasos de sondagem, observações de campo, petrografia e microtomografia computadorizada, e com isso conhecer os principais fatores biossedimentológicos envolvidos em sua gênese. Macroscopicamente, foi possível a distinção de onze estruturas relacionadas a atividades microbianas: gretas de dessecação, *mat curls*, *mat chips*, estrutura de nivelamento laminada, estromatólito, wrinkle, estrutura de descolamento, *petees*, biolaminito, nódulo trombolítico e placa carbonática. Em lâmina petrográfica foram caracterizadas as principais feições microbianas, e em micro-CT foram analisadas características morfo-estruturais de algumas amostras. Os resultados permitem a melhor compreensão da relação existente entre esteiras microbianas e a dinâmica física e química do ambiente sedimentar. O reconhecimento dessas estruturas formadas por indução microbiana auxiliam seu reconhecimento no registro geológico e em sucessões continentais e marinhas.

Palavras-chave: MISS; Lagoa Vermelha; Sedimentação Carbonática.

## Abstract

SAMPAIO, Lorena. **Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS) in sediments of Lagoa Vermelha – Southeast of Brazil**. 2014. xiv, 70 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Lagoa Vermelha is a hypersaline body of water which is part of the lagoon complex of Araruama that was formed during the last shoreline transgression (Holocene) and is situated in the Região dos Lagos, in the Rio de Janeiro State. The lagoon has been intensively studied during the last decades by biologists due to a vast occurrence of stromatolites and microbial mats. However, the sedimentary structures formed by microbial induction (MISS) have never been the subject of these studies. MISS studies are scarce in the geoscience literature. The unfamiliarity with the genesis and morphology has made it impossible for recognition in depositional environments, being sometimes confused with physical depositional structures or even trace fossils. The aim of this study is the analysis and characterization of MISS structures that occur in sediments of the Lagoa Vermelha. MISS structures were recognized macroscopically in the field and cores. The main structures comprises dessication cracks, mat curls, mat chips, laminated leveling structure, stromatolites, wrinkle, detachment structure, petees, biolaminite, thrombolytic nodule, and carbonate plates. Major microbial features were also characterized in thin sections, and morpho-structural characteristics of some samples were analyzed by  $\mu$ -CT. The results allow a better understanding of the relationship between microbial mats and physical and chemical processes in the lagoon sedimentary environment. The recognition of these structures formed by microbial induction in modern environments helps their recognition in the geologic record of continental and marine successions.

Key-Words: MISS, Lagoa Vermelha; Carbonate Sedimentation.

## SUMÁRIO

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>vi</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de abreviações e siglas.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Apresentação .....	1
1.2 Objetivo e Justificativa .....	2
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
2.1 Análise Granulométrica.....	6
2.2 Laminação .....	6
2.3 Microtomografia Computadorizada.....	6
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>9</b>
3.1 Contexto Geomicrobiológico .....	9
3.1.1 Biofilmes e Esteiras microbianas.....	9
3.1.2 MISS.....	12
3.2 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	21
3.2.1 Apresentação .....	21
3.2.2 Princípios Físicos.....	21
<b>4 CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>25</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>28</b>
5.1 <b>MISS reconhecidas em atividades de campo.....</b>	<b>29</b>
5.1.1 ESTRUTURAS RESULTANTES DO PROCESSO DE BIOESTABILIZAÇÃO.....	29
5.1.1.1 Gretas de Dessecamento .....	29
5.1.1.2 <i>Mat Curls</i> .....	30
5.1.1.3 <i>Mat Chips</i> .....	32
5.1.2 ESTRUTURAS RESULTANTES DO PROCESSO DE CRESCIMENTO MICROBIAL .....	32
5.1.2.1 Estrutura de Nivelamento Laminada .....	32
5.1.3 ESTRUTURAS RESULTANTES DO METABOLISMO DA ESTEIRA .....	34
5.1.3.1 Estromatólito.....	34
5.1.4 ESTRUTURAS RESULTANTES DA INTERFERÊNCIA DE MAIS DE UMA ATIVIDADE MICROBIAL INTERAGINDO COM A DINÂMICA FÍSICA DOS SEDIMENTOS.....	35
5.1.4.1 <i>Wrinkle</i> .....	35

5.1.4.2	Estrutura de descolamento (Remanescentes Erosivos).....	36
5.1.4.3	Petees.....	37
<b>5.2</b>	<b>MISS reconhecidas em testemunho .....</b>	<b>38</b>
5.2.1	Biolaminitos.....	38
5.2.2	Nódulos trombolíticos.....	40
5.2.3	Estromatólito <i>biscuit</i> .....	43
<b>5.3</b>	<b>Feições microbiais reconhecidas em lâminas petrográficas .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4</b>	<b>Resultado da análise granulométrica .....</b>	<b>48</b>
<b>5.5</b>	<b>Resultado da microtomografia computadorizada .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>.....</b>	<b>1</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> - Foto da vista da margem nordeste da Lagoa Vermelha com algumas estruturas expostas. .	4
<b>Figura 2</b> - Foto aérea com a localização dos pontos de coleta dos testemunhos (Fonte IBGE 2005). ...	5
<b>Figura 3</b> - Esquema mostrando aquisição, reconstrução e visualização de uma amostra de biolaminito testemunho LV-03 da Lagoa Vermelha. ....	8
<b>Figura 4</b> - Lâminas petrográficas evidenciando as tramas de uma esteira microbiana endobêntica (foto superior) e epibêntica (foto inferior). Escala: 1mm. (Nofke, 2010). ....	10
<b>Figura 5</b> - Diagrama de classificação das MISS (modificado de Nofke, 2010). ....	13
<b>Figura 6</b> – Intercalações de lâminas claras (com CaCO <sub>3</sub> ) e escuras (de matéria orgânica) constituindo um biolaminito (Schieber <i>et al.</i> , 2007). ....	14
<b>Figura 7</b> - Ilustração demonstrando o processo de formação da estrutura de nivelamento laminada (Nofke, 2010). ....	15
<b>Figura 8</b> - Processo de formação de <i>mat chips</i> (Nofke, 2010). ....	17
<b>Figura 9</b> – Exemplo de estrutura wrinkle retirado de Schieber <i>et al.</i> (2007). ....	18
<b>Figura 10</b> – Esteiras microbianas exibindo estruturas convolutas devido a rápida expansão lateral (Schieber <i>et al.</i> , 2007). ....	20
<b>Figura 11</b> - Princípio da formação da imagem tomográfica (Andreucci, 2003). ....	22
<b>Figura 12</b> - Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra (Andreucci, 2003). ....	23
<b>Figura 13</b> - Representação do feixe cônico (Forsberg, 2008). ....	23
<b>Figura 14</b> - Mapa de localização da área de estudo. A lagoa está localizada entre os municípios de Araruama e Siquemema, no Estado do Rio de Janeiro (Google Earth, acessado em novembro de 2013). ....	25
<b>Figura 15</b> - Seção transversal esquemática representando os dois conjuntos de lagoas formadas no Quaternário pelas oscilações do nível do mar. Modificada de Coe Neto (1984). ....	27
<b>Figura 16</b> - Gretas de dessecação observadas na Lagoa Vermelha. ....	30
<b>Figura 17</b> - <i>Mat curls</i> observadas na Lagoa Vermelha. ....	31
<b>Figura 18</b> - <i>Mat chips</i> observadas na Lagoa Vermelha. ....	32
<b>Figura 19</b> - Estrutura de nivelamento laminada observada na Lagoa Vermelha. ....	33
<b>Figura 20</b> - Amostras de estromatólitos da Lagoa Vermelha. ....	34
<b>Figura 21</b> - <i>Wrinkles</i> observadas na Lagoa Vermelha. ....	36
<b>Figura 22</b> - Estrutura de descolamento laminada observada na Lagoa Vermelha. ....	37
<b>Figura 23</b> - <i>Petees</i> observados na Lagoa Vermelha. ....	38
<b>Figura 24</b> - Biolaminitos observados no testemunho LV-02. ....	39
<b>Figura 25</b> - Biolaminitos observados em lâmina petrográfica. Intercalação de esteiras e carbonato peloidal. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200 µm. ....	40
<b>Figura 26</b> - Nódulo trombolítico observado no testemunho LV-02. ....	41
<b>Figura 27</b> - Lâmina petrográfica correspondente ao intervalo de nódulo trombolítico do testemunho LV-02. Observa-se uma textura grumosa constituída por material orgânico cimentado por micrita. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200 µm. ....	42
<b>Figura 28</b> - Exemplo de estromatólito <i>biscuit</i> observado em testemunho (LV-05). ....	43
<b>Figura 29</b> - Laminações orgânicas desenvolvidas sobre carbonato grumoso. Escala: 100 µm (Lâmina LV-10-95cm). ....	44

<b>Figura 30</b> - Lâmina petrográfica correspondente ao intervalo de biolaminito do testemunho LV-01. Observa-se grão de quartzo aprisionado por esteira microbiana. Foto superior: nicóis paralelos; foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200 $\mu\text{m}$ . ....	45
<b>Figura 31</b> - Fotomicrografia correspondente a lâmina LV-10-95, demonstrando grãos trapezados, aprisionados e orientados. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala 500 $\mu\text{m}$ . ....	46
<b>Figura 32</b> - Laminações orgânicas fosfatizadas. Escala: 100 $\mu\text{m}$ . ....	47
<b>Figura 33</b> - Biválvio micritizado por ação microbiana. Escala: 500 $\mu\text{m}$ . ....	48
<b>Figura 34</b> - Intervalo do testemunho LV-02 onde foi realizada a análise granulométrica.....	49
<b>Figura 35</b> - Distribuição granulométrica por classes verificada em amostra do intervalo compreendido entre 91-99 cm de profundidade do testemunho LV-02. ....	49
<b>Figura 36</b> - Intervalo do testemunho LV-06 onde foi realizada a análise granulométrica.....	50
<b>Figura 37</b> - Distribuição granulométrica por classes verificada em amostra do intervalo compreendido entre 74-90 cm de profundidade do testemunho LV-06.. ....	50
<b>Figura 38</b> - Localização das amostras coletadas para realização das análises de $\mu\text{-CT}$ . ....	52
<b>Figura 39</b> - Fotografias das amostras analisadas. ....	52
<b>Figura 40</b> - Visualização em $\mu\text{-CT}$ 3D de todas as amostras analisadas. (I) Estromatólito, (II) Biolaminito (III) Estromatólito Biscuit e (IV) Matéria Orgânica.....	54
<b>Figura 41</b> - Imagens de gretas de dessecação retiradas de Schieber et al. (2007) .....	56
<b>Figura 42</b> - Exemplos comparativos às mat curls retiradas de Schieber et al. (2007) (A e B) e Avalone (2013) (C). ....	57
<b>Figura 43</b> - Exemplos comparativo de mat chips descritas por Nofke (2010). Escala: 5 cm.....	58
<b>Figura 44</b> - Ilustração demonstrando o processo de formação dos estromatólitos de borda convoluta da Lagoa Vermelha (Black, 1933). ....	59
<b>Figura 45</b> - A - Estrutura de descolamento atual descrita por Parada et al. (2007); B - Remanescentes erosivos descrito Bottjer e Hagadorn (2007) no Grupo Elk Mound (Cambriano); Wisconsin, USA.....	60
<b>Figura 46</b> - Biolaminito crenulado (a) e liso (b) descrito por Terra et al. (2000) (Formação Barra Velha – seção pré-sal da Bacia de Santos) comparados com os biolaminitos crenulado e liso do testemunho LV-01 da Lagoa Vermelha.....	61

## Lista de abreviações e siglas

*MISS* – Microbially Induced Sedimentary Structure

EPS – Extrapolymeric Substance

$\mu$ -CT – Microtomografia computadorizada

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O principal foco dos estudos que envolvem estruturas microbianas é relacionado à formação de carbonato com origem microbial (Riding, 2000). Nesse cenário, os estromatólitos são tidos como as feições carbonáticas mais conhecidas resultantes dos processos de interação entre micro-organismos e o meio ambiente. Entretanto, outras estruturas menos conhecidas provenientes dessa interação, as *MISS* (*Microbially Induced Sedimentary Structures*), também vêm sendo reconhecidas tanto no registro geológico quanto nos ambientes deposicionais atuais (*e.g.*, Gerdes *et al.*, 1985; Schieber, 1998; Eriksson *et al.*, 2000; Nofke *et al.* 2002, Nofke *et al.*, 2003).

*MISS* são estruturas sedimentares primárias formadas a partir da interação de biofilmes e esteiras microbianas com a dinâmica sedimentar física e química (Nofke *et al.*, 2003). Biofilmes constituem o estágio inicial de formação de uma esteira microbiana, desenvolvendo-se a partir de micro-organismos (principalmente cianobactérias) colonizando um substrato sedimentar. A esteira é uma camada orgânica com organização trófica interna de micro-organismos, que responde imediatamente às mudanças ambientais (como luz, disponibilidade de nutrientes, temperatura, etc.) e à influência dos processos sedimentares (Nofke, 2010).

As *MISS* têm sido descritas em uma grande variedade de ambientes, desde planícies de maré, lagunas e plataformas continentais até em áreas de interdunas úmidas (*e.g.*, Nofke, 1996; Nofke *et al.*, 2006a; Avalone, 2013). Apesar de, por vezes, serem descritas como de ocorrência restrita a ambientes siliciclásticos (Nofke, 2010), o conceito de *MISS* utilizado neste trabalho também abrange as estruturas formadas em ambientes cuja sedimentação é controlada por parâmetros químicos, como em sistemas deposicionais carbonáticos ou evaporíticos. As esteiras

aprisionam, ligam e precipitam sedimentos e minerais, que resultam na formação de estruturas sedimentares estratificadas (laminitos microbiais) e estromatólitos (Krumbein, 1983).

## 1.2 Objetivo e Justificativa

Os estudos relacionados as *MISS* são poucos, o que faz com que a literatura geocientífica permaneça carente de pesquisas relacionadas à gênese e morfologia dessas estruturas. Os estudos existentes sobre o tema comprovam cada vez mais que tais estruturas são muito frequentes tanto no registro geológico como nos ambientes deposicionais, porém de reconhecimento dificultado pela falta de conhecimento, podendo ser facilmente confundidas e descritas como outras estruturas sedimentares e até mesmo icnofósseis.

Além da contribuição para a literatura, a relevância dos estudos com *MISS* está no fato de que essas estruturas podem ser descritas em rochas de idades desde o Arqueano (Nofke et al., 2006a), e por isso oferecem a principal evidência para o entendimento da origem da vida no nosso planeta (Nofke, 2006), podendo também ser esperadas em estudos relacionados à vida extraterrestre (Nofke *et al.*, 2003).

Além disso, a caracterização das feições morfoestruturais das *MISS* são muito importantes por servirem de contribuição para o entendimento de rochas carbonáticas microbiais e esteiras microbianas, assunto que tem ganhado importância devido as possíveis analogias com os reservatórios carbonáticos do intervalo Pré-sal das bacias sedimentares brasileiras de margem leste.

A Lagoa Vermelha vem sendo historicamente estudada devido à vasta ocorrência de estromatólitos do tipo *biscuit* e de esteiras microbianas desenvolvidos nas margens e interior

da lagoa. Contudo, as estruturas sedimentares formadas por indução microbiana nunca foram objeto de estudo.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é realizar a análise e caracterização das *MISS* recentes que ocorrem na Lagoa Vermelha, reconhecendo os principais fatores biossedimentológicos envolvidos em sua gênese.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização das *MISS* foram realizadas em duas etapas. A primeira consistiu em atividades de campo, nas quais foram descritas estruturas localizadas na região nordeste da lagoa, tanto em suas margens quanto no interior (Figura 1).



**Figura 1** - Foto da vista da margem nordeste da Lagoa Vermelha com algumas estruturas expostas.

Nesta etapa foram realizadas medições e descrições macroscópicas das estruturas observadas, bem como registro fotográfico e coleta de amostras representativas das principais feições e estruturas microbianas (para análises laboratoriais).

A segunda etapa consistiu na descrição de testemunhos rasos de sondagem, os quais foram coletados e cedidos parcialmente pela Universidade Federal Fluminense (UFF), como parte integrante do material do Projeto Lagoas II (Caracterização estratigráfica, sedimentológica,

geoquímica e de fácies orgânica das lagoas Salgada, Vermelha e Brejo do Espinho) financiado pela PETROBRÁS S.A. As sondagens foram realizadas por vibracores em diferentes pontos do interior da lagoa, onde foram coletados 10 testemunhos totalizando 12,7 metros (Figura 2).



**Figura 2** - Foto aérea com a localização dos pontos de coleta dos testemunhos (Fonte IBGE 2005).

Nos testemunhos, a descrição foi realizada em escala 1:1, e seguiu o método de análise de fácies considerando os seguintes atributos: litologia, textura, estruturas sedimentares, cor e composição biótica. Em seguida foram realizados o registro fotográfico, amostragem para análise granulométrica, confecção de lâminas petrográficas de alguns intervalos de interesse e também análises de  $\mu$ -CT (microtomografia computadorizada) de amostras escolhidas. Por fim, os perfis foram carregados no programa *CORELDRAW*.

A caracterização das *MISS* baseia-se na comparação das feições morfológicas e estruturas observadas, com fotos e descrições de estruturas descritas na literatura.

## 2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Geologia Sedimentar do Departamento de Geologia da UFRJ. Foram utilizados dois intervalos arenosos dos testemunhos LV-02 e LV-06, por meio do método convencional de peneiramento (peneiras  $-1\phi$ ,  $0\phi$ ,  $1\phi$ ,  $2\phi$ ,  $3\phi$ ,  $4\phi$ ). Foram retirados os fragmentos de conchas para realização das análises; porém determinou-se percentualmente sua participação.

## 2.2 Laminação

A confecção das lâminas foi feita pela *Schlumberger (BRGC-SLB)* e se deu a partir da amostragem de alguns intervalos de interesse nos testemunhos.

As lâminas delgadas foram descritas com o uso de microscópio (Zeiss Axioimager AZm) por luz transmitida/polarizada, tendo como foco a descrição de feições microbianas e a confirmação/complementação das feições descritas em macroescala.

## 2.3 Microtomografia Computadorizada

As análises de  $\mu$ -CT foram realizadas no laboratório de petrofísica do Departamento de Geologia da UFRJ.

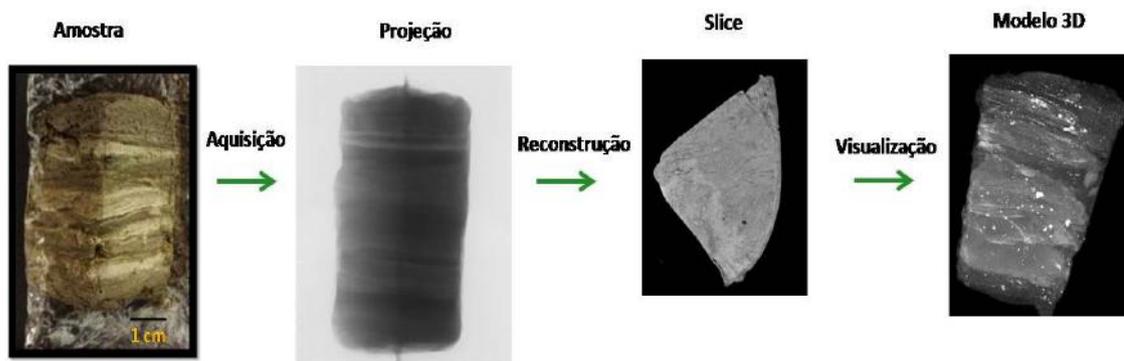
As imagens de  $\mu$ -CT foram obtidas em um sistema de microtomografia de alta energia - Skyscan / Bruker, modelo 1173 HE. As amostras foram colocadas num suporte de

poliestireno para a aquisição dos dados. O sistema operou em uma faixa de energia e corrente de 60-100 kV e 100-133 Å, respectivamente. De forma a reduzir a contribuição de fótons de baixa energia do feixe (efeito de endurecimento), foi usado uma combinação de dois filtros: cobre (0,10 mm de espessura) e de alumínio (1,0 mm de espessura). Os tamanhos de pixel foram 14 µm, 22 µm, 24 µm e 25 µm. Um detector de tela plana (2240x 2240) foi utilizado para registrar a transmissão do feixe de raios X. Foram obtidas projeções de 360 ° em passos de 0,30° de rotação.

O efeito de endurecimento de feixe ocorre devido à natureza policromática do feixe de raios X, uma vez que os fótons apresentam diferenças na sua atenuação em diferentes regiões da amostra, principalmente nas bordas, ao se comparar com o centro da amostra, o que gera bordas na imagem das amostras como com composição falsa de alta densidade.

A reconstrução, por sua vez, foi feita utilizando o software (NRecon®) da própria fabricante do sistema. No software de reconstrução alguns parâmetros podem ser inseridos para melhorar o resultado da imagem final antes do uso da mesma para quantificação e visualização. A figura 3 apresenta um esquema mostrando aquisição, reconstrução e visualização de uma das amostras. Posterior a reconstrução foram feitas as análises quantitativas para porosidade total das amostras, para isso foi empregado o software CTAn®. Para a quantificação de uma imagem de µCT-3D primeiramente se deve aplicar o processo de segmentação, que diferencia a região de interesse (ROI) do fundo da imagem. Nesse caso, o interesse está em identificar regiões que correspondem aos poros da amostra. Logo, deve-se escolher um valor de threshold (TH) que separe os dois objetos contidos no ROI. Não existe nenhum método padrão para determinar o valor do TH. Neste trabalho foi utilizado um TH global para um intervalo de 0 a 255. O TH global é o tipo mais simples e é aplicável a maioria das µ-CT's. Dessa forma, foi possível separar os poros (brancos) da matriz da rocha (preto),

permitindo assim a quantificação da porosidade. Para os modelos 3D o software utilizado foi o CTVox®.



**Figura 3** - Esquema mostrando aquisição, reconstrução e visualização de uma amostra de biolaminado testemunho LV-03 da Lagoa Vermelha.

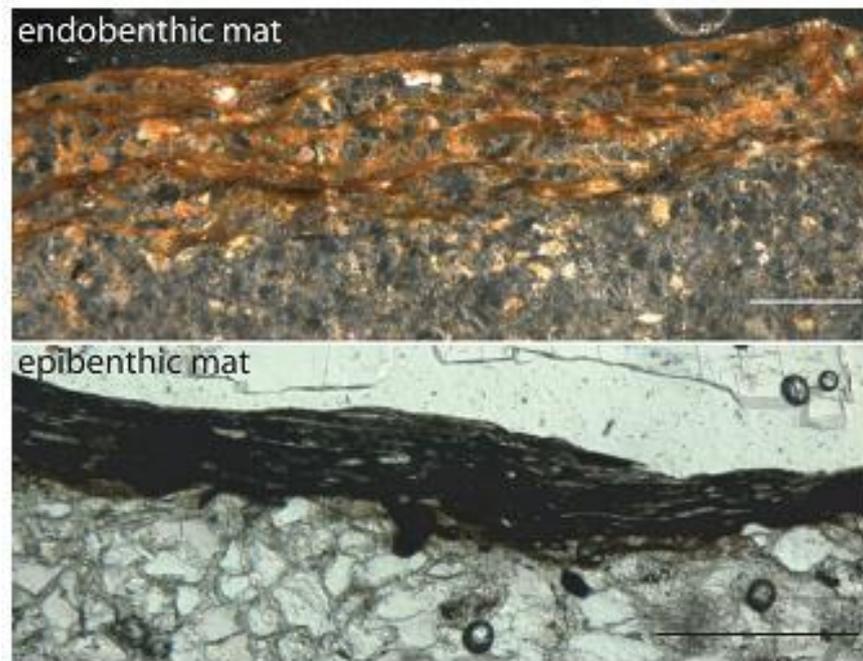
### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Contexto Geomicrobiológico

##### 3.1.1 Biofilmes e Esteiras microbianas

Biofilmes e esteiras microbianas são comunidades de micro-organismos, principalmente constituídas por procariontes, que colonizam superfícies e interagem com o meio ambiente (Stolz, 2000).

Os principais micro-organismos que formam os biofilmes são as bactérias. Elas podem ser aeróbicas fototróficas, utilizando a luz do sol como fonte de energia, ou anaeróbicas heterotróficas, cuja fonte de energia advém da decomposição de material orgânico em material inorgânico (Riding, 2000). Em relação à disposição dos biofilmes em um substrato sedimentar, as bactérias podem ser endobênticas (dispondo-se entre as partículas sedimentares, dentro de uma camada) ou epibênticas (dispondo-se sobre uma superfície sedimentar), as quais resultam em esteiras endobênticas e epibênticas, respectivamente (Figura 4) (Nofke, 2010).



**Figura 4-** Lâminas petrográficas evidenciando as tramas de uma esteira microbiana endobêntica (foto superior) e epibêntica (foto inferior). Escala: 1mm. (Nofke, 2010).

Os biofilmes são comunidades de micro-organismos aderidos ao substrato sedimentar (O'Toole *et al.*, 2000) que se desenvolvem quando há no ambiente bactérias metabolicamente ativas, ou seja, quando não estão em seu estado vegetativo (Costerton *et al.*, 1995). Bactérias são encontradas em estado metabolicamente ativo quando o ambiente apresenta condições favoráveis para que elas possam realizar os processos necessários a sua sobrevivência. Disponibilidade de nutrientes, luminosidade, temperatura, salinidade e substrato estável, podem ser incluídos nessas condições (Costerton *et al.*, 1995; Nofke, 2010).

As bactérias secretam uma substância extrapolimérica denominada EPS, a qual é responsável por formar uma matriz protetora e adesiva que fixa esses microorganismos ao substrato (Costerton *et al.*, 1978). O EPS pode ocorrer de diversas maneiras, variando de envelopes bem definidos ao redor de células (como no envoltório de cianobactérias) a massas que fixam e fornecem um habitat favorável para populações e comunidades de micro-organismos na escala de biofilmes e esteiras microbianas (Riding, 2000). Isso quer dizer que, durante o

desenvolvimento, os biofilmes passam a constituir microecossistemas nos quais as comunidades de micro-organismos imersas no extrapolímero criam ambientes capazes de garantir a sobrevivência em períodos em que as condições ambientais externas são adversas.

Dentro da estrutura do biofilme os micro-organismos se dispõem de forma a controlar e otimizar a necessidade por nutrientes, quantidade de luz, salinidade e temperatura que passa pelo EPS (Nofke, 2010). Em estágios mais maduros, os biofilmes podem evoluir para estruturas centimétricas denominadas esteiras microbianas, resultado da sucessiva acreção de lâminas orgânicas (Gerdes, 2010).

As esteiras microbianas são estruturas organossedimentares constituídas principalmente por cianobactérias (Abed *et al.*, 2003). As populações de cianobactérias e outros microorganismos se dispõem segundo uma organização trófica dentro da esteira, de modo que as diferentes microcolônias se movem em resposta a luz e gradientes químicos, organizando-se em profundidades distintas de acordo com suas próprias necessidades e características intrínsecas, compondo verdadeiros ecossistemas (Stolz *et al.*, 1989; Stolz, 2000). Tal organização pode ser visualizada macro- e microscopicamente pela notável fotopigmentação das laminações observadas em perfil (Pierson *et al.*, 1987; Van Gemerden, 1993).

As esteiras microbianas constituem sistemas dinâmicos. Elas se desenvolvem, principalmente, em ambientes aquáticos e os fatores ambientais predominantes fazem com que as mesmas adquiram diferentes estruturas e exibam diferentes morfologias. A variedade de fenótipos existentes também é controlada pelo tipo de cianobactéria e/ou outros micro-organismos presentes (Gerdes *et al.*, 2000; Stolz, 2000).

Em biofilmes e esteiras microbianas, a capacidade de movimento dos micro-organismos, principalmente cianobactérias, dentro da bainha de EPS produzido, possibilita a rápida colonização de novas superfícies sedimentares. As cianobactérias, ao se moverem, frequentemente

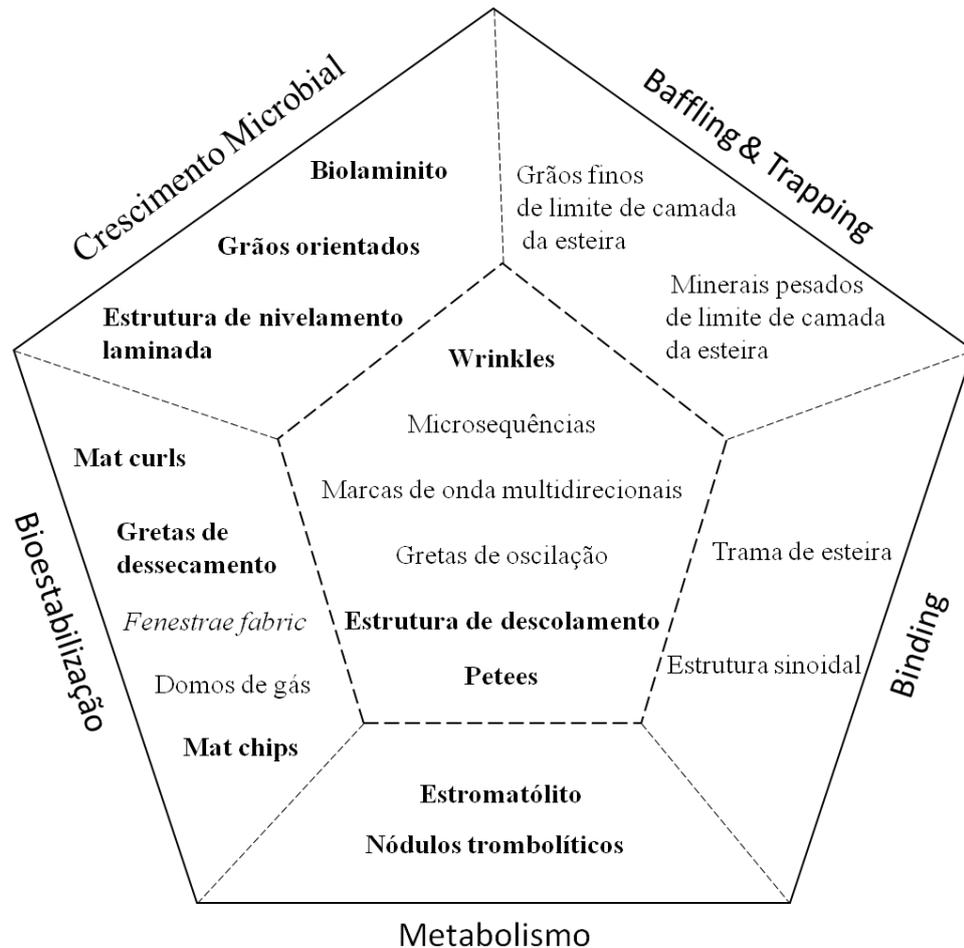
abandonam esse material em que elas se encontram envoltas, deixando-o para trás como um suporte de textura orgânica para os sedimentos por onde passaram. Esse contínuo movimento de cianobactérias pode resultar em estabilização de uma superfície sedimentar, acreção de sedimentos e construção de estruturas organossedimentares, diferenciação biogeoquímica de microambientes na interface sedimento-água, e sucessiva substituição por outra biota (Golubic, *et al*, 2000).

### 3.1.2 MISS

Como já mencionado no capítulo introdutório, *MISS* são estruturas sedimentares primárias formadas a partir da interação entre biofilmes e esteiras microbianas com a dinâmica física e química dos sedimentos.

Essa relação é mais bem compreendida quando conhecidos os processos que dão origem as *MISS*, os quais revelam a complexa interação microorganismos-sedimentos.

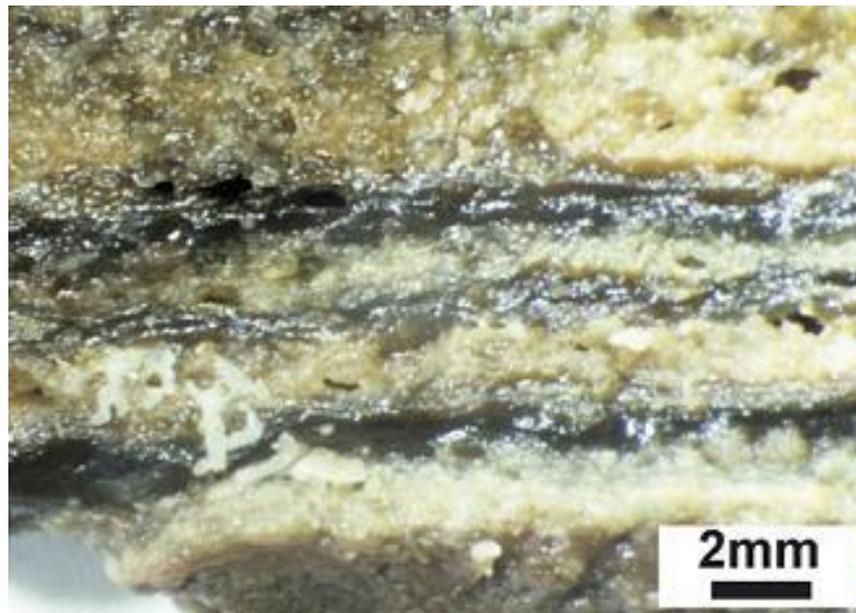
Nofke (2010), classifica as *MISS* em 17 estruturas reconhecidas e que se distribuem em 5 categorias de atividades microbianas: i) estruturas resultantes de crescimento microbial; ii) estruturas resultantes de bioestabilização; iii) estruturas resultantes de *binding*; iv) estruturas resultantes de *baffling* e *trapping*; v) estruturas resultantes da interação de mais de um processo. No presente estudo, estromatólitos também são reconhecidos como *MISS*, e foram inseridos em uma nova categoria de atividade microbial: Estruturas resultantes do metabolismo da esteira (Figura 5).



**Figura 5-** Diagrama de classificação das MISS (modificado de Nofke, 2010).

Ainda de acordo com Nofke (2010), o processo de crescimento microbial está relacionado ao enriquecimento de biomassa por replicação celular e é controlado não somente por parâmetros sedimentológicos, mas também por luminosidade, temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes. Eventos de sedimentação induzem o processo de crescimento por estimular a migração dos organismos formadores das esteiras em direção ascendente à nova superfície sedimentar, buscando luminosidade, e conseqüentemente estabilizando novamente o substrato (Gerdes, 2010). A continuidade desse processo pode formar biolaminitos, estruturas de nivelamento laminadas e grãos orientados.

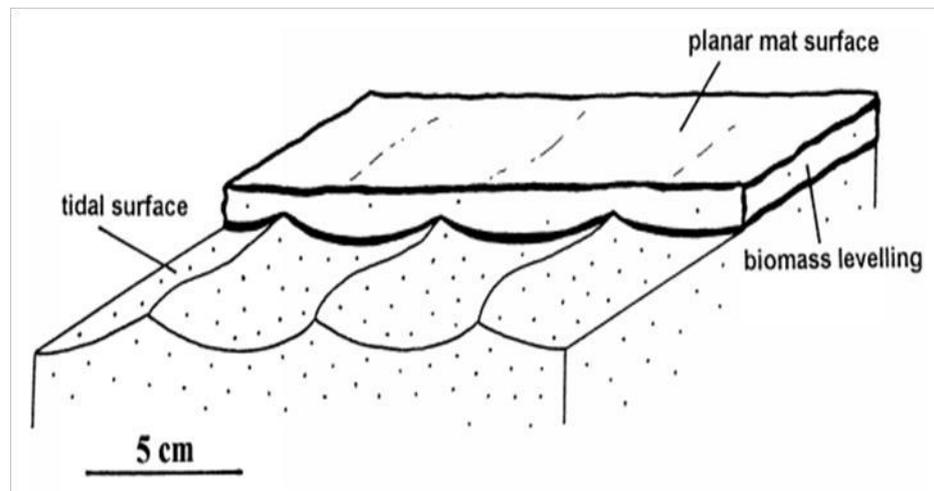
Biolaminitos caracterizam-se pela intercalação de lâminas claras e escuras dentro de uma camada (Figura 6). Eles são influenciados pela sazonalidade, a qual provoca períodos de maior e menor evaporação, alterações em salinidade, profundidade da lâmina d'água e, conseqüentemente, flutuações na intensidade de luz. As lâminas escuras são formadas por abundância de cianobactérias filamentosas, enquanto as lâminas claras são formadas por cianobactérias cocoides, grandes quantidades de EPS e intercalações de minerais autigênicos precipitados. No inverno, as espécies filamentosas se beneficiam com a diminuição da intensidade de luz e aumento da profundidade da lâmina d'água, ultrapassando as cocoides (Schieber *et al.*, 2007; Gerdes, 2010).



**Figura 6** – Intercalações de lâminas claras (com  $\text{CaCO}_3$ ) e escuras (de matéria orgânica) constituindo um biolaminito (Schieber *et al.*, 2007).

Estruturas de nivelamento laminadas são geradas quando uma superfície deposicional é recoberta por esteiras microbianas, fazendo com que qualquer estrutura previamente existente, tais como marcas de ondas, fiquem encobertas por biomassa (Figura 7). O desenvolvimento da esteira e nivelamento da superfície se dá em períodos de não-erosão e baixas taxas de sedimentação, e

produz uma superfície planar, na qual a superfície deposicional original é pouco ou não reconhecível, exceto quando observada em perfil (Nofke *et al.*, 2003).



**Figura 7** - Ilustração demonstrando o processo de formação da estrutura de nivelamento laminada (Nofke, 2010).

Grãos orientados constituem uma textura microscópica formada por grãos individuais derivados do substrato abaixo da esteira microbiana. O biofilme inicial se desenvolve ao redor dos grãos e com o tempo um envelope orgânico cada vez mais espesso é formado, até o momento em que esses grãos estejam suspensos numa matriz orgânica, sem contato entre si ou com o substrato original (Nofke, 2006). Os grãos podem rotacionar e ficar orientados horizontalmente devido à fricção e carga de pressão existente entre a matriz orgânica e os próprios grãos. Mas orientações preferenciais não precisam, necessariamente, ocorrer, principalmente quando os grãos estão sob empacotamento fechado (Nofke, 2010).

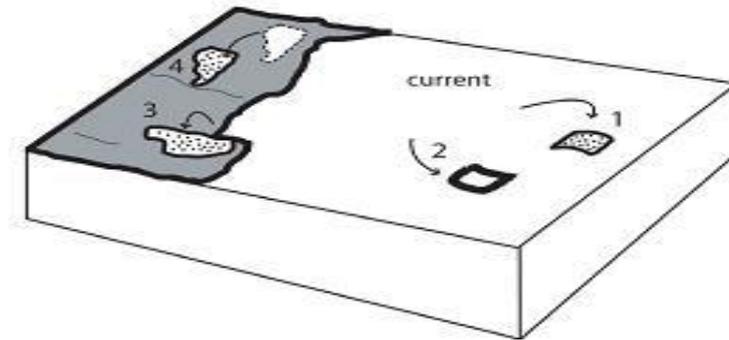
O processo de bioestabilização é considerado a resposta da esteira microbiana ou biofilmes à erosão e também o comportamento flexível – biologicamente controlado – de uma camada de sedimentos que, se não houvesse influência de fatores biológicos, seria rúptil (Nofke, 2010). A

estabilização dos sedimentos é influenciada pela produção de EPS por micro-organismos viventes nos poros e superfícies sedimentares (Paterson e Black, 2000). A bioestabilização de uma camada sedimentar também pode ocasionar a impermeabilização dessa superfície, impossibilitando trocas de gases e fluidos entre sedimentos e a atmosfera (Nofke, 2010). Essa impermeabilização pode gerar diversas estruturas, como por exemplo as *fenestras fabric*, enquanto as camadas com comportamento flexível pode gerar gretas de dessecamento, *mat curls*, *mat chips*, entre outras (Schieber, 2007; Nofke, 2010).

*Fenestras fabric* são estruturas geradas quando uma esteira microbiana, ao impermeabilizar uma superfície sedimentar, impossibilita o escape de gases dos sedimentos subjacentes. Isso faz com que a pressão de gás dentro da camada de sedimentos aumente gerando poros (Nofke, 2010).

Gretas de dessecamento são caracterizadas por esteiras microbianas rachadas em forma de polígonos, que podem ter suas margens dobradas e reviradas, as quais são denominadas *mat curls*. Ocorrem a partir da perda de água de uma esteira microbiana que estabilizava uma superfície sedimentar, a qual ao encolher expõe os sedimentos localizados sob ela (Schieber *et al.*, 2007; Nofke, 2010). As *mat curls* também são frequentemente conhecidas como estruturas *roll ups* ou *flip overs* (Schieber *et al.*, 2007).

As *mat chips* são formadas a partir da erosão física (por ação de ondas, ventos e correntes) de uma camada sedimentar bioestabilizada, a qual tem seus fragmentos transportados e depositados aleatoriamente no ambiente de sedimentação (Figura 8) (Nofke, 2010).



**Figura 8** - Processo de formação de *mat chips* (Nofke, 2010).

Os estromatólitos são depósitos microbiais bênticos laminados, enquanto trombólitos são estruturas que apresentam uma textura grumosa (*clotted*) em macroescala, sem laminação. Tanto os estromatólitos, quanto trombólitos constituem produtos primários de calcificação, aglutinação microbiana e litificação precoce, associados a crescimento sazonal, sedimentação periódica ou ambos. A formação de estruturas calcificadas pode ocorrer por i) degradação de matéria orgânica sob a esteira microbiana por bactérias heterotróficas, as quais criam microambientes propícios a precipitação de carbonato; ii) calcificação de cianobactérias como resultado da criação de gradientes de alcalinidade dentro da bainha de mucilagem (EPS) pela absorção de  $\text{CO}_2$  fotossintético e/ou  $\text{HCO}_3^-$ ; iii) atração de íons de cálcio por regiões negativamente carregadas dentro da bainha de EPS. Tais processos são muito importantes na litificação de esteiras microbianas, pela precipitação de grãos muito finos, de tamanho micrita ou pouco maiores (Riding, 2000).

O processo de *binding* está relacionado à formação de uma trama dentro da esteira pelo ativo movimento das cianobactérias, que aglutinam partículas sedimentares. Esses microorganismos se comunicam e se arranjam como uma rede orgânica, no qual o único controle são os parâmetros sedimentológicos do ambiente (Gerdes, 2010; Nofke, 2010).

*Baffling* e *trapping* correspondem a resposta dos micro-organismos à deposição de partículas sedimentares. Os sedimentos suspensos no meio aquoso podem ser aprisionados por filamentos de cianobactérias orientados verticalmente – que buscam condições ótimas de luminosidade - ou podem ser aprisionados ao se depositarem por gravidade devido às baixas condições de energia do meio. Essa atividade microbial está relacionada ao aprisionamento de partículas sedimentares devido à propriedade “pegajosa” do EPS (Gerdes, 2010; Nofke, 2010).

Estruturas como remanescentes erosivos e *wrinkles* são formadas pela interferência de mais de um dos processos aqui descritos interagindo com a dinâmica física do ambiente de sedimentação.

*Wrinkles* são estruturas formadas por deformação devido a forças gravitacionais e trativas atuando sobre uma esteira fina e flexível, a qual adquire um padrão poligonal e uma morfologia enrugada ou plissada (Figura 9) (Schieber *et al.*, 2007).



**Figura 9** – Exemplo de estrutura wrinkle retirado de Schieber *et al.* (2007).

Remanescentes erosivos formam-se a partir dos processos de crescimento e *binding* nivelando uma superfície sedimentar e dos processos de *baffling* e *trapping* de grãos minerais, que contribuem para o espessamento da esteira pela incorporação de sedimentos. Quando a energia proveniente dos processos erosivos supera a capacidade de bioestabilização da esteira microbiana, partes dela são removidas, formando bolsões erodidos (Nofke, 2010). Além disso, a erosão das camadas orgânicas por processos físicos pode ser facilitada pelo aumento da pressão de infiltração em sedimentos confinados sob a esteira microbiana. Esse aumento resulta na atenuação da sua propriedade adesiva e também da sua capacidade de bioestabilizar a superfície, fazendo com que a esteira se descole do substrato e seja mais facilmente erodida (Schieber *et al.*, 2007). No registro geológico é comum a observação de tais feições, mas a associação com fatores biológicos é muito pouco frequente.

O aumento na pressão de infiltração em sedimentos confinados sob a esteira também pode resultar em estruturas denominadas *petees*. Tais estruturas são interpretadas como resultado de pressão de gás subsuperficial produzido por processos metabólicos de micro-organismos ou por decaimento pós-deposicional de esteiras soterradas. A pressão de gás faz com que as esteiras formem domos e dobras (Schieber *et al.*, 2007). Essas estruturas também podem ter sua gênese relacionada a episódios de inundação, os quais resultam no ativo crescimento da camada de esteira e em sua rápida expansão lateral. Se o espaço disponível para o crescimento for limitado, a esteira cresce formando estruturas domais e convolutas sobre as outras porções da esteira (Figura 10) (Eriksson *et al.*, 2010).



**Figura 10** – Esteiras microbianas exibindo estruturas convolutas devido a rápida expansão lateral (Schieber *et al.*, 2007).

A distribuição das *MISS* no registro geológico é função das condições ecológicas existentes para sua formação no ambiente de sedimentação e das condições que propiciam sua preservação por eventos sin- e pós-deposicionais (Nofke, 2010).

## 3.2 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

### 3.2.1 Apresentação

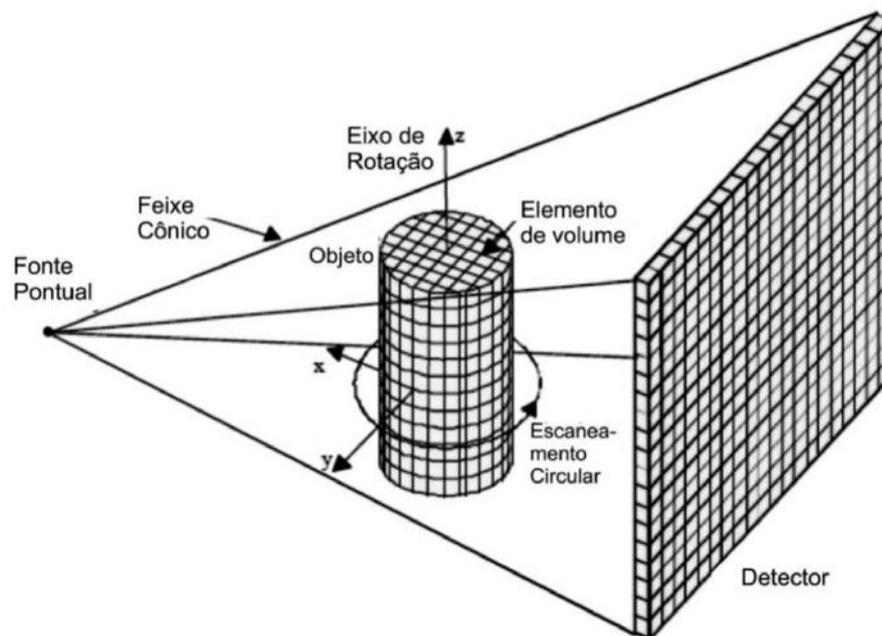
A técnica de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X ( $\mu$ -CT) é uma ferramenta utilizada para caracterização dos espaços porosos e visualização da estrutura de poros e fraturas em rochas, e a cada dia está mais presente nas análises petrofísicas. Está é uma técnica não-invasiva, que permite a visualização de estruturas internas 2D/3D de um objeto, e este não precisa ser submetido a um método de preparação, tais como impregnação, desbaste ou polimento (Remeysen e Swennen, 2008), o que é uma vantagem. A  $\mu$ -CT vem sendo, sobretudo, desenvolvida para inspeções de pequenas estruturas. Esta técnica tem o mesmo princípio da tomografia computadorizada, no entanto algumas adaptações foram feitas para permitir uma melhora na resolução. Atualmente são desenvolvidos equipamentos de tomografia com vários tamanhos de foco. Os microtomógrafos correspondem a um tamanho de foco de 100 a  $1\mu\text{m}$  (Umbaugh, 2005). O pequeno diâmetro do foco do tubo de raios x é uma característica muito importante, pois quanto menor for esse parâmetro, melhor se dará a focalização das estruturas inspecionadas. Junto ao tamanho focal, temos os detectores de raios X no formato de painéis e matriz de fotodiodos, com tamanho cada vez mais reduzido.

### 3.2.2 Princípios Físicos

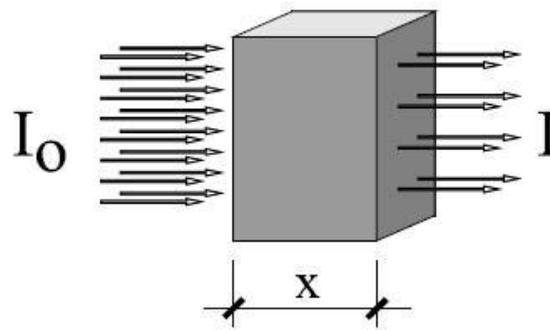
Os princípios físicos da  $\mu$ -CT baseiam-se na atenuação da radiação X pela matéria. O resultado da imagem da seção do objeto é um mapa quantitativo do coeficiente de atenuação linear, de cada ponto do plano. Este coeficiente caracteriza a razão local da interação dos raios X durante o escaneamento, tanto por espalhamento quanto por absorção, da radiação

incidente. Uma propriedade particularmente importante do coeficiente total de atenuação é de ser proporcional a densidade do material, que é uma propriedade física fundamental dos materiais. Este coeficiente carrega, também, uma dependência energética que é função da composição do material (Lima, 2002).

Para que se possa obter a imagem de uma seção do objeto é necessário que se obtenham várias projeções, em passos angulares constantes. Na microtomografia industrial, em geral, é o corpo de prova que se movimenta, e não a fonte e o detector que são fixos, como mostrado na figura 11, onde o objeto é rotacionado no eixo z formando a imagem no detector. Assim, quando um feixe de raios x com intensidade  $I_0$  atravessa um objeto com espessura  $x$ , conforme a figura 12, atenua a intensidade de radiação  $I$  após a transmissão do feixe.

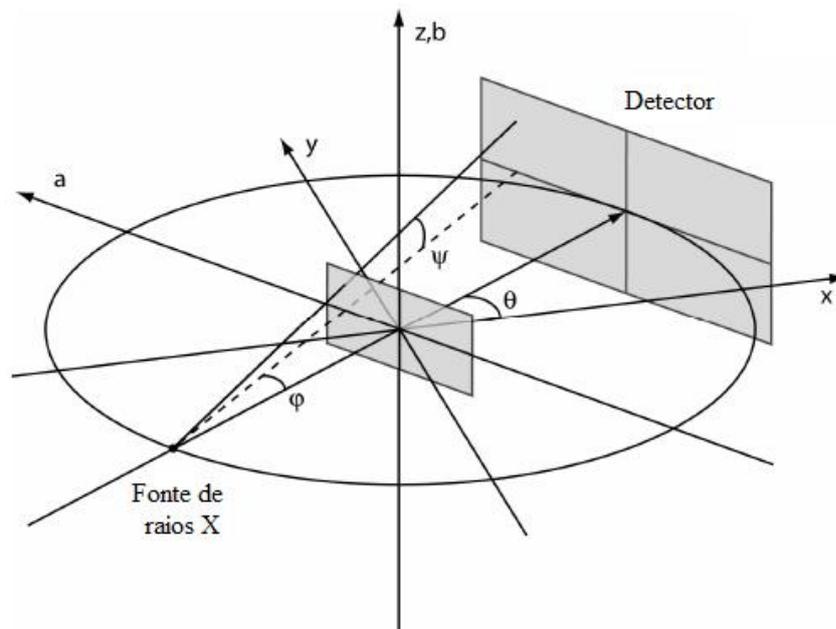


**Figura 11** - Princípio da formação da imagem tomográfica (Andreucci, 2003).



**Figura 12** - Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra (Andreucci, 2003).

O feixe do tubo de raios x do microtomógrafo é o feixe cônico (Figura 13). Sua vantagem é que ele permite a reconstrução de um espaço 3D diretamente através dos dados de projeção 2D, sem a necessidade de reconstruir cada fatia até a formação do volume. Para reconstruir o volume tridimensional, é necessário o uso de um algoritmo, sendo o de Feldkamp o mais utilizado (Feldkamp, 1984).



**Figura 13** - Representação do feixe cônico (Forsberg, 2008).

Uma vez já reconstruída, a imagem é mostrada em forma de uma matriz digital  $N \times M$  "pixels", onde  $N$  representa o número de "pixels" existentes na vertical e  $M$  os da horizontal. Para cada valor do "pixel" designa-se um valor de cinza que é proporcional a  $\mu(x,y)$ , ponto a ponto. Assim, tem-se que a região mais densa aparece mais clara e conseqüentemente a região menos densa aparece mais escura. Dos 256 níveis de cinza (o máximo para tais), a escala é realizada da seguinte forma: 0 para o preto e 255 para o branco e, os valores que são intermediários a estes equivalem aos níveis de cinza propriamente dito (Lima, 2002).

#### 4 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Lagoa Vermelha está localizada no norte do estado do Rio de Janeiro, na região conhecida como Região dos Lagos, entre os municípios de Araruama e Saquarema, compreendida entre as coordenadas geográficas  $-22^{\circ} 55' 44.36''$  e  $-42^{\circ} 23' 29.25''$  (Figura 14).



**Figura 14-** Mapa de localização da área de estudo. A lagoa está localizada entre os municípios de Araruama e Saquarema, no Estado do Rio de Janeiro (Google Earth, acessado em novembro de 2013).

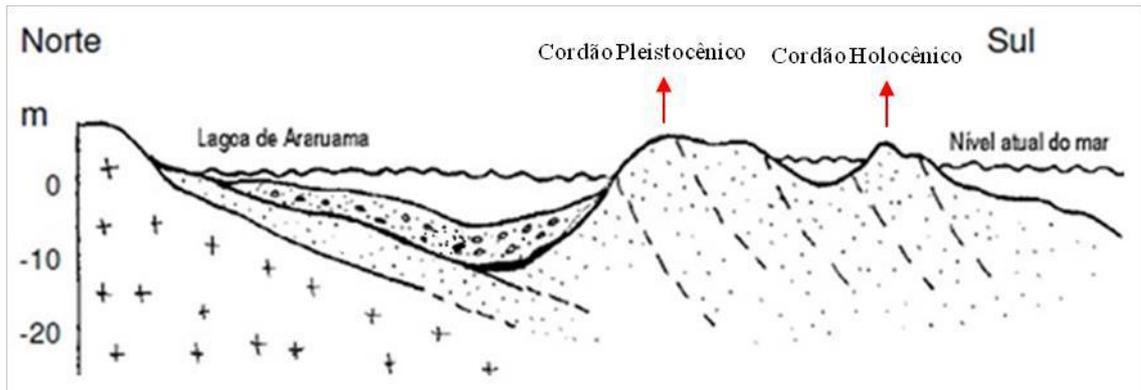
Essa região compreende rochas gnaisse-graníticas pré-cambrianas cobertas por sedimentos cenozoicos (Penha, 1999). Oscilações relativas do nível do mar durante o Cenozoico têm sido estudadas em alguns setores da costa brasileira por diversos autores e são

muito importantes por definirem a distribuição dos depósitos sedimentares litorâneos que influenciam diretamente na geomorfologia das regiões costeiras.

Tais flutuações do nível relativo do mar, associadas a modificações climáticas no decorrer do Quaternário, desempenharam um papel fundamental na formação dos sistemas lagunares e das planícies sedimentares do litoral brasileiro (Suguio, 1985).

A Lagoa Vermelha está inserida num sistema de lagunas formado nesse contexto. Tal sistema constitui-se de duas sequências de lagunas isoladas por dois cordões arenosos, os quais são tidos como característica notável do litoral do estado do Rio de Janeiro. O mais interno pode ser representado pelas lagoas de Jacarepaguá, Rodrigo de Freitas, Maricá, Araruama, etc; enquanto o mais externo pode ser representado pelas lagoas Marapendi, Vermelha, Pernambuco, Brejo do Espinho, etc (Turcq *et al.*, 1999).

Essas flutuações do nível do mar evoluíram a partir de uma transgressão no Pleistoceno, responsável pela estabilização de um conjunto de ilhas barreiras que isolou a primeira série de lagoas do mar. Com a posterior regressão normal, a lagoa formada por isolamento foi sendo dessecada e redes de drenagem erodiram parte do cordão arenoso formado. Em um segundo episódio transgressivo, no Holoceno, novas ilhas barreiras se desenvolveram em porções mais externas – mais distantes do continente em relação as primeiras – e os depósitos previamente depositados pela paleolagoa pleistocênica foi invadido pelo mar. No evento regressivo que se sucedeu, esses dois conjuntos de ilhas barreiras passaram a constituir cordões arenosos, delimitando os dois conjuntos de lagoas (Turcq *et al.*, 1999). As lagoas localizadas nas porções internas são maiores, enquanto as mais externas possuem menores dimensões (Figura 15).



**Figura 15** - Seção transversal esquemática representando os dois conjuntos de lagoas formadas no Quaternário pelas oscilações do nível do mar. Modificada de Coe Neto (1984).

Desse modo, a Lagoa Vermelha foi formada no Holoceno e constitui uma laguna hipersalina pequena e rasa (<2m). Apresenta sedimentação orgânica (esteiras microbianas) associada à sedimentação carbonática, que inclui a formação de microbialitos (estromatólitos).

A Lagoa Vermelha é tida como uma área de grande importância nacional no que diz respeito a formação de microbialitos. É conhecida nacional e internacionalmente por estudos relacionados principalmente a ocorrência de estromatólitos (Spadafora *et al.*, 2010), desenvolvimento de cianobactérias e esteiras microbianas (Vasconcelos *et al.*, 2006; Silva e Silva *et al.*, 2007c), e processos de precipitação de dolomita (Vasconcelos *et al.*, 1995).

As condições de hipersalinidade e a sedimentação carbonática observada nessa lagoa é consequência do seu isolamento durante o Holoceno e do microclima árido existente na região, que ocorre devido ao fenômeno de ressurgência marinha da região de Cabo Frio, do regime de ventos e da pluviosidade anual e média de evaporação nessa área, que é de aproximadamente 830 mm e 1400 mm, respectivamente (Barbière e Coe Neto, 1999).

## 5 RESULTADOS

Foram caracterizadas macroscopicamente 11 estruturas sedimentares induzidas por atividade microbiana na Lagoa Vermelha, sendo 8 reconhecidas em afloramentos e 3 em testemunhos.

Em campo, a associação das morfologias observadas foi possível pelo frequente reconhecimento de esteiras microbianas como parte integrante da estrutura, sendo clara a influência de agentes microbiais. Onde as esteiras não estavam nitidamente presentes, as descrições e fotos fornecidas pela literatura foram decisivas na diagnose.

Na etapa de testemunho, seguindo o mesmo processo e raciocínio da atividade de campo, foram caracterizadas estruturas nas quais assinaturas microbiais foram possíveis de serem reconhecidas. Tais assinaturas foram confirmadas com auxílio de lâminas petrográficas.

Além da análise e confirmação das estruturas em testemunho, as lâminas petrográficas também foram utilizadas para o reconhecimento de outras feições microbiais microscópicas, que, dessa vez, não foram relacionadas a nenhuma estrutura macroscópica.

As *MISS* foram observadas tanto em sedimentos lamosos quanto em sedimentos arenosos, e quase sempre associadas a carbonatos, o que é esperado, já que se trata de um ambiente dominado por sedimentação carbonática e evaporítica.

A etapa de  $\mu$ -CT permitiu, a partir de algumas amostras selecionadas, a descrição de estruturas internas, diferenciação mineralógica e análise de porosidade.

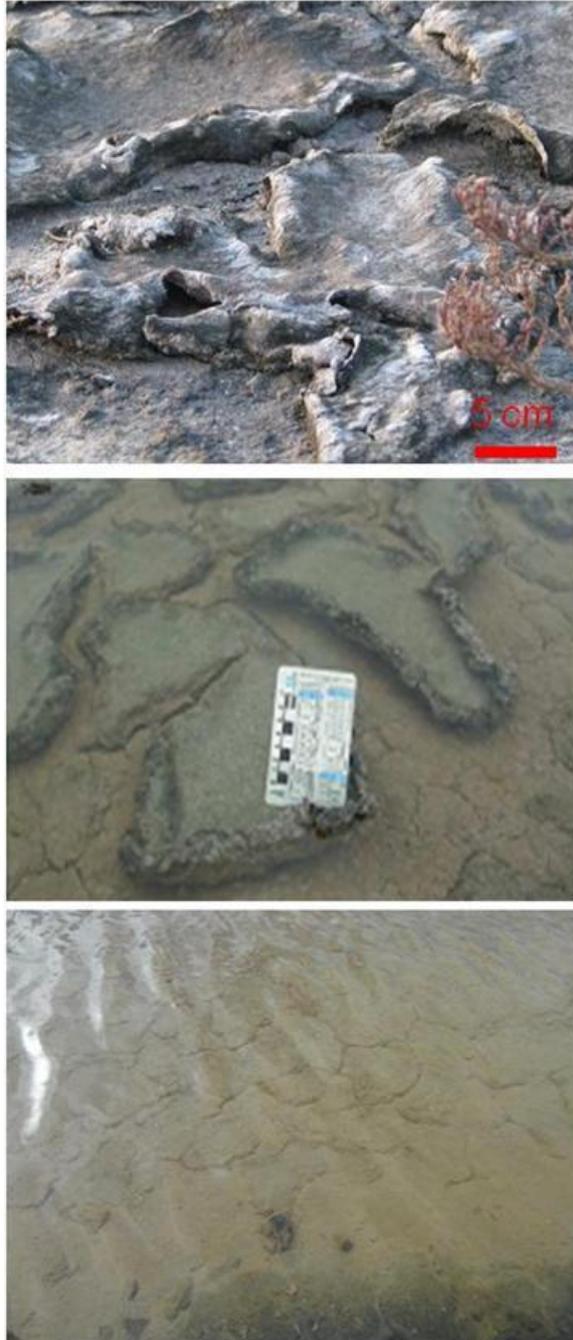
## **5.1 MISS reconhecidas em atividades de campo**

### **5.1.1 ESTRUTURAS RESULTANTES DO PROCESSO DE BIOESTABILIZAÇÃO**

#### **5.1.1.1 Gretas de Dessecamento**

As gretas de dessecamento da Lagoa Vermelha são encontradas nas margens em que há exposição subaérea da esteira microbiana.

As gretas se caracterizam por esteiras microbianas que se rompem e que podem ter suas bordas revolvidas – tanto para cima quanto para baixo -, enquanto sua porção interna/central permanece não-deformada, lisa e, por vezes, aderida ao substrato (Figura 16). Esse comportamento é mais comum em gretas de dimensões maiores, pois, quando são pequenas, a deformação chega ao centro e toda a greta se torna uma estrutura totalmente contorcida e não mais aderida a superfície sotoposta. Conjuntamente a isso, as gretas de dessecamento também são reconhecidas pelo substrato subjacente a elas sempre exposto, devido ao encolhimento da esteira.



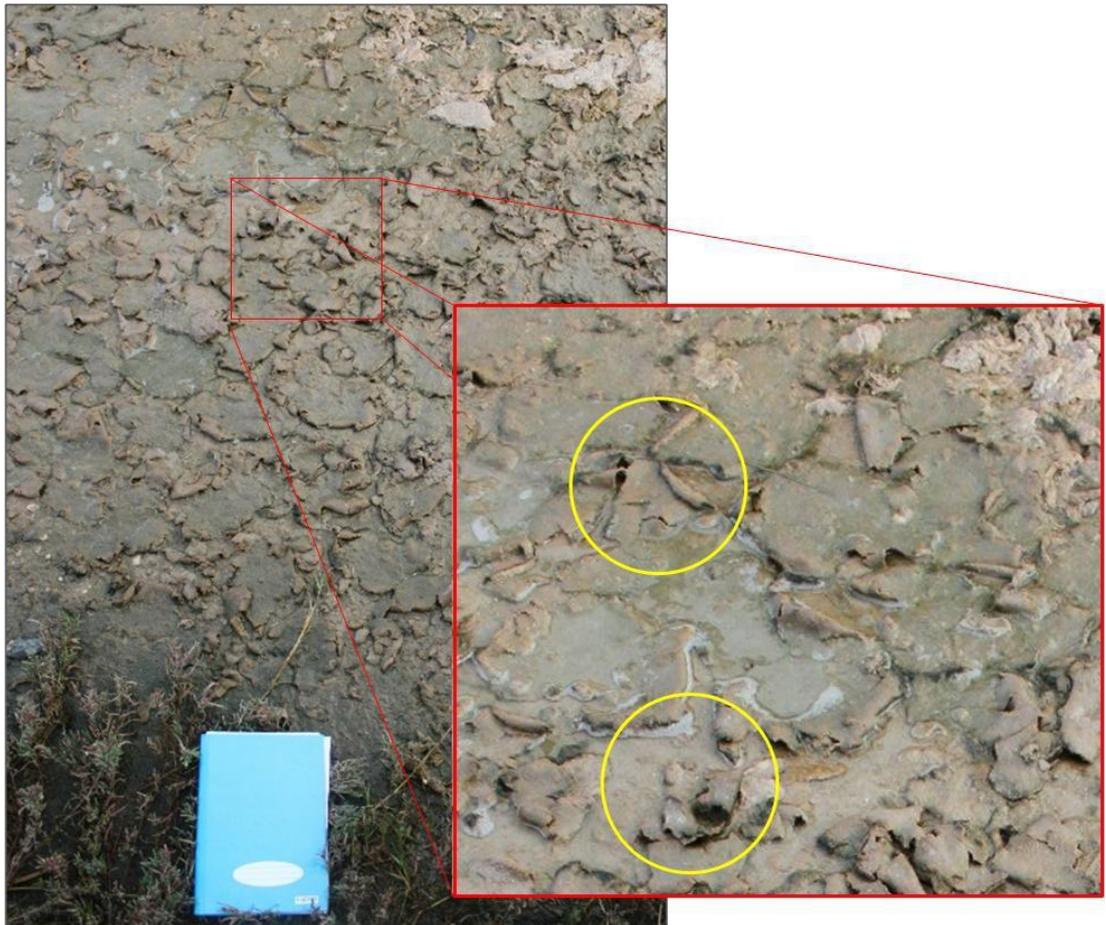
**Figura 16** - Gretas de dessecação observadas na Lagoa Vermelha.

#### 5.1.1.2 *Mat Curls*

*Mat curls* são estruturas associadas às gretas de dessecação, e se formam também em períodos de seca no ambiente. Nas gretas de dessecação com pequenas dimensões, ocorre tamanha deformação de suas bordas, que a estrutura formada passa a ser outra.

As *mat curls* observadas são caracterizadas por porções de uma camada sedimentar bioestabilizada totalmente contorcidas, adquirindo a forma de uma folha enrolada (Figura 17.).

Nesse caso, as bactérias presentes são, provavelmente, endobênticas, já que uma esteira microbiana superficial não é reconhecida, apesar da camada arenosa se comportar como uma.

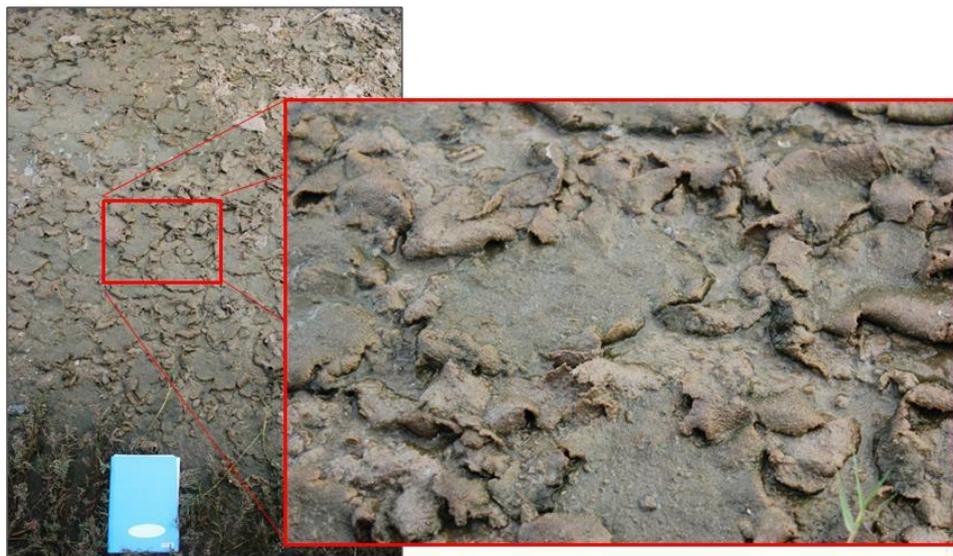


**Figura 17** - *Mat curls* observadas na Lagoa Vermelha.

### 5.1.1.3 *Mat Chips*

As *mat chips* na Lagoa Vermelha ocorrem associadas às gretas de dessecação e às *mat curls*.

Essa estrutura corresponde a fragmentos de esteiras de, aproximadamente, 5 cm, os quais são erodidos, retrabalhados e dispostos aleatoriamente no ambiente de sedimentação. Os fragmentos foram observados próximos ou sobre as *mat curls* e constituem partes das mesmas (Figura 18).



**Figura 18** - *Mat chips* observadas na Lagoa Vermelha..

## 5.1.2 ESTRUTURAS RESULTANTES DO PROCESSO DE CRESCIMENTO MICROBIAL

### 5.1.2.1 Estrutura de Nivelamento Laminada

Estruturas de nivelamento laminadas foram observadas nas margens da Lagoa Vermelha e são caracterizadas por uma sucessão de lâminas de esteiras microbianas acrescidas sobre uma superfície deposicional, que, provavelmente, conviveu com um período de baixas taxas de sedimentação durante o desenvolvimento dessa camada orgânica.

O conjunto de lâminas apresenta cerca de 2 cm de espessura, tem a forma ondulada em seu limite inferior, enquanto seu limite superior exibe uma forma mais plana (Figura 19).



**Figura 19** - Estrutura de nivelamento laminada observada na Lagoa Vermelha.

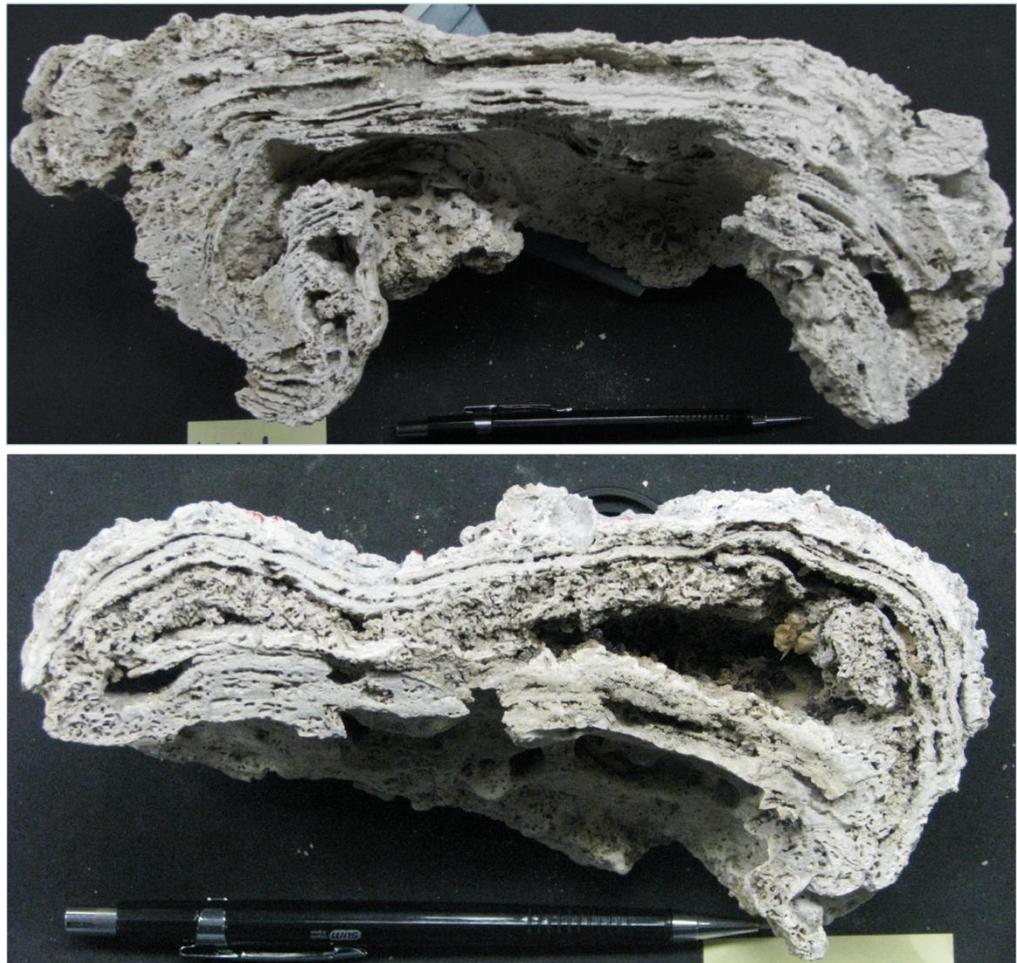
A esteira microbiana é formada por bactérias epibênticas, pois laminações orgânicas sobre a superfície sedimentar são muito bem reconhecidas. A ondulação observada corresponde à forma do substrato subjacente.

### 5.1.3 ESTRUTURAS RESULTANTES DO METABOLISMO DA ESTEIRA

#### 5.1.3.1 Estromatólito

Os estromatólitos observados na Lagoa Vermelha apresentam dimensões que variam de 10 a 25 cm de comprimento e 5 a 10 cm de altura. Possuem laminações milimétricas, por vezes intercaladas com intervalos terrígenos, os quais são constituídos por grãos quartzosos e poucos bivalvíos, fragmentados ou não. O material terrígeno aparece cimentado por carbonato e as laminações ocorrem frequentemente bioerodidas.

Os estromatólitos apresentam uma forma muito peculiar, cujas bordas são lâminas convolutas dobradas para baixo da estrutura, enquanto a porção central é mais plana (Figura 20).

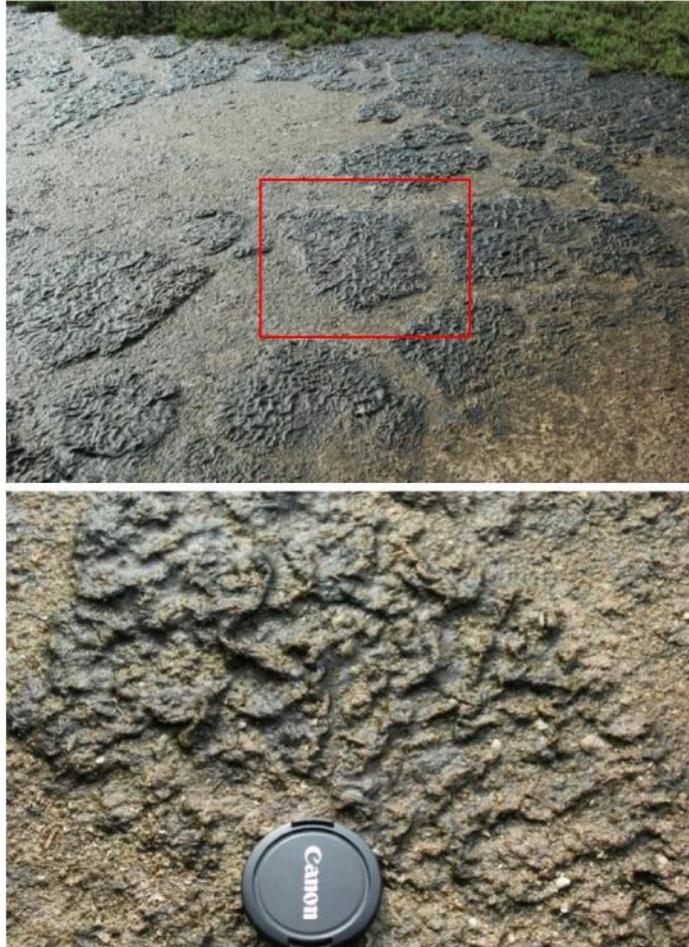


**Figura 20** - Amostras de estromatólitos da Lagoa Vermelha.

#### 5.1.4 ESTRUTURAS RESULTANTES DA INTERFERÊNCIA DE MAIS DE UMA ATIVIDADE MICROBIAL INTERAGINDO COM A DINÂMICA FÍSICA DOS SEDIMENTOS

##### 5.1.4.1 Wrinkle

As *wrinkles* observadas na área de estudo estão localizadas nas margens da Lagoa Vermelha. São estruturas deformadas em formato poligonal que variam de 20 a 60 cm. Caracterizam-se pelo aspecto enrugado e sinuoso da esteira microbiana, que ocorre em sedimentos areno-lamosos (Figura 21).



**Figura 21** - *Wrinkles* observadas na Lagoa Vermelha.

A esteira microbiana não é sempre reconhecida, apesar da deformação flexível da superfície sedimentar explicitar sua presença.

#### 5.1.4.2 Estrutura de descolamento (Remanescentes Erosivos)

Em uma área marginal alagada da lagoa, foi possível observar esteiras microbianas finas e flexíveis descoladas e flutuando sobre o substrato.

As esteiras apresentam rompimento em forma de polígonos de cerca de 20 cm e bordas por vezes dobradas e reviradas (Figura 22).



**Figura 22** - Estrutura de descolamento laminada observada na Lagoa Vermelha.

#### 5.1.4.3 Petees

Na área de estudo, os *petees* são estruturas convolutas que ocorrem espacialmente associadas com as estruturas de descolamento da esteira em períodos de maior pluviosidade (Figura 23).

Caracterizadas por domos e dobras, essas estruturas ocorrem nas porções centrais das esteiras que foram rompidas em forma de polígonos, alcançando até 2 cm de comprimento para cima.

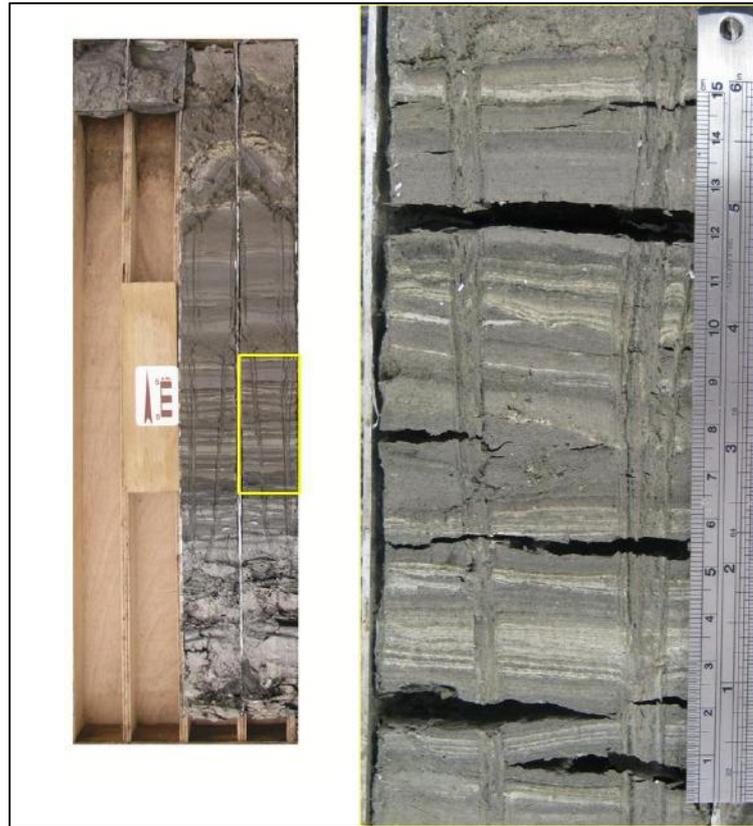


**Figura 23** - *Petees* observados na Lagoa Vermelha.

## **5.2** *MISS* reconhecidas em testemunho

### **5.2.1** Biolaminitos

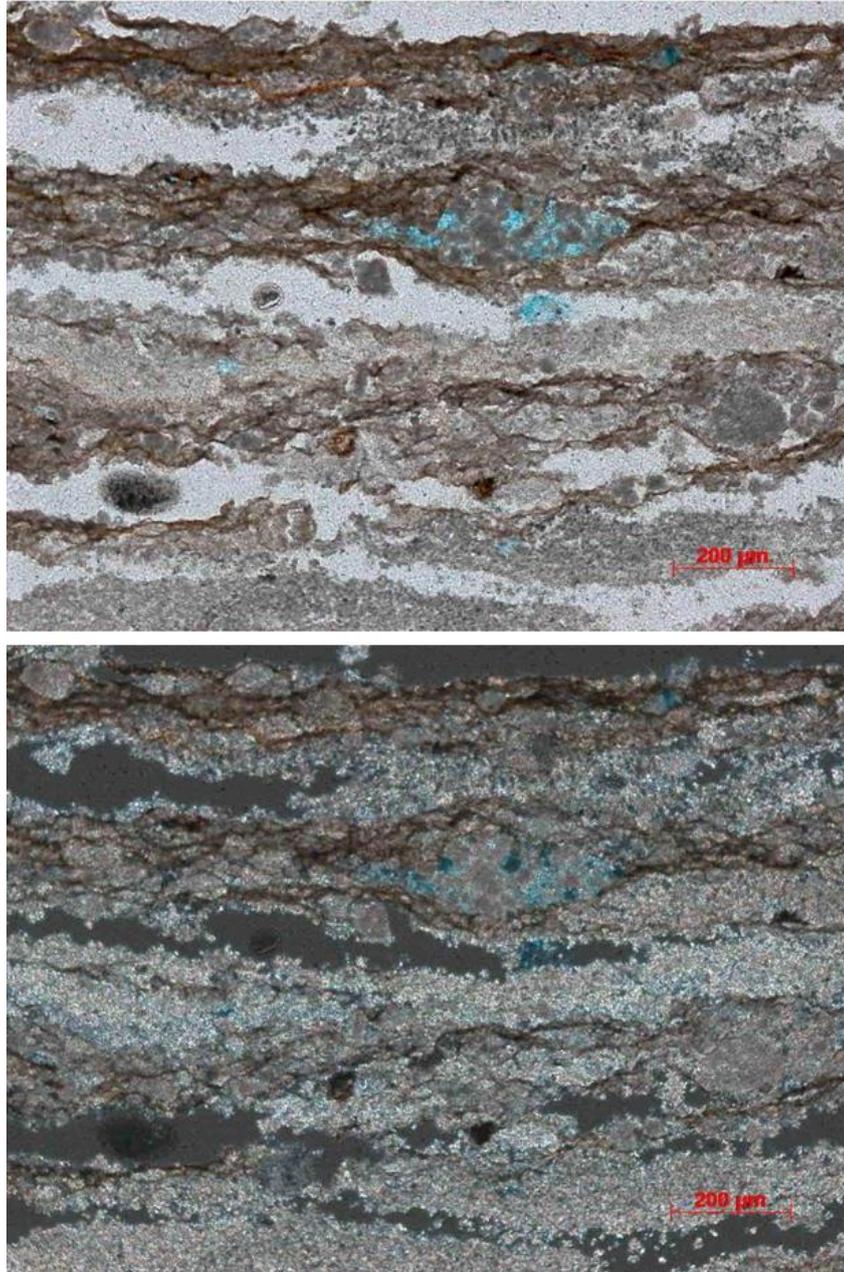
Os biolaminitos são caracterizados pela intercalação de lâminas de carbonato de cálcio com lâminas de esteiras microbianas esverdeadas (Figura 24).



**Figura 24** - Biolaminitos observados no testemunho LV-02.

Macroscopicamente, essas laminações apresentam configuração lisa ou crenulada.

Em lâmina petrográfica correspondente a esse intervalo, é possível observar o mesmo padrão de laminações, caracterizadas pela intercalação entre carbonato peloidal e esteira microbiana. O carbonato peloidal aparece como grumos cimentados por micrita (Figura 25).



**Figura 25** - Biolaminitos observados em lâmina petrográfica. Intercalação de esteiras e carbonato peloidal. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.2 Nódulos trombolíticos

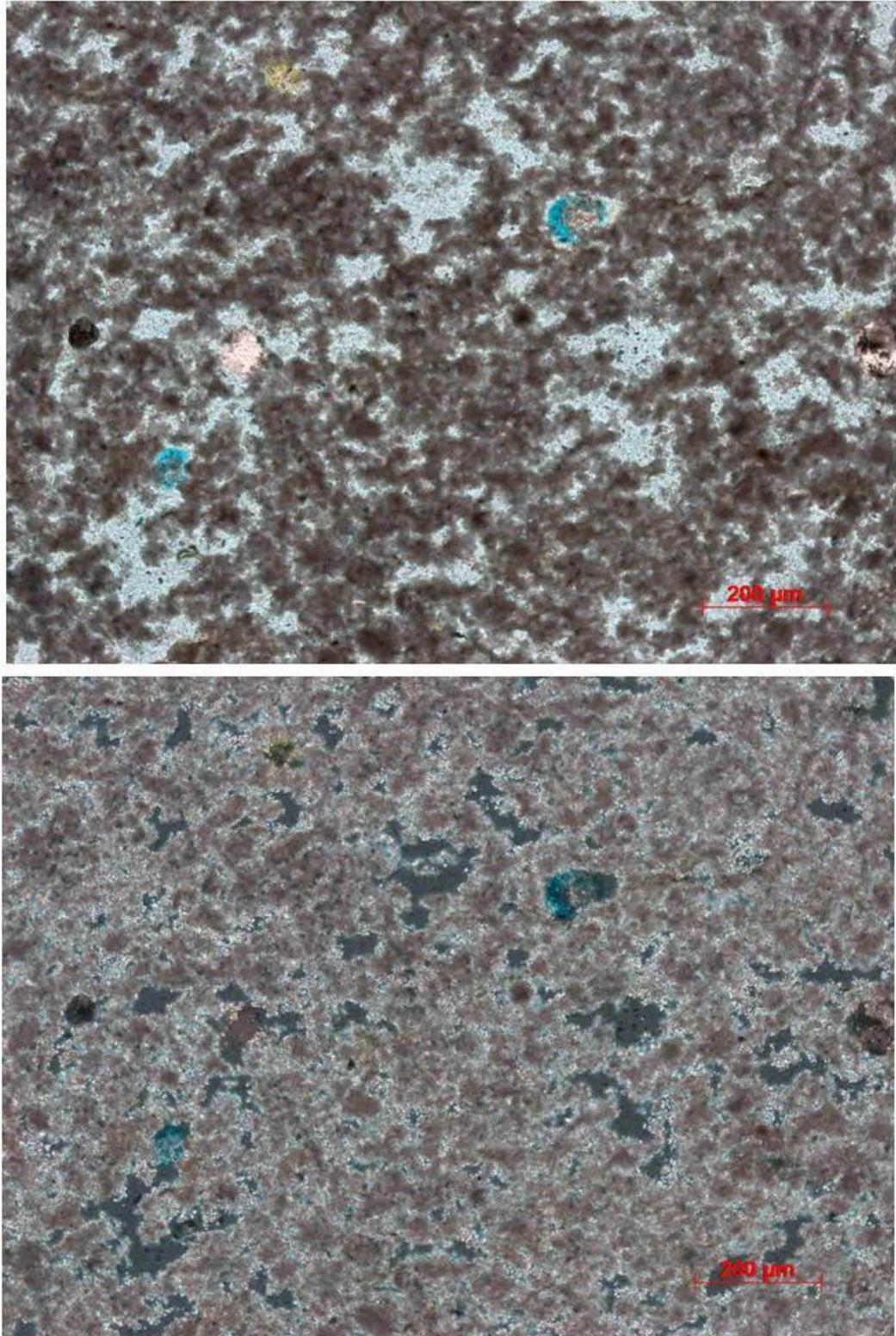
A feição referida como nódulo trombolítico observada no testemunho LV-02, corresponde a um aglomerado de carbonato de cálcio não litificado, com formato arredondado, sem

organização em lâminas, de textura coagulada, porosa, e que trunca os biolaminitos laterais (Figura 26).



**Figura 26** - Nódulo trombolítico observado no testemunho LV-02.

Em lâmina petrográfica, é possível descrever a textura dessa estrutura como um acúmulo grumoso de carbonato peloidal (*clotted*) cimentados por calcita microcristalina (figura 27).

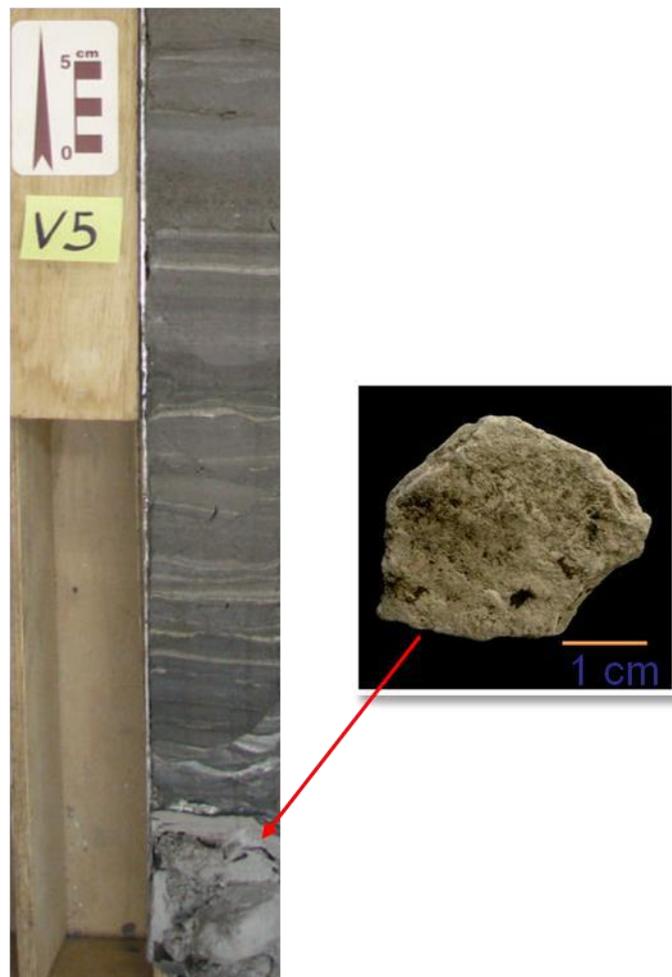


**Figura 27** - Lâmina petrográfica correspondente ao intervalo de nódulo trombolítico do testemunho LV-02. Observa-se uma textura grumosa constituída por material orgânico cimentado por micrita. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200 µm.

### 5.2.3 Estromatólito *biscuit*

Essas estruturas são caracterizadas por crostas carbonáticas litificadas. São estruturas que apresentam laminações milimétricas, irregulares e descontínuas resultantes de processos de calcificação precoce de esteiras microbianas (Figura 28).

Os estromatólitos *biscuit* são estruturas características da Lagoa Vermelha, encontrados, inclusive, em superfície.

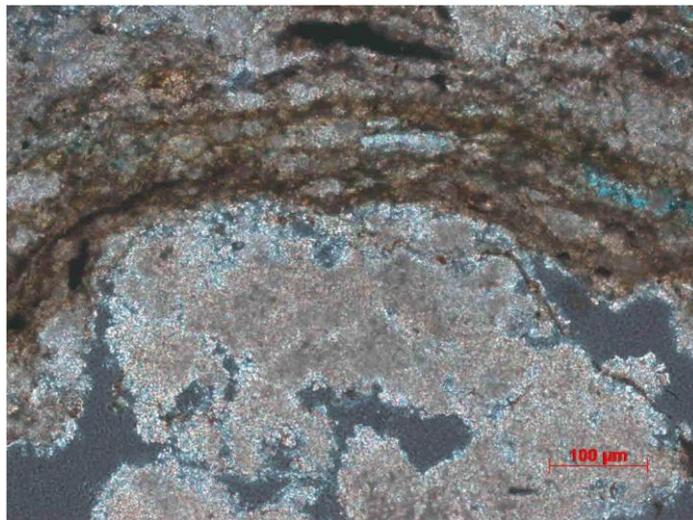


**Figura 28** - Exemplo de estromatólito *biscuit* observado em testemunho (LV-05).

### 5.3 Feições microbiais reconhecidas em lâminas petrográficas

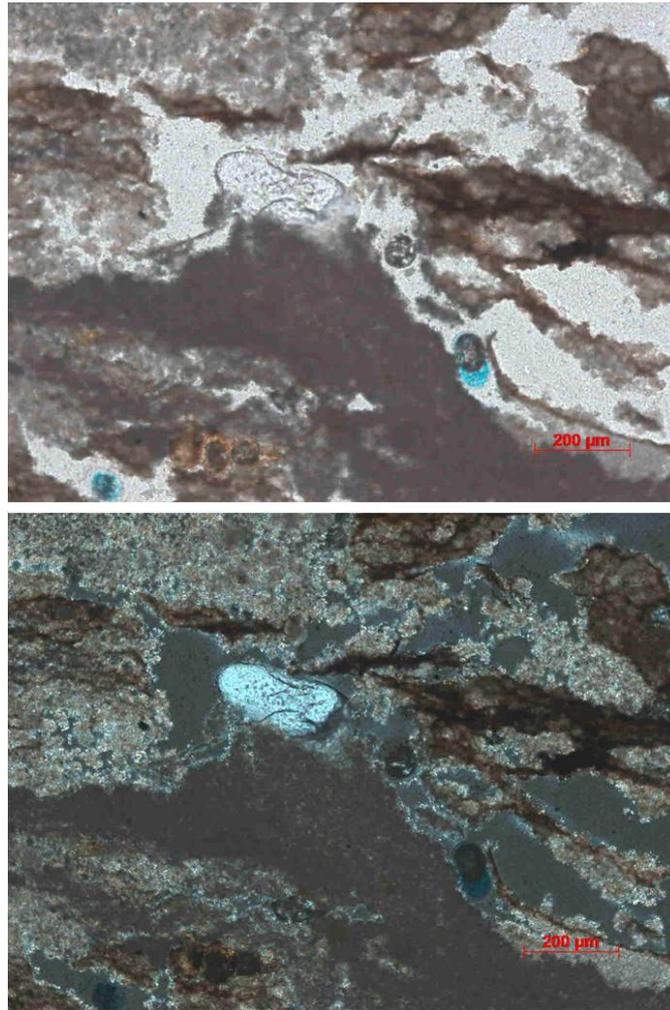
Por meio da análise das lâminas petrográficas foi possível caracterizar as principais feições microbiais que ocorrem associadas aos sedimentos dos testemunhos.

Na lâmina LV-10-95 (Figura 29), observa-se uma concentração de  $\text{CaCO}_3$  compondo um textura grumosa (*clotted*). Desenvolvidas sobre o aglomerado grumoso, observam-se lâminas de biofilmes microbianos, e entre essas também ocorrem carbonatos com textura grumosa.



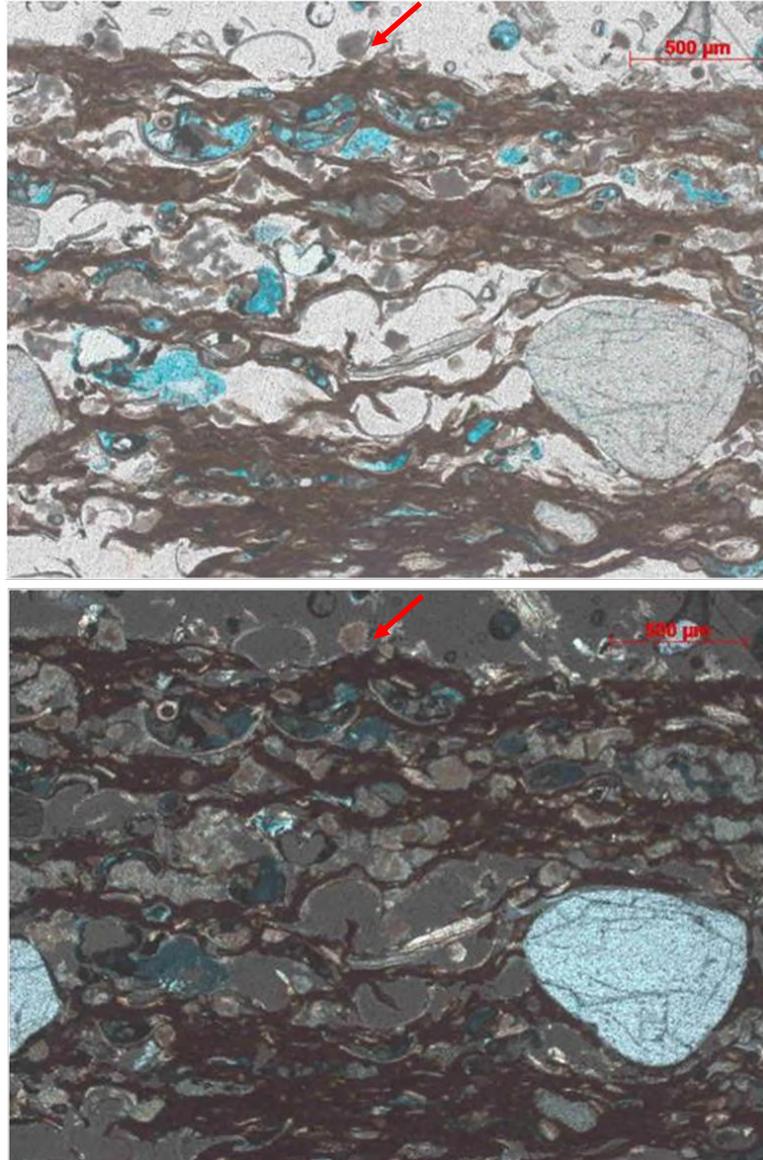
**Figura 29** - Laminações orgânicas desenvolvidas sobre carbonato grumoso. Escala: 100  $\mu\text{m}$  (Lâmina LV-10-95cm).

Na lâmina LV-01-55, correspondente ao intervalo 53-58 cm do testemunho LV-01, é possível observar o aprisionamento de um grão de quartzo por uma esteira microbiana (Figura 30).



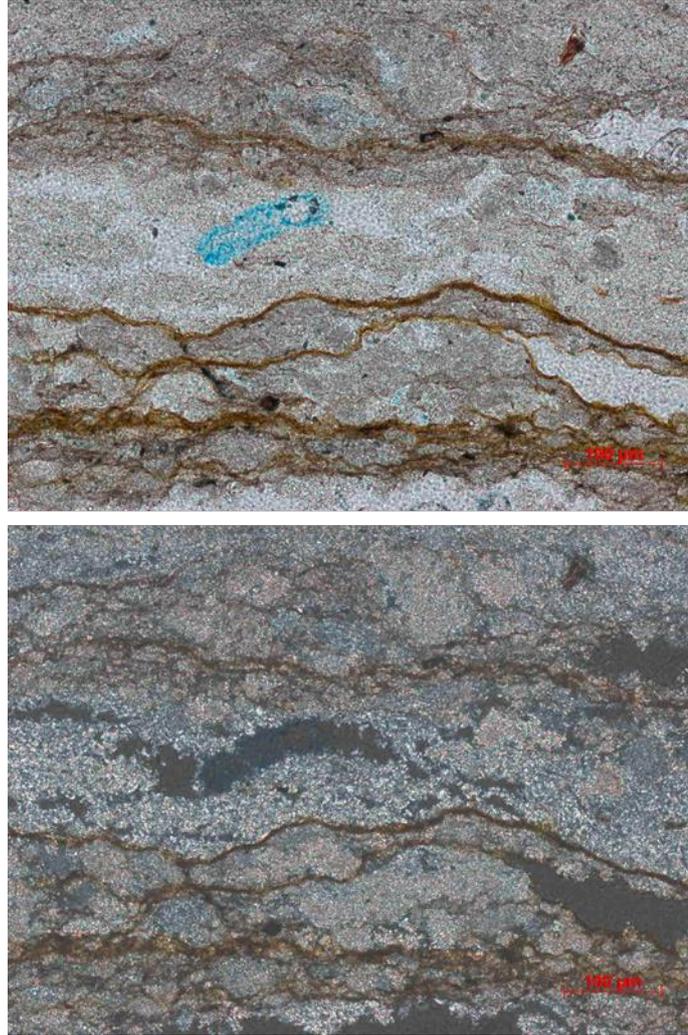
**Figura 30** - Lâmina petrográfica correspondente ao intervalo de biolaminito do testemunho LV-01. Observa-se grão de quartzo aprisionado por esteira microbiana. Foto superior: nicóis paralelos; foto inferior: nicóis cruzados. Escala: 200 µm.

Na lâmina LV-10-95, correspondente ao intervalo 92-97 cm do testemunho LV-10, além do aprisionamento e trapeamento de sedimentos, é possível observar laminações *crinkle*, que é uma feição microbiana muito característica (Figura 31).



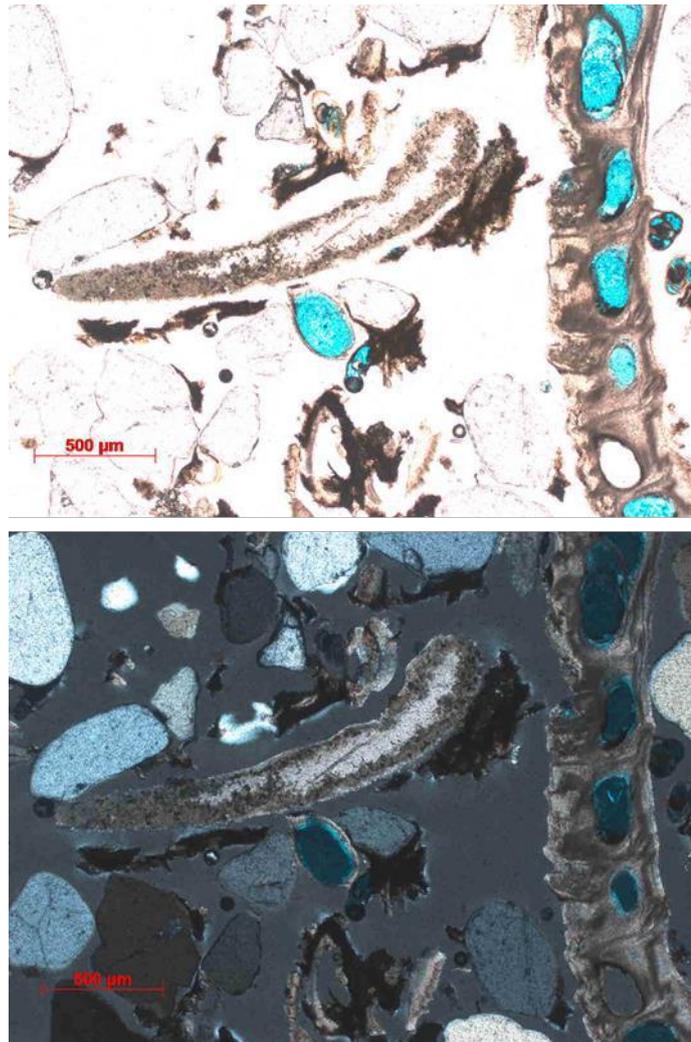
**Figura 31** - Fotomicrografia correspondente a lâmina LV-10-95, demonstrando grãos trapezados, aprisionados e orientados. Foto superior: nicóis paralelos. Foto inferior: nicóis cruzados. Escala 500 μm.

Outra feição microbial característica das lâminas descritas, está representada na figura 32 pela lâmina LV-01-55. Lâminas de fosfato ocorrem substituindo as laminações orgânicas das esteiras.



**Figura 32** - Laminações orgânicas fosfatizadas. Escala: 100 µm.

A lâmina LV-10-95 é caracterizada por diversos fragmentos de organismos de composição carbonática sofrendo micritização por micro-organismos (Figura 33).



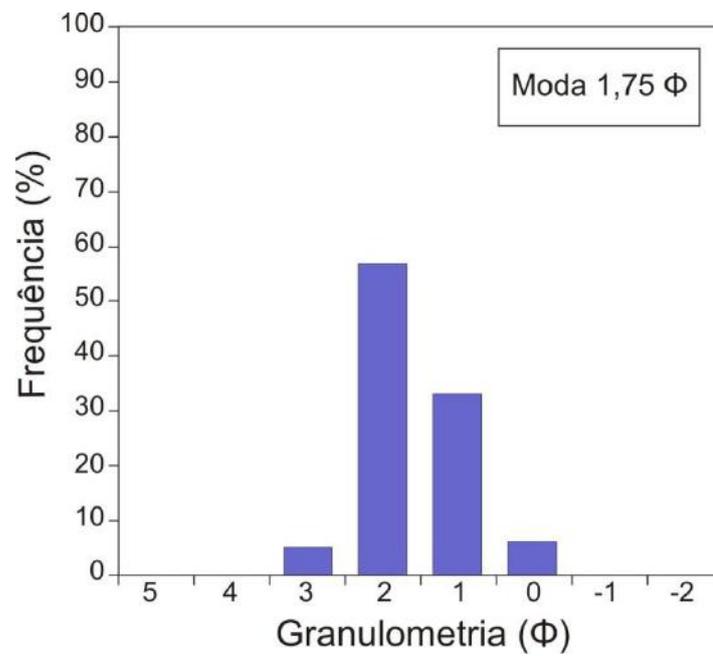
**Figura 33** - Biválvio micritizado por ação microbiana. Escala: 500  $\mu\text{m}$ .

#### **5.4 Resultado da análise granulométrica**

Aa análises foram realizadas nos intervalos arenosos dos testemunhos LV-02 (Figura 34) e LV-06 (Figura 36). De um modo em geral, as areias analisadas variam de médias (55%) a grossas (45%); mal selecionadas (70%), pobremente selecionadas (21%) a moderadamente selecionadas (9%); subarredondadas; quartzosas e, na maior parte das vezes, conchíferas (média 20%, variando entre 2 a 40%) (Figuras 35 e 47).



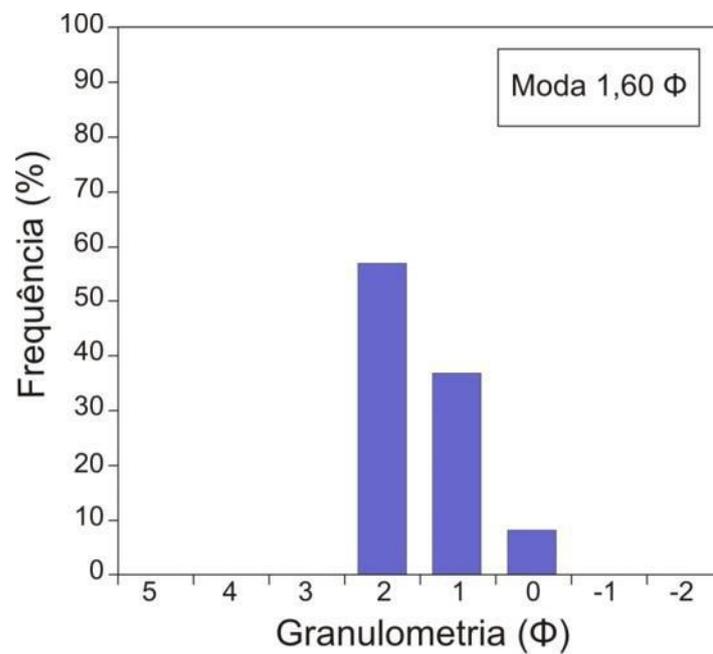
**Figura 34** - Intervalo do testemunho LV-02 onde foi realizada a análise granulométrica.



**Figura 35** - Distribuição granulométrica por classes verificada em amostra do intervalo compreendido entre 91-99 cm de profundidade do testemunho LV-02.



**Figura 36** - Intervalo do testemunho LV-06 onde foi realizada a análise granulométrica.



**Figura 37** - Distribuição granulométrica por classes verificada em amostra do intervalo compreendido entre 74-90 cm de profundidade do testemunho LV-06..

## 5.5 Resultado da microtomografia computadorizada

A microtomografia computadorizada foi realizada em amostras de microbialitos retirados de 3 testemunhos da Lagoa Vermelha (Figura 38) e uma amostra de estromatólito coletada na lagoa, totalizando 4 amostras (Figura 39). O estudo compreendeu a avaliação estrutural, caracterização mineralógica e distribuição da porosidade de cada amostra.

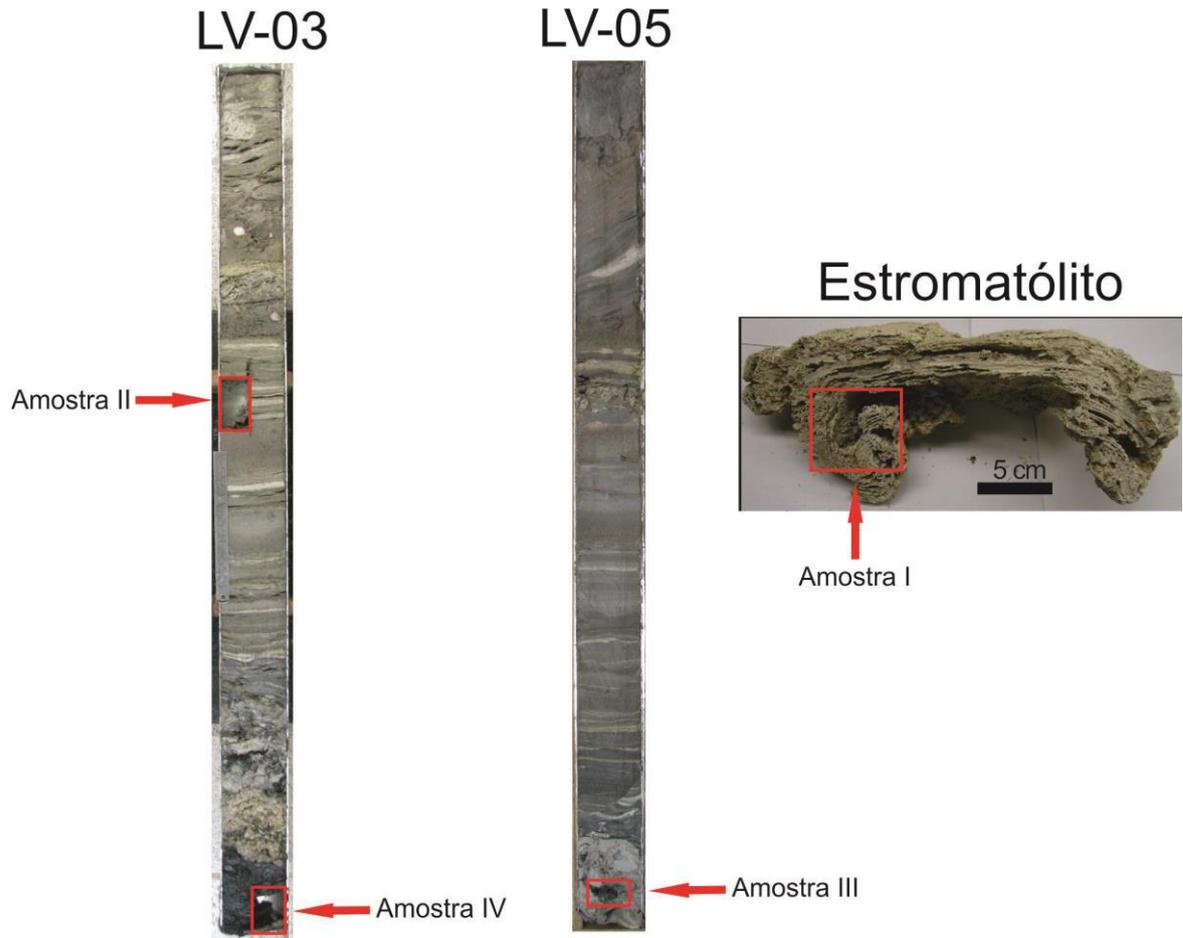
- Descrição das Amostras:

**Amostra I:** Estromatólito – é caracterizada por ondulações e lâminas de carbonato muito irregulares e a presença distinta de porosidade vulgular.

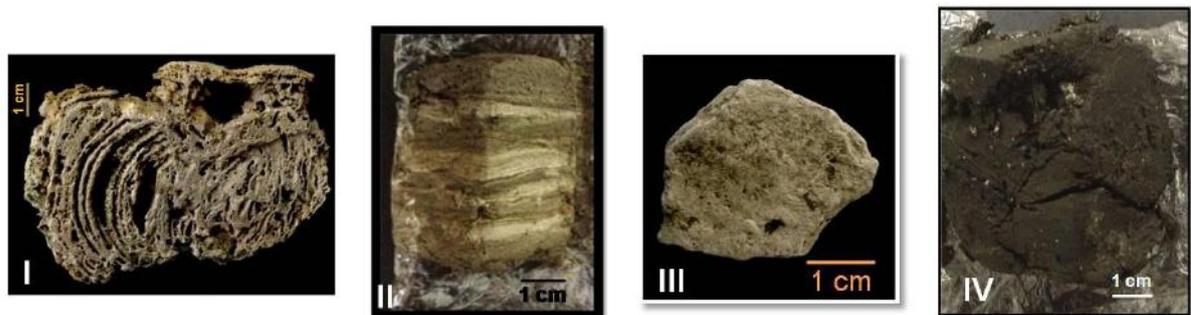
**Amostra II:** Biolaminito – esteiras microbianas compostas de lâminas escuras (ricas em matéria orgânica) intercaladas com lâminas carbonáticas, cinza claro, de configuração lisa e crenulada.

**Amostra III:** Estromatólito *Biscuit* – crostas endurecidas de carbonato de cálcio organizado em lâminas finas, irregulares e descontínuas.

**Amostra IV:** Matéria Orgânica – formada por diferentes fases de decomposição de estruturas microbianas e fragmentos vegetais.



**Figura 38** - Localização das amostras coletadas para realização das análises de  $\mu$ -CT.



**Figura 39** - Fotografias das amostras analisadas.

As análises microtomográficas permitiram a identificação de constituintes e estruturas internas (ostracodes, laminações, grãos de carbonato) bem como de diferentes mineralogias

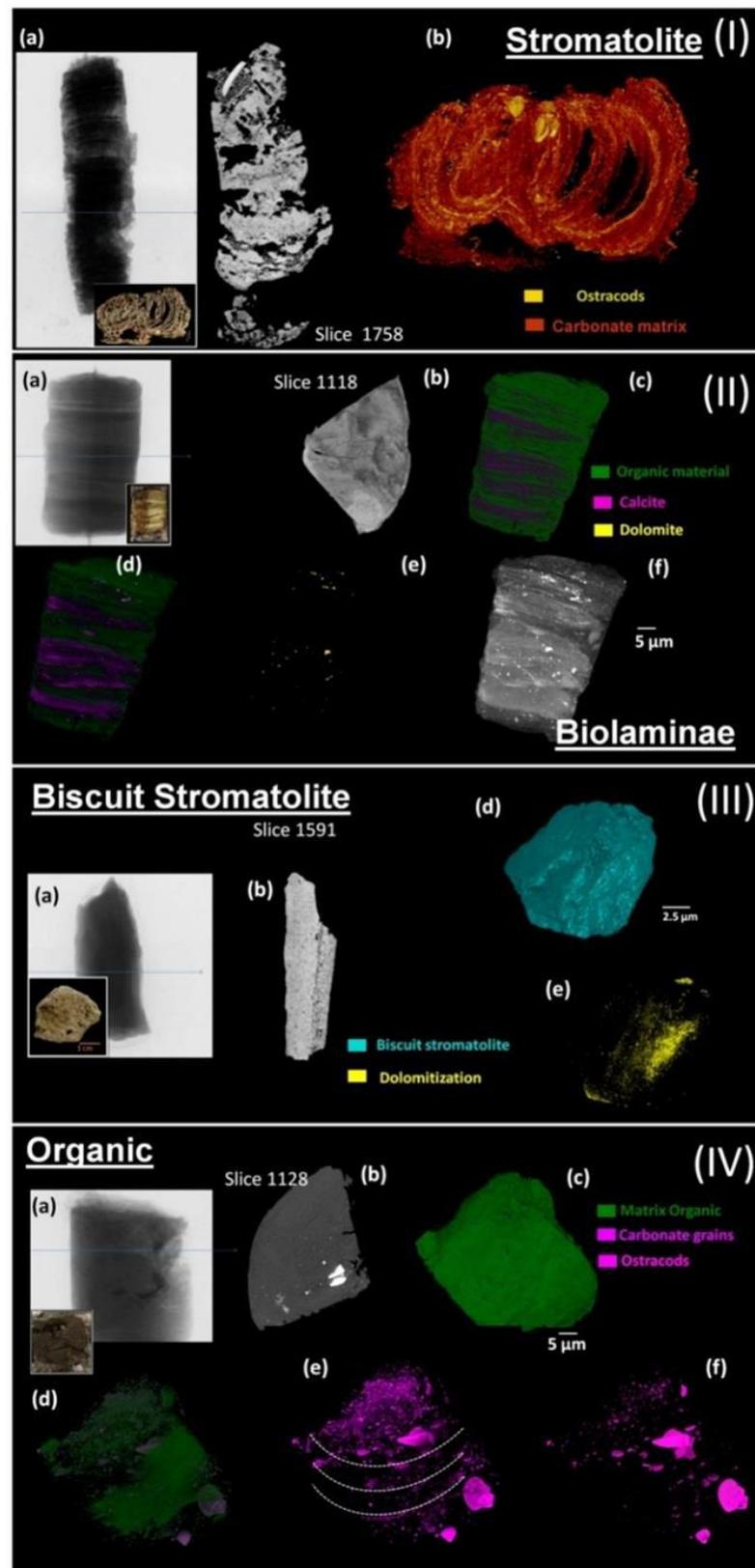
(dolomita, calcita e quartzo). As Figura 40 mostra os resultados da  $\mu$ -CT para as seguintes amostras:

**Amostra I** - As diferentes mineralogias (calcita e calcita-Mg) podem ser vistas na Figura 40 (Ib). A porosidade total desta amostra foi de 11%.

**Amostra II** - Nesta amostra, os resultados das diferenças de composição (presença de calcita, dolomita, matéria orgânica e grãos brilhantes, possivelmente quartzo) são mostrados na Figura 40 (II.c-II.F). Foi possível quantificar cerca de 0,01% de quartzo e dolomita mais de 14% de calcita. As análises quantitativas resultaram em uma porosidade total de 0,46%.

**Amostra III** – A Figura 40 (III.d e III.e) mostra que o estromatólitos biscuit apresenta uma massa difusa de maior densidade de material carbonato (dolomita?). Isto ocorre possivelmente como um subproduto da dolomitização associado a uma distinta colônia de cianobactérias, correspondendo a 0,97%. A porosidade da amostra é de 0,35%.

**Amostra IV** – A laminação é vista pela concentração dos grãos carbonáticos (0,74%) no interior da matéria orgânica (tapete microbiano) como linhas brilhantes na Figura 40 (IV.e). Na Figura 40 (IV.f), ostracodes (0,39%) estão presos nas esteiras microbianas, alguns ocorrendo com as valvas fechadas e outros fragmentados (transportados por tração / suspensão em baixa energia).



**Figura 40** - Visualização em  $\mu$ -CT 3D de todas as amostras analisadas. (I) Estromatólito, (II) Biolaminito (III) Estromatólito Biscuit e (IV) Matéria Orgânica.

## 6 DISCUSSÃO

As *MISS* reconhecidas na Lagoa Vermelha foram agrupadas de acordo com os processos predominantes em sua formação.

As estruturas resultantes de bioestabilização (gretas de dessecação, *mat curls* e *mat chips*) ocorrem espacialmente associadas em regiões marginais da lagoa que foram submetidas à exposição subaérea, já que essas estruturas resultaram, primeiramente, do dessecação e consequente encolhimento da esteira. Aparentemente, as bactérias presentes são do tipo endobêntica, pois, além de não ser possível reconhecer a esteira microbiana, observa-se que a estrutura é constituída por sedimentos areno-lamosos, os quais não teriam propriedades flexíveis se não houvesse um condicionante biológico (Figura 41). Em outras palavras, isso significa que a esteira microbiana propriamente dita não foi observada, mas sua atuação sobre a camada de sedimentos bioestabilizada é perfeitamente notável, em resposta a um momento de condições mais secas na lagoa.



**Figura 41** - Imagens de gretas de dessecação retiradas de Schieber et al. (2007)

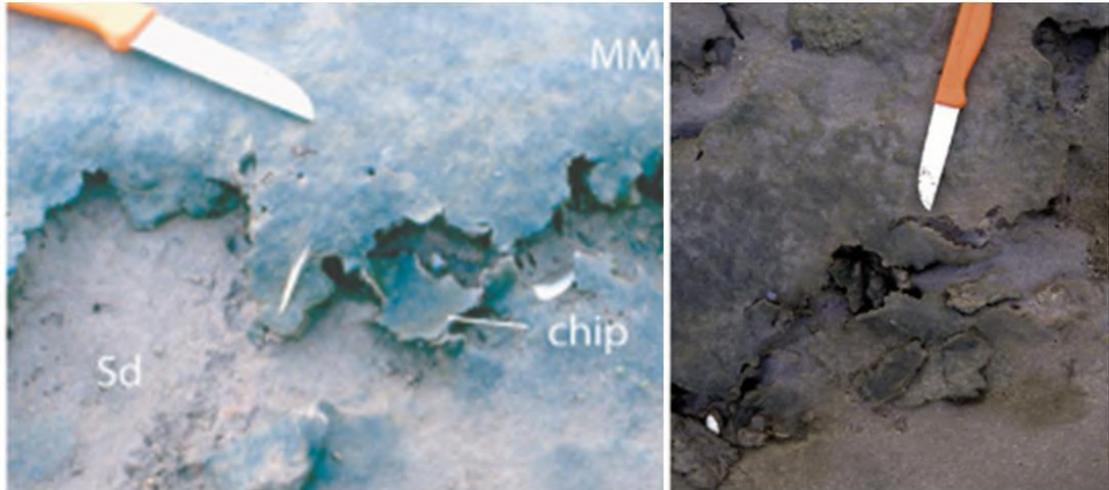
De acordo com Schieber (2007), as gretas de dessecação em esteiras microbianas apresentam morfologias distintas daquelas que ocorrem em superfícies não-bioestabilizadas, devido a imperfeições e variações locais na espessura da esteira microbiana. Exemplos de gretas de dessecação que ocorrem em uma salina das Ilhas Canárias, Espanha, possuem as mesmas formas de polígonos irregulares, com dobras e margens reviradas (Reineck, *apud* Schieber *et al.*,

2007) que as gretas de dessecação encontradas na Lagoa Vermelha, as quais puderam então ser comparadas e relacionadas a ambientes evaporíticos.

As *mat curls* refletem o comportamento coesivo e flexível das esteiras microbianas, as quais podem ter seus fragmentos erodidos e retrabalhados, constituindo as *mat chips*. As bordas enroladas das *mat curls* colaboram para distinção entre a coesão dada por cimentação sin-sedimentar, e a coesão dada pelo processo de *binding* em esteiras (Schieber, 1999). Na Lagoa Vermelha, os processos que levaram a separação desses fragmentos, foram de pouca energia, de modo que as *mat chips* foram remobilizadas e permaneceram sobre as esteiras originais. Posteriormente as *chips* soltas, podem vir a ser transportadas para outros locais do ambiente de sedimentação. Na Lagoa Vermelha as *mat curls* foram comparadas às *flip overs* documentadas em Schieber *et al.* (2007) e a lama escrespada descrita por Avalone (2013) (Figura 42), enquanto as *mat chips* foram comparadas com as descritas por Nofke (2010) (Figura 43).



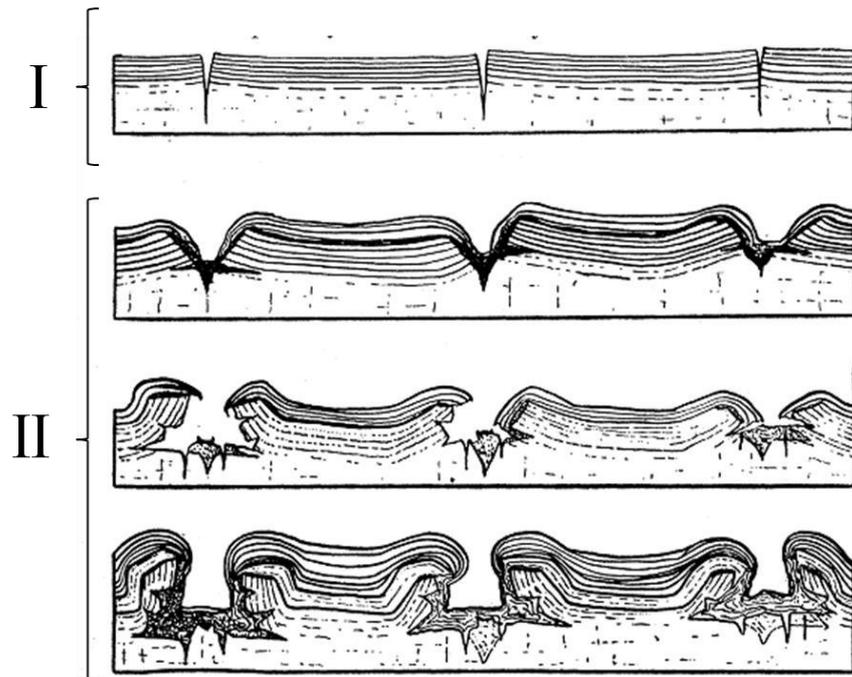
**Figura 42** - Exemplos comparativos às *mat curls* retiradas de Schieber *et al.* (2007) (A e B) e Avalone (2013) (C).



**Figura 43** - Exemplos comparativo de mat chips descritas por Nofke (2010). Escala: 5 cm..

As estruturas de nivelamento laminadas foram as estruturas encontradas resultantes do processo de crescimento microbial e representam esteiras microbianas que colonizaram e modelaram a superfície sedimentar. É possível que as laminações mascarem alguma outra estrutura ou forma de leito existente, devido a sua forma ondulada nas laminações basais. Segundo Schieber *et al.* (2007), essa estrutura ocorre porque os biofilmes não foram coesos o suficiente para modificar as estruturas físicas primárias, embora tenha sido possível bioestabilizar a superfície original.

Nos estromatólitos, a morfologia peculiar possivelmente reflete a forma original da esteira microbiana precursora, a qual adquire esse formato, primeiramente, em resposta a um período de baixa pluviosidade e seca na lagoa, que ocasionou no seu rompimento em gretas (Figura 44-I). Por conseguinte, um período de maior disponibilidade de água, ocasiona em rápido desenvolvimento das esteiras, que crescem colonizando e envolvendo sua própria superfície (Figura 44-II). A sucessiva repetição desse processo, associada a processos de calcificação, resulta na forma convoluta das bordas desse estromatólito.



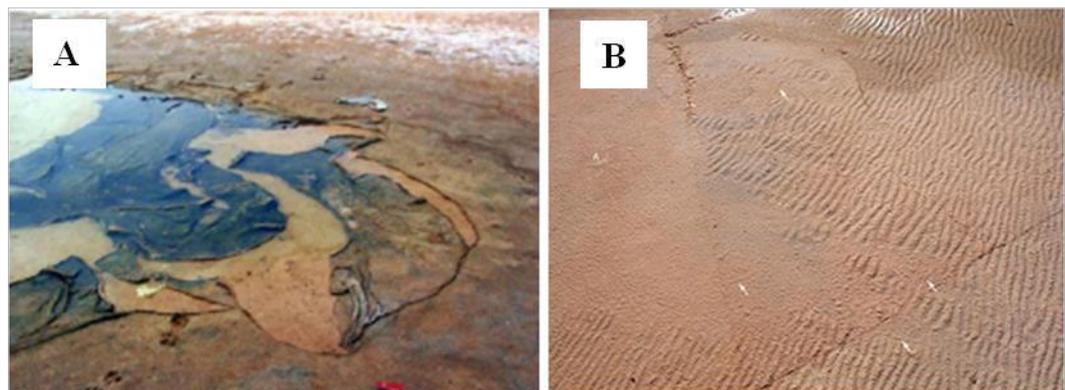
**Figura 44** - Ilustração demonstrando o processo de formação dos estromatólitos de borda convoluta da Lagoa Vermelha (Black, 1933).

As *wrinkles*, juntamente com as estruturas de descolamento e os *petees*, fazem parte das estruturas formadas por mais de uma atividade microbiana interagindo com a dinâmica sedimentar física (Nofke, 2010). Elas podem ter diversas origens (Schieber *et al.*, 2007). Apesar de Nofke (2010) assumir que *wrinkles* sejam formadas em um momento pós-deposicional através da expulsão lateral de água por uma esteira microbiana soterrada, no caso da Lagoa Vermelha, foi assumido, de acordo com Schieber *et al.* (2007), que essas estruturas foram formadas por forças trativas atuando sobre uma esteira que não estava totalmente aderida ao substrato devido à elevação no nível do lençol freático.

As esteiras microbianas podem constituir zonas contínuas e coesas que impermeabilizam a interface sedimento-atmosfera impossibilitando a perda de água do substrato por evaporação. Esse mecanismo faz com que a camada de sedimentos saturada em água sob a esteira funcione como um aquífero confinado (Porada *et al.*, 2007). Quando a pressão subjacente ultrapassa a resistência

da esteira microbiana, a mesma pode se romper e se descolar do substrato, formando as denominadas estruturas de descolamento na Lagoa Vermelha.

Os processos que dão origem às estruturas de descolamento podem ser os mesmos que resultam na formação de remanescentes erosivos (Figura 45), embora os dois nunca tenham sido atribuídos um ao outro. O local onde as esteiras descoladas do substrato foram observadas havia sido inundado além do ideal, ocasionando no descolamento de todas as esteiras microbianas, não restando nenhuma remanescente. Provavelmente, a estrutura de remanescentes erosivos é formada em algum momento anterior ou posterior ao descolamento de todas as esteiras.



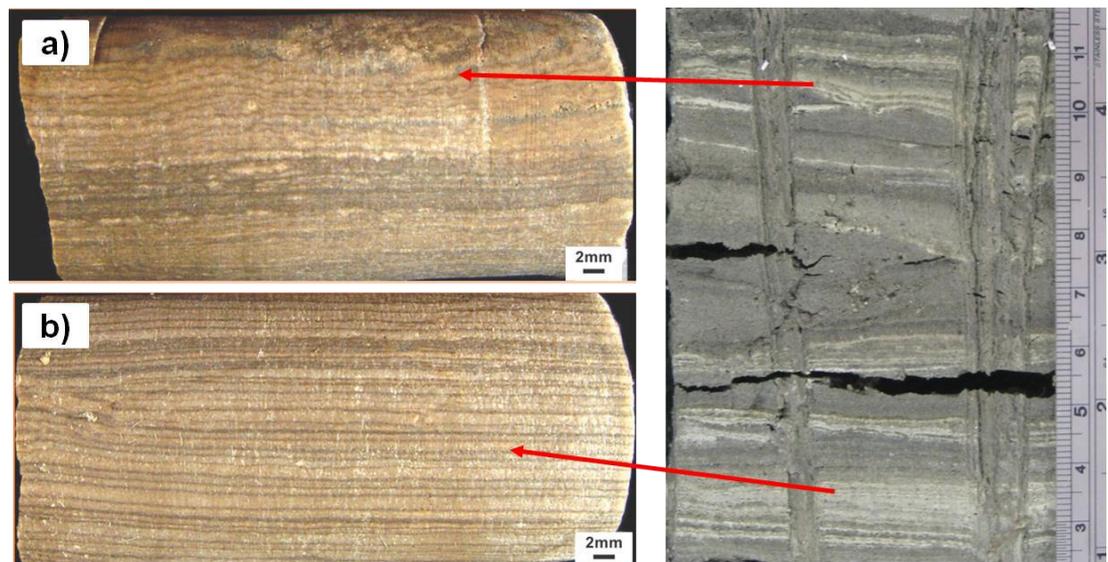
**Figura 45** - A - Estrutura de descolamento atual descrita por Parada et al. (2007); B - Remanescentes erosivos descrito Bottjer e Hagadorn (2007) no Grupo Elk Mound (Cambriano); Wisconsin, USA.

Muitas estruturas descritas na literatura são muito semelhantes, apesar de receberem nomes distintos e serem interpretadas como tendo sido formadas por processos também distintos. Esse é o caso de estruturas classificadas como *petees*, *bulges*, *domos* etc. Esse problema pode ser explicado pelo fato de que os processos que ocorrem ao longo de uma determinada área ocupada por esteiras microbianas podem não ser uniformes, como no caso de um processo de destruição da esteira ocorrendo adjacente ao de crescimento de uma outra (Schieber *et al.*, 2007).

*Petees* são estruturas observadas juntamente com as estruturas de descolamento nas margens da Lagoa Vermelha. Elas podem ter sido formadas tanto por deformação por processos físicos das esteiras que flutuam sobre a fina lâmina d'água (como ação de ventos e correntes), quanto pelo contínuo desenvolvimento e crescimento das esteiras durante e após seu descolamento (Reineck *et al.*, 1990).

Nos testemunhos, as estruturas microbiais reconhecidas estão relacionadas à precipitação de carbonato.

Os biolaminitos ocorrem em meio a sedimentos finos e constituem laminações de carbonato intercalado com esteira microbiana. As laminações parecem estar relacionadas a variações sazonais, podendo ser denominados bioarvitos. Tais laminações correspondem àquelas descritas por Terra *et al.* (2010) nos biolaminitos lisos e crenulados da Formação Barra Velha – seção Pré-sal da Bacia de Santos (Figura 46).



**Figura 46** - Biolaminito crenulado (a) e liso (b) descrito por Terra *et al.* (2000) (Formação Barra Velha – seção pré-sal da Bacia de Santos) comparados com os biolaminitos crenulado e liso do testemunho LV-01 da Lagoa Vermelha.

Já os nódulos trombolíticos e estromatólito *biscuit* foram interpretados como tendo sido formados pelo mesmo processo, a partir da precipitação de carbonato dentro da bainha de mucilagem do EPS (Riding, 2000). A textura maciça e sem organização observada macroscopicamente nos nódulos carbonáticos, se repete em lâmina petrográfica pela textura grumosa (*clotted*), caracteristicamente formada pela calcificação de cianobactérias.

As feições microbiais analisadas sob petrografia foram muito importantes para a compreensão dos processos desempenhados pelos micro-organismos.

Na lâmina LV-10-95, o aglomerado de  $\text{CaCO}_3$  de textura grumosa (*clotted*) é interpretado como cianobactérias calcificadas dentro da bainha de mucilagem produzida pelo EPS e cimentadas por micrita (Riding, 2000). A partir da relação de associação das esteiras com os aglomerados carbonáticos é possível confirmar que essa textura grumosa é, de fato, produzida pelos micro-organismos formadores das esteiras. Além disso, devido à observação de textura *clotted* em todos os intervalos em que foi feito petrografia, é possível concluir que esses micro-organismos representam a principal fonte de sedimentação carbonática existente na Lagoa Vermelha.

As relações existentes entre biofilmes e partículas sedimentares podem ser muito bem reconhecidas em lâmina petrográfica, sendo possível observar a formação de tramas de aprisionamento e trapeamento -  *baffling* e *trapping* - de sedimentos e grãos esqueléticos. Essas tramas são formadas através do contínuo desenvolvimento das esteiras microbianas, as quais circundam e aglutinam partículas pelo processo de *binding* (Gerdes, 2010). Exemplos dessa interação são representados pelo grão de quartzo aprisionado por esteiras na lâmina LV-01-55 e pela trama de esteiras formando uma rede de trapeamentos de grãos na lâmina LV-10-95.

Laminações crenuladas de fosfato substituindo as laminações orgânicas originais foram frequentemente observadas. Tal processo ocorre devido a momentos de eutrofização na lagoa, que

disponibiliza fosfato para ser absorvido pelos micro-organismos dentro da bainha de mucilagem do EPS. As laminações aparecem amarronzadas e isotrópicas em nicóis cruzados devido à presença de matéria orgânica e óxidos de ferro (Flügel, 2010) Lâminas crenuladas (*crinkle*) são feições comumente associadas à ação microbiana (Riding, 2000).

A micritização de carapaças de organismos, como bivalvíos, briozoários e foraminíferos, por bactérias é observada na lâmina LV-10-95. Esse processo resulta na disponibilização de íons de cálcio para o ambiente, que podem se ligar a outros íons carregados negativamente e contribuir para a sedimentação carbonática na Lagoa Vermelha. As bactérias intermediam esse ciclo.

O resultado da análise granulométrica dos sedimentos arenosos existentes na base dos testemunhos LV-02 e LV-06, que demonstrou o predomínio de areias médias a grossas, mal selecionadas e fragmentos de conchas, permite inferir que, provavelmente, esse depósito está relacionado a um momento pretérito de comunicação da Lagoa Vermelha com o mar, antes do Holoceno. Nesse episódio, o aumento de energia no sistema possibilitou o transporte e deposição de sedimentos de granulometria mais grossa do que os depositados nas atuais condições da lagoa.

Em rochas carbonáticas, a sedimentação e diagênese produzem uma ampla gama de tamanhos de poros, resultando tanto em uma distribuição espacial de poros quanto em uma conectividade complexa (Arns, 2005). Os resultados das análises de  $\mu$ -CT apresentaram excelentes imagens 3D com alta resolução (vide Anexo I), que permitem distinguir diferentes fases minerais e o comportamento da porosidade, bem como a identificação de bioclastos e componentes siliciclásticos.

## 7 CONCLUSÕES

A análise conjunta de atividades de campo e laboratoriais, utilizando descrições detalhadas, análise faciológica, petrografia e microtomografia computadorizada são necessárias para o entendimento de processos físicos, químicos e biológicos que resultam na formação da *MISS*.

Neste trabalho foram caracterizadas 11 estruturas sedimentares formadas por atividade microbiana na Lagoa Vermelha, além de 4 feições microbianas em lâminas petrográficas. O reconhecimento de tais estruturas é de grande importância para a caracterização geológica regional, devido ao fato de que essas estruturas nunca haviam sido descritas nessa região.

O estudo contribuiu para o melhor entendimento dos processos físicos, químicos e biológico que ocorrem na Lagoa Vermelha. Os parâmetros ambientais, tais como salinidade, temperatura da água, microclima árido da área e aporte sedimentar, associados aos processos físicos, controlam a atividade das biotas, e conseqüentemente, o comportamento das esteiras na lagoa e precipitação de carbonato. As estruturas que não apresentam precipitação de carbonato e, portanto, não são litificadas precocemente, dificilmente serão preservadas, pois são menos resistentes à ação de agentes físicos de destruição.

A literatura que abrange o assunto deste trabalho foi essencial para o reconhecimento das estruturas na Lagoa Vermelha por apresentar um amplo leque de fotos e descrições detalhadas. Apesar disso, há a necessidade de formulação de uma nomenclatura consolidada de traduções, pois por se tratar de um assunto inédito, não há um consenso nomenclatural entre os autores, já que diferentes autores usam denominações diversas de acordo com os objetivos de cada estudo.

É recomendado o estudo de estruturas microbianas tanto em ambientes deposicionais atuais, quanto em sucessões sedimentares, as quais evidenciam estruturas e porosidade complexas, como as do intervalo pré-sal.

Além do interesse para a indústria, pesquisas sobre *MISS* no registro geológico podem conduzir a importantes descobertas sobre a origem da vida no nosso planeta, já que microorganismos são capazes de habitar uma infinidade de ambientes, incluindo ambiente extremófilos, como no caso de lagoas hipersalinas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNS, C. H., BAUGET, F., LIMAYE, A., SAKELLARIOU, A., SENDEN, T. J., SHEPPARD, A. P., SOK, R. M., PINCZEWSKI, W. V., BAKKE, S., BERGE, L. I., ØREN, P. –E., KNACKSTEDT, M. A. 2005. Pore-scale characterization of carbonates using X-ray microtomography: *SPE Journal*, 10, 475-484.

ABED, R.M.M.; GOLUBIC, S.; GARCIA–PICHEL, F.; CAMOIN, G.F. & SPRACHTA, S. Characterization of microbialite-forming cyanobacteria in a tropical lagoon: Tikehau Atoll, Tuamotu, French Polynesia. *Journal Phycology*, 39:862-873, 2003.

AVALONE, C.M.K. Estruturas sedimentares microbianas em arenitos da formação sergi (jurássico), Bacia do Recôncavo. 2013, 77p, Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARBIÉRE, E., COE NETO, R. 1999. Spatial and temporal variation of rainfall of the East Fluminense Coast and Atlantic Serra do Mar, state of Rio de Janeiro, Brazil. In: Knoppers, B., Bidone, E.D., Abrão, J.J. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems of Rio de Janeiro, Brazil*. FINEP (Série Geoquímica Ambiental 6), Rio de Janeiro, 25–46

BLACK, M. 1933. The algal sediments of Andros Island, Bahamas. *Philosophical Transactions Royal Society*, 222 (Series B): 165-192,

BOTTJER, D.; HAGADORN, J.W. 2007. Mat Features in Sandstone: Mat Growth Features. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU (eds) *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. *Atlases in Geoscience 2*. Elsevier, Amsterdam, 2007, pp.53-71

Coe Neto, R. 1984. Algumas considerações sobre a origem do sistema lagunar de Araruama. In: *SIMPÓSIO DE RESTINGAS BRASILEIRAS*, 1984. Anais, Rio de Janeiro, p. 61-63.

COSTERTON, J. W., GEESEY, G. G., CHENG, K. J. 1978. How bacteria stick. *Scientific American*, 238, 86-95.

COSTERTON, J. W., LEWANDOWSKI, Z., CALDWELL, D. E., KORBER, D.R. LAPPIN-SCOTT, H.M. 1995. Microbial biofilms. *Annual Review of Microbiology*, 49: 711-745

ERIKSSON, P.G.; SIMPSON, E.L.; ERIKSSON, K.A.; BUMBY, A.J.; STEYN, G.L.; SARKAR, S. 2000. Muddy Roll-up Structures in Siliciclastic Interdune Beds of the c.1.8 Ga Waterberg Group, South Africa. *Palaios*, v.15, pp. 177-183

FELDKAMP, L., DAVIS, L., & KRESS, J. 1984. Practical Cone-beam Algorithm. *Journal of the Optical Society American*, 1(6), 612-619

FLÜGEL, E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. 2 ed. Berlin: Springer, 2010, 641-656, ISBN 978-3-642-03795-5

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

GERDES, G. 2010. What are microbial mats? In: Seckbach J, Oren A (eds) *Microbial mats: modern and ancient microorganisms in stratified systems. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology* 14:5–25

GERDES, G., KRUMBEIN, W.E., REINECK, H.-E., 1985b. The depositional record of sandy, versicolored tidal flats (Mellum Island, southern North Sea). *J. Sediment. Petrol.* 55, 265–278.

GERDES, G., KRUMBEIN, W.E., NOFFKE, N. 2000. Evaporite microbial sediments, p. 196-208. In R. E. Riding and S. M. Awramik (ed.), *Microbial sediment*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

GOLUBIC, S., L. SEONG-JOO, K. M. BROWNE. 2000. Cyanobacteria: architects of sedimentary structures, p. 57-67. In R. E. Riding and S. M. Awramik (ed.), *Microbial sediments*. Springer-Verlag, Berlin, Germany

KRUMBEIN, W.E., 1983. Stromatolites – the challenge of a term in space and time. *Precambrian Res.* 20, 493–531

LIMA, I. *Quantificação Histomorfológica 2D a partir de Tomografia Computadorizada 3D*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

NOFFKE, N. 2007. Microbially induced sedimentary structures in Archean sandstones: A new window into early life. *Gondwana Research* 11, 336 – 342.

NOFFKE, N. 2010. *Geobiology. Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archaean Era to Today*. Springer, p.194.

NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T.H.; KRUMBEIN, W.E. 1996. Microbially induced sedimentary structures - examples from modern siliciclastic tidal at sediments. *Zentralbl. Geol. Palaont.*, pp. 307-316

NOFFKE, N., KNOLL, A.H., GROTZINGER, J.P., 2002. Sedimentary controls on the formation and preservation of microbial mats in siliciclastic deposits: a case study from the Upper Neoproterozoic Nama Group, Namibia. *Palaios* 17, 533–544

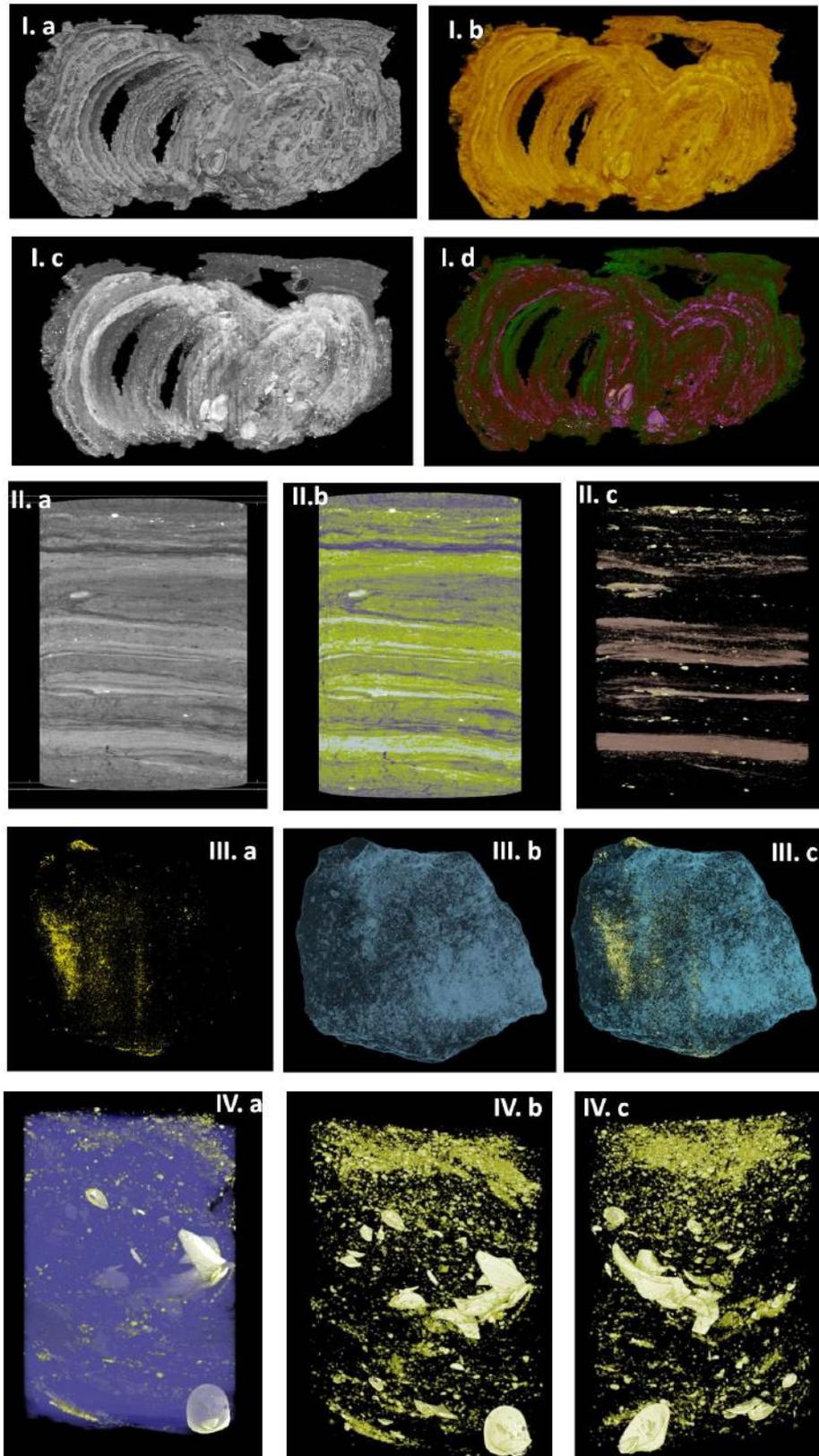
NOFFKE, N., GERDES, G., KLENKE, T., 2003b. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). *Earth-Sci. Rev.* 62,163–176.

- NOFFKE, N., BEUKES, N., HAZEN, R., 2006a. Spatial and temporal distribution of microbially induced sedimentary structures: a case study from siliciclastic storm deposits of the 2.9 Ga old Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Res.* 146, 35–44.
- O'TOOLE, G., KAPLAN, H.B., KOLTER, R. 2000. Biofilm formation as microbial development. *Annual Review of Microbiology*, 54: 49-79.
- PATERSON, D.M. AND BLACK, K. 2000. Siliciclastic intertidal microbial sediments, In: R. Riding and S.M. Awramik (eds.) *Microbial Sediments*. Springer, Heidelberg, pp. 76–83
- PENHA, H.M. 1999. A Synthesis of geology of the east fluminense coast, state of Rio de Janeiro, Brazil. In: *Environmental Microbiology*, 3(2): 123-130.
- PIERSON, B., OESTERLE, A. AND MURPHY, G. L. 1987. Pigments, light penetration, and photosynthetic activity in the multi-layered microbial mats of Great Sippewissett Salt Marsh, Massachusetts. *FEMS Microbiology Letters*, 365-376.
- PORADA, H.; BOUOUGRE, E. 2007. Wrinkle Structures – a critical review. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE,S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU (eds) *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. *Atlases in Geoscience 2*. Elsevier, Amsterdam, 2007, pp. 39-52.
- PORADA, H., BOUOUGRI, E., GHERGUT, J. 2007. Hydraulic conditions and mat-related structures in tidal flats and Coastal sabkhas. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE,S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU (eds) *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. *Atlases in Geoscience 2*. Elsevier, Amsterdam, 2007, pp. 258-266..
- REINECK, H.-E., GERDES, G., CLAES, M., DUNAJTSCHIK, K., RIEGE, H., KRUMBEIN, W.E., 1990. Microbial modification of sedimentary surface structures. In: Heling, D., Rothe, P., Förstner, U., Stoffers, P. (Eds.), *Sediments and Environmental Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 254–276.
- REMEYSEN, K., SWENNEN, R. 2008. Application of Microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations. *Marine and Petroleum Geology*, 25, 486-499.
- RIDING, R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial – algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47: 79-214.
- SCHIEBER, J., 1998a. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, USA. *Sediment. Geol.* 120, 105–124.
- SCHIEBER, J., 1999. Microbial mats in terrigenous clastics: the challenge of identification in the rock record. *Palaios* 14, 3–12.

- SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU, O. 2007a. Prologue: An introduction to microbial mats. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU (eds) Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record. Atlases in Geoscience 2. Elsevier, Amsterdam, 2007, pp. 1-3.
- SILVA E SILVA, L.H., ALVES, S.A.P.M.N., IESPA, A.A.C., M. D. IESPA, C.M.D. 2007. Incidência de cianobactérias em estruturas estromatolíticas biscuit na Lagoa Vermelha, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de Geologia*, 20: 33-38.
- SPADAFORA, A., PERRI, E., MCKENZIE, J.A. AND VASCONCELOS, C. 2010. Microbial biomineralization processes forming modern Ca:Mg carbonate stromatolites. *Sedimentology*, v. 57, no. 1, p. 27-40.
- STOLZ J.F., BOTKIN D.B., DASTOOR, M.N. 1989. The integral biosphere. In: Rambler MB, Margulis L, Fester R (eds) *Global ecology: towards a science of the biosphere*. Academic Press, San Diego, pp 31-50.
- STOLZ, J. F. 2000. Structure of microbial mats and biofilms, p. 1-8. In R. E. Riding and S. M. Awramik (ed.), *Microbial sediment*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- SUGUIO, K., MARTIN, L., BITENCOURT, A.C.SP., DOMINGUEZ, J.M.L., FLEXOR, J.M., AZEVEDO, A.E.G. 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(4): 273-286.
- TERRA, G.J.S., SPADINI, A. R., FRANÇA, A.B., SOMBRA, C.L., ZAMBONATO, E.E., JUSCHAKS, L.C.S., ARIENTI, L.M., ERTHAL, M.M., BLAUTH, M., FRANCO, M.P., MATSUDA, N.S., SILVA, N.G.C., MORETTI JUNIOR, P.A., D'AVILA, R.S.F., SOUZA, R.S., TONIETTO, S.N., ANJOS, S.M.C., CAMPINHO, V.S., WINTER, W.R. 2009. Classificação das rochas carbonáticas aplicada às bacias sedimentares brasileiras, *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio De Janeiro, 18 (1): 9-29.
- TURCQ, B.; MARTIN, L.; FLEXOR, J. M.; SUGUIO, K.; PIERRE, C., TASAYCO-ORTEGA, L. 1999. Origin and evolution of quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, state of Rio de Janeiro, Brazil. In: Knoppers, B. A.; Bidone, E. D.; J. J. Abrão (eds) *Environmental Geochemistry of coastal lagoon system of Rio de Janeiro, Brazil*. Universidade Federal Fluminense/Programa de Geoquímica Ambiental
- UMBAUGH, S. E., 2005. *Computed Imaging*. CRC Press Publisher, USA.
- VAN GERMENDEN, H. 1993. Microbial mats: A joint venture. *Marine Geology*, Elsevier, 113, 3-25.
- VASCONCELOS, C., MCKENZIE, J.A., BERNASCONI, S., GRUJIC, D., TIEN, A.J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for dolomite formation. *Nature*, 377, 220-222.

VASCONCELOS, C., R. WARTHMAN, J.A. MCKENZIE, P.T. VISSCHER, A.G. BITTERMANN, Y. VAN LITH. 2006. Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern precambrian relics? *Sedimentary Geol.* 185:175-183.

## ANEXO 1



**Figura 1** - Modelos 3D das amostras analisadas. (I) Estromatólito, (II) Biolaminito (III) Estromatólito Biscuit e (IV) Matéria Orgânica.