

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise de fácies e sua ciclicidade

Nesse capítulo serão apresentados os resultados da análise de fácies para as rochas carbonáticas da Formação Barra Velha na área de estudo. Tal análise envolveu a descrição macroscópica e microscópica de testemunhos e amostras laterais de quatro poços, buscando a caracterização de seus constituintes, texturas e estruturas sedimentares. As feições diagenéticas serão detalhadas em capítulo específico.

#### 5.1.1 Classificações adotadas

Neste trabalho, algumas classificações de rochas carbonáticas foram adotadas para nomear os carbonatos da Formação Barra Velha.

A referência principal utilizada foi a classificação de Dunham (1962) (Figura 14). Porém, essa proposta sozinha não foi suficiente para a devida classificação das fácies observadas. Assim, para as rochas cujos elementos não foram ligados durante a deposição, com no mínimo 10% de grãos maiores do que 10 mm, a classificação de Embry & Klovan (1971) foi utilizada (Figura 15). Da classificação de Terra *et al.* (2010) foi empregado o termo “esferulitito” para classificar as rochas constituídas predominantemente por esferulitos (partículas de formas esféricas ou subesféricas de contornos lisos ou lobados, de tamanho geralmente inferior a 2 mm), cujos elementos tiveram crescimento *in situ* (Figura 17). Por fim, optou-se por usar o termo laminito (modificado de Demicco & Hardie, 1994) para as rochas carbonáticas de granulometria fina formada pela recorrência de laminações micríticas delgadas. São denominadas “laminito liso”, quando as laminações são plano-paralelas, com superfície lisa, e “laminito crenulado”, quando as laminações são crenuladas.

Para o tamanho das partículas, foi empregada a classificação granulométrica de Wentworth-Udden (1922a), que é apresentada na Tabela 4. A única exceção se deu para os

*shrubs*, onde foi utilizada uma classificação de tamanho (muito pequeno, pequeno, médio e grande) derivada da proposta de Terra *et al.* (2010), como mostrado na Tabela 5.

Tabela 4 - Escala granulométrica de Wentworth-Udden (1922)

Escala Granulométrica de Wentworth-Udden (1922a)				
Intervalo granulométrico (mm)	Classificação Nominal			
	Proposição original (inglês)		Tradução usual (português)	
>256	GRAVEL	Boulder	CASCALHO	Matacão
256-64		Cobble		Bloco ou calhau
64-4.0		Pebble		Seixo
4.0-2.0		Granule		Grânulo
2.0-1.0	SAND	Very coarse sand	AREIA	Areia muito grossa
1.0-0.5		Coarse sand		Areia grossa
0.5-0.250		Medium sand		Areia média
0.250-0.125		Fine sand		Areia fina
0.125-0.062		Very fine sand		Areia muito fina
0.062-0.031	SILT	Coarse silt	SILTE	Silte grosso
0.031-0.016		Medium silt		Silte médio
0.016-0.008		Fine silt		Silte fino
0.008-0.004		Very fine silt		Silte muito fino
<0.004	CLAY	Clay	ARGILA	Arugila

Fonte: Modificado de Giannini ; Ricomini, 2000.

Tabela 5: Classificação de tamanho do constituinte *Shrub*

Classificação de Tamanho dos Shrubs (Modificado de Terra <i>et al.</i> , 2010)	
Tamanho (cm)	Classificação Nominal
<0.2	Muito Pequeno
0.2-0.5	Pequeno
0.5-1.5	Médio
>1.5	Grande

Fonte: Modificado de Terra *et al.* (2010).

### 5.1.2 Principais constituintes identificados

A análise macroscópica e microscópica dos testemunhos e amostras laterais permitiu a identificação dos principais constituintes das rochas carbonáticas da Formação Barra Velha, sendo eles: *shrubs* (Figura 63-1) e esferulitos calcíticos (Figura 63-2). Como material de granulometria fina, são observadas principalmente laminações de composição micrítica (Figura 63-3) e matriz composta por argilominerais magnesianos (Figura 63-4). Também ocorrem, em menor abundância, pelóides (Figura 64-1), litoclastos vulcânicos (Figura 64-2), oncóides (Figura 64-3), bioclastos (ostracodes (Figura 64-5) e fragmentos fosfáticos (Figura 64-6)) e grãos siliciclásticos de tamanho areia muito fina a silte (Figura 64-4). Serão descritas a seguir as características chave dos constituintes supracitados, que serviram como guia para sua identificação, e para a posterior classificação em fácies sedimentares.

*Shrubs*: São agregados calcíticos fibrosos, de textura microscópica do tipo fascicular-óptica (*sensu* Kendall, 1977). Ocorrem como crescimentos verticais a subverticais, com tamanhos de 1 mm a 20 mm (muito pequeno a grande) em seu maior comprimento. O tamanho médio desses constituintes nos intervalos aqui estudados variou entre 2 mm até 15 mm (pequeno a médio). Os *shrubs* ocorrem em diferentes formatos, principalmente em relação à razão altura/largura, podendo ser arredondado (quando sua razão altura/largura é de aproximadamente 1:1), ou com altura maior que a sua largura, lembrando arborescências (Figura 63-1). Observados em MEV, pode-se notar que os mesmos são, em geral, microporosos, e que sua textura fascicular-óptica é constituída pelo alinhamento de cristais nanométricos de calcita (Figura 65-3/4), sem nenhuma evidência de dissolução ou ocorrência de neomorfismo, o que evidencia que sua mineralogia original não foi alterada. São muito semelhantes aos *shrubs* cristalinos descritos por Chafetz & Guidry (1999), interpretados como precipitados predominantemente químicos, associados a ambientes supersaturados em relação ao carbonato de cálcio, e com altas taxas de perda de CO<sub>2</sub>, o que propicia altíssimas taxas de precipitação. *Shrubs* também constituem intraclastos, compondo a maior parte das rochas carbonáticas alóctones (*grainstones* e *rudstones*).

*Esferulitos*: Constituem agregados fibrosos de calcita, com formato esférico a subsféricos e contornos lisos ou lobados. Sob luz polarizada, apresentam extinção em formato de cruz (Figura 63-2). O tamanho dos esferulitos variou entre 0,5 mm e 2 mm (granulometria

entre areia grossa e areia muito grossa), com maior frequência entre 0,5 mm e 1 mm (granulometria areia grossa). Em seu núcleo, é comum observar pequenas cavidades (Figura 66), por vezes preenchidas por quartzo. Geralmente tem bordas dolomitizadas e por vezes apresentam graus variados de silicificação. Assim como os *shrubs*, a observação dos esferulitos em MEV mostra que os mesmos, por vezes, são microporosos, com sua textura fibrosa sendo gerada pelo alinhamento de cristais nanométricos de calcita, sem nenhuma evidência de dissolução ou ocorrência de neomorfismo (Figura 65-1/2). Ocorrem também crescimentos assimétricos de esferulitos, cuja textura é semelhante a fascicular-óptica dos *shrubs*, mas ainda mantendo a característica extinção em cruz dos esferulitos. Assim, há uma indicação de que ocorra uma transição contínua entre esferulitos e *shrubs* (essa questão será discutida posteriormente). Assim como os *shrubs*, os esferulitos também ocorrem como intraclastos nas rochas carbonáticas alóctones (*grainstones* e *rudstones*).

*Laminações micríticas*: Laminações de estrutura lisa ou crenulada (Figura 63-3), constituídas por micrita (*sensu* Dunham, 1962). Essas laminações são comumente associadas a níveis crostiformes (níveis compostos por *shrubs* amalgamados) e também a níveis esferulíticos.

*Argilominerais magnesianos*: Constituem agregados maciços ou laminados, de coloração acastanhada (Figura 63-4). São abundantes nos poços B, C e D, mas restritos a um único intervalo, que é bem marcado pelo perfil NMR (porosidades dos tipos *freefluid* e efetiva muito baixas e altos valores de porosidade total), como pode ser visto na Figura 60. São extremamente raros no poço A, sendo observados apenas alguns fragmentos reliquiais. A mineralogia desses argilominerais não pode ser verificada, já que não foram realizadas análises de difratometria de raios x.

*Pelóides*: São grãos de composição micrítica, sem estrutura interna (Figura 64-1).

*Litoclastos vulcânicos*: Constituem-se em fragmentos de rochas vulcânicas, provavelmente de composição basáltica, com granulometria variando entre areia média a areia muito grossa. Macroscopicamente tem coloração preta a levemente esverdeada. Microscopicamente, são opacos, mas em alguns casos pode-se observar neles cristais prismáticos incolores de plagioclásio (Figura 64-2).

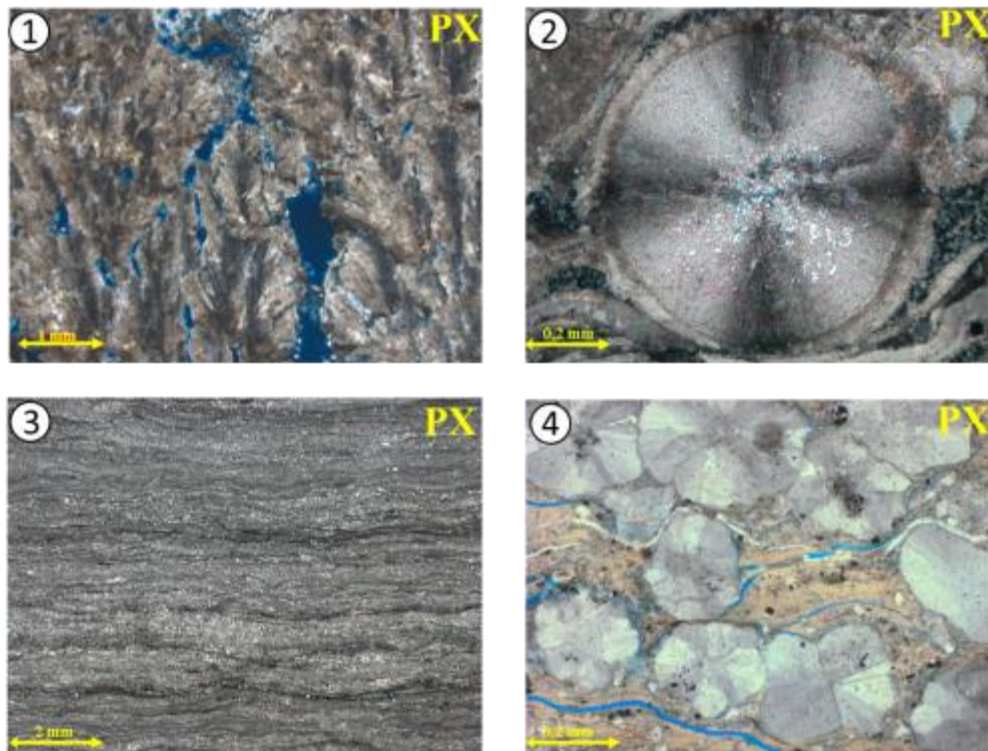
*Oncóides*: São grãos que apresentam envelopes concêntricos, descontínuos de composição micrítica, em torno de um núcleo composto por fragmentos de esferulitos ou de

*shrubs* (Figura 64-3). Por vezes, o núcleo dos oncóides não é reconhecível, pois foi totalmente dissolvido. Apresentam granulometrias de areia muito grossa a grânulo.

*Bioclastos*: São pouco frequentes nas rochas descritas, e constituem-se basicamente em ostracodes e fragmentos fosfáticos. Os ostracodes tem granulometria entre areia fina e areia média. Na maior parte das vezes ocorrem articulados (Figura 64-5). Já os bioclastos fosfáticos (Figura 64-6) são fragmentos ósseos, com diversos tamanhos e formatos geralmente alongados (vértebras). São provavelmente restos de esqueletos de peixes, já que foram observados nos testemunhos fósseis bem preservados dos mesmos.

*Grãos siliciclásticos*: São compostos por fragmentos de quartzo, feldspato e micas de granulometria silte a areia muito fina (Figura 64-4).

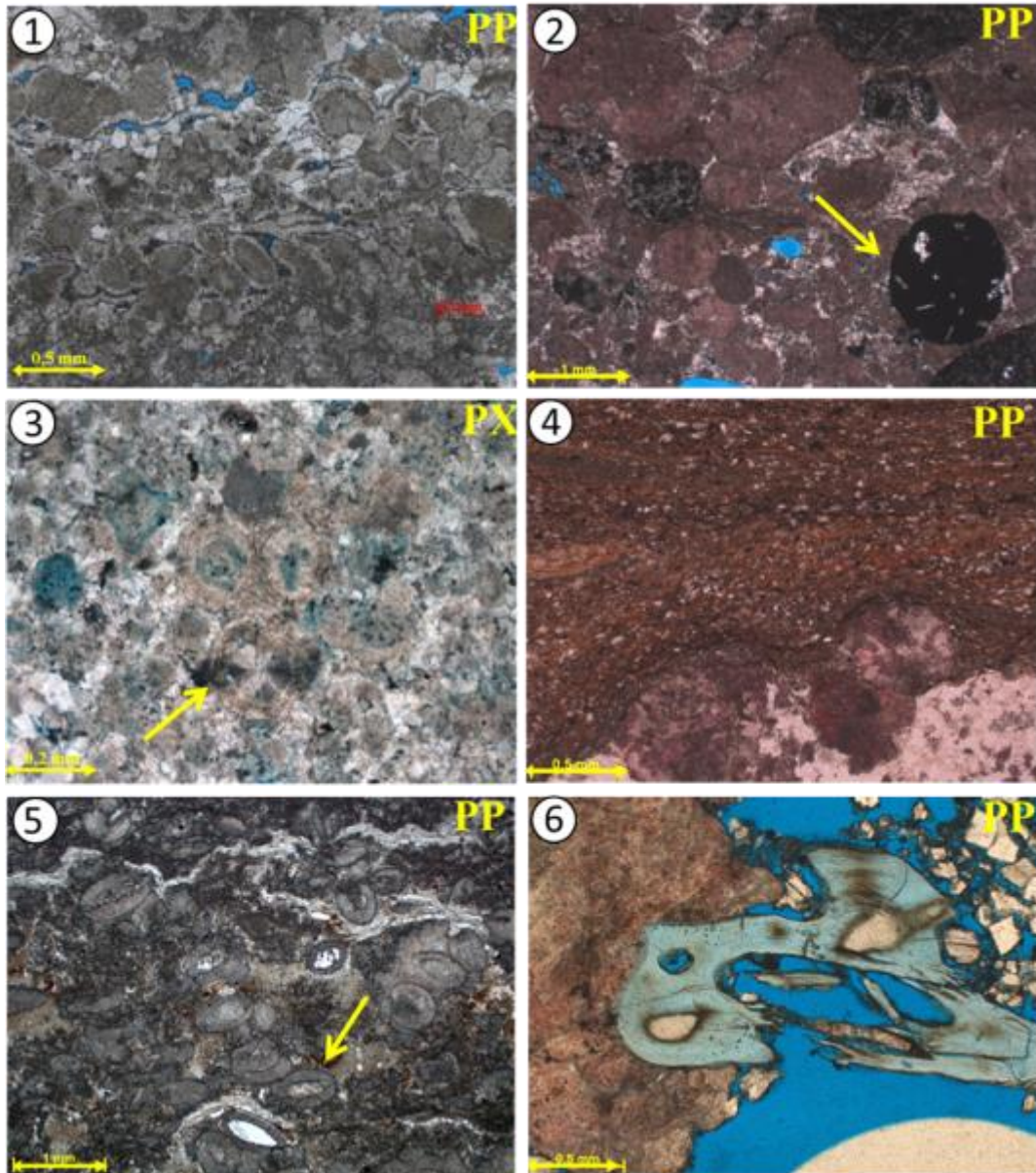
Figura 63 - Principais constituintes das rochas carbonáticas da Formação Barra Velha



Legenda: 1) agregados calcíticos fibrosos com textura fascicular-óptica (*Shrubs*). Fotomicrografia com PX; 2) agregado esférico fibroso de calcita (esferulito). Notar extinção radial em forma de cruz e núcleo silicificado. Fotomicrografia com PX; 3) laminações micríticas lisas. Fotomicrografia com PX; 4) matriz maciça, acastanhada, composta por argilominerais magnesianos. Fotomicrografia com PX.

Fonte: A autora, 2018.

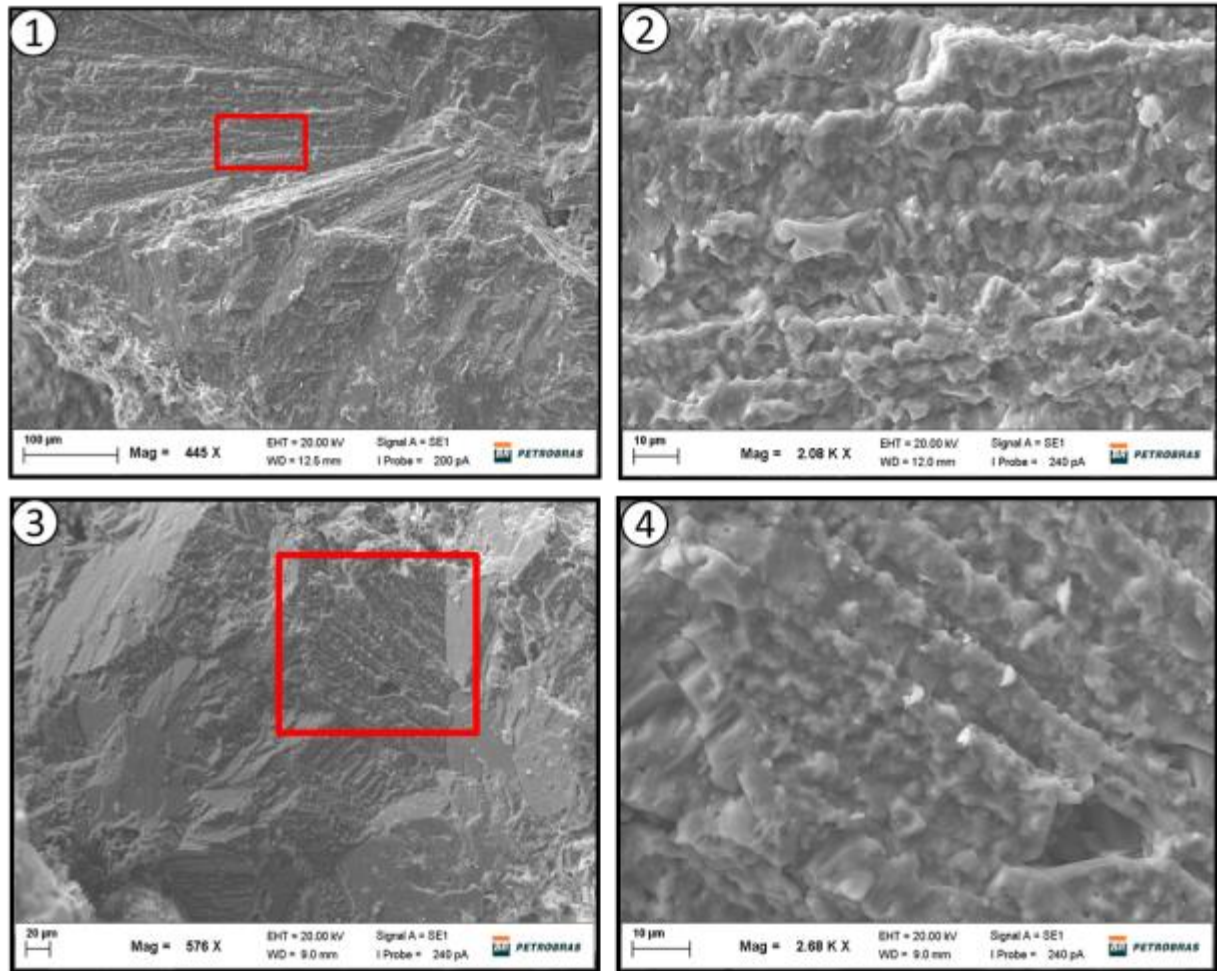
Figura 64 - Constituintes menos frequentes das rochas carbonáticas da Formação Barra Velha



Legenda: 1) grãos de composição micrítica, sem estrutura interna (pelóides). Notar imbricação dos grãos. Fotomicrografia com PP; 2) litoclastos vulcânicos. Notar presença de minerais prismáticos dentro dos fragmentos (seta). Fotomicrografia com PP. 3) oncóides com núcleos dissolvidos e com fragmento de esferulito como núcleo (seta). Fotomicrografia com PP; 4) grãos siliciclásticos de granulometria silte associados a uma matriz de argilominerais magnesianos e micrita. Fotomicrografia com PP; 5) carapaças articuladas de ostracodes. Fotomicrografia com PP. 6) fragmento fosfático. Fotomicrografia com PP.

Fonte: A autora, 2018.

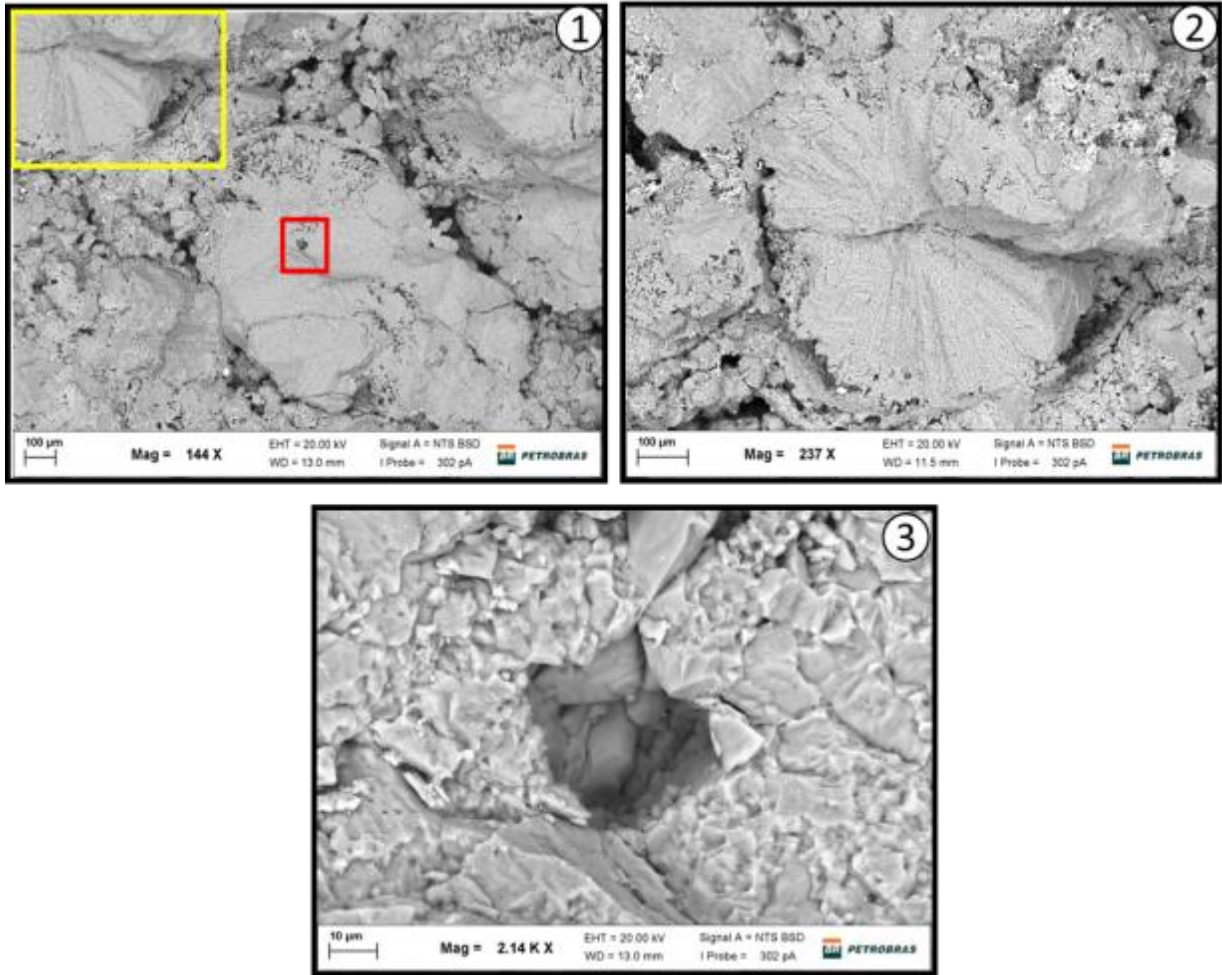
Figura 65 - Imagens em MEV (BEI) das texturas dos esferulitos e *shrubs*



Legenda: 1) Textura fibrosa radial do esferulito; 2) detalhe da imagem 1 (localização em vermelho). Notar que a textura fibrosa se dá pelo alinhamento de cristais de calcita. 3) textura fascicular-óptica em um *shrub*; 4) detalhe da imagem 3 (localização indicada em vermelho). Notar que a textura fascicular-óptica (observada em lâmina petrográfica) também se dá pelo alinhamento de cristais de calcita.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 66 - Imagens em MEV (BEI) de esferulitos



Legenda: 1) localização das imagens (2), em amarelo, e (3), em vermelho. 2) detalhe de um esferulito e de sua textura fibrosa radial; 3) detalhe de cavidade que ocorre no núcleo do esferulito. Notar que não há sinais de corrosão.

Fonte: A autora, 2018.

### 5.1.3 Descrição e interpretação das fácies sedimentares

Foram definidas 15 fácies sedimentares que podem ser agrupadas em 4 grandes grupos: 1) fácies carbonáticas autóctones cristalinas; 2) fácies carbonáticas autóctones micríticas; 3) fácies carbonáticas alóctones com matriz micrítica; 4) fácies carbonáticas alóctones sem matriz. Tais grupos e as fácies que os compõem são descritos a seguir, e são resumidos na Tabela 6.



### 5.1.3.1 Fácies carbonáticas autóctones cristalinas

Esse grupo engloba as rochas carbonáticas cujo arcabouço é formado por agregados calcícticos cristalinos (*shrubs* e esferulitos), e cuja precipitação ocorreu *in situ*. As fácies desse grupo são as mais frequentes na área de estudo, e incluem: esferulitito (ESF); esferulitito com matriz de argilominerais magnesianos (ESF.arg); *shrubby boundstone* (SB); heterolito de esferulitito e *shrubby boundstone* (HESF/SB).

#### 5.1.3.1.1 Esferulitito (ESF) e Esferulitito com matriz de argilominerais magnesianos (ESF.arg)

Essas fácies são constituídas majoritariamente por crescimentos *in situ* de esferulitos calcícticos, os quais podem estar associados a uma matriz composta por argilominerais magnesianos (ESF.arg), ou não (ESF).

Macroscopicamente, a fácies ESF tem estrutura levemente laminada a maciça (Figura 68-3/4), com coloração creme clara. A densidade e o tamanho dos esferulitos variam ao longo dos intervalos onde ocorre esta fácies (Figura 68-2), sendo observado um aumento progressivo do tamanho dos mesmos em direção ao topo da seção, muitas vezes culminando com um nível composto por *shrubs*. Níveis estratiformes e nódulos de quartzo são comuns, frequentemente deformando a laminação (Figura 68-1). Intercalações com lâminas de composição micrítica também são frequentes. A fácies ESF ocorre em abundância em todos os testemunhos estudados, com espessuras de camada entre 5 cm e 2 m.

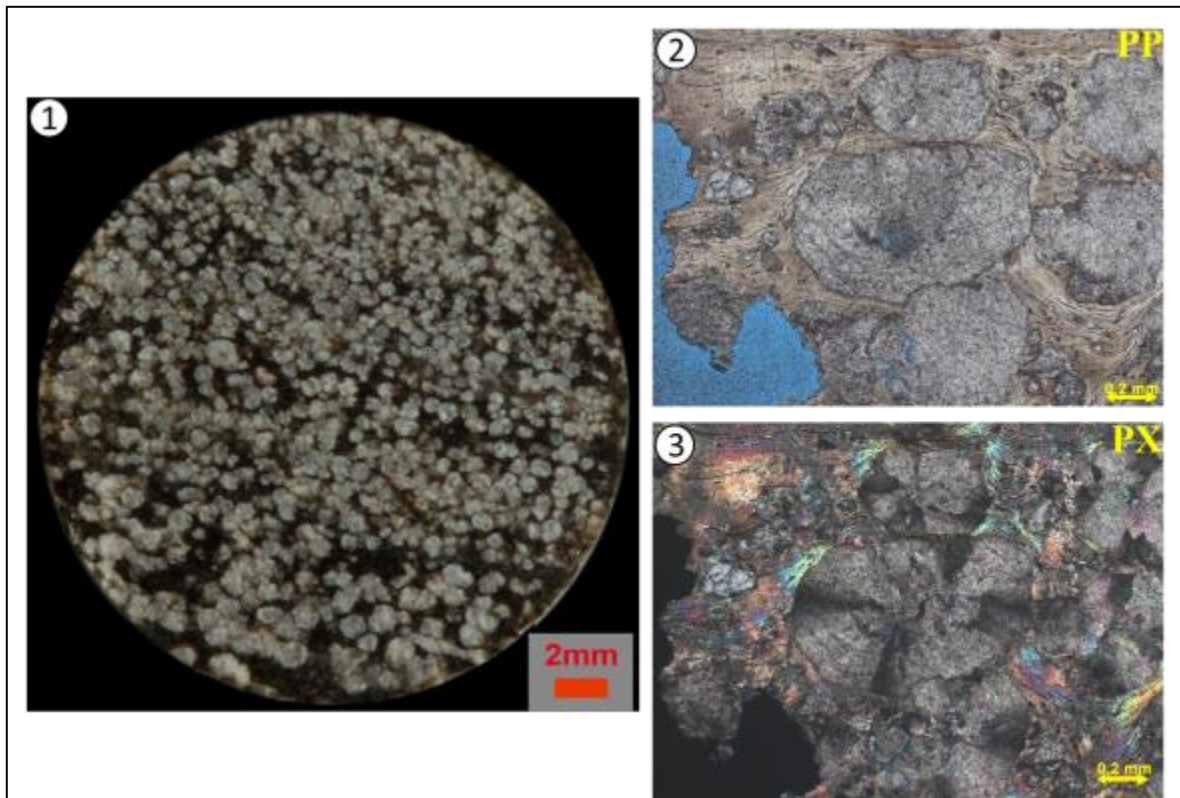
Já a fácies ESF.arg tem laminação mais bem definida, e coloração acastanhada escura a esverdeada (Figura 67-1). Essa fácies é rara no poço A, e ocorre em intervalos não testemunhados nos demais poços (B, C e D), cuja resposta no perfil de RMN é típica e bem marcada. Portanto, não foi possível observar sua organização vertical, mas infere-se que a mesma deva ser similar a observada na fácies ESF.

Microscopicamente, ambas as fácies são muito semelhantes, sendo distinto apenas o tipo de material presente entre os esferulitos. Na fácies ESF, os esferulitos normalmente são envolvidos por cristais de dolomita com morfologia lamelar (finos cristais alinhados segundo uma direção, em geral do acamamento) e romboédrica (euédrica a subédrica), entre os quais muitas vezes ocorre sílica criptocristalina e quartzo microcristalino, além de localmente pequena quantidade de magnesita e outros minerais traço (Figura 69-1/2). O espaço entre os esferulitos também pode estar vazio, ou pouco preenchido pelos minerais supracitados, nesse caso sendo uma rocha com boa qualidade permoporosa (Figura 69-5/6). O significado diagenético desses minerais será discutido posteriormente. Já na fácies ESF.arg, os esferulitos são englobados por uma matriz composta por argilominerais magnesianos, que pode ser maciça ou de aspecto lamelar. Associados a essa matriz, também são observadas algumas lamelas de composição dolomítica, dolomita romboédrica e grãos siliciclásticos tamanho silte (Figura 69-3/4). Ostracodes e fragmentos fosfáticos são frequentemente observados em ambas as fácies.

Quanto ao sistema poroso, a fácies ESF.arg são fechadas. Já a fácies ESF, frequentemente apresenta porosidades baixas dos tipos intercristalina e fenestral. No entanto, quando o espaço entre os esferulitos não é preenchido, pode apresentar altos valores de porosidade entre os esferulitos, que é análoga a porosidade interpartículas de Choquette & Pray (1997).

Em ambas as fácies, o material que ocorre entre os esferulitos se amolda aos mesmos (Figura 69), dando a impressão de que seu crescimento teria deslocado o sedimento ao seu redor, como proposto por Wright & Barnett (2015) e Herlinger Jr. *et al* (2017). No entanto, quando esse tipo de relação com o material intersticial ocorre, o contato entre os esferulitos tende a apresentar feições típicas de processos de compactação mais intensos, como contatos paralelos e côncavo-convexos (compactação mecânica), e contatos suturados (compactação química). Além disso, o material intersticial não ocorre entre os esferulitos compactados, ou parece estar comprimido entre eles (Figura 67). Assim, uma interpretação alternativa para difração da laminação ao redor dos esferulitos poderia ser a de que a mesma seria resultado da compactação diferencial do material intersticial (menos competente) em relação aos esferulitos (mais rígidos).

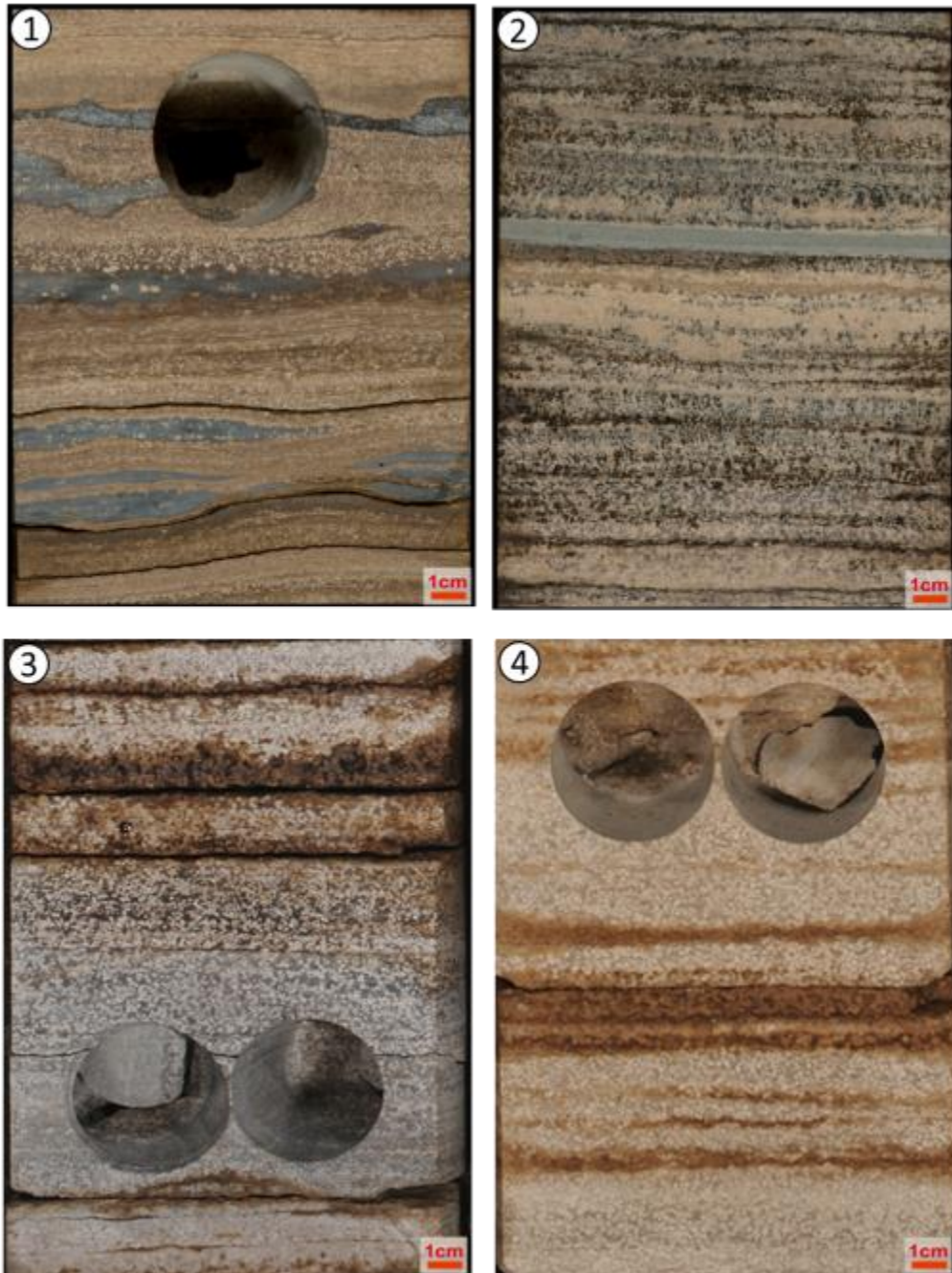
Figura 67 - Características gerais da fácies ESF.arg



Legenda: 1) aspecto macroscópico da fácies ESF.arg. Notar agregados esféricos de coloração creme (esferulitos) e matriz de coloração escura, composta por argilominerais magnesianos; 2) aspecto microscópico da fácies ESF.arg. Notar contatos plano-paralelos e côncavo-convexos dos esferulitos, indicando atuação de processos de compactação mecânica o material intersticial não ocorre entre os esferulitos compactados, ou parece estar comprimido entre eles. Fotomicrografia com PP; 3) mesma de 2, com PX. Notar birrefringência alta dos argilominerais magnesianos.

Fonte: A autora, 2018.

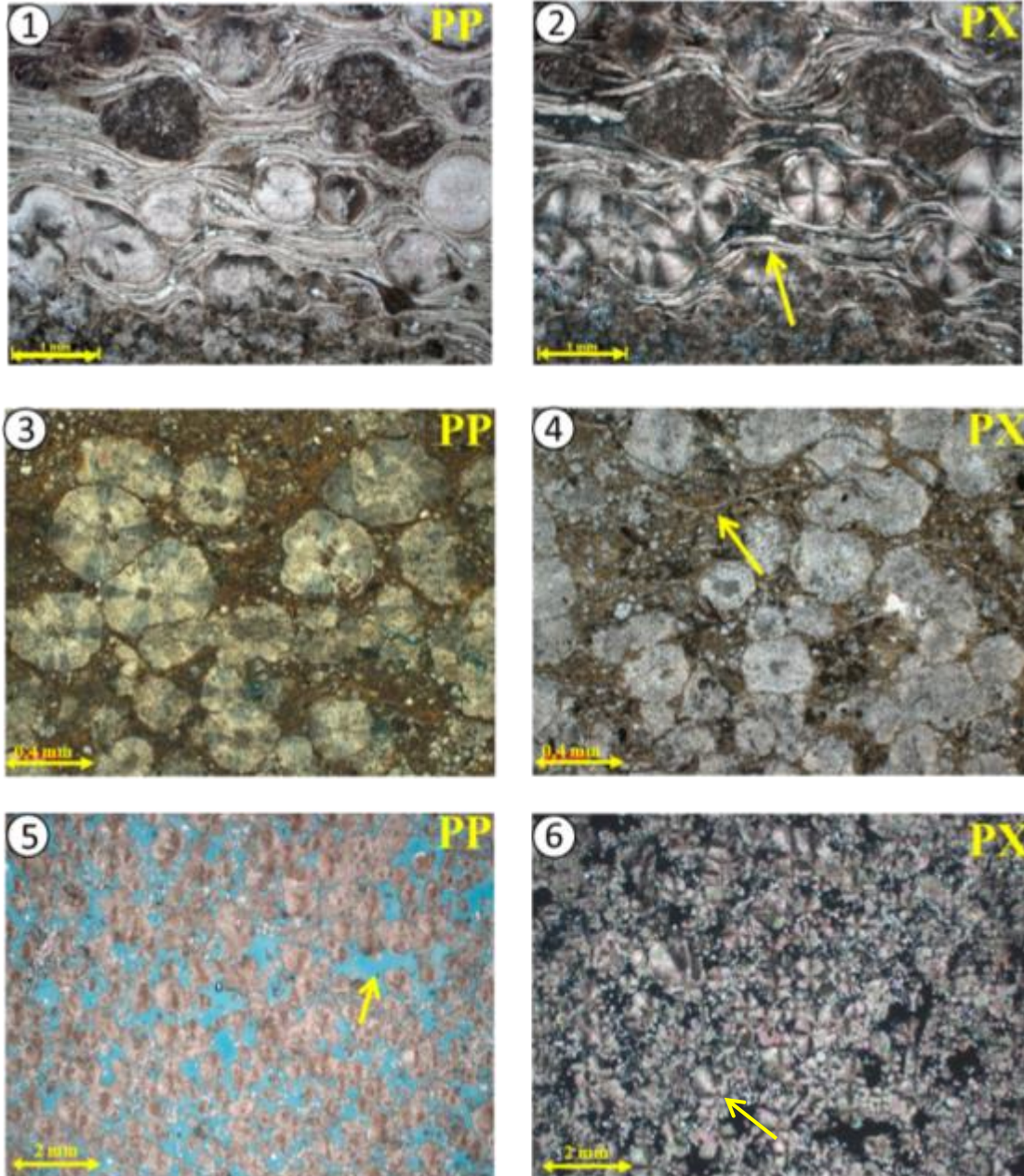
Figura 68 - Exemplos do aspecto macroscópico da fácies ESF:



Legenda: 1) ESF associado a nódulos e níveis estratiformes de quartzo; 2) níveis compostos por esferulitos mostrando diferentes graus de amalgamamento; 3) e 4) ESF levemente laminados.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 69 - Exemplos do aspecto microscópico das fácies ESF e ESF.arg



Legenda: 1) esferulitos envolvidos por cristais de dolomita lamelar, com quartzo microcristalino entre as lamelas. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, com PX; 3) esferulitos envolvidos por uma matriz de aspecto lamelar composta por argilominerais magnesianos. Fotomicrografia com PP; 4) mesmo de 3, com PX. Notar lamelas de composição dolomítica (seta amarela) e grãos siliciclásticos de tamanho silte associados à matriz argilosa; 5) fácies ESF com espaço entre os esferulitos poroso (seta amarela), contendo apenas poucos cristais de dolomita. Fotomicrografia com PP; 6) mesmo de 5, com PX. Notar que alguns esferulitos apresentam crescimento assimétrico (seta amarela).

Fonte: A autora, 2018.

As fácies (ESF e ESF.arg) provavelmente foram geradas em um contexto de baixa energia, já que apresentam estrutura predominantemente laminada, e geralmente se associam a carbonatos de composição micrítica, e, no caso da fácies ESF.arg, a matriz composta por argilominerais magnesianos.

A estrutura cristalina dos esferulitos calcíticos é indicativa de que os mesmos constituem precipitados predominantemente químicos. Contudo, Chafetz *et al.* (2017), estudando esferulitos provenientes de diferentes sistemas deposicionais (e.g travertinos, tufas e caliches) observaram que todos eles apresentam núcleos compostos por corpos de bactérias, biofilmes, e/ou EPS incrustados por calcita. Esses agregados apresentaram tamanhos entre 5 e 30  $\mu\text{m}$ . Assim, esses autores interpretam que o início da precipitação dos esferulitos se daria por indução microbiana, que atuaria como catalizadora para o início da precipitação do carbonato de cálcio. Rompida a barreira cinética inicial, a precipitação continuaria abioticamente, produzindo, assim, cristais bem formados, e com raros fósseis associados. Nas amostras analisadas por esse estudo não foram observadas evidências desse tipo de material nos núcleos dos esferulitos. Contudo, as cavidades que ocorrem nesses sítios têm tamanhos compatíveis aos observados pelos autores (cerca de 30  $\mu\text{m}$ ), e poderiam ter contido esse tipo de agregado orgânico, que é frágil e facilmente degradável. Portanto, interpreta-se que o modelo de precipitação supracitado provavelmente atuou na formação dos esferulitos na área de estudos.

O modelo proposto por Wright & Barnett (2015) e Herlinger Jr. *et al.* (2017) de que os esferulitos seriam resultado de um processo de substituição de depósitos compostos por argilominerais magnesianos não condiz com as seguintes observações: 1) argilominerais magnesianos não ocorrem como material intersticial na maior parte das amostras estudadas; 2) não foram observadas inclusões de argilominerais magnesianos nos esferulitos, nem mesmo na fácies ESF.arg; 3) como já discutido, a difração da laminação do material intersticial ao redor dos esferulitos pode ser resultado de um processo de compactação diferencial, e não necessariamente representa um deslocamento do sedimento pelo crescimento dos mesmos. Adicionalmente, trabalhos como os de Chekroun *et al.* (2004) e Mercedes-Martín (2016). demonstraram experimentalmente a nucleação de esferulitos em géis e mucilagens orgânicas em meio a esteiras microbianas. Portanto, a geometria lamelar do material intersticial, seja ele composto por

argilominerais magnesianos ou não, pode ser indicativa de que os esferulitos teriam sido precipitados nesse tipo de substrato.

Em suma, interpreta-se que as fácies ESF e ESF.arg tiveram origem com a precipitação bioinduzida de esferulitos em um substrato orgânico, próximos à interface com a água, provavelmente em períodos de clima árido, quando ocorre maior saturação da água do lago. Após a precipitação dos esferulitos, a mucilagem orgânica pode ter sido degradada, deixando o espaço entre os esferulitos vazio, ou pode ter sido mineralizada, sendo um sítio preferencial para a organomineralização influenciada de dolomita, sílica e argilominerais magnesianos.

#### 5.1.3.1.2 *Shrubby Boundstone* (SB)

Essa fácies é constituída predominantemente por crescimentos *in situ* verticais a subverticais de *shrubs*. Macroscopicamente, tem coloração creme clara, e apresentam estrutura de aspecto maciço a bandado, alternando níveis de *shrubs* com tamanhos, formas e densidades variadas (Figura 70-1/2/3). Diferentemente dos esferulitos, não só ocorre um aumento progressivo do tamanho dos *shrubs* em direção ao topo da seção, mas também é observada uma variação de seu formato, passando de uma geometria esférica (razão altura/largura de aproximadamente 1:1) para uma mais alongada na vertical, lembrando crescimentos arborescentes. Intercalações com níveis micríticos laminados e com camadas de ESF são frequentes. No topo do pacote é comum observar contatos abruptos com fácies carbonáticas finas (Figura 70-4), ou fácies retrabalhadas (Figura 71-3), nesse caso podendo gerar contatos erosivos. Feições de exposição também são eventualmente observadas, e consistem em gretas de contração e níveis dissolvidos/brechados. Por fim, ocorrem na fácies SB níveis silicificados e nódulos de quartzo, que deformam sua estrutura sedimentar.

A fácies SB é abundante em todos os poços estudados, apresentando espessuras de camada entre 5 cm e 4 m, sendo que as maiores espessuras ocorrem no poço A. A geometria dos pacotes variou entre tabular, tabular com topos sinuosos e dômica. Os domos de SB por vezes são muito semelhantes aos observados em estromatólitos (Figura 71), apresentando variações de

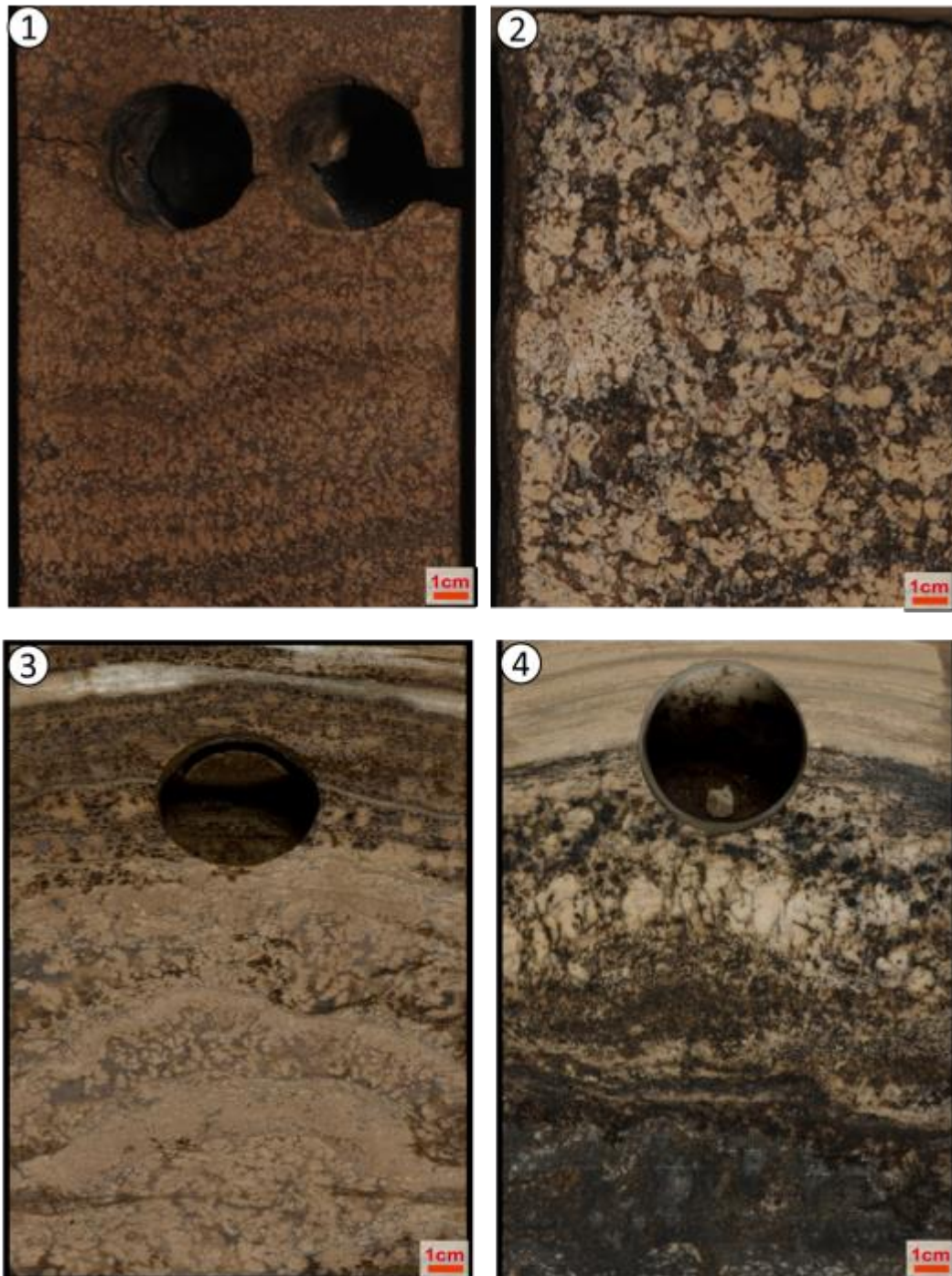
espessuras nas suas camadas internas ao longo da estrutura (camadas mais espessas nos flancos e menos espessas no topo). Portanto, a fácies SB muito provavelmente gerou relevos positivos, muito semelhantes a recifes, no substrato lacustre.

Microscopicamente, os *shrubs* ocorrem de forma mais ou menos amalgamada, sendo que esse fator é fundamental para a qualidade permoporosa da rocha. Em geral, o espaço entre os mesmos é pouco preenchido por romboedros de dolomita, que parecem “flutuar” nos poros (Figura 72-3/4), e raras lamelas de composição dolomítica. Por vezes, os *shrubs* apresentam-se parcialmente dissolvidos (Figura 72-5/6), e microfraturados. Esses processos diagenéticos parecem precoces, pois são sobrepostos por uma nova camada de *shrubs*, que não é afetada pelos mesmos, como será melhor discutido em capítulo específico. Ostracodes e fragmentos fosfáticos são bioclastos de presença comum nos poros da rocha, ou incrustados aos *shrubs*. Por fim, foi identificada, através de análise em MEV, a presença de estruturas alongadas, muito semelhantes a corpos de bactérias, incrustadas a um *shrub* (dentro de sua estrutura), como pode ser observado na Figura 73.

O tipo de porosidade mais comum da fácies SB ocorre entre os crescimentos de *shrub* (Figura 72-1/2), sendo semelhante à porosidade do tipo *growth framework* de Choquette & Pray (1997). Também é comum a ocorrência de porosidade dentro dos *shrubs*, primária (microporosidade) ou secundária, esta última gerada por dissolução (Figura 72-5/6), análoga à porosidade intrapartículas dos mesmos autores.



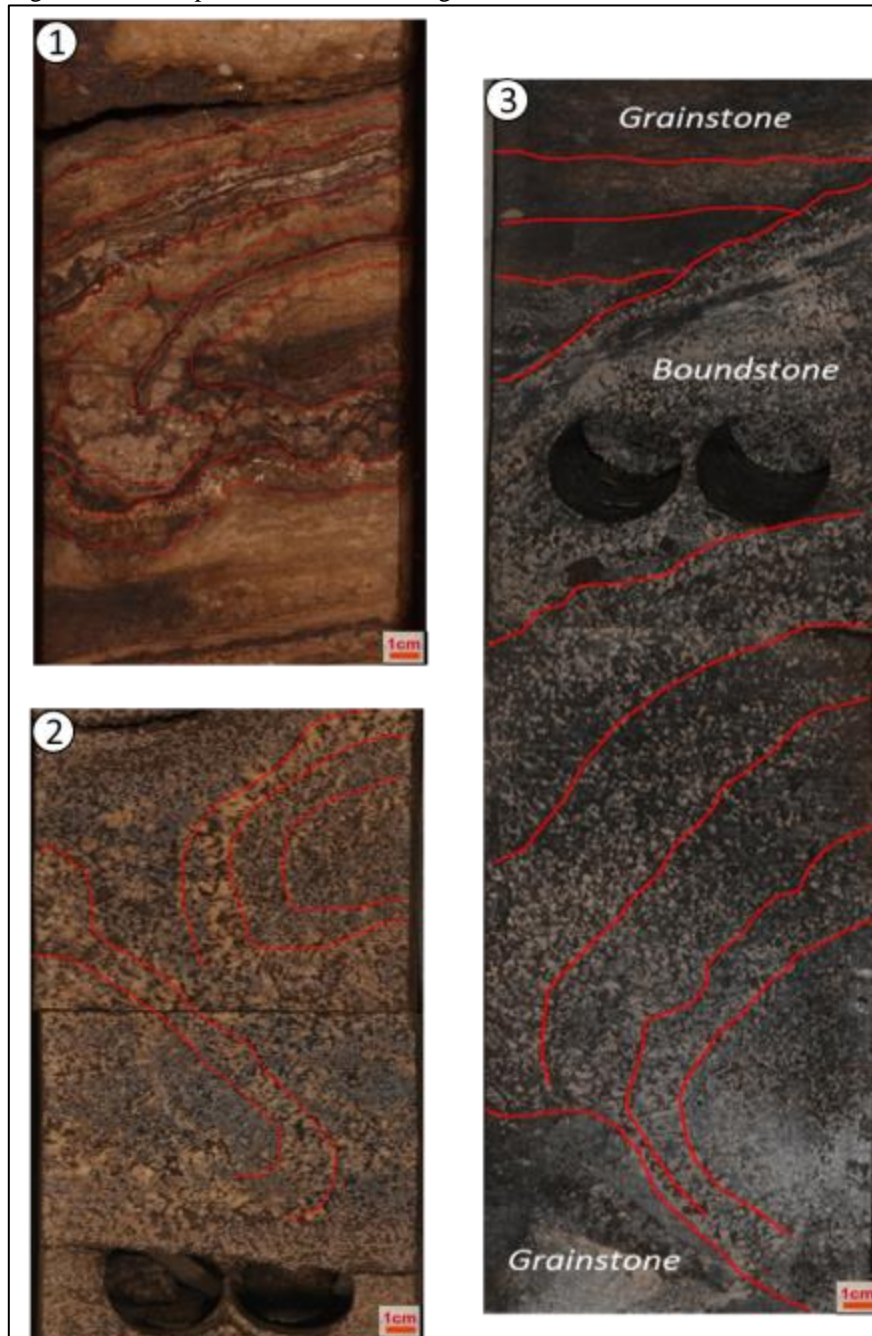
Figura 70 - Exemplos do aspecto macroscópico da fácies SB



Legenda: 1) SB de aspecto bandado e geometria externa tabular, com topos sinuosos. Notar tamanho pequeno dos *shrubs*; 2) SB de aspecto maciço. Notar tamanho médio dos *shrubs*; 3) SB com geometria dômica. Notar variação no tamanho dos *shrubs* e na densidade dos mesmos em cada camada. 4) contato abrupto da fácies SB e fácies carbonáticas fina (laminito liso).

Fonte: A autora, 2018.

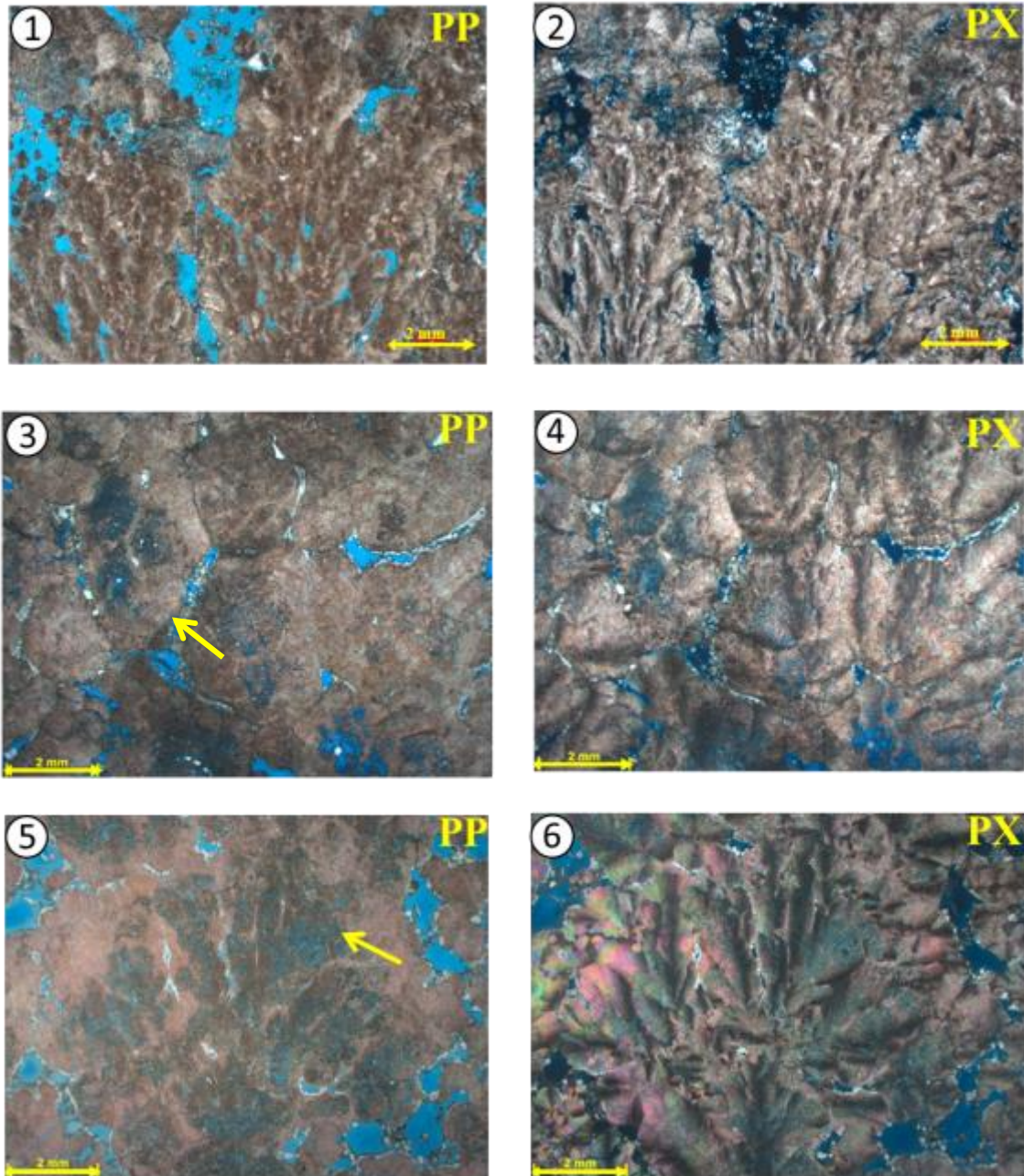
Figura 71 - Exemplos da fácies SB com geometria dômica



Legenda: 1) domo composto por camadas de SB intercaladas a níveis micríticos laminados. Notar as variações de espessuras nas camadas internas ao longo da estrutura (camadas mais espessas nos flancos e menos espessas no topo); 2) SB com geometria dômica; 3) SB com geometria dômica de grande porte, sotoposta ao nível de *grainstone*. Notar terminação em *onlap* do *grainstone* sobre a interface com SB.

Fonte: A autora, 2018.

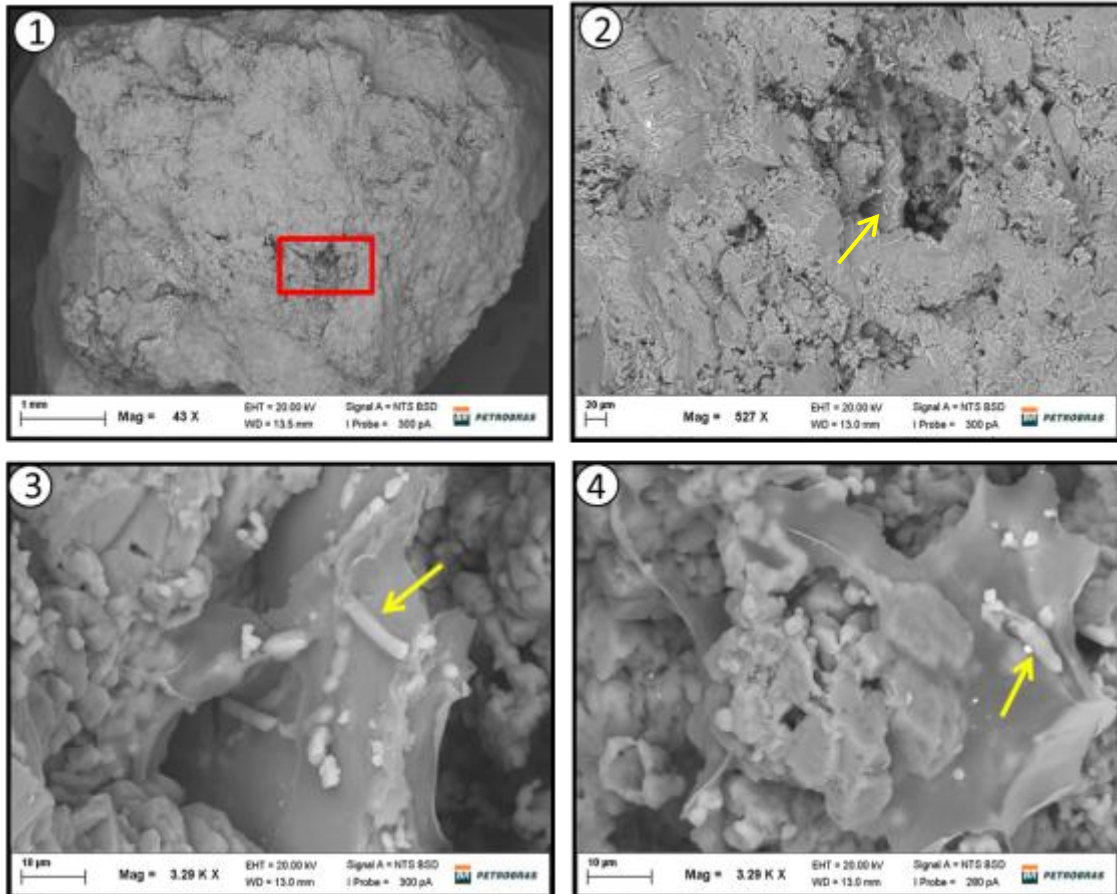
Figura 72 - Exemplos do aspecto microscópico das fácies SB



Legenda: 1) SB composto por shruvs alongados na vertical (altura maior do que sua largura), com aspecto arborescente. Notar porosidade alta entre os shruvs, semelhante a do tipo *growth framework*. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, com PX; 3) SB composto por *shruvs* de formato esférico (razão largura/altura próxima a 1:1). Notar pequenos cristais de dolomita que parecem “flutuar” nos poros (seta). Fotomicrografia com PP. 4) mesmo de 3, com PX; 5) *Shruvs* parcialmente dissolvidos (seta amarela). Notar que nível superior não é afetado. Fotomicrografia com PP. 6) mesmo de 5, com PX.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 73 - Imagens em MEV (BEI) de estruturas alongadas, semelhantes a corpos de bactérias, associadas a um *shrub*.



Legenda: 1) Localização da imagem 2, em vermelho; 2) shrub apresentando estruturas alongadas (seta); 3) e 4) Detalhe da imagem 2, mostrando estruturas alongadas, semelhantes a corpos de bactérias, incrustadas ao *shrub* (seta).

Fonte: A autora, 2018.

A fácies SB, dada a sua frequente associação com rochas retrabalhadas sem matriz, como *grainstones* e *rudstones*, provavelmente foi precipitada em um ambiente de moderada a alta energia. A semelhança entre os *shrubs* que constituem essa fácies e os *shrubs* cristalinos descritos por Chafetz & Guidry (1999), sugere que os mesmos foram gerados por precipitação predominantemente abiótica, associada a ambientes supersaturados em relação ao carbonato de cálcio, alcalinos e com altas taxas de perda de CO<sub>2</sub>. Todavia, a geometria predominantemente dômica desses precipitados, que exibem uma organização das camadas internas muito semelhante a estromatólitos, pode significar que haja uma influência microbial na gênese desses depósitos. Intercalações de camadas compostas por *shrubs* e níveis micríticos dentro de estromatólitos foram relatadas por Bento Freire (2012). A observação em MEV de corpos alongados,

semelhantes a bactérias, associados aos *shrubs* indica que o ambiente continha esses microrganismos, que podem ter tido algum papel em sua precipitação.

Embora agregados calcícticos tipo *shrubs* sejam comuns em carbonatos precipitados em sistemas hidrotermais (e.g. *Pyramid Lake*), a grande extensão areal dos intervalos que contém essa fácies ao longo da seção estudada, sua geometria externa predominantemente dômica, e o arranjo vertical organizado dessa fácies em relação à fácies ESF, sugerem que o controle de sua precipitação seja majoritariamente o aumento da saturação de carbonato de cálcio como resultado de variações do nível do lago, provavelmente com alguma influência microbial.

Portanto, interpreta-se que precipitação dos *shrubs* tenha se dado em ambiente subaquoso, na superfície sedimento-água, em períodos de maior aridez, ou seja, quando as altas taxas de evaporação causariam o progressivo aumento da salinidade e da saturação da água do lago em relação ao carbonato de cálcio. A agitação da água em ambientes de alta energia também facilitaria a perda de CO<sub>2</sub>. A escassez de fósseis nessa fácies, somada a frequente associação de feições de exposição, dão suporte a essa interpretação. Como já discutido, um modelo semelhante foi proposto por Wright & Barnett (2015), porém, os autores não consideram que processos microbiais tenham atuado em sua gênese.

#### 5.1.3.1.3 Heterolito de esferulitito e *shrubby boundstone* (HESF/SB)

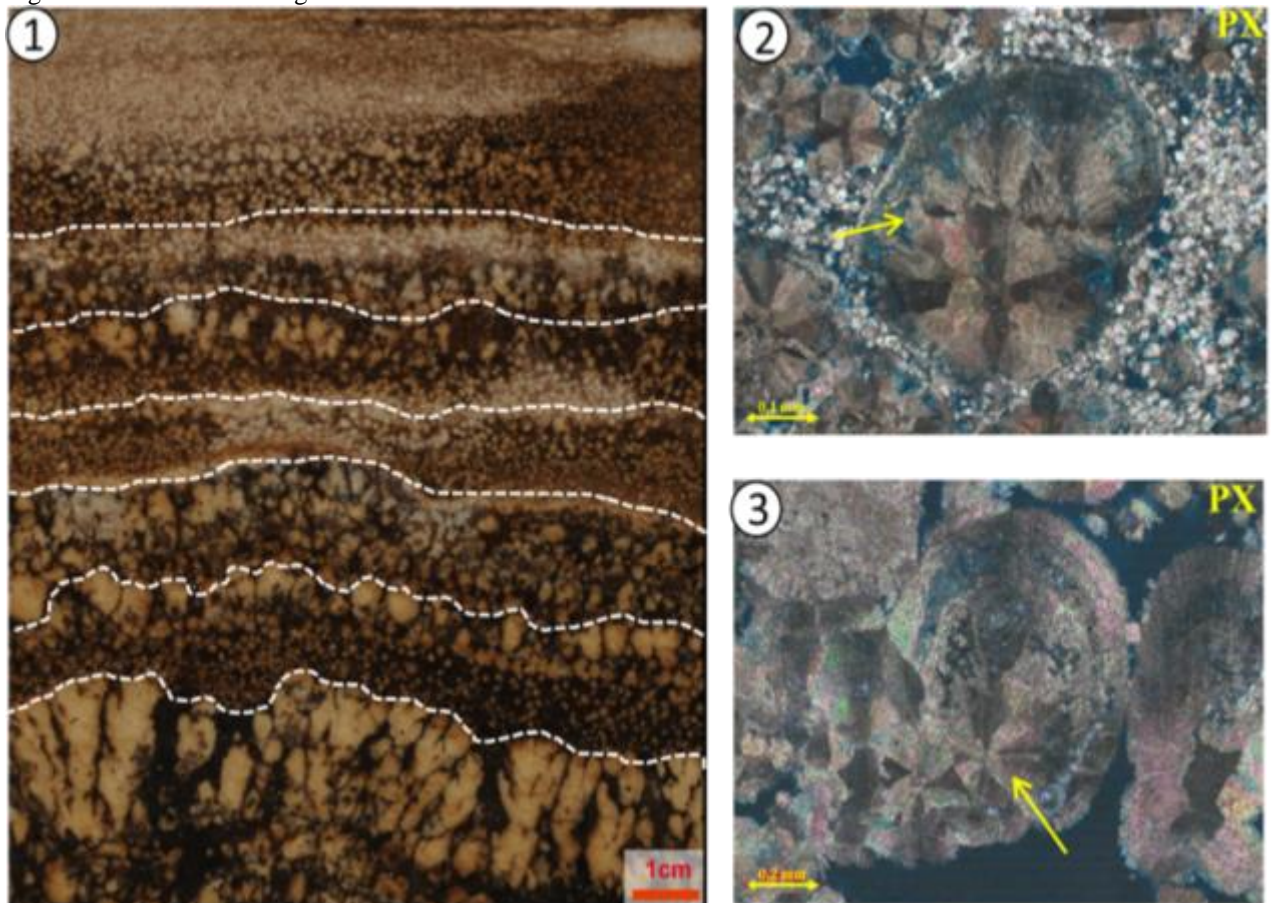
Essa fácies consiste na intercalação em alta frequência de camadas centimétricas (menores do que 5 cm) das fácies SB e ESF. Pacotes da fácies HESF/SB ocorrem sobrepostos aos intervalos compostos pela fácies ESF, e são sotopostos pela fácies SB, representando, assim, uma fácies de caráter transicional. Tem significativa expressão em todos os testemunhos descritos, apresentando espessuras entre 5 cm e 1 m. Todavia, nos intervalos não testemunhados, é de mais difícil interpretação, já que a amostragem pontual das amostras laterais rotativas por vezes é demasiadamente espaçada para indicar a ocorrência dessa intercalação, sendo que a mesma também não é evidente nos perfis de imagem.

Macroscopicamente apresenta estrutura laminada a bandada e geometria externa tabular a levemente dômica. Analisando os níveis intercalados em detalhe, é possível notar uma gradação do tamanho dos esferulitos que culminam em níveis de SB (Figura 74). Essa mesma intercalação é observada, por vezes, microscopicamente (Figura 74). São comuns os crescimentos assimétricos de esferulitos, e o crescimento de *shrubs* sobre os mesmos. Portanto, provavelmente há uma íntima relação no processo formador de esferulitos e de *shrubs*.

Transições entre as fácies ESF, HESF/SB e SB se repetem ao longo dos testemunhos analisados, como pode ser observado na Figura 75. A base do ciclo se inicia com um pacote de ESF, seguido por um pacote transicional, representado pela fácies HESF/SB, terminando com intervalo de SB, cujo topo é irregular e frequentemente apresenta feições de exposição.

Interpreta-se que a fácies HESF/SB representa a transição de um ambiente de mais baixa energia, representado pelas fácies ESF e ESF.arg, para um ambiente de moderada a alta energia, provavelmente em um ciclo de diminuição do nível relativo do lago. A existência de formas intermediárias entre *shrubs* e esferulitos também sugerem uma transição das condições físico-químicas do ambiente, provavelmente menos saturadas, com maior influência microbial quando da formação dos esferulitos, e mais saturadas, com processos de precipitação predominantemente abióticos, no caso dos *shrubs*.

Figura 74 - Características gerais da fácies HESF/SB



Legenda: 1) aspecto macroscópico da fácies HESF/SB. Notar gradação do tamanho dos esferulitos, que ficam maiores, até culminarem em um nível de *shrubs*. 2) Crescimento de *shrubs* a partir de esferulito. 3) *Shrub* com núcleo de esferulito.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 75: Fotos de parte do testemunho do poço A exemplificando o empilhamento vertical e a transição entre as fácies ESF, HESF/SB e SB



Legenda: A base do ciclo se inicia com um pacote de ESF, seguido por um pacote transicional, representado pela fácies HESF/SB, terminando com um intervalo de SB, cujo topo é irregular (linhas vermelhas) e frequentemente apresenta feições de exposição. Notar contato abrupto da fácies SB com o pacote de ESF que a sobrepõe.

Fonte: A autora, 2018.



### 5.1.3.2 Fácies carbonáticas autóctones micríticas

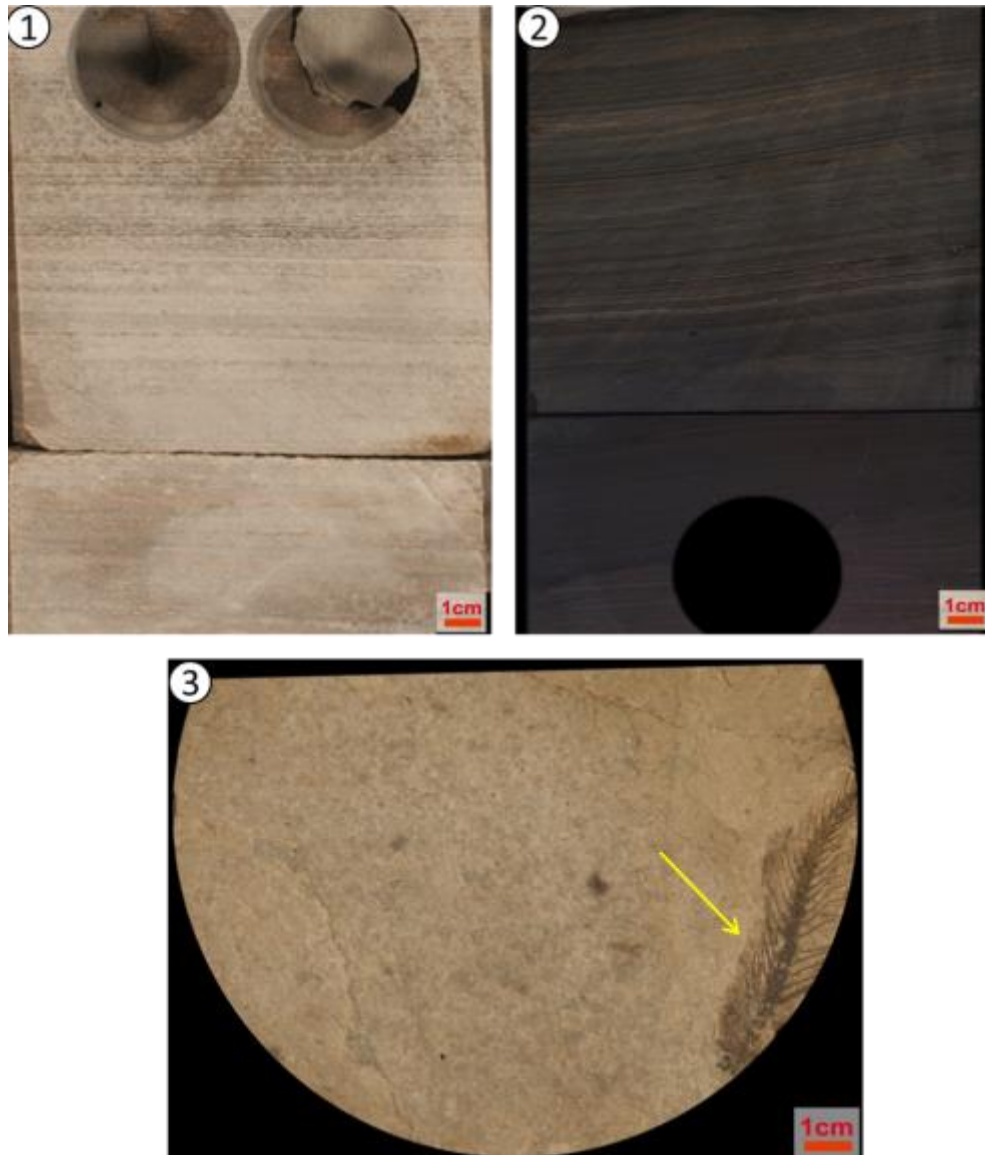
Esse grupo de fácies engloba as rochas carbonáticas cujo arcabouço é formado majoritariamente por laminações de composição micrítica, e cuja precipitação ocorreu *in situ*. Incluem-se nesse grupo a fácies: 1) laminito de laminação lisa (LMT.lis); 2) laminito de laminação crenulada (LMT.cre); 3) laminito de laminação crenulada com crostas calcíticas (LMT.cro); 4) *boundstone laminado* (BL).

#### 5.1.3.2.1 Laminito de laminação lisa (LMT.lis)

Essa fácies engloba as rochas carbonáticas caracterizadas pela recorrência em alta frequência de laminações micríticas, plano-paralelas, predominantemente com superfície lisa, por vezes intercalada a níveis levemente crenulados ou com esferulitos. Macroscopicamente apresenta coloração muito variada, podendo ser creme clara (Figura 76-1) até marrom escura (Figura 76-2), sendo que os níveis mais escuros refletem um maior teor de matéria orgânica. Apesar de a laminação ser majoritariamente plano-paralela, muitas vezes é possível notar variações sutis na sua orientação e inclinação (Figura 76-2). A fácies LMT.lis foi descrita em todos os poços estudados, apresentando espessuras entre 2 cm e 80 cm. No poço C, foi observado um fóssil de peixe bem preservado, associado a essa fácies (Figura 76-3).

Microscopicamente, é possível observar que as laminações apresentam uma ondulação sutil, associada a filmes orgânicos escuros (Figura 77), e, raramente, a finos níveis compostos por argilominerais magnesianos (Figura 77-3). Tais laminações, por vezes, ocorrem dolomitizadas (Figura 77-1). Grãos siliciclásticos, em sua maioria quartzo e feldspato, são muito abundantes (Figura 77-2), assim como bioclastos de ostracodes e fragmentos fosfáticos. Essa fácies não exibe porosidade em lâmina delgada.

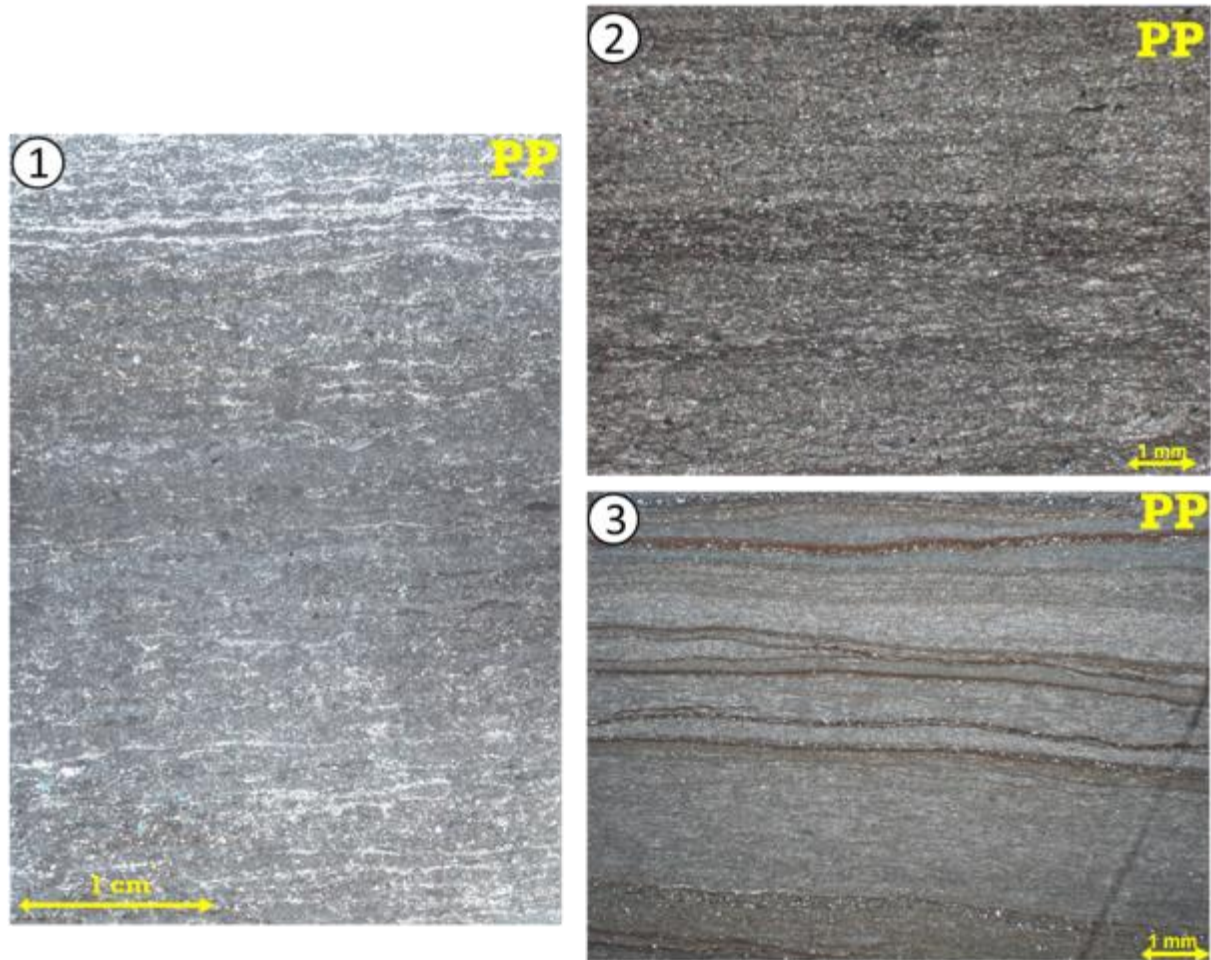
Figura 76: Exemplos do aspecto macroscópico da fácies LMT.lis



Legenda: 1) LMT.lis de coloração creme, parcialmente dolomitizado; 2) LMT.lis de coloração escura. Notar variações sutis da laminação; 3) fóssil de peixe associado a fácies LMT.lis, observado no poço C.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 77 - Exemplos do aspecto microscópico da fácies LMT.lis.



Legenda: 1) LMT.lis com níveis dolomitizados (níveis brancos). Fotomosaico com PP; 2) LMT.lis rico em grãos siliciclásticos de granulometria silte. Fotomicrografia com PP; 3) LMT.lis apresentando níveis escuros compostos por matéria orgânica, e nível acastanhado composto por argilominerais magnesianos. Fotomicrografia com PP.

Fonte: A autora, 2018.

A composição micrítica da fácies LMT.lis, somada a sua laminação predominantemente lisa, são indicativas de que essa fácies foi gerada predominantemente por processos decantativos, em um ambiente subaquoso, de baixa energia, provavelmente abaixo no nível de ação de ondas. No entanto, a esporádica presença de crenulações em sua laminação também indica a atuação de esteiras microbiais na gênese dessa fácies.

A maior concentração de fósseis associados à fácies LMT.lis, somados a grande proporção de grãos siliciclásticos, a ausência de feições de exposição, e a sua associação com níveis estratiformes de quartzo, de provável origem singenética, ou diageneticamente precoces,

indicam que a mesma tenha origem em períodos climáticos mais úmidos e quimicamente menos estressantes do lago, proporcionando maior desenvolvimento da biota. Adicionalmente, pHs mais ácidos propiciam a precipitação singenética de quartzo. Nos períodos secos, essa fácies deve ocorrer nas regiões estruturalmente mais baixas da área de estudos, que não foram amostradas pelos poços.

#### 5.1.3.2.2 Laminito de laminação crenulada (LMT.cre) e laminito de laminação crenulada com crostas calcíticas (LMT.cro)

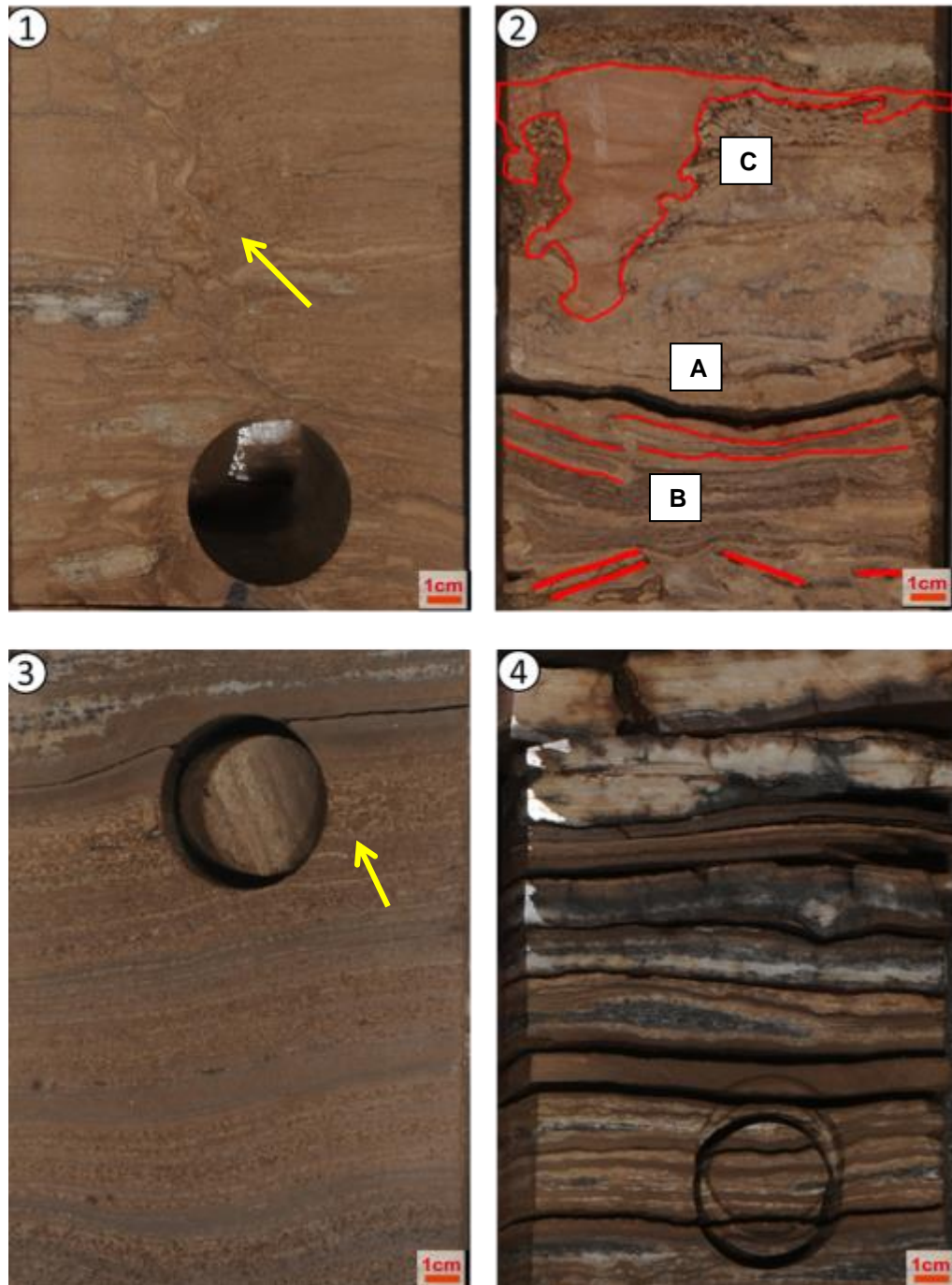
As fácies LMT.cre e LMT.cro são muito semelhantes e caracterizadas por laminações micríticas, plano-paralelas, com superfície crenulada. Contudo, no caso da fácies LMT.cro, as laminações são alternadas a níveis compostos por agregados calcíticos com textura fascicular óptica (*shrubs*) amalgamados, formando, assim, níveis contínuos e tabulares, aqui chamados de crostas calcíticas.

Macroscopicamente, a coloração de ambas as fácies é acastanhada. A fácies LMT.cro apresenta níveis com geometria levemente sinuosa, e, além das crostas calcíticas, também é possível observar intercalações centimétricas de níveis de SB (Figura 78-3). Já as camadas compostas por LMT.cre tem geometria predominantemente tabular, frequentemente deformada por nódulos ou níveis estratiformes de quartzo (Figura 78-1/4). Nesses níveis, também são observadas estruturas indicativas de exposição e atuação de processos pedogenéticos, como gretas de contração, marcas de raiz e *teepees* (Figura 78-2). Ambas as fácies ocorrem nos quatro poços estudados, ao longo de toda a seção carbonática, com espessuras entre 2 cm e 50 cm. No entanto, tem particular importância no topo da Formação Barra Velha, onde tem espessuras de até 1 m.

Microscopicamente, as fácies exibem laminações irregulares, de aspecto peloidal. São frequentes feições de dissolução, que geram porosidade do tipo fenestral (Figura 79-1). Os nódulos e níveis silicosos são compostos por quartzo microcristalino (Figura 79-2). Ao contrário da fácies LMT.lis, grãos siliciclásticos são muito raros ou ausentes.

As fácies LMT.cre, LMT.cro, devido a sua laminação crenulada, provavelmente são produto de processos de organomineralização bioinduzida (Dupraz *et al.* 2009) em ambientes rasos, de baixa energia. Essa hipótese é corroborada pela frequente identificação de feições indicativas de exposição e formação de paleossolos, principalmente nos intervalos de LMT.cre. Além disso, a rara presença de grãos siliciclásticos e a frequente associação de crostas calcíticas, são indicativas de períodos climáticos mais secos, e quimicamente mais estressantes.

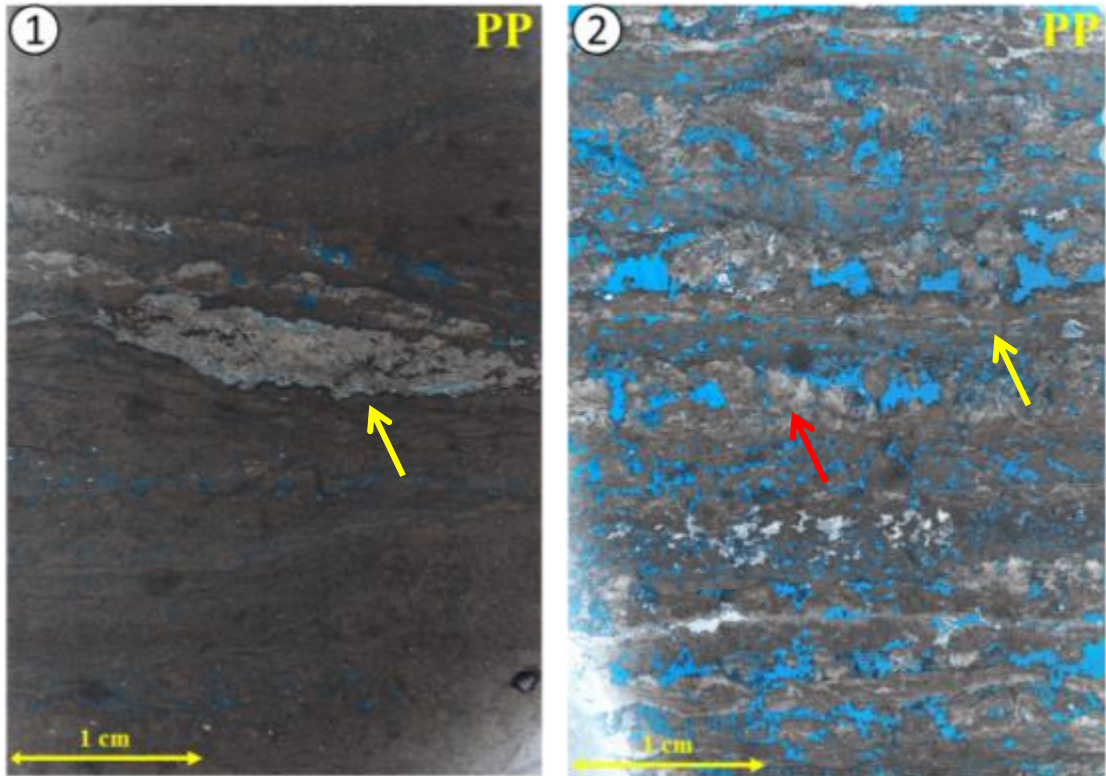
Figura 78 - Exemplos do aspecto macroscópico da fácies LMT.cre e LMT.cro



Legenda: 1) LMT.cre com laminação deformada pela presença de nódulos de quartzo e possível marca de raiz (seta); 2) LMT.cre apresentando feições indicativas de exposição: gretas de contração (a); teepees (b); e cavidade gerada por dissolução, preenchida por grainstone fino (c); 3) LMT.cro intercalado a nível de SB (seta). Notar crostas calcíticas contínuas, de coloração creme mais clara; 4) LMT.cre associado a níveis estratiformes de quartzo.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 79 - Exemplos do aspecto microscópico das fácies LMT.cre e LMT.cro



Legenda: 1) LMT.cre com nódulo de quartzo microcristalino (seta amarela). Fotomosaico com PP; 2) LMT.cro poroso. Notar alternância de níveis laminados micríticos (seta amarela) e níveis de crosta calcítica (seta vermelha). Fotomosaico com PP.

Fonte: A autora, 2018.

#### 5.1.3.2.3 *Boundstone* laminado (BL)

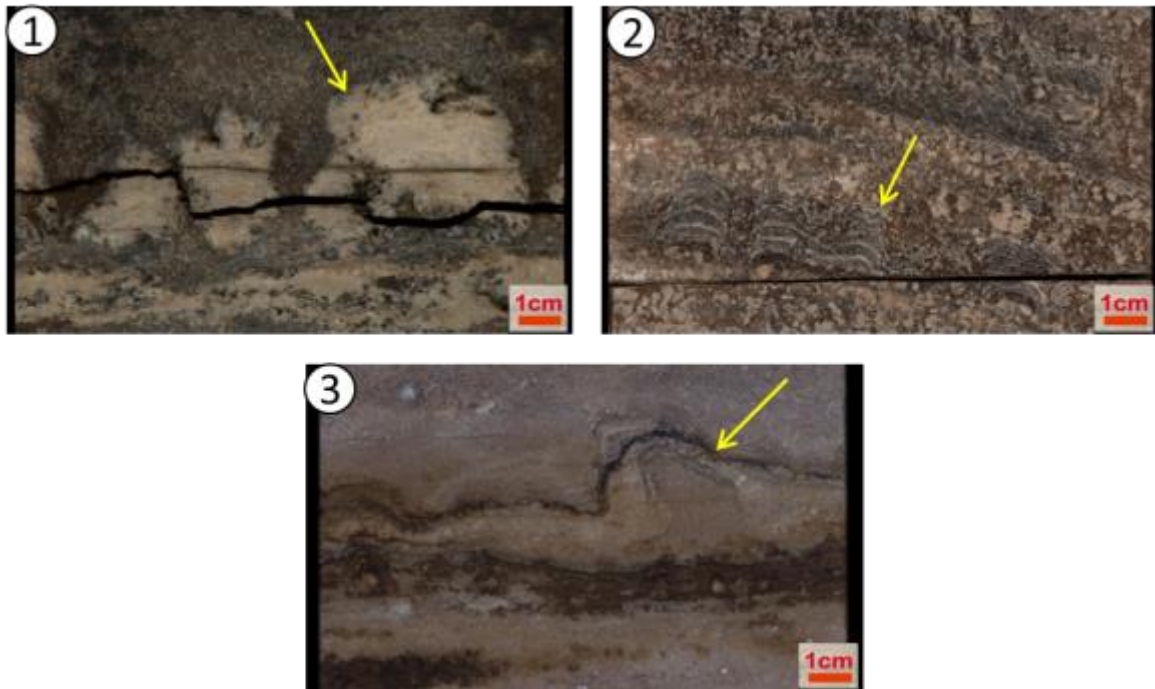
Essa fácies engloba rochas de geometria dômica a colunar, laminadas (laminação crenulada), de composição micrítica (Figura 80-3), muito semelhantes aos estromatólitos de Riding (2000). Em alguns casos, ocorre totalmente silicificada (Figura 80-1).

A fácies BL foi identificada em todos os testemunhos, mas não é frequente na seção, apresentando em média espessuras de camada entre 2 e 10 cm, e espessura máxima de 20 cm. Geralmente associa-se a intervalos com predomínio da fácies SB (Figura 80-2) ou com fácies alóctones (*grainstones* intraclásticos). Não foi identificada em amostras laterais. Isso provavelmente se deve ao fato desse tipo de amostra ter um tamanho reduzido, dificultando a identificação das estruturas dômicas. Assim, são facilmente confundidos com a fácies LMT.cre.

Não há amostras de lâminas delgadas disponíveis para a fácies BL. No entanto, dada a sua semelhança com a fácies LMT.cre, essas duas fácies devem ser parecidas microscopicamente.

A laminação crenulada da fácies BL, assim como nas fácies LMT.cre e LMT.cro, é indicativa de que a mesma tenha origem em processos de organomineralização bioinduzida em esteiras microbiais (Dupraz *et al.*, 2009). Porém, a sua geometria dômica a colunar e a sua associação com *grainstones* e com a fácies SB, indicam que a fácies BL tenha se formado em ambiente subaquoso, de moderada a alta energia.

Figura 80 - Exemplos do aspecto macroscópico da fácies BL



Legenda: 1) BL com geometria colunar, silicificado; 2) Níveis centimétricos de BL intercalados à fácies SB;  
3) Nível delgado de BL, com geometria dômica. Notar laminação crenulada.

Fonte: A autora, 2018.



### 5.1.3.3 Fácies carbonáticas alóctones sem matriz micrítica

Esse grupo engloba as rochas carbonáticas cujos constituintes não estavam ligados durante a deposição, e que não apresentam matriz, incluindo as seguintes fácies: *grainstone* intraclástico (GST); *grainstone* intraclástico com litoclastos vulcânicos (GST.vulc); *grainstone* intraclástico com oncóides (GST.onc); *rudstone* intraclástico (RUD); *rudstone* intraclástico com oncóides (RUD.onc).

#### 5.1.3.3.1 *Grainstone* intraclástico (GST) e *Rudstone* intraclástico (RUD)

Essas fácies consistem em rochas carbonáticas alóctones, cujo arcabouço é composto essencialmente por intraclastos (fragmentos de *shrubs* e esferulitos), ocorrendo raros níveis compostos por pelóides (Figura 81-3/4). A fácies GST possui granulometria variando de areia fina a areia muito grossa, com moda entre areia grossa a muito grossa. Já a fácies RUD, apresenta, em média, granulometria areia muito grossa, e mais de 10% de grãos de tamanho grânulo a seixo, raramente chegando a bloco. A seleção de ambas as fácies é em geral moderada a ruim. Em termos de estruturas sedimentares, podem apresentar estratificação plano-paralela, cruzada tabular de baixo ângulo (Figura 81-3/4). e, mais raramente, cruzada tangencial a base. Contudo, na maior parte das vezes não apresentam estrutura sedimentar reconhecível, tendo um aspecto maciço.

A fácies GST é muito frequente em todos os poços, com espessura de camada variando entre 5 cm e 3 m. Já a fácies RUD ocorre como pacotes menores, com espessuras de camada entre 5 cm até 1 m. Ambas as fácies frequentemente sobrepõem pacotes compostos por SB, por vezes exibindo bases erosivas, ou relação de contato em *onlap*, como mostra a Figura 71-3. Níveis centimétricos de SB também podem ocorrer no meio dos pacotes de GST.

Microscopicamente, as partículas de ambas as fácies apresentam graus variados de micritização e compactação. São cimentadas por dolomita e calcita em franja e/ou mosaico

(Figura 82-3/4). Quanto à porosidade, apresentam principalmente as dos tipos interpartículas, intrapartículas e, mais raramente, móldica.

A presença de estruturas sedimentares geradas por processos trativos (estratificações cruzadas) sugere que as fácies GST e RUD tenham se formado em ambiente subaquoso, de alta energia. Sua composição predominantemente intraclástica é indicativa de que as mesmas sejam produto de processos de retrabalhamento das fácies precipitadas *in situ*, ou seja, SB, ESF e ESF.arg, provavelmente devido a ação de ondas e correntes. Portanto, interpreta-se que essas fácies tendem a se desenvolver de forma mais expressiva em climas mais úmidos, em momentos de subida do nível do lago. Nesses momentos, o material proveniente das fácies *in situ*, desagregado durante as exposições subaéreas, seria remobilizado.

A fácies RUD pode ocorrer como clastos de tamanho seixo a bloco, muito angulosos, compostos predominantemente por *shrubs*, e com poucas evidências de transporte. Nesse caso, a mesma provavelmente se originou em decorrência de exposições subaéreas da fácies SB, com pouco ou nenhum transporte.

#### 5.1.3.3.2 *Grainstone* intraclástico com litoclastos vulcânicos (GST.vulc)

Essa fácies, similar à fácies GST, apresenta arcabouço principalmente constituído por intraclastos de esferulitos e *shrubs*, mas possui um conteúdo significativo de litoclastos de rochas vulcânicas (mais de 5%). Macroscopicamente, tem coloração levemente esverdeada, que é provavelmente resultado da alteração desses litoclastos. Em geral, apresentam granulometria areia média a grossa, raramente chegando areia muito grossa, e seleção ruim. Os pacotes de GST.vulc exibem estratificações cruzadas tabulares de baixo ângulo, frequentemente com gradação inversa dos grãos (Figura 81-1).

A fácies GST.vulc tem ocorrência restrita na área de estudos, tendo sido identificada apenas no poço D. A espessura das camadas variou entre 5 cm e 20 cm. Microscopicamente, é muito semelhante a fácies GST. No entanto, os litoclastos vulcânicos geralmente tem um grau maior de alteração, muitas vezes sendo bastante afetados por processos de dissolução. Por esse

motivo, a fácies GST.vulc apresenta com mais frequência porosidade do tipo móldica (Figura 82-1).

Interpreta-se que a gênese dessa fácies deva ser muito semelhante à descrita para a fácies GST. No entanto, a presença de gradação inversa dos grãos é indicativa da atuação de fluxos gravitacionais. Os litoclastos vulcânicos teriam origem na denudação de altos vulcânicos, provavelmente próximos à área de estudos.

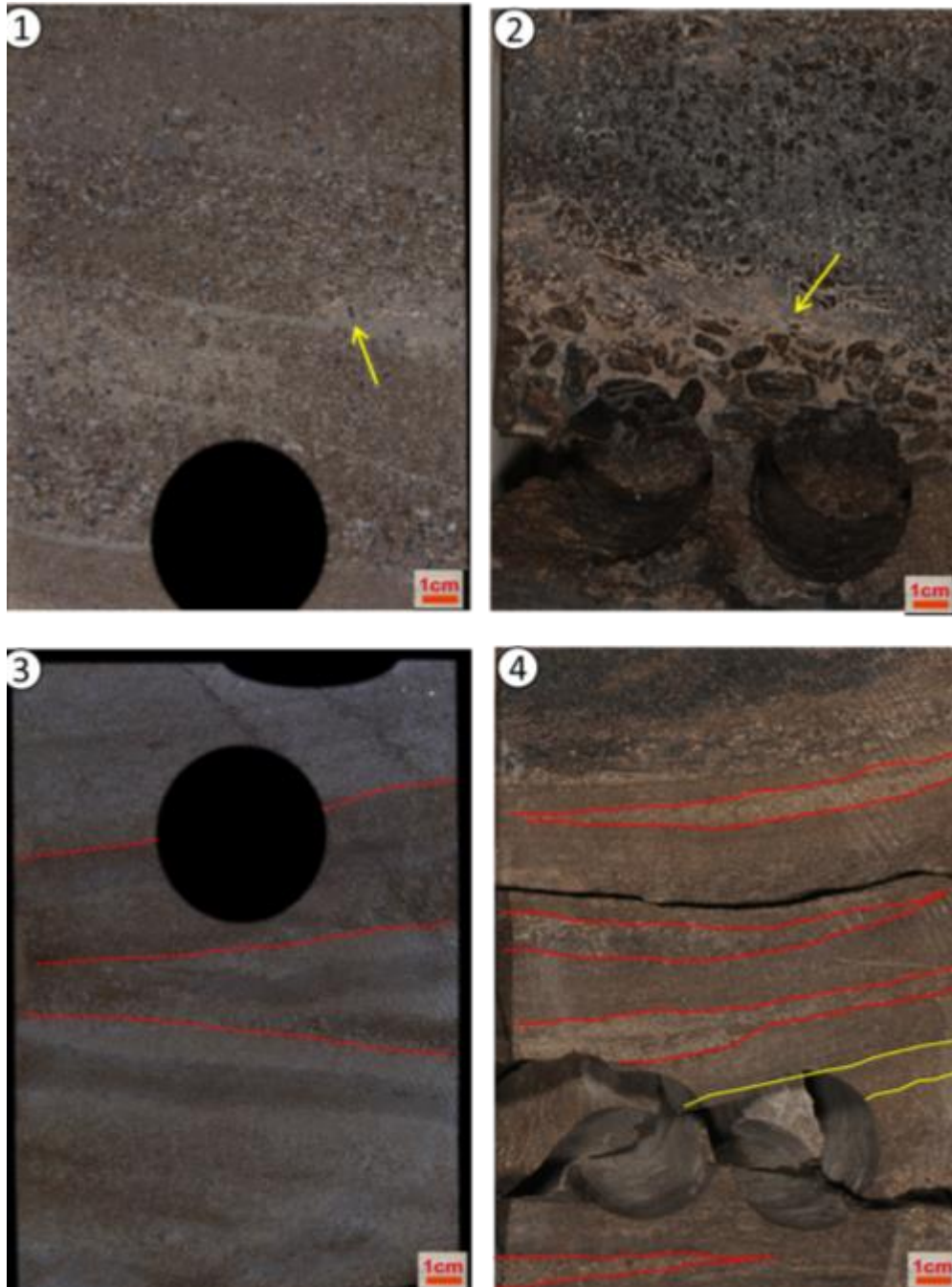
#### 5.1.3.3.3 *Grainstone* intraclástico com oncóides (GST.onc) e *rudstone* intraclástico com oncóides (RUD.onc)

Ambas as fácies são caracterizadas por conter em seu arcabouço, além dos intraclastos de *shrubs* e esferulitos, mais de 5% de oncóides (Figura 81-2). A fácies GST.onc possui granulometria areia grossa a muito grossa. Já a fácies RUD.onc, apresenta, em média, granulometria areia muito grossa, e mais de 10% de grãos de tamanho grânulo a seixo. Em termos de estruturas sedimentares, foram observadas estratificações plano-paralelas e cruzadas tabulares de baixo ângulo. No entanto, por vezes, tem aspecto maciço. Alguns níveis ocorrem silicificados.

As fácies GST.onc e RUD.onc ocorrem em todos os poços, mas não são frequentes no poço A. A espessura de camada da fácies RST.onc variou entre 5 cm e 20 cm. Já os níveis compostos pela fácies GST.onc podem ser mais espessos, e variam entre 5 cm e 1 m. Microscopicamente, não apresentam grandes diferenças em relação às fácies GST e RUD (Figura 82-2). Em geral, como no caso dos litoclastos vulcânicos, os oncóides sofrem a ação de processos diagenéticos com mais intensidade, muitas vezes apresentando núcleos dissolvidos.

A presença de grãos oncolíticos nessa fácies sugere que a mesma tenha se originado em períodos de maior proliferação da comunidade microbiana, já que a origem desses grãos está associada à intermediação desses organismos. Ou seja, em períodos em que a água do lago estava menos concentrada. Portanto, as fácies GST.onc e RUD.onc provavelmente se depositaram em um ambiente de energia moderada, em momentos mais úmidos e de maior nível do lago.

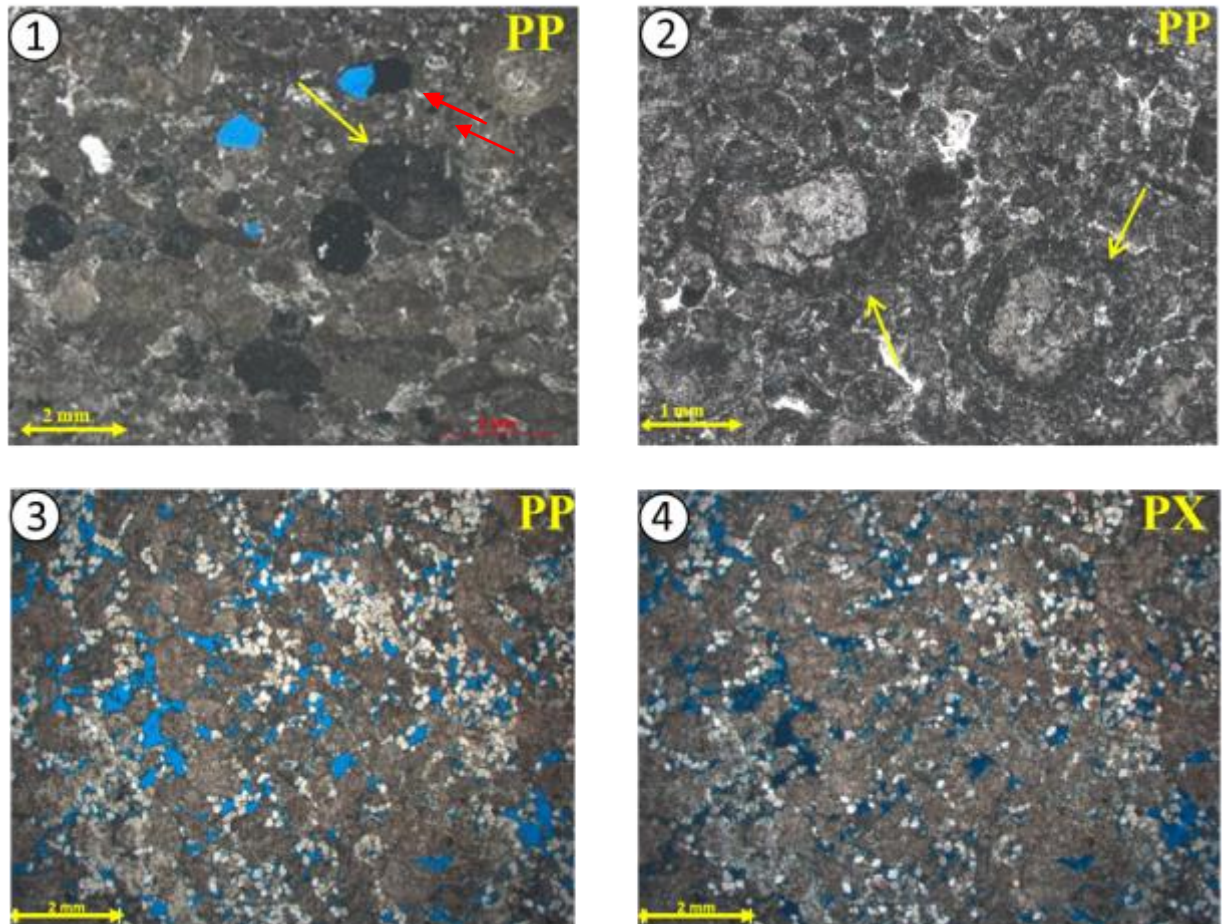
Figura 81 - Exemplos do aspecto macroscópico das fácies carbonáticas alóctones sem matriz micrítica



Legenda: 1) GST.vulc com estratificação cruzada tabular e gradação inversa. Notar litoclastos vulcânicos de coloração escura (seta); 2) RUD.onc, composto por oncóides de tamanho seixo, com núcleos dissolvidos; 3) GST exibindo estratificação cruzada tabular de baixo ângulo 4) GST de granulometria média, com lentes de granulometria grossa. Notar estratificação cruzada, destacada pelas linhas amarelas.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 82 - Exemplos do aspecto microscópico das fácies carbonáticas alóctones sem matriz micrítica



Legenda: 1) GST.vulc. Notar litoclastos vulcânicos (seta amarela) e porosidade móldica gerada pela dissolução dos litoclastos vulcânicos (seta vermelha). Fotomicrografia com PP; 2) RUD.onc. Notar oncóides (setas). Fotomicrografia com PP; 3) GST composto por intraclastos micritizados. Notar romboedros de dolomita nos poros. Fotomicrografia com polarizadores PP; 4) mesmo de 3, com PX.

Fonte: A autora, 2018.

#### 5.1.3.4 Fácies carbonáticas alóctones com matriz

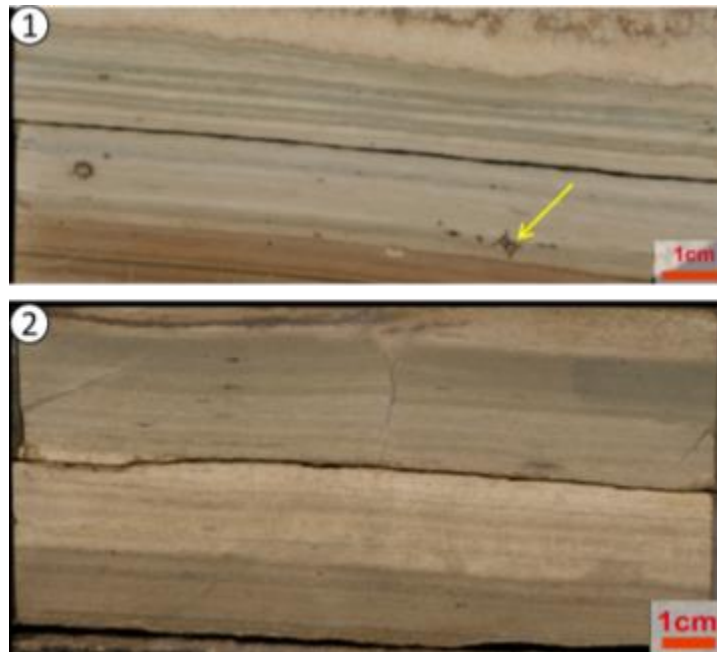
Esse grupo de fácies engloba as rochas carbonáticas cujos constituintes não estavam ligados durante a deposição, e que apresentam matriz micrítica, incluindo: *wackestone* intraclástico (WCK); *mudstone* (MUD).

As fácies WCK e MUD tem estrutura levemente laminada e coloração castanha a esverdeada, o que provavelmente indica um maior conteúdo de constituintes siliciclásticos

(Figura 83). Comumente apresentam como grãos, bioclastos de ostracodes e fragmentos fosfáticos (Figura 83-1). Ocorrem em baixíssima proporção em todos os poços, com espessura de camada entre 1 cm e 5 cm. Não há lâminas delgadas disponíveis para essas fácies.

A origem dessa fácies é interpretada como sendo relacionada à decantação de lama carbonática, e material siliciclástico, em um ambiente subaquoso, de baixa energia, provavelmente abaixo do nível de ação de ondas. Seu provável conteúdo de material siliciclástico em comparação à fácies LMT.lis pode ser indicativa de eventos de afogamento da plataforma carbonática de maior expressividade. Nos períodos secos, essa fácies deve ocorrer nas regiões estruturalmente mais baixas da área de estudos, que não foram amostradas pelos poços.

Figura 83 - Exemplos do aspecto macroscópico das fácies carbonáticas alóctones com matriz micrítica



Legenda: 1) WCK laminado, com coloração esverdeada. Notar fragmento fosfático (seta); 2) MUD laminado.

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 6 - Síntese das principais características e interpretação das fácies sedimentares identificadas (continua)

Código	Característica	Interpretação
MUD	Rocha de composição micrítica, com menos de 10% de grãos. Estrutura levemente laminada e coloração castanha a esverdeada. Presença frequente de bioclastos (ostracodes e fragmentos fosfáticos).	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia.
WCK	Rocha de composição micrítica, matriz-suportada, com mais de 10% de grãos, Estrutura levemente laminada e coloração castanha a esverdeada. Presença frequente de bioclastos (ostracodes e fragmentos fosfáticos).	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia, associada a fluxo trativo.
LMT.lis	Recorrência em alta frequência de laminações micríticas, plano-paralelas, predominantemente com superfície lisa, por vezes intercaladas a níveis levemente crenulados ou com esferulitos. Apresenta coloração variada, possivelmente refletindo o conteúdo de matéria orgânica.	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia, associada à indução microbial em esteiras.
LMT.cre	Recorrência em alta frequência de laminações micríticas, plano-paralelas, predominantemente com superfície crenulada. Frequentemente associada às feições indicativas de exposições subaéreas.	Organomineralização bioinduzida em esteiras. Ambiente raso de baixa energia.
LMT.cro	Recorrência em alta frequência de laminações micríticas, plano-paralelas, predominantemente com superfície crenulada, intercalados a níveis de crosta calcítica.	Organomineralização bioinduzida em esteiras. Ambiente raso de baixa energia. Crostas associadas à precipitação química de calcita, em lâminas d'água reduzidas e supersaturadas.
BL	Rocha de geometria dômica a colunar, com laminação crenulada, e composição micrítica, frequentemente associada às fácies GST e SB.	Organomineralização bioinduzida em esteiras. Ambiente raso de moderada a alta energia.
ESF	Rocha constituída por crescimentos <i>in situ</i> de esferulitos calcíticos. O espaço entre os esferulitos pode ocorrer vazio ou preenchido por dolomita, sílica criptocristalina e quartzo.	Bioindução e posterior crescimento abiótico dos esferulitos em um substrato orgânico, próximos à interface com água, em ambientes de baixa energia.
ESF.arg	Rocha constituída por crescimentos <i>in situ</i> de esferulitos calcíticos. O espaço entre os esferulitos ocorre preenchido por argilominerais magnesianos.	Bioindução e posterior crescimento abiótico dos esferulitos em um substrato orgânico, próximos à interface com água, em ambientes de baixa energia. Precipitação heterogênea de argilominerais magnesianos nas esteiras.
SB	Rocha constituída por crescimentos <i>in situ</i> de <i>shrubs</i> . Apresenta geometrias tabulares a dômicas. Frequentemente associada à feições de exposição.	Precipitação predominantemente abiótica, com possível influência microbial, em ambiente subaquoso supersaturado, alcalino, e de alta a moderada energia.
HESF/SB	Intercalação em alta frequência de camadas centimétricas (menores do que 5 cm) das fácies SB e ESF.	Fácies transicional entre as fácies SB e ESF.

Tabela 7 - Síntese das principais características e interpretação das fácies sedimentares identificadas (conclusão)

Código	Característica	Interpretação
<b>GST</b>	Rocha carbonática alóctone, composta por intraclastos carbonáticos (fragmentos de SB e ESF). Na maior parte das vezes não apresentam estrutura sedimentar reconhecível, mas podem apresentar estratificação plano-paralela, cruzada tabular de baixo ângulo e cruzada tangencial na base.	Retrabalhamento das fácies <i>in situ</i> (SB, ESF e ESF.arg) por fluxos trativos subaquosos de alta energia.
<b>RUD</b>	Rocha carbonática alóctone, composta por intraclastos carbonáticos (fragmentos de SB e ESF), com mais de 10% de grãos maiores do que 2 mm. Podem ocorrer de duas formas: com estruturas sedimentares semelhantes à fácies GST; como clastos de tamanho seixo a bloco, muito angulosos, compostos predominantemente por <i>shrubs</i> , e com poucas evidências de transporte.	Retrabalhamento das fácies <i>in situ</i> (SB, ESF e ESF.arg) por fluxos trativos subaquosos de alta energia; Exposições subaéreas da fácies SB, com pouco ou nenhum transporte.
<b>GST.vulc</b>	Rocha carbonática alóctone, composta por intraclastos carbonáticos e mais de 5% de litoclastos vulcânicos. Semelhantes à fácies GST em termos de estrutura, mas com frequente gradação inversa dos grãos.	Retrabalhamento das fácies <i>in situ</i> (SB, ESF e ESF.arg) por fluxos trativos subaquosos de alta energia, possivelmente relacionados a processos gravitacionais.
<b>GST.onc</b>	Rocha carbonática alóctone, composta por intraclastos carbonáticos, e mais de 5% de grãos oncolíticos. Semelhante à fácies GST em termos de estrutura.	Origem em períodos de menor saturação da água do lago e maior proliferação da comunidade microbiana, em ambiente de energia moderada.
<b>RUD.onc</b>	Rocha carbonática alóctone, com mais de 10% de grãos maiores do que 2 mm, composta por intraclastos carbonáticos, e mais de 5% de grãos oncolíticos. Semelhantes a fácies GST.onc em termos de estrutura.	Origem em períodos de menor saturação da água do lago e maior proliferação da comunidade microbiana, em ambiente de energia moderada.

Fonte: A autora, 2018

#### 5.1.4 Distribuição das fácies sedimentares na área de estudos

A proporção das fácies sedimentares descritas apresentou variações consideráveis nas suas distribuições areal e vertical. Em geral, pode-se observar que o contexto estrutural de cada poço influenciou de forma significativa as fácies neles observadas (Figura 84), tanto no testemunho, quanto no intervalo da Formação Barra Velha como um todo (obtido pela interpretação de perfis de imagem associada às informações das amostras laterais).

O poço A está localizado no alto principal da plataforma carbonática. Possui maior proporção de fácies carbonáticas autóctones cristalinas, com destaque para a fácies SB, que



corresponde a mais da metade de todas as fácies que ocorrem no poço. Intervalos compostos por ESF e pela fácies transicional HESF/SB também são frequentes e provavelmente refletem momentos de nível do lago mais elevado. O grupo das fácies alóctones sem micrita tem importância pontual, sendo mais restrita a alguns intervalos do poço. Por fim, as fácies LMT.cre ocorrem majoritariamente no topo do intervalo. Portanto, o contexto estrutural poço A, somado às fácies que nele ocorrem, são indicativos de um ambiente de águas rasas, de alta a moderada energia, onde predominou a precipitação *in situ* de *shrebs*, provavelmente gerando relevos positivos semelhantes à recifes. Destaca-se ainda a ausência das fácies ESF.arg, provavelmente devido ao contexto mais energético no qual o poço se encontra.

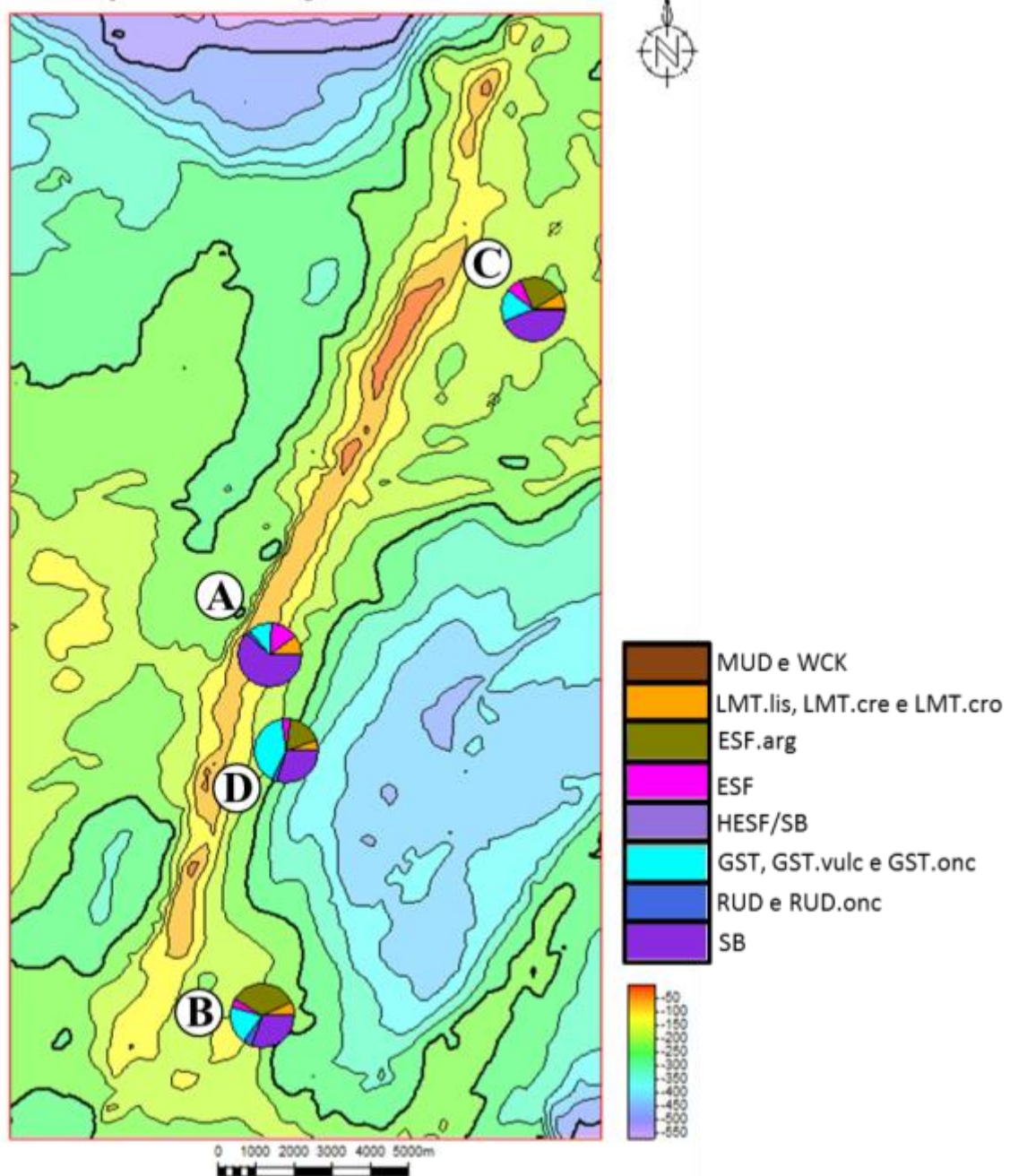
Os poços B e C estão localizados em porções relativamente mais baixas em comparação ao poço A, em um contexto de baixas declividades, com poucas falhas. Esses baixos relativos foram aqui nomeados “terraços”. Ambos os poços apresentaram proporções e distribuições de fácies semelhantes. Assim como no poço A, o grupo das fácies carbonáticas autóctones cristalinas representa as fácies mais frequentes. Todavia, as fácies ESF e ESF.arg ganharam maior importância nesses poços, com destaque para a fácies ESF.arg, que se acumula em intervalos intermediários nos dois poços, aparentemente correlacionáveis, como será melhor discutido posteriormente. Ambos os poços apresentaram proporções semelhantes de fácies alóctones sem micrita, com uma proporção significativa de GST.onc e RUD.onc. O poço C concentra, ainda, intervalos mais espessos da fácies BL. Com base nessas informações, interpreta-se que as fácies dos poços B e C refletem um contexto menos energético em comparação ao poço A, fato que favoreceu a precipitação das fácies ESF, a preservação dos argilominerais magnesianos (observados na fácies ESF.arg) e a proliferação da comunidade microbiana, dada a ocorrência em maior proporção das fácies BL e das fácies com oncóides.

O poço D localiza-se em uma porção adjacente ao alto estrutural principal da área de estudo, a cerca de 2.5 km do poço A, em um contexto de flanco. A proporção de fácies observada nesse poço é consideravelmente distinta das demais, ocorrendo maiores volumes de fácies alóctones sem matriz (fácies GST, GST.vulc e GST.onc). Essas fácies têm provável origem na degradação e remobilização das rochas presentes no alto estrutural, que se acumularam em seus flancos possivelmente através de fluxos gravitacionais, como indicam as estruturas observadas na fácies GST.vulc. As fácies autóctones cristalinas (SB, ESF e ESF.arg) também são expressivas

nesse poço, sendo que a fácies ESF.arg ocorre em uma posição estratigráfica semelhante a que foi observada nos poços B e C. Já as fácies LMT.lis e LMT.cre tem maior expressão na porção superior do poço. Em suma, o poço D ocorre em um contexto de flanco, de alta a moderada energia, provavelmente em batimetrias mais elevadas em comparação ao poço A. Sua posição adjacente ao alto principal, somada às declividades maiores favoreceram o acúmulo das fácies GST, GST.onc e GST.vulc. Fácies como LMT.lis, ESF e ESF.arg foram provavelmente geradas em momentos de lâmina d'água mais elevadas e menor aporte de litoclastos carbonáticos provenientes dos porções mais altas da plataforma carbonáticas.

As Figuras 85, 86, 87 e 88 ilustram a distribuição de fácies ao longo dos poços estudados, assim como a proporção de fácies neles observadas.

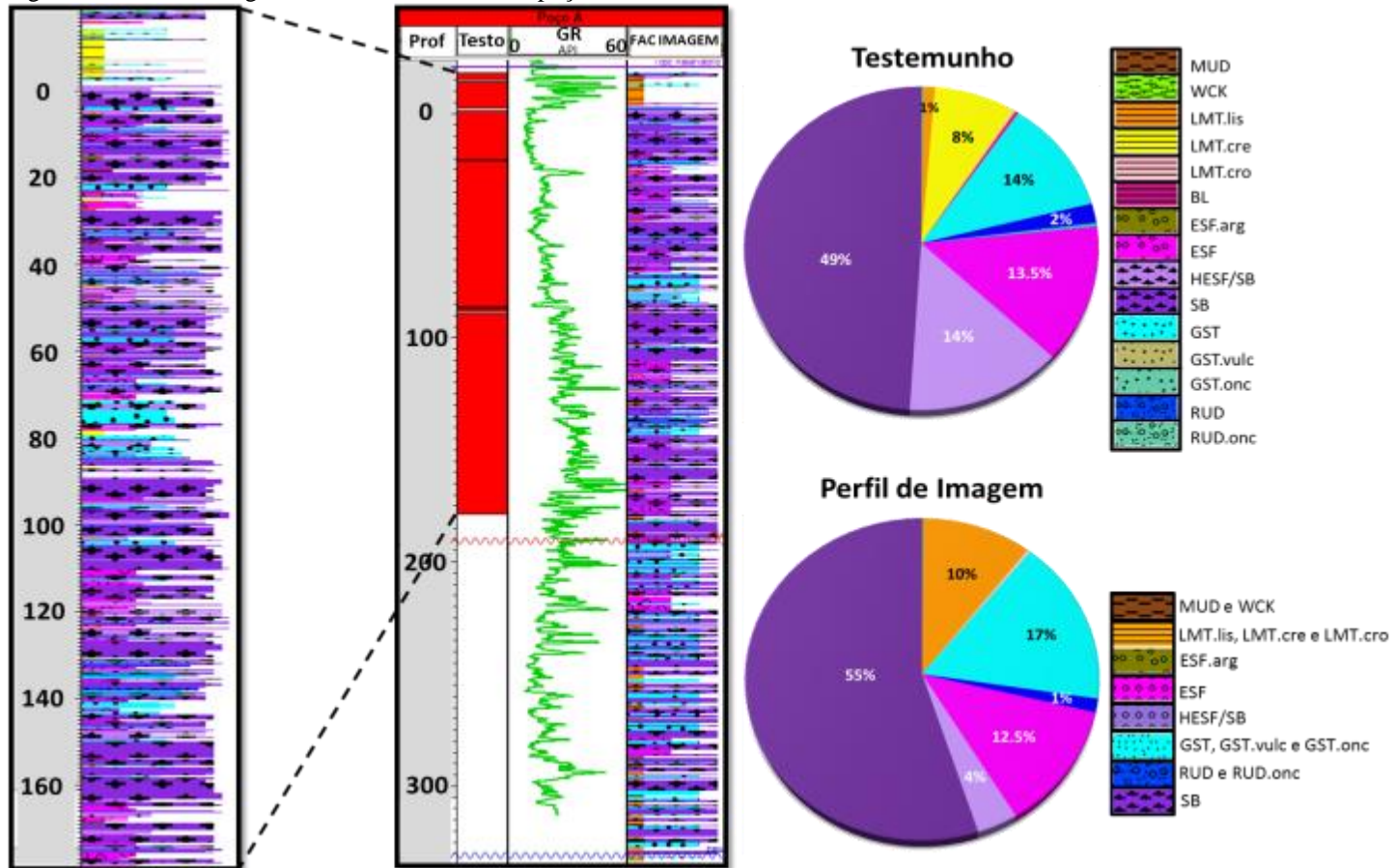
Figura 84 – Proporção de fácies por poço na Fm. Barra Velha



Legenda: Mapa estrutural do topo da Fm. Barra Velha, mostrando a proporção das fácies identificadas em cada poço através da descrição dos testemunhos e amostras laterais, associados a interpretação de perfis de imagem. Os valores de cota foram descaracterizados para esse estudo.

Fonte: A autora, 2018.

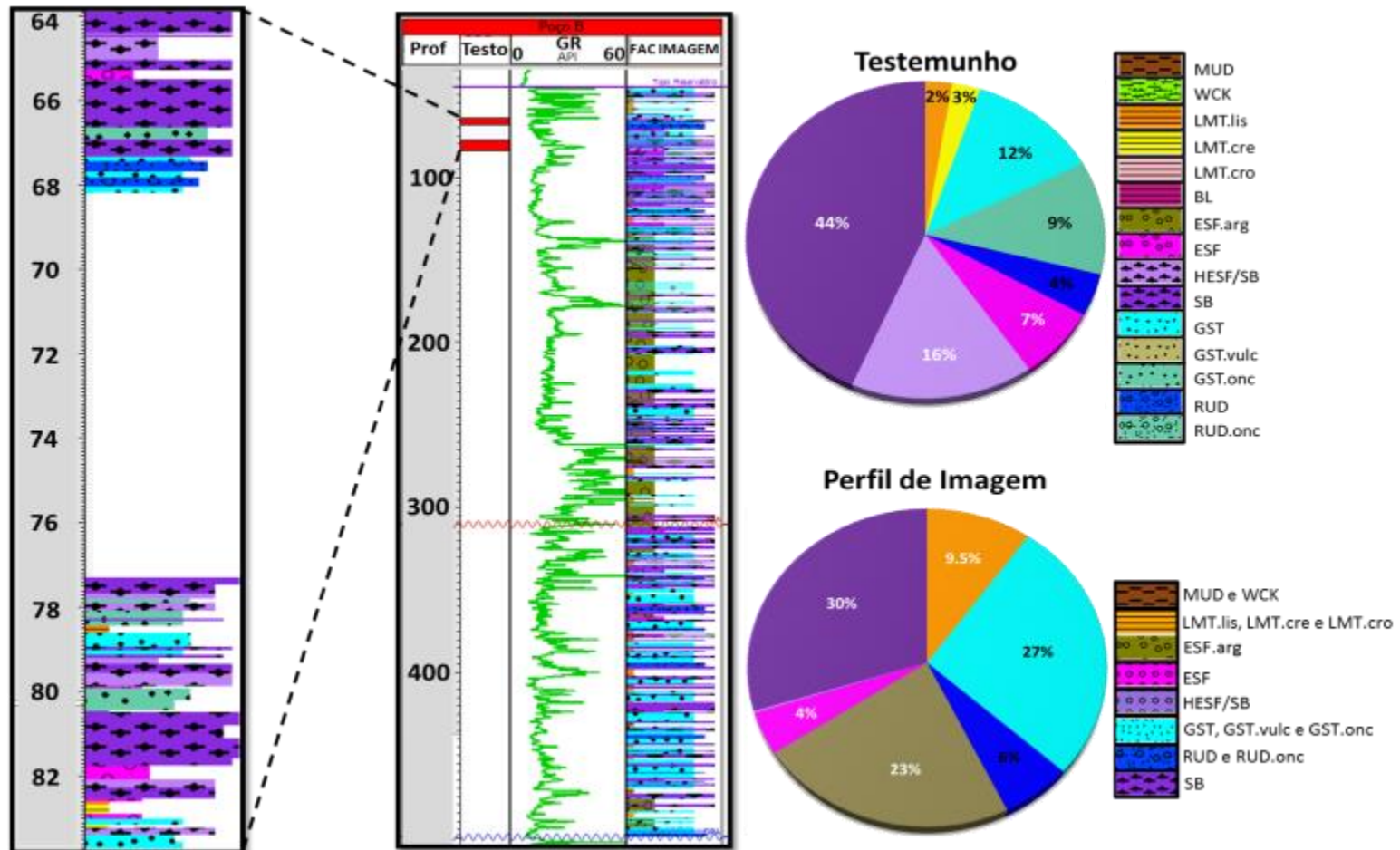
Figura 85 - Perfil litológico da Fm. Barra Velha no poço A



Legenda: Perfil litológico de todo intervalo de ocorrência da Fm. Barra Velha no poço A, obtido através da descrição de testemunhos e amostra laterais, associados à interpretação em perfil de imagem, com destaque para o intervalo testemunhado, cuja descrição é mostrada à esquerda. À direita, foram representadas as proporções de fácies identificadas no testemunho (lado direito superior) e em toda seção da Fm Barra Velha (lado direito inferior).

Fonte: A autora, 2018.

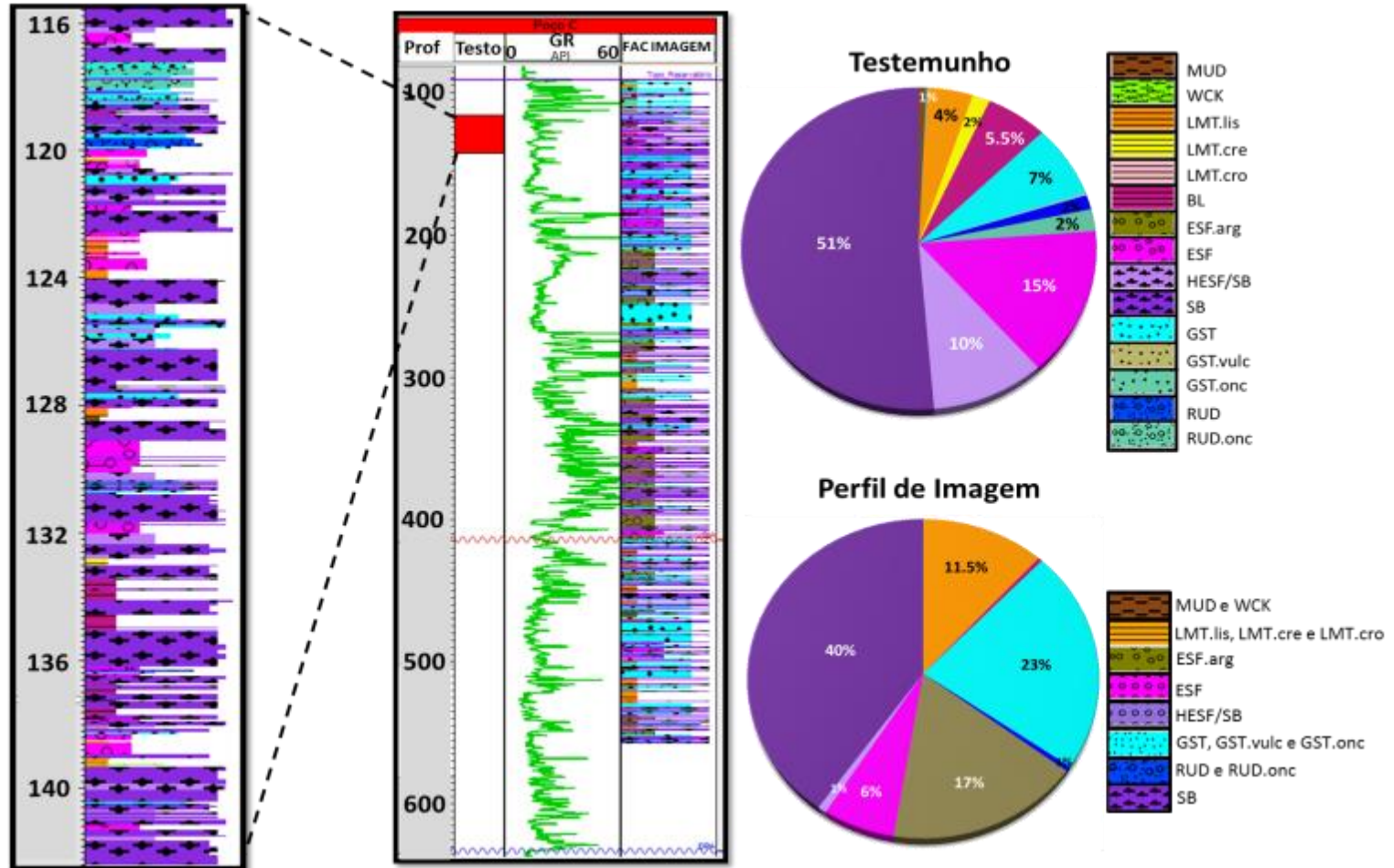
Figura 86 - Perfil litológico da Fm. Barra Velha no poço B



Legenda: Perfil litológico de todo intervalo de ocorrência da Fm. Barra Velha no poço B, obtido através da descrição de testemunhos e amostra laterais, associados à interpretação em perfil de imagem, com destaque para o intervalo testemunhado, cuja descrição é mostrada à esquerda. À direita, foram representadas as proporções de fácies identificadas no testemunho (lado direito superior) e em toda seção da Fm Barra Velha (lado direito inferior).

Fonte: A autora, 2018.

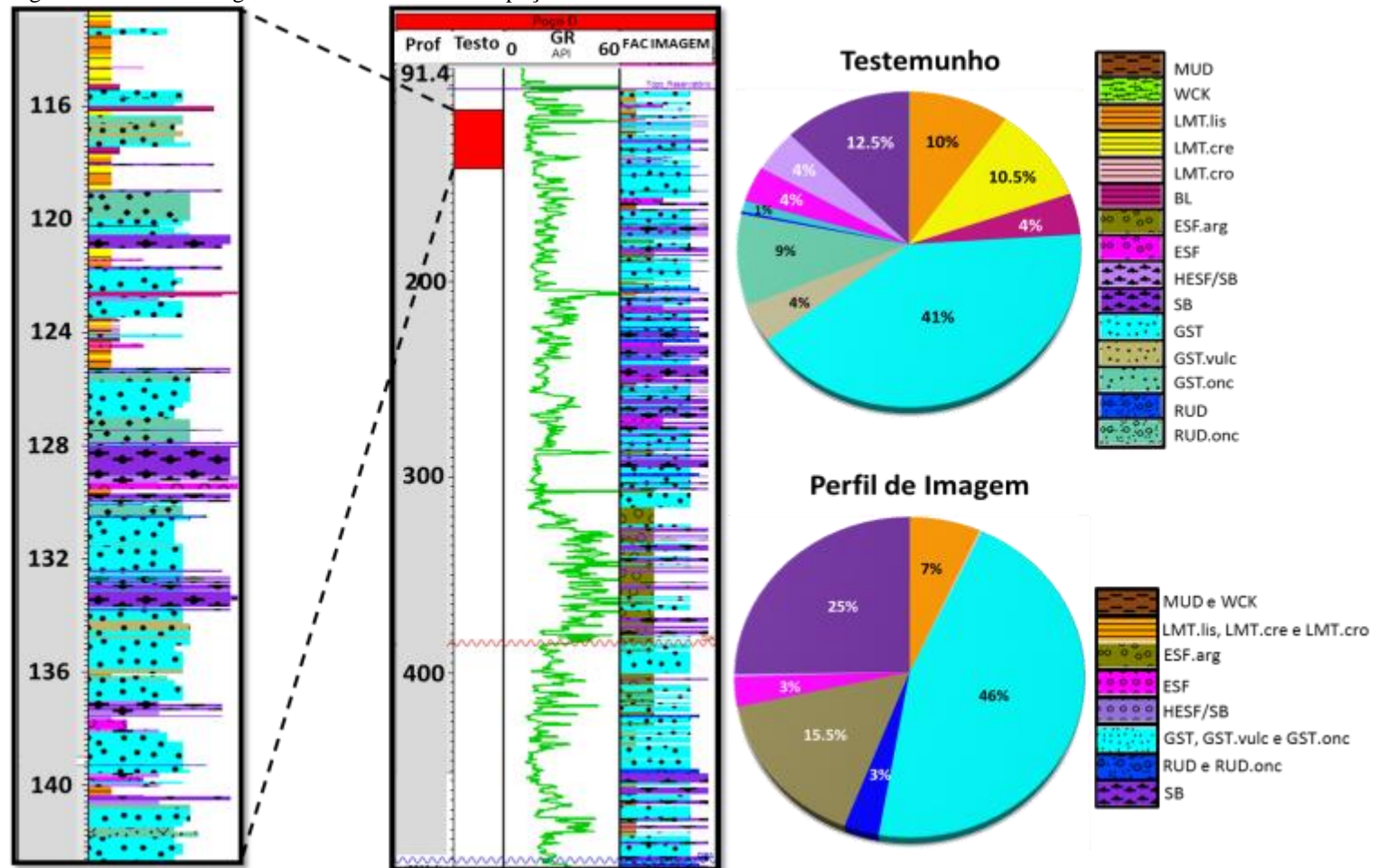
Figura 87 - Perfil litológico da Fm. Barra Velha no poço C



Legenda: Perfil litológico de todo intervalo de ocorrência da Fm. Barra Velha no poço C, obtido através da descrição de testemunhos e amostra laterais, associados à interpretação em perfil de imagem, com destaque para o intervalo testemunhado, cuja descrição é mostrada à esquerda. À direita, foram representadas as proporções de fácies identificadas no testemunho (lado direito superior) e em toda seção da Fm Barra Velha (lado direito inferior).

Fonte: A autora, 2018.

Figura 88 - Perfil litológico da Fm. Barra Velha no poço D



Legenda: Perfil litológico de todo intervalo de ocorrência da Fm. Barra Velha no poço D, obtido através da descrição de testemunhos e amostra laterais, associados à interpretação em perfil de imagem, com destaque para o intervalo testemunhado, cuja descrição é mostrada à esquerda. À direita, foram representadas as proporções de fácies identificadas no testemunho (lado direito superior) e em toda seção da Fm Barra Velha (lado direito inferior).

Fonte: A autora, 2018.

### 5.1.5 Ciclicidade e modelo deposicional

Analisando-se as características litológicas de cada fácies sedimentar, juntamente com o padrão de transição entre elas, foi possível estabelecer um padrão de empilhamento de fácies ideal, que se repete em alta frequência ao longo dos testemunhos analisados (Figura 89).

Segundo Tucker & Wright (1990), a ciclicidade bem marcada que ocorre em alguns depósitos lacustres é principalmente controlada pelo balanço hídrico do mesmo, ou seja, do balanço entre as taxas de entrada de água no sistema pela rede de drenagem, de precipitação e de evaporação. Nos períodos úmidos do lago, as taxas de precipitação e de influxo de água fluvial superam a taxa de evaporação. Esse balanço permite a elevação do nível da lâmina d'água do lago, que se torna menos saturada, apresentando salinidades e pHs menores. Além disso, a entrada de água na bacia através dos rios que nela desaguam é o principal mecanismo de aporte siliciclástico nos sistemas lacustres (Bohacs *et al.*, 2000). Por outro lado, nos períodos de seca, as taxas de precipitação e de influxo de água pluvial são superadas pela taxa de evaporação. Assim, o volume de água das chuvas não é suficiente para manter o nível freático estável, acarretando o rebaixamento gradativo do nível do lago e, conseqüentemente, tornando a água do lago mais saturada, salina e alcalina. Com a diminuição da entrada fluvial no sistema, o aporte siliciclástico é reduzido, possibilitando o maior desenvolvimento da fábrica carbonática.

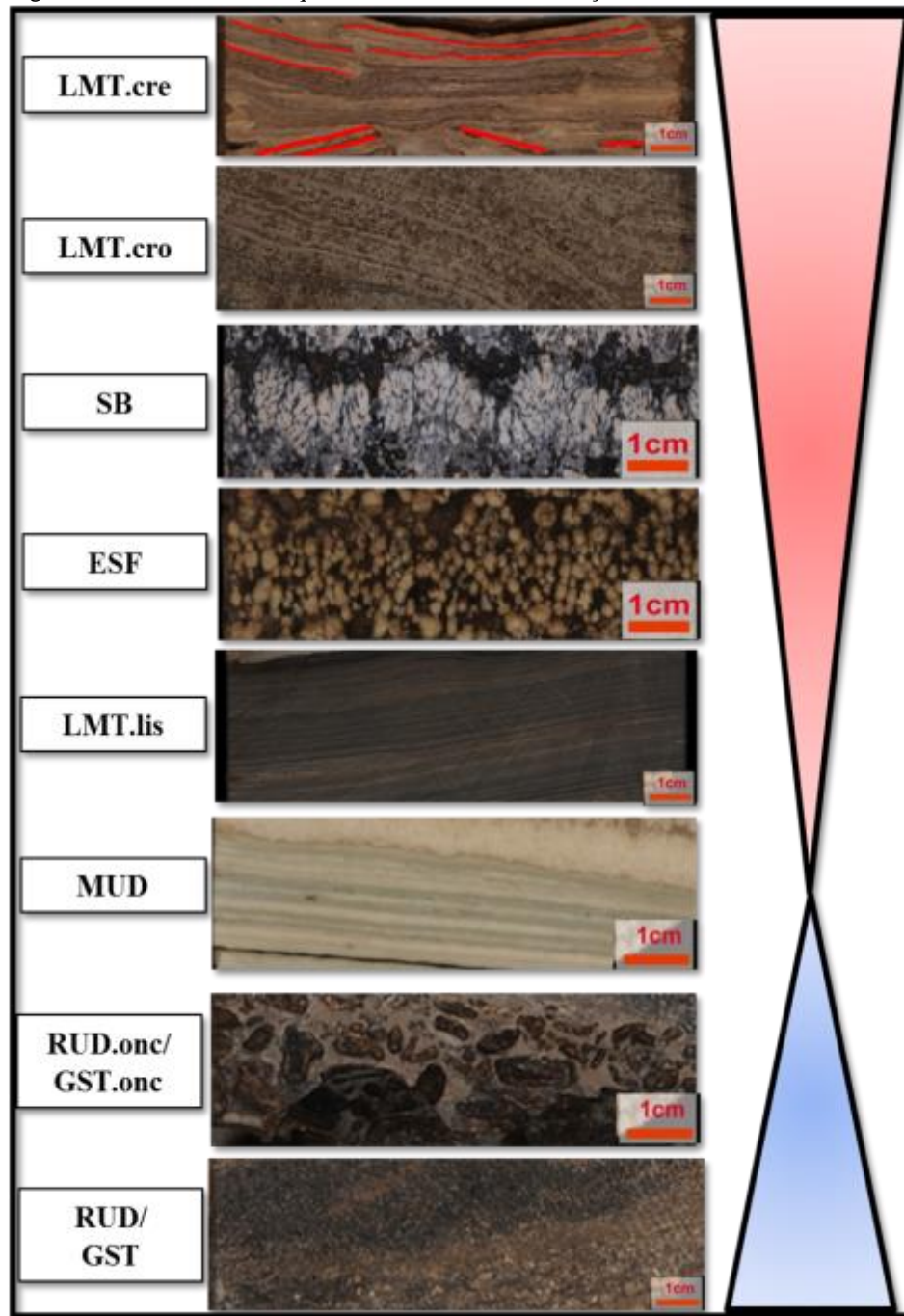
Levando-se em conta a dinâmica climática descrita acima, interpreta-se que a fase úmida na Formação Barra Velha (Figura 90) é marcada pela ocorrência das fácies carbonáticas alóctones (GST, RUD, GST.vulc, GST.onc e RUD.onc) e pelas fácies *in situ* de composição micrítica (BL e LMT.lis). O ciclo tem início com a remobilização de intraclastos carbonáticos (*shrubs* e esferulitos) das porções mais altas da plataforma em direção às regiões mais profundas da bacia, se acumulando principalmente nos flancos da estrutura. Com o contínuo aumento do nível do lago, as fácies de composição micrítica (LMT.lis e MUD) avançam em direção a plataforma carbonática. A água mais diluída (menos salinas e alcalinas), propicia a colonização da biota, e a proliferação dos microrganismos, resultando nas fácies BL e LMT.cre, que se acumulam principalmente nas regiões com declividades mais baixas (poços A, B e C), e no



desenvolvimento de oncóides, que tendem a ter maior importância nas adjacências da plataforma (poço D).

Já o período seco (Figura 91) é marcado pelo maior desenvolvimento das fácies *in situ* cristalinas (ESF, ESF.arg e SB). Com a contínua diminuição do nível do lago, o corpo d'água se torna progressivamente mais saturado em íons e, conseqüentemente, mais salino e alcalino. Essas condições ambientais propiciam a nucleação de esferulitos nas esteiras microbiais, que se formam em maior proporção nas regiões mais planas e protegidas da plataforma (poços B e C). Com contínuo aumento da concentração em íons da água do lago, ocorre a precipitação de *shrubs* calcíticos (fácies SB), que se desenvolvem preferencialmente nas regiões mais rasas da plataforma carbonática, onde a batimetria é menor e, conseqüentemente, possui maior saturação de carbonato de cálcio. Quando a lâmina d'água já não é mais suficiente para o desenvolvimento dos *shrubs*, são formadas crostas calcíticas (LMT.cro) e laminações micríticas (LMT.cre) que são frequentemente expostas, gerando feições como *teepees* e gretas de contração. Por fim, com a retração máxima do lago, as porções mais altas da plataforma carbonática podem ser totalmente expostas, e ocorre um período de não deposição até o início do próximo ciclo.

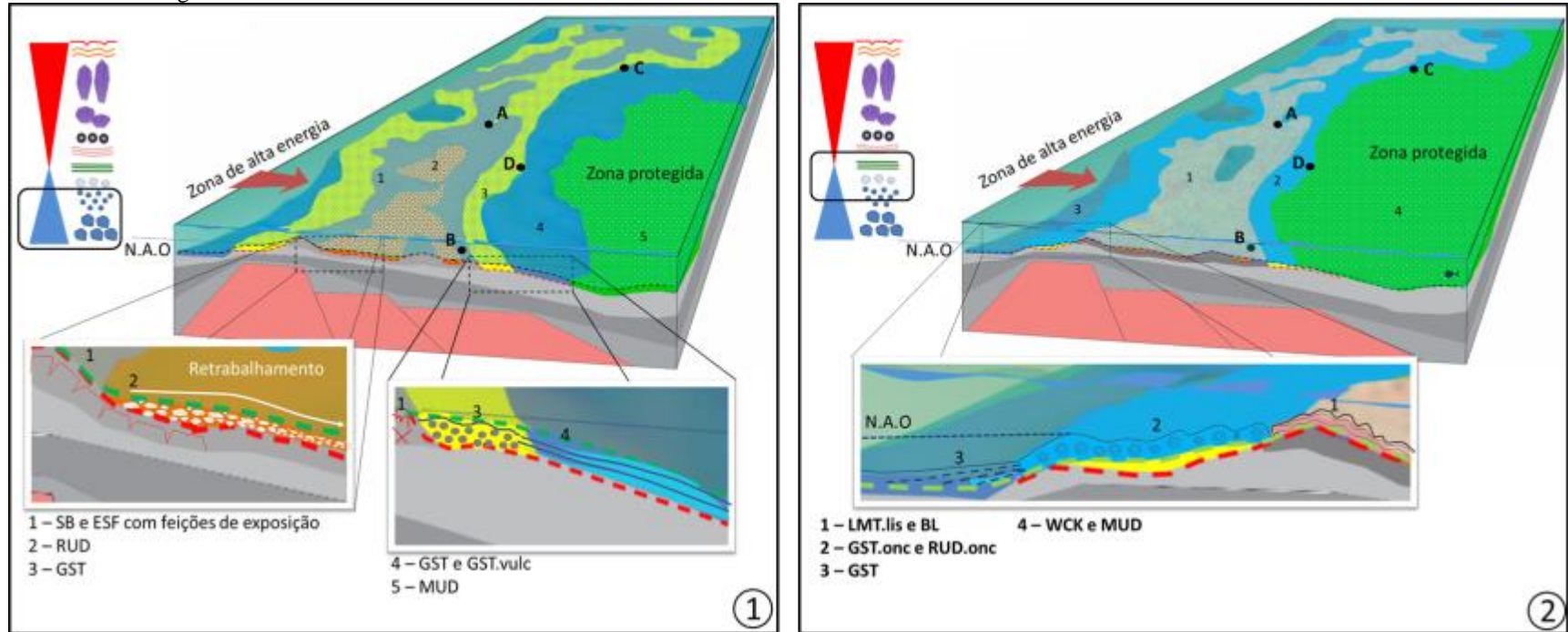
Figura 89 - Ciclo de alta frequência idealizado da Formação Barra Velha



Legenda: Ciclo construído a partir da caracterização das fácies sedimentares e os padrões de transição entre elas. Os triângulos azul e vermelho indicam, respectivamente, os hem ciclos transgressivo e regressivo.

Fonte: A autora, 2018.

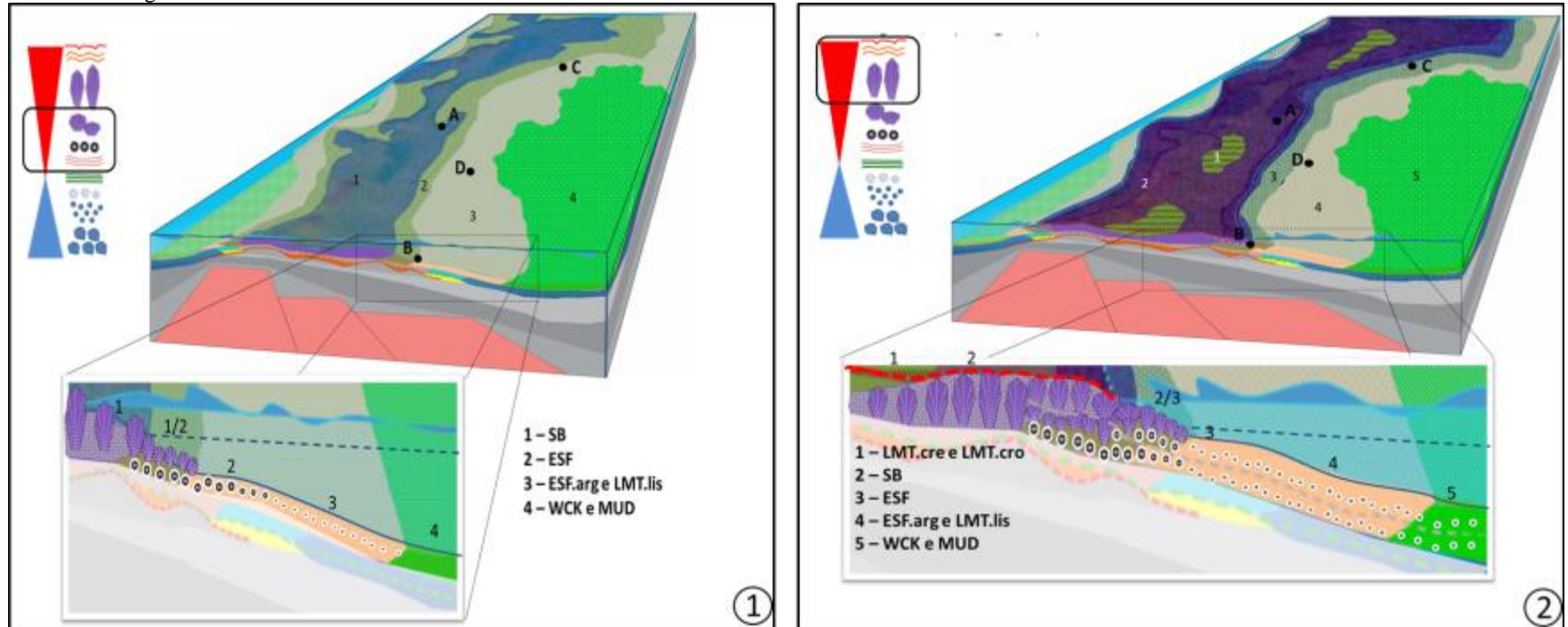
Figura 90 - Diagramas esquemáticos da área de estudos representando a distribuição de fácies e os processos sedimentares que ocorrem nos períodos úmidos do lago



Legenda: 1) Início da subida do nível do lago. Remobilização de intraclastos carbonáticos (fragmentos de *shrubs* e esferulitos) dos altos estruturais para as porções mais profundas da bacia, se acumulando principalmente nos flancos da estrutura. 2) Fase de máxima inundação. As fácies carbonáticas finas (LMT.lis, WCK e MUD) avançam em direção às regiões mais altas. Maior desenvolvimento e proliferação da biota, propiciando a formação de oncólitos e da fácies BL.

Fonte: A autora. 2018.

Figura 91 - Diagramas esquemáticos representando a distribuição de fácies na área de estudos e os processos sedimentares que ocorrem nos períodos de seca do lago



Legenda: 1) Início da queda do nível do lago. O progressivo aumento da salinidade e alcalinidade do corpo d'água propicia a nucleação de esferulitos em um substrato orgânico. *Shrubs* precipitam preferencialmente nos altos estruturais, onde a lâmina d'água é menor e mais saturada em íons. 2) Fase de máxima regressão e exposição da plataforma carbonática. O nível do lago torna-se muito delgado, não permitindo mais o desenvolvimento da fácies SB. Assim, são precipitadas crostas calcíticas (LMT.cro) e laminações micríticas (LMT.cre), com exposições frequentes. Por fim, na retração máxima do lago, as porções mais altas são totalmente expostas, ocorrendo um hiato na deposição até o início do próximo ciclo.

Fonte: A autora, 2018.

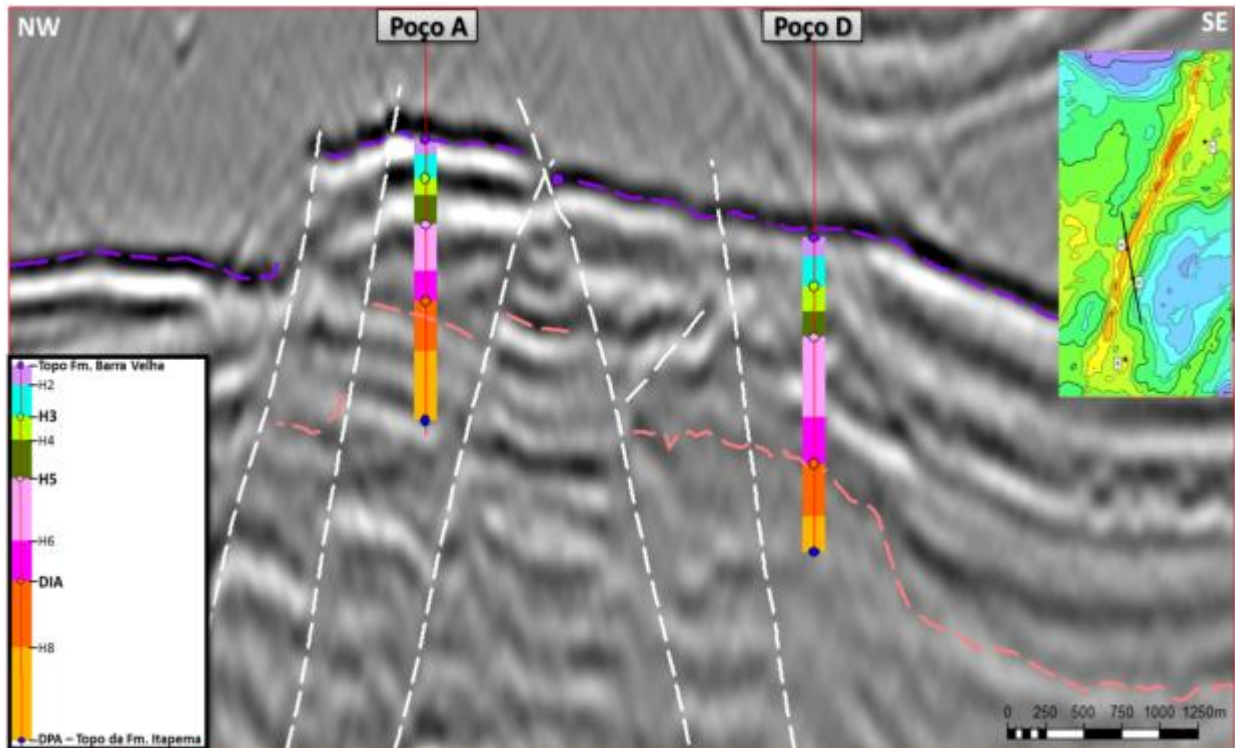
## 5.2 Correlação estratigráfica

Após a caracterização das fácies sedimentares que ocorrem na área de estudos e do estabelecimento de um padrão de variação vertical de fácies, buscou-se fazer a correlação estratigráfica entre os quatro poços estudados. Para tanto, foram utilizados como critérios a análise de seções sísmicas entre os poços, os padrões de variação dos perfis elétricos, principalmente dos perfis GR e GR SPEC, e também a sucessão vertical de fácies observada ao longo de todo o intervalo.

As distâncias entre os poços selecionados são relativamente grandes, variando entre 2.5 km (distância entre os poços A e D) e 19.8 km (distância entre os poços B e C). Mesmo assim, foi possível identificar padrões de perfis muito semelhantes entre eles, sendo que algumas das superfícies identificadas nos poços se traduziram na sísmica em refletores rastreáveis (Figura 92). Vale ressaltar que não foi feita a amarração dos poços com o dado sísmico. No entanto, como o processamento utilizado tem como produto o dado sísmico em profundidade, considera-se que os marcadores identificados nos poços podem ser aproximadamente correlacionados às feições observadas na sísmica.

Foram interpretados no total 9 marcadores, sendo que cinco deles puderam ser identificados na sísmica, como mostra a Figura 92. Esses últimos corresponderam à horizontes de cunho regional, sendo eles o topo da Formação Barra Velha (contato com os evaporitos da Fm. Ariri), a Discordância Intra-Alagoas (DIA) e a Discordância Pré-Alagoas (contato com as coquinhas da Formação Itapema). O topo da Formação Barra Velha representa um forte refletor positivo, facilmente rastreável. Já as discordâncias supracitadas, correspondem a refletores positivos mais esmaecidos, o que pode trazer dificuldades na sua interpretação. Além desses horizontes, puderam ser identificados nas seções sísmicas mais dois marcadores, aqui nomeados H3 e H5. Ambos correspondem a refletores positivos, sendo que o H3 mostra amplitudes bastante altas, principalmente no alto estrutural (poço A), como pode ser visto na Figura 92. Os demais marcadores (H2, H4, H6 e H8) foram interpretados utilizando apenas os perfis elétricos e o empilhamento de fácies sedimentares.

Figura 92 - Seção sísmica entre os poços A e D mostrando os marcadores identificados na sísmica:

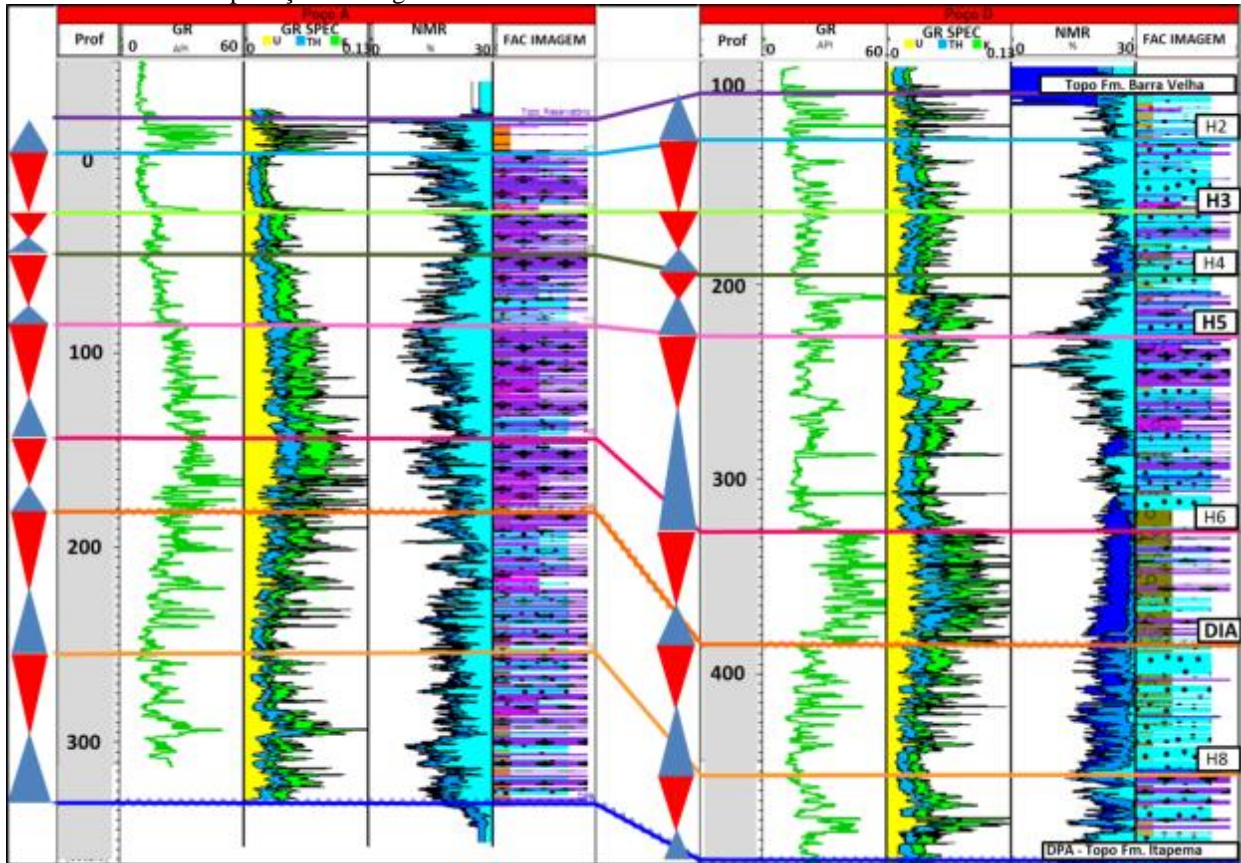


Legenda: Topo da Fm. Barra Velha (em roxo), H3 (em verde claro), H5 (em rosa), DIA (em laranja) e a DPA (em azul). As demais marcadores não possuem correspondência com refletores sísmicos rastreáveis.

Fonte: A autora, 2018.

Com exceção do topo da Formação Barra Velha, todos os marcadores representam o topo dos hem ciclos regressivos, como pode ser visto na Figura 93, que apresenta a interpretação dos marcadores estratigráficos, assim como seu significado em termos de ciclos sedimentares, nos poços A e B.

Figura 93 - Seção estratigráfica entre os poços A e D mostrando os 9 marcadores interpretados, juntamente com sua interpretação estratigráfica.



Legenda: Os triângulos vermelhos representam hemicíclios regressivos, enquanto os azuis marcam os hemicíclios transgressivos. Os valores reais de profundidade, em cota, foram descaracterizados.

Fonte: A autora, 2018.

Tendo-se definido o arcabouço estratigráfico para a área de estudos, selecionou-se um intervalo para a realização do detalhamento e caracterização dos processos e produtos diagenéticos. O intervalo escolhido corresponde ao último hemicíclio regressivo interpretado, que tem como base o marcador H3 e como topo o marcador H2. O mesmo foi considerado representativo da Formação Barra Velha na área de estudo, pois contém a maior parte das fácies identificadas. Além disso, é facilmente correlacionado em todos os poços, apresenta uma maior densidade de amostras de rocha e lâminas delgadas, e possui um grande interesse econômico, já que é a zona de maior produtividade do campo aqui estudado.

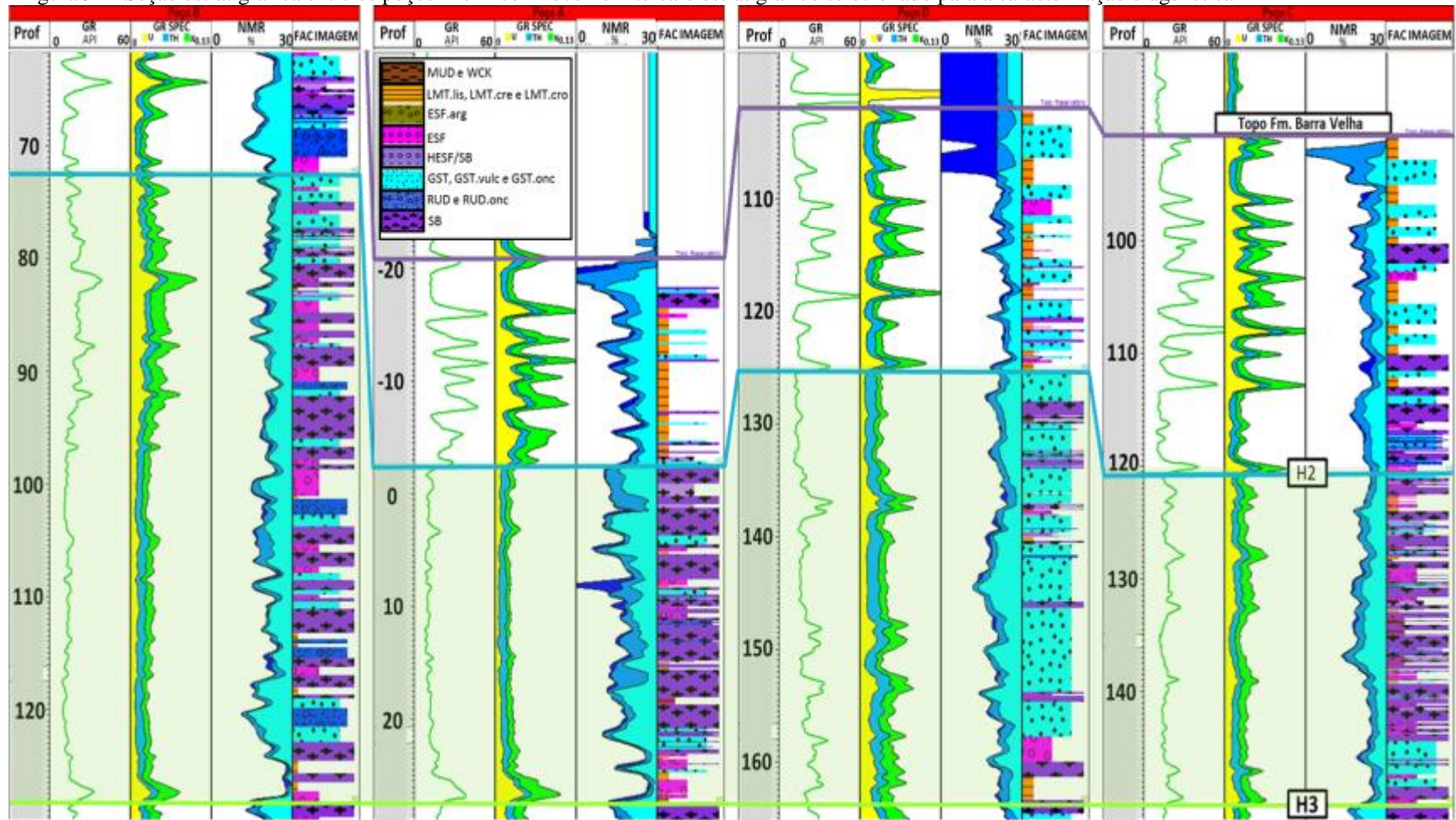
A Figura 94 mostra o intervalo selecionado para o estudo diagenético. Como pode ser observado na figura, o marcador H2 corresponde à base de uma feição característica do perfil de raios *gamma* em todos os poços estudados, representada pela alternância de picos proeminentes e

vales em alta frequência. Essa feição corresponde a um trecho peculiar em todos os poços estudados, apresentando grandes proporções da fácies LMT.cre, exibindo feições de exposição, alternando-se a níveis de SB, GST e/ou RUD. Já o marcador H3, como já discutido, é mapeável nas seções sísmicas, e é sobreposto por fácies carbonáticas de baixa energia, como LMT.lis e ESF.

Em termos de fácies sedimentares, o intervalo selecionado apresenta proporções e distribuições muito semelhantes às observadas na Formação Barra Velha como um todo (Figura 95). No entanto, nota-se uma maior concentração da fácies SB em todos dos poços, com exceção do poço D, que apresenta grande volume de fácies alóctones sem matriz (GST e RUD). A fácies ESF.arg é a única que não está presente neste intervalo, pois sua ocorrência, como já mencionado, é restrita na área de estudos.



Figura 94 - Seção estratigráfica entre os poços A e D com foco no intervalo estratigráfico selecionado para a caracterização diagenética



Legenda: Seção estratigráfica entre os poços A e D com foco no intervalo estratigráfico selecionado para a caracterização diagenética (destacado em verde).  
Fonte: A autora, 2018