

Gerson Felizardo de Sousa Júnior

**CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE TESTEMUNHOS DO
PRÉ-SAL, BACIA DE SANTOS, CAMPO DE SURURU**

Trabalho Final de Curso
(Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2020



UFRJ

Gerson Felizardo de Sousa Júnior

**CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE TESTEMUNHOS DO
PRÉ-SAL, BACIA DE SANTOS, CAMPO DE SURURU**

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:

Renato Rodriguez Cabral Ramos

Coorientadores:

Katia Regina Nogueira Mendonça

Marcelle Marques Erthal

Rio de Janeiro

Julho de 2020

SOUSA JÚNIOR, Gerson Felizardo de

**Caracterização Faciológica de Testemunho do Pré-Sal,
Bacia de Santos, Campo de Sururu** / Gerson Felizardo de Sousa
Júnior - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2020.

92 p.: il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de
Geologia, 2020.

Orientador: Renato Rodriguez Cabral Ramos

Coorientadores: Kátia Regina Nogueira Mendonça, Marcelle
Marques Erthal

1. Geologia. 2. Sedimentologia e Estratigrafia – Trabalho de
Conclusão de Curso. I. Renato Rodriguez Cabral Ramos. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Geologia. III. Título.

Gerson Felizardo de Sousa Júnior

CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE TESTEMUNHO DO PRÉ-SAL, BACIA DE
SANTOS, CAMPO DE SURURU

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:

Renato Rodriguez Cabral Ramos (UFRJ)

Coorientadores:

Katia Regina Nogueira Mendonça
(PETROBRAS)

Marcelle Marques Erthal (PETROBRAS)

Aprovada em: 27/07/2020

Por:

Orientador: Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (UFRJ)

Dr^a. Katia Regina Nogueira Mendonça (PETROBRAS)

Dr^a. Marcelle Marques Erthal (PETROBRAS)

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello (UFRJ)

Geól. Jessica Aguillar Faria Magalhães (UFRJ)

“Nada é inútil na Natureza; tudo tem um fim, uma destinação. Em lugar algum há o vazio; tudo é habitado, há vida em toda parte. Assim, durante a dilatada sucessão dos séculos que passaram antes do aparecimento do homem na Terra, durante os lentos períodos de transição que as camadas geológicas atestam, antes mesmo da formação dos primeiros seres orgânicos, naquela massa informe, naquele árido caos, onde os elementos se achavam em confusão, não havia ausência de vida. Seres isentos das nossas necessidades, das nossas sensações físicas, lá encontravam refúgio.”

Livro dos Espíritos (pergunta 236);
Allan Kardec.

Agradecimentos

A Deus e à Espiritualidade por me conduzirem e protegerem em minha trajetória.

Aos meus pais, irmãos, familiares e amigos que entenderam o que é a geologia para mim e me apoiaram mesmo estando longe da minha cidade natal.

À Petrobras, representada por Helga Voelcker, pela compreensão em minhas ausências, pelos incentivos e estruturas fornecidas ao longo da minha graduação.

Ao meu orientador Renato Ramos, por me acolher e aceitar a missão que é estudar os carbonatos da seção Pré-sal.

Às minhas orientadoras Katia Mendonça e Marcelle Erthal pelas inúmeras discussões, revisões e incentivos para conclusão desta monografia.

À professora Silvia Regina de Medeiros e à pedagoga Anadja Antônia Pacheco Soares pelo suporte acadêmico e incentivo durante toda a minha graduação.

A Pablo Luigi, pela presteza em me substituir nos momentos de ausência no trabalho, pelas contribuições no texto e confecção dos mapas.

Aos laboratórios de testemunhos, laminação, petrografia, MEV e granulometria do CENPES-Petrobras, pelas amostragens, soluções químicas e lâminas petrográficas confeccionadas.

Aos colegas de trabalho e amigos, pelas discussões e revisões, em especial para Jéssica Aguillar, Felipe Vasconcelos, Sandra Tonietto e Thisiane C. dos Santos.

Aos meus amigos da UFRJ, Anna Gabrielle, Dannel Dutra, Elaine Neri, Hamanda Kuntz, Jayrisson Melo, Leonardo Santos, Lucas Alfano, Maria Clara, Mateus Andrade, Paloma Lisboa, Raizza Soledad, Rodrigo Sangoi, Shirlene Barros e William Gouveia pelo carinho, compreensão das minhas ausências e por sempre me manterem atualizado de tudo.

Resumo

FELIZARDO DE SOUSA JÚNIOR, Gerson. **Caracterização Faciológica de Testemunho do Pré-Sal, Bacia de Santos, Campo de Sururu**. 2020, 92 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A exploração de petróleo nos reservatórios carbonáticos do pré-sal em águas profundas e ultraprofundas gerou um marco importante para as Geociências, principalmente no Brasil. Assim, estudar a gênese dessas rochas peculiares tornou-se missão de diversos pesquisadores de companhias de óleo e gás e universidades mundo afora. A busca por análogos desses carbonatos continentais aumentou significativamente os estudos de estromatólitos, travertinos, tufas, espeleotemas, caliches e paleossolos. A classificação dessas litologias é tema ainda bastante discutido devido às suas variedades composicionais e texturais, provenientes, principalmente, da susceptibilidade às transformações diagenéticas. Diante disso, o objetivo deste estudo é caracterizar faciológicamente 38,40 metros de rochas carbonáticas do pré-sal, amostradas da Formação Barra Velha, de um poço de petróleo do Campo de Sururu, Bacia de Santos. Após levantamento bibliográfico e descrição litológica, seis litofácies sedimentares carbonáticas foram classificadas com o auxílio dos segmentos de testemunhos, técnicas petrográficas com o auxílio de microscópio ótico por luz transmitida, catodoluminescência e mapeamento mineralógico. Processos diagenéticos de carstificação, cimentação, substituição e dolomitização foram evidenciados ao longo das seções estudadas. Calcita, dolomita, quartzo e barita foram as fases minerais mais presentes nessas rochas, estando como elementos primários e cimentos. Por fim, foi confeccionada uma tabela de litofácies utilizando a nomenclatura utilizada, imagens macroscópicas, microscópicas e exemplos da literatura.

Palavras-chave: Reservatórios Carbonáticos; Formação Barra Velha; Pré-sal; Bacia de Santos.

Abstract

FELIZARDO DE SOUSA JÚNIOR, Gerson. **Faciological Characterization of Pre-Salt Core Samples, Santos Basin, Sururu Field**. 2020, 92 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The exploration of oil and gas in the pre-salt carbonate reservoirs in deep and ultra-deep waters has generated an important milestone for geosciences, mainly in Brazil. The rocks described for this pre-salt interval are considered peculiar because they do not have analogues faithful to these deposits. In this way, to understand the genesis of these rocks has become a mission for researchers for oil and gas companies and universities around the world. The search for analogues of these carbonates has increased studies in continental systems as lakes, travertines and paleosols. The facies classification associated to those systems is still a topic widely discussed due to their compositional and textural varieties. Therefore, the aim of this study is to characterize the facies of 38,40 meters of pre-salt carbonate rocks, sampled from an oil well in the Sururu Field, Santos Basin. Six sedimentary carbonate lithofacies were recognized and classified on a macro- and micro-scale. Cathodoluminescence and mineralogical mapping were used to guide the identification and characterization of the depositional and diagenetic features. Diagenetic processes of carstification, cementation and substitution were described throughout the studied core. Calcite, dolomite, quartz and barite were the most common mineral phases identified. As a summary of the facies characterization, a table has been created which comprises the lithotype classification, macro- and microscopic images and finally examples from the literature.

Keywords: Carbonate reservoirs; Barra Velha Formation; Pre-Salt; Santos Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção esquemática modificada de exploração de petróleo em águas ultraprofundas. Fonte: PETROBRAS Disponível em:< https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/ >. Acesso em: 10/01/2020.	2
Figura 2 - Mapa localização do polígono do Pré-Sal (linha verde), contendo os campos de produção de óleo e gás das bacias de Campos e Santos. Ênfase no campo de Sururu (em vermelho). Fonte: Mapa confeccionado a partir de <i>shapefiles</i> disponíveis no banco de dados (BDEP) ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: < http://www.anp.gov.br/ >. Acesso em: 10/01/2020.	3
Figura 3 - Mapa de detalhe de campos de produção de óleo e gás. Campo de Sururu ao centro (nome em vermelho) ao centro. Fonte: Mapa confeccionado a partir de <i>shapefiles</i> disponíveis no banco de dados (BDEP) ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: < http://www.anp.gov.br/ >. Acesso em: 10/01/2020.....	4
Figura 4 - Estereomicroscópio Zeiss <i>Discovery V8</i> . Disponibilizados pelo CENPES-Petrobras.	6
Figura 5 - Microscópio ótico por luz transmitida ZEISS <i>Axiolmager.M2m</i> , à esquerda, e módulo <i>CITL Mk5-2</i> de catodoluminescência, à direita. Disponibilizados pelo CENPES-Petrobras.....	7
Figura 6 – Parte 1: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos (MOREIRA <i>et al.</i> 2007).....	10
Figura 7 – Parte 2: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos (MOREIRA <i>et al.</i> 2007).....	11
Figura 8 – Características texturais dos oólitos (modificado de TERRA <i>et al.</i> 2010).	13
Figura 9 – Características texturais dos oncólitos (modificado de TERRA <i>et al.</i> 2010).	13
Figura 10 – Pelóides e pelóides fecais (modificado de TERRA <i>et al.</i> 2010).....	14
Figura 11 – Intraclastos (modificado de TERRA <i>et al.</i> 2010).....	14
Figura 12 – Bioclastos (modificado de TERRA <i>et al.</i> 2010).	14
Figura 13 – Esferulitos (modificado de Terra <i>et al.</i> (2010).....	15
Figura 14 – Morfologias dos <i>shrubs</i> segundo influência microbial e fluxo de água. Modificado de ERTHAL <i>et al.</i> (2017).	16
Figura 15 - Morfologia macro e micro de <i>shrubs</i> (modificado de CLAES <i>et al.</i> 2017).	16
Figura 16 - Morfologia macro e micro de <i>shrubs</i> (modificado de CLAES <i>et al.</i> 2017).	17
Figura 17 – Classificação de rochas carbonáticas (modificado de FOLK 1962 <i>apud</i> Terra <i>et al.</i> 2010).....	19
Figura 18 – Classificação de rochas carbonáticas (modificado de DUNHAM (1962) <i>apud</i> Terra <i>et al.</i> 2010).....	20
Figura 19 – Classificação de rochas carbonáticas por Terra <i>et al.</i> (2010).....	22
Figura 20 - Classificação de litofácies carbonáticas <i>in situ</i> a partir dos seus constituintes por Gomes <i>et al.</i> (2020).	23
Figura 21 – Diagrama ternário da classificação de litofácies carbonáticas <i>in situ</i> a partir dos seus constituintes por Gomes <i>et al.</i> (2020).....	23
Figura 22 – Diagrama esquemática da precipitação de carbonato terrestre de forma interligada por Pedley & Rogerson (2010).....	25
Figura 23 – Distribuição geral dos principais grupos de litofácies (microcristalinas, cristalinas e granulares) identificadas no intervalo estudado do poço SB-1 por Falcão (2015).	26
Figura 24 - Perfil esquemático com a distribuição das litofácies do poço SB-1 por Falcão (2015).	27
Figura 25 – Estruturas resultantes da dissolução de rochas carbonáticas presentes em ambiente de caverna: estalactite, estalagmite, tufa, entre outros (FRISIA & BORSATO, 2010).	28
Figura 26 – Tipos de associações de microestruturas de calcretes (Wright e Tucker, 1991, Wrihth, 2007). Convenções de alfa (quadro a): 1. Matriz micrítica-microesparítica densa, 2.	

Nódulos,3. Rachaduras complexas e <i>crystallaria</i> , 4. Rachaduras circungranulares, 5. Cristais romboédricos de calcita, 6. Cristais de calcita corroídos, 7. Grãos detríticos flutuantes (corroídos), 8. Coroas aciculares de calcita em torno de grãos, 9. Calcita deslocativa (p.ex. com micas); de beta (quadro b): 1. Revestimento microbiano e oóides, 2. Calcita acicular, 3. Túbulos calcificados (principalmente fúngicos), 4. <i>Microcodium</i> , 5. Trama septal alveolar, 6. Pelotilhas calcificadas, 7. células vegetais calcificadas, 8. Calciesferas (fúngicas, perithecium), 9. Esferulitos.	29
Figura 27 - Tipos de poros da classificação modificado de Choquette e Pray (1970).	30
Figura 28 - Regiões de influência dos processos diagenéticos. Choquette e Pray (1970).	31
Figura 29 – BRC: Brecha, em vermelho; CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa; CAR: Calcário Arborescente, em lilás.	35
Figura 30 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo e CAR: Calcário Arborescente, em lilás.	36
Figura 31 – BRC: Brecha, em vermelho; CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo e CAR: Calcário Arborescente, em lilás.	37
Figura 32 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo; CAR: Calcário Arborescente, em lilás e CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa.	38
Figura 33 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo; CAR: Calcário Arborescente, em lilás, CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa; BRC: Brecha, em vermelho e CGR: Calcário Granular, em branco.	39
Figura 34 – CGR: Calcário Granular, em branco e CDF: Calcário Dendriforme, em verde. ..	40
Figura 35 – CGR: Calcário Granular, em branco.	41
Figura 36 – (A) Foto de detalhe: Litofácies Brecha.	42
Figura 37 – Litofácies Brecha: A e B – Detalhe em material castanho resultado da cominuição dos grãos/partículas do material infiltrado composto por micrita (setas amarelas) e fragmentos de calcita com extinção ondulante indiferenciado (setas verdes) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em do cimento de barita blocosa em nicóis paralelos e cruzados (setas laranjas), respectivamente.	43
Figura 38 – A: Brecha em nicóis paralelos; B: Brecha em nicóis cruzados e C: Mapa mineralógico brecha.	44
Figura 39 (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Arborescente.	45
Figura 40 – Litofácies Calcário arborescente: A e B – Detalhe em material castanho resultado da cominuição dos grãos/partículas (microfraturamento) em nicóis paralelos e cruzados (setas amarelas), respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de dolomita romboédrica em nicóis paralelos e cruzados (setas laranjas), respectivamente.	46
Figura 41 – F: Calcário arborescente em nicóis paralelos; G: Calcário arborescente em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário arborescente.	47
Figura 42 – (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Arbustiforme.	48
Figura 43 – Litofácies Calcário Arbustiforme: A e B – Detalhe em dissolução parcial dos <i>shrubs</i> arbustiformes (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em dolomita romboédrica em espaço inter- <i>shrub</i> (setas laranjas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	49
Figura 44 – F: Calcário arbustiforme em nicóis paralelos; G: Calcário arbustiforme em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário arbustiforme.	50
Figura 45 – (A) Foto de detalhe: Litofácies Calcário Crostiforme.	51
Figura 46 – Litofácies Calcário Crostiforme: A e B – Detalhe em arranjo denso dos elementos e fraturas (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de quartzo microcristalino, em mosaico e rosetas de calcedônia (setas laranjas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente;	52

Figura 47 – F: Calcário crostiforme em nicóis paralelos; G: Calcário crostiforme em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário crostiforme.....	53
Figura 48 – (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Dendriforme.	54
Figura 49 – Litofácies Calcário Dendriforme: A e B – Detalhe em porosidade inter- <i>shrub</i> (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de quartzo do tipo franja ao redor de porosidade intercrystalina (setas vermelhas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	55
Figura 50 – H: Calcário dendriforme em nicóis paralelos; I: Calcário dendriforme em nicóis cruzados e J: Mapa mineralógico Calcário dendriforme.	56
Figura 51 (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Granular.....	57
Figura 52 – Litofácies Calcário Granular: A e B – Detalhe em agregados de calcita com extinção ondulante indiferenciados (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em porção composta por pelóides esféricos a alongados (setas vermelhas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	58
Figura 53 – F: Calcário Granular em nicóis paralelos; G: Calcário Granular em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico Calcário Granular	59
Figura 54– Seção com preenchimento de cavidade por calcita e quartzo (prof.: 16,60m – Litofácies Brecha).....	60
Figura 55 - Seção com estruturas similares a espeleotemas (prof.: 35,40m – Litofácies Calcário Granular). Em azul, região de confecção da lâmina petrográfica.	60
Figura 56 - Precipitação de cristais dendriformes (possível teto de cavidade) (prof.: 35,80m - Litofácies Calcário Dendriforme).....	61
Figura 57 – Fotomicrografias da seção prof.: 35,40 m – Litofácies Calcário Dendriforme. A e B – Detalhe em feições calcítica concêntricas (possível corte basal de estalactite) (setas em laranja), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D –Detalhe em <i>shrubs</i> dendriformes (setas amarelas) e em preenchimento de fratura por quartzo em mosaico, em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	61
Figura 58 – A e B – Cimento de calcita (em vermelho tingido por solução de alizarina) englobando cristal de dolomita romboédrica (setas verdes) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	62
Figura 59 – A e B – Cristais romboédricos de dolomita preenchendo intensamente o espaço inter- <i>shrub</i> presentes na litofácies Calcário Arbustiforme (setas vermelhas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	63
Figura 60 – A e B – Cristais romboédricos de dolomita preenchendo intensamente o espaço inter- <i>shrub</i> na litofácies Calcário Arborescente (setas verdes), em nicóis paralelos e imagem por catodoluminescência, respectivamente.	63
Figura 61 – A e B – Cristais de barita blocosa (setas laranjas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente, encontradas na litofácies Brecha.	64
Figura 62 – A e B – Cimento de quartzo preenchendo intensamente o espaço inter- <i>shrub</i> (setas amarelas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente, presentes na litofácies Calcário Dendriforme.....	64
Figura 63 - A e B – Litofácies Calcário Arborescente mostrando substituição de calcita por dolomita (setas verdes) (tingimento vermelho dos elementos por solução de alizarina) e substituição de carbonato por sílica (setas vermelhas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.	65
Figura 64 - Perfil Esquemático do Empilhamento das Litofácies.....	66
Figura 65 – À direita, aspecto geral das fácies do poço SB-1. À esquerda, empilhamento das fácies com ambiente deposicional sugerido, modificado de Falcão 2015.....	68
Figura 66 - Ambiente deposicional de travertino subaéreo (Mancini <i>et al.</i> 2019).....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre litofácies e dimensões dos constituintes:.....	32
Tabela 2 - Litofácies carbonáticas interpretadas com sua estrutura, imagens macroscópicas, microscópicas e exemplos na bibliografia.....	70

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
3 LOCALIZAÇÃO.....	3
4 MATERAIS E MÉTODOS.....	5
5 GEOLOGIA REGIONAL – BACIA DE SANTOS.....	8
6 ESTADO DA ARTE.....	12
6.1 Composição.....	12
6.2 Classificação de rochas carbonáticas.....	18
6.3 Tufa, Travitufa e Travertino.....	25
6.4 Espeleotema em ambiente cárstico.....	28
6.5 Caliche e Paleossolo.....	29
6.6 Porosidade.....	30
6.7 Diagênese.....	32
7 RESULTADOS.....	33
7.1 Classificação das rochas descritas.....	33
7.2 Descrição faciológica.....	35
7.2.1 Brecha.....	43
7.2.2 Calcário Arborescente.....	46
7.2.3 Calcário Arbustiforme.....	49
7.2.4 Calcário Crostiforme.....	52
7.2.5 Calcário Dendriforme.....	55
7.2.6 Calcário Granular.....	58
7.3 Processos diagenéticos.....	61
7.4 Empilhamento das litofácies.....	67
7.5 Ambiente deposicional.....	68

7.6 Tabela de litofácies.....	71
7.7 Considerações.....	74
8 CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros resultados exploratórios do pré-sal da Bacia de Santos foram apresentados por Carminatti *et al.* (2008), que destacaram ser esta uma das maiores descobertas de petróleo até então realizadas no país. Isso despertou o interesse de diversos geocientistas que buscam entender melhor esses reservatórios, sua gênese, propriedades físicas e químicas.

A classificação das rochas carbonáticas lacustres da seção pré-sal é tema bastante discutido atualmente. De Grabau (1904) até Terra *et al.* (2010) houve uma compilação de diversos artigos que abordam aspectos texturais e composicionais. Trabalhos mais recentes como Falcão (2015), Wright & Barnett (2017), Lima & De Ros (2019) e Gomes *et al.* (2020) confirmam as lacunas e discussões ainda presentes. A busca por análogos desses carbonatos continentais aumentou significativamente a quantidade de pesquisas e artigos em relação às tufas, travertinos, caliches, paleossolos e estromatólitos, dentre outros depósitos.

O aumento na quantidade das reservas provadas, o entendimento do complexo sistema petrolífero e os avanços tecnológicos em exploração e produção em água ultraprofundas foram avanços significativos para as Geociências. Entender melhor a gênese dessas rochas é de suma importância para melhorar os modelos geológicos, otimizar custos operacionais e buscar novas reservas.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo principal a descrição de rochas carbonáticas de um poço de exploração de petróleo e gás do campo de Sururu – Bacia de Santos, localizada na seção conhecida como Pré-Sal (conjunto de rochas carbonáticas presentes abaixo da sucessão evaporítica de idade Aptiana - Figura 1), mais especificadamente dos carbonatos lacustres encontrados na Formação Barra Velha, visando caracterizar suas diferentes litofácies, estruturas deposicionais e feições diagenéticas, bem como aspectos texturais e composicionais.

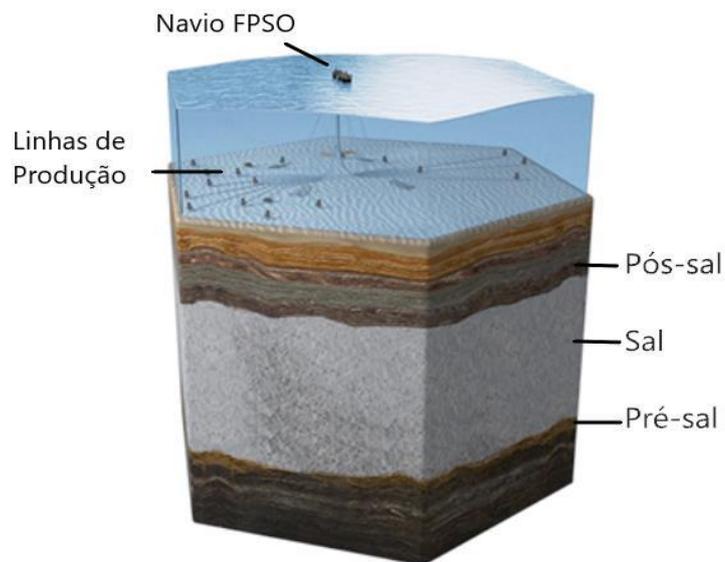


Figura 1 – Seção esquemática modificada de exploração de petróleo em águas ultraprofundas. Fonte: PETROBRAS Disponível em:< <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 10/01/2020.

3. LOCALIZAÇÃO

O poço estudado está localizado na Bacia de Santos (Figura 2), Sudeste brasileiro, mais especificamente no campo de petróleo de Sururu (Figura 3).



Figura 2 - Mapa localização do polígono do Pré-Sal (linha verde), contendo os campos de produção de óleo e gás das bacias de Campos e Santos. Ênfase no campo de Sururu (em vermelho). Fonte: Mapa confeccionado a partir de *shapefiles* disponíveis no banco de dados (BDEP) ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 10/01/2020.

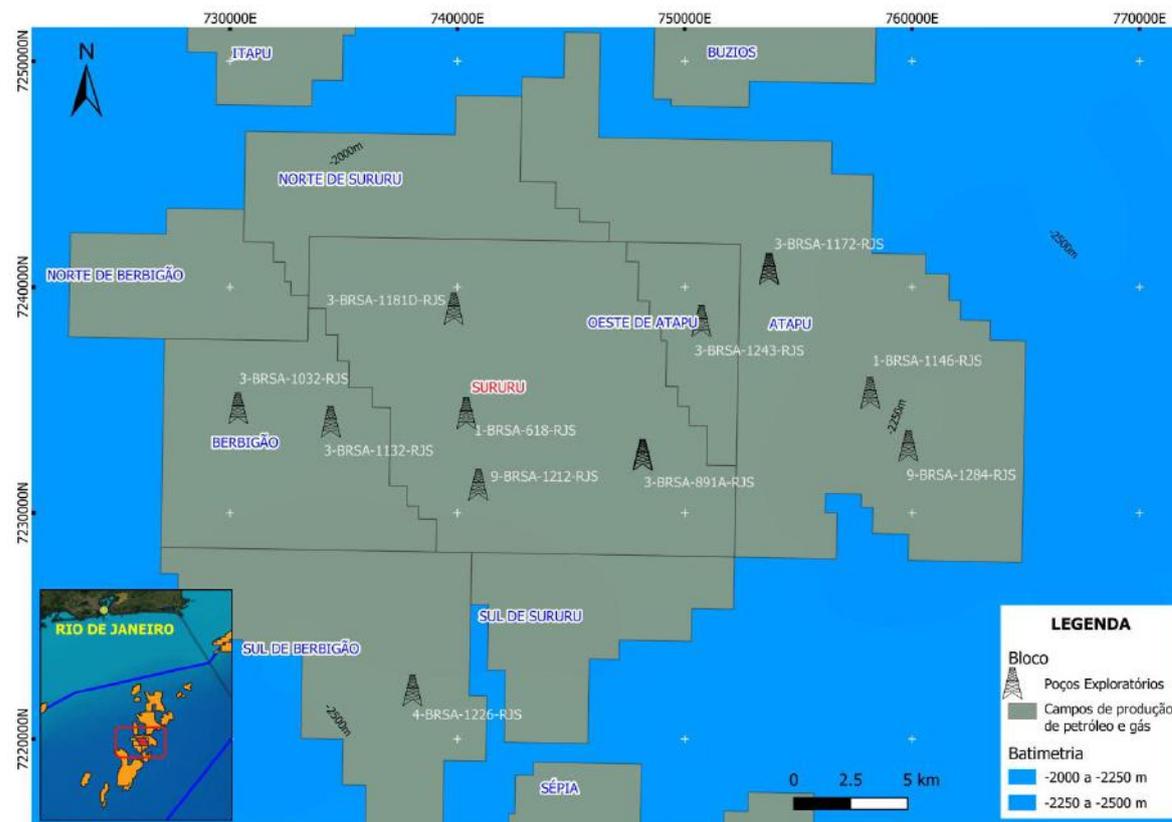


Figura 3 - Mapa de detalhe de campos de produção de óleo e gás. Campo de Sururu ao centro (nome em vermelho) ao centro. Fonte: Mapa confeccionado a partir de *shapefiles* disponíveis no banco de dados (BDEP) ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 10/01/2020.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em testemunhos de rochas carbonáticas que totalizam 38,4m, obtidos de um poço de petróleo do Pré-Sal do campo de Sururu, referentes à Formação Barra Velha. A metodologia adotada pode ser dividida em três etapas.

A primeira etapa foi a realização de uma ampla revisão bibliográfica sobre a geologia regional da Bacia de Santos por Pereira *et al.* (1986), Pereira & Macedo (1990), Pereira & Feijó, (1994) e Moreira *et al.* (2007), para melhor entendimento da formação desses depósitos. Posteriormente, a respeito dos tipos de constituintes carbonáticos existentes, os autores consultados foram Kitano (1963), Tucker (1981), Folk & Chafetz (1983), Chafetz & Folk (1984), Chafetz & Guidry (1999) e Erthal *et al.* (2017), assim como a classificação de rochas carbonáticas por Grabau (1904), Folk (1959, 1962), Dunham (1962), Embry & Klován (1971), Terra *et al.* (2010) e Gomes *et al.* (2020).

Ambientes deposicionais análogos à seção pré-sal foram descritos por Ford & Pedley (1990), Pentecost (2005), Wright (2007), Pedley (2009), Pedley & Rogerson (2010), Frisia & Borsato (2010), Alonso-Zarza & Wright (2010), Falcão (2015), Claes *et al.* (2017), bem como processos diagenéticos por Pettijohn (1957).

A segunda etapa corresponde às análises laboratoriais macroscópicas e microscópicas dos testemunhos. As litofácies sedimentares foram identificadas e classificadas com base nos trabalhos realizados por Falcão (2015), Wright & Barnett (2017), Claes *et al.* (2017), Lima & De Ros (2019) e Gomes *et al.* (2020). A classificação de porosidade foi utilizada segundo Choquette & Pray (1970). Mapas mineralógicos foram gerados a partir da técnica quantitativa de mineralogia (QEMSCAN - *quantitative evaluation of mineral by scanning electron microscopy*) em lâminas petrográficas e imagens de catodoluminescência foram obtidas para agregar informações quanto à gênese deposicional e diagenética das rochas estudadas.

As análises macroscópicas foram realizadas com o auxílio de estereomicroscópio *Zeiss Discovery V8* (Figura 4) disponibilizados pelo CENPES/PETROBRAS. As rochas foram submetidas à imersão em uma solução corrosiva de HCl diluída a 10%, e posterior lavagem com água corrente, com o objetivo de diferenciar constituintes e cimentos carbonáticos afetados pelo ácido, dos silicosos, ferruginosos ou de composição distinta cuja corrosão fosse ineficaz. As coletas do testemunho foram realizadas de forma orientada, resultando na confecção de 124 lâminas petrográficas. Posteriormente estas foram submetidas à solução de alizarina que permite identificação de fases calcíticas (tingidas em vermelho) de dolimíticas (sem tingimento).



Figura 4 - Estereomicroscópio Zeiss *Discovery V8*. Disponibilizados pelo CENPES-Petrobras.

As fotomicrografias foram obtidas com o microscópio ótico por luz transmitida (paralela e cruzada) *ZEISS AxioImager.M2m* e as análises de catodoluminescência pelo módulo acoplado *CITL Mk5-2* (Figura 5) disponibilizados pelo CENPES/PETROBRAS. A técnica do QEMSCAN possui o mesmo princípio do microscópio eletrônico de varredura convencional com detectores EDS (espectroscopia de raios X), porém atua de forma automatizada

transformando os dados químicos obtidos em mapas mineralógicos. A quantificação da mineralogia é feita em porcentagem da massa e da área distribuída na amostra. As fases identificadas como material rico em carbono (MC) podem estar relacionadas à presença de betume, matéria orgânica, resíduos de óleo, contaminantes de perfuração ou artefatos de lâmina.



Figura 5 - Microscópio óptico por luz transmitida ZEISS *Axiolmager.M2m*, à esquerda, e módulo *CITL Mk5-2* de catodoluminescência, à direita. Disponibilizados pelo CENPES-Petrobras.

A terceira etapa foi a consolidação das informações descritas previamente em uma tabela envolvendo litologias, texturas, estruturas e exemplos na bibliografia.

5. GEOLOGIA REGIONAL – BACIA DE SANTOS

A Bacia de Santos está situada no Sudeste brasileiro, compreendida entre os paralelos 23° e 28° Sul. Ocupa uma área aproximada de 350.000 km² até a cota batimétrica de 3.000 m. É uma extensa bacia sedimentar e está presente no litoral de diversos estados brasileiros, entre eles: Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, segundo Pereira & Feijó (1994).

O embasamento cristalino da Bacia de Santos é caracterizado por granitos e gnaisses de idade pré-cambriana pertencentes ao Complexo Costeiro e metassedimentos da Faixa Ribeira (MOREIRA *et al.* 2007).

Segundo Moreira *et al.* 2007, há três supersequências segundo zoneamento bioestratigráfico de ostracodes: rifte (sequências K20-K20-K34, K36 e K38); pós-rifte (sequências K44, K46-K48 e K50); e drifte (sequências K60, K70, K82-K86, K-88, K90, K100, K110, K120, K130, E10, E20, E30-E40, E50, E60, E70, E80, N10-N30, N40 e N50-N60 (Figura 6)

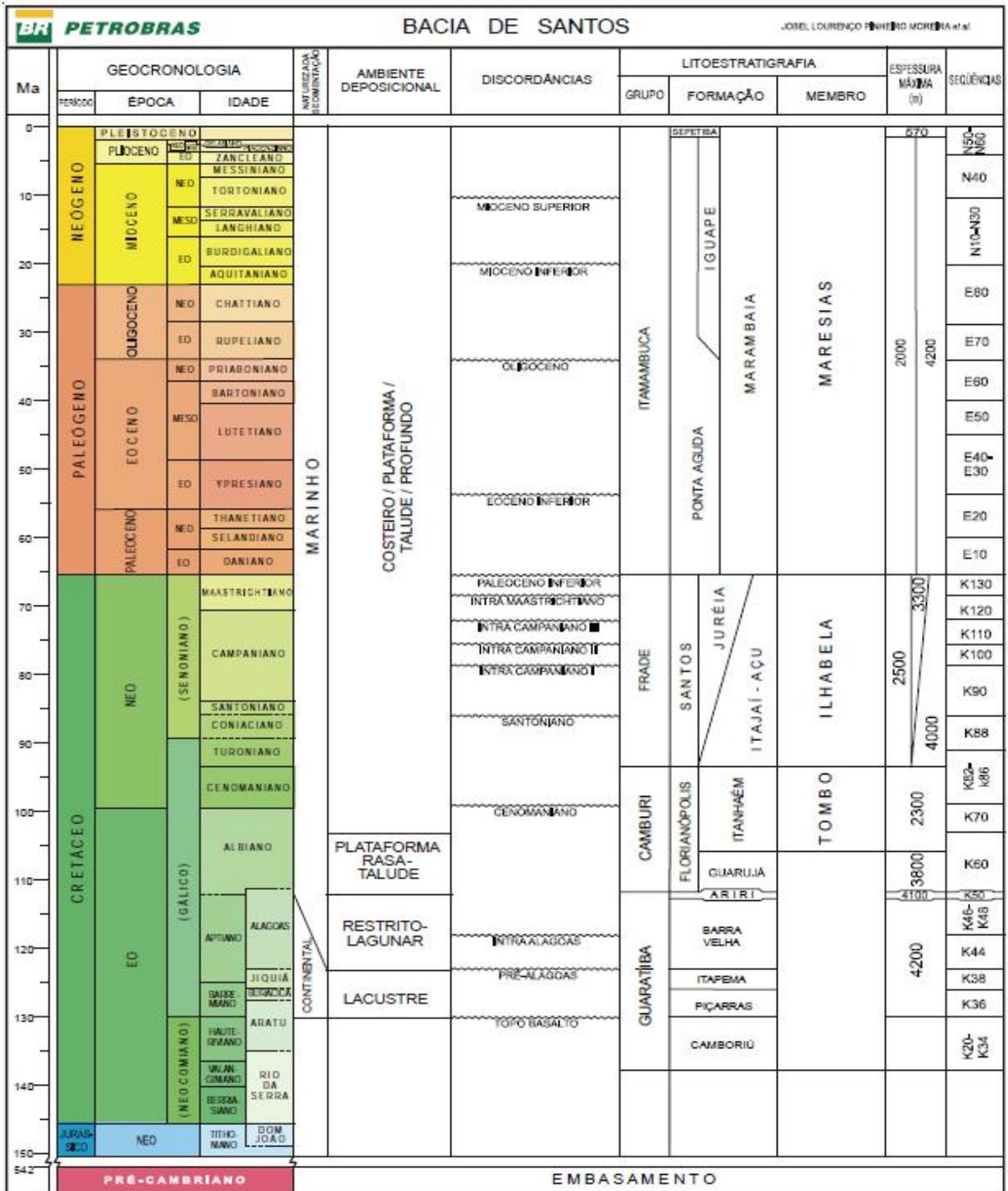
A supersequência da fase rifte na Bacia de Santos teve seu início no Hauteriviano (Rio da Serra e Aratu) e prolongou-se até o início do Aptiano (Jiquiá), sendo subdividido em três seqüências deposicionais denominadas K20-K20-K34 (Formação Camboriú – basaltos toleíticos amigdaloidais), K36 (Formação Piçarras – arenitos e conglomerados polimíticos) e K38 (Formação Itapema – coquinhas), de acordo com Moreira *et al.* (2007). Além disso, os mesmos autores elevaram a Formação Guaratiba à categoria de Grupo, anteriormente definida por Pereira & Feijó (1994). Após consolidarem novos dados de poços, MOREIRA *et al.* (2007) redefiniram as formações em: fase rifte (formações Camboriú, Piçarras e Itapema); e fase pós-rifte (formações Barra Velha e Ariri).

Foram identificados três eventos de magmatismo básico pré-albianos, datados pelo método Ar/Ar: derrames basálticos provavelmente subaéreos associados ao embasamento

econômico (130 Ma); basaltos subaquosos intercalados à seção rifte (121-130 Ma) e na porção inferior do Pós-Rifte (118 Ma) (MOREIRA *et al.* 2007).

Ainda segundo Moreira *et al.* (2007), à porção inferior da Formação Barra Velha do Grupo Guaratiba, cujos sedimentos depositaram-se durante o Eoaptiano, equivalente ao andar local Alagoas inferior. O ambiente deposicional desta seqüência é marcado por um ambiente transicional, entre continental e marinho raso, bastante estressante, com a deposição de calcários microbiais, estromatólitos e laminitos nas porções proximais e folhelhos nas porções distais. Ocorrem também grainstone e packstones compostos por fragmentos dos estromatólitos e bioclásticos (ostracodes) associados. Tais carbonatos encontram-se por vezes parcial ou totalmente dolomitizados.

A superseqüência drifte, composta pelo maior número de seqüências já mencionadas, inicia sua deposição no Neoaptiano (Alagoas superior) até o Pleistoceno (Figura 7). Inicia-se pela parte inferior da Formação Florianópolis, Formação Guarujá e a porção basal da Formação Itanhaém. Seu limite inferior é o topo das anidritas da Formação Ariri e o seu limite superior é marcado pela entrada dos primeiros sedimentos arenosos da Formação Itanhaém, acima do marco estratigráfico folhelho radioativo denominado Beta. A Formação Florianópolis corresponde às fácies proximais e está constituída por conglomerados, arenitos e folhelhos associado a sistemas de leques aluviais e deltaicos (MOREIRA *et al.* 2007).



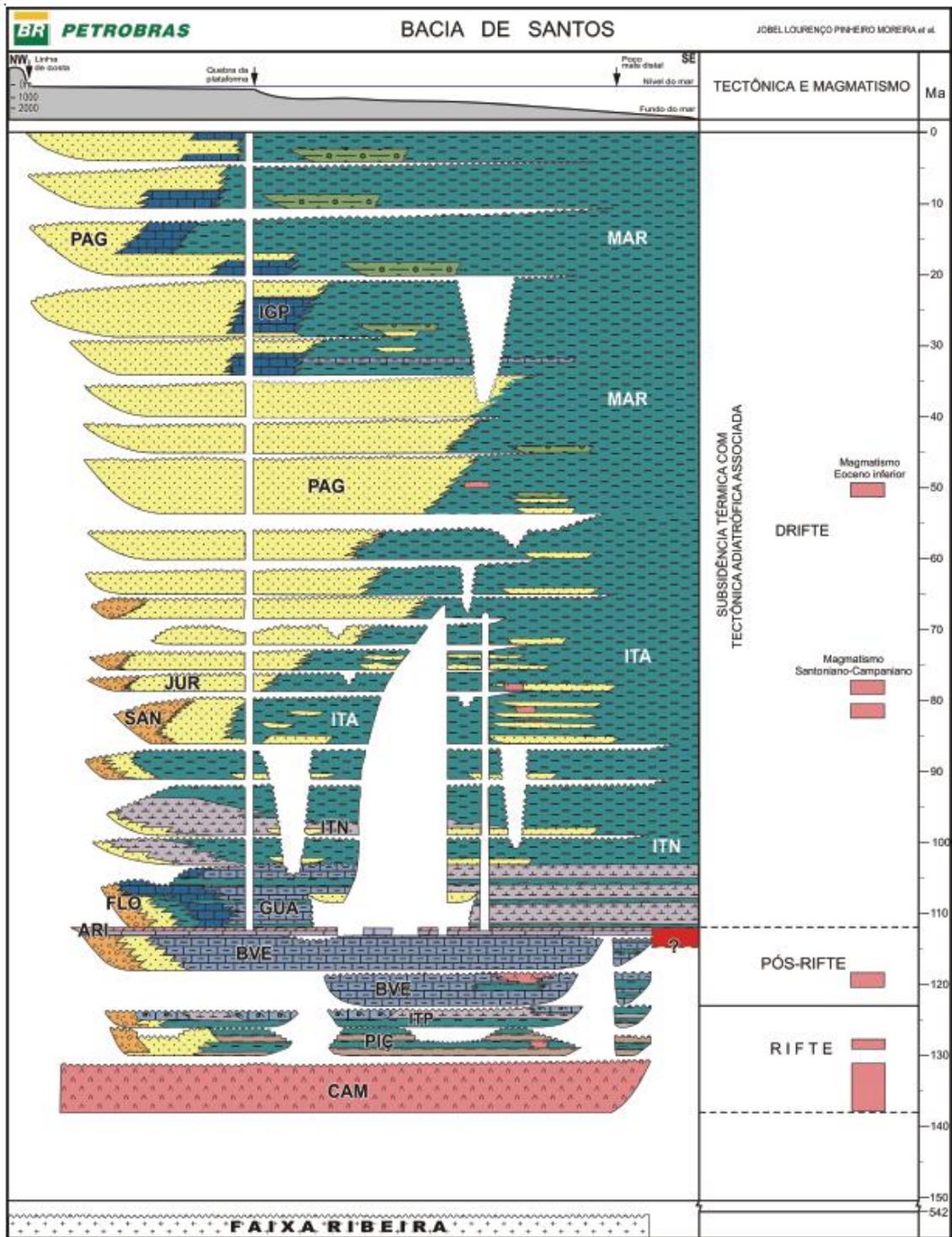


Figura 7 – Parte 2: Coluna estratigráfica da Bacia de Santos (MOREIRA *et al.* 2007).

6. ESTADO DA ARTE

Para a análise e classificação de rochas carbonáticas torna-se indispensável a identificação da presença de matriz e a definição do tipo de arcabouço, além dos principais tipos de grãos formadores (TERRA *et al.* 2010).

6.1 Composição:

6.1.1 Matriz carbonática:

Folk (1962) foi o primeiro a definir o termo micrita, abreviação para calcita microcristalina e caracterizada por partículas carbonáticas de granulometria inferior a $4\mu\text{m}$. Tucker & Wright (1990) mostra que as possibilidades mais aceitas de sua origem são: a abrasão mecânica e/ou biológica dos cristais, bioacumulação de organismos e precipitação por influência bioquímica.

6.1.2 Grãos aloquímicos e constituintes primários:

Os grãos aloquímicos são os constituintes do arcabouço da rocha carbonática. Dentre os tipos existentes, oólitos, oncólitos, pelóides, pelóides fecais, intraclastos e bioclastos são os mais comuns (TUCKER & WRIGHT, 1990).

6.1.2.1 Oólitos:

Os oólitos, ao menos durante o Fanerozoico, constituem partículas envelopadas, esféricas a subesféricas, originadas por acreção físico-química em torno de um núcleo (Figura 8). Possuem, em geral, tamanho areia, variando normalmente entre 0,2mm e 1,0mm, mas em alguns casos raros podem ultrapassar os 2,0mm. Muitos autores utilizam o termo pisolito para se referir a oólitos de tamanho maior que 2,0mm, entretanto, esta não é uma terminologia recomendada por confundir a gênese com a granulometria (TERRA *et al.* 2010).

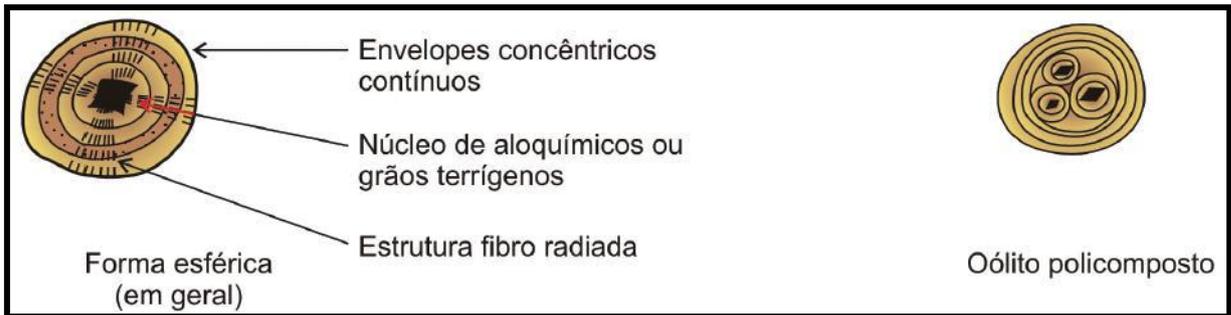


Figura 8 – Características texturais dos oólitos (modificado de TERRA *et al.* 2010).

6.1.2.2 Oncólitos:

Os oncólitos, segundo Terra *et al.* (2010), são grãos formados por acreção organo-sedimentar de cianobactérias, portanto, possuem sua origem diretamente ligada a partículas orgânicas (Figura 9).

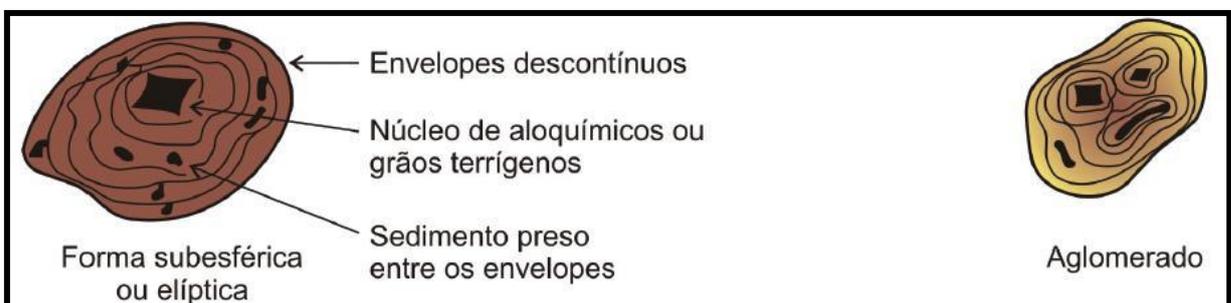


Figura 9 – Características texturais dos oncólitos (modificado de TERRA *et al.* 2010).

6.1.2.3 Pelóides e pelóides fecais:

Pelóides são grãos micríticos, subesféricos de difícil visualização de sua estrutura interna (Figura 10) (TERRA *et al.* 2010). Sua origem é incerta, pois este pode ser um grão aloquímico micritizado ou possuem origem fecal, recebendo o nome de pelóides fecais. Os pelóides são comuns em ambientes protegidos, tais como lagunas e planícies de maré (TUCKER, 1981), ou ainda no interior de plataformas e bancos, como observado nas Bahamas.

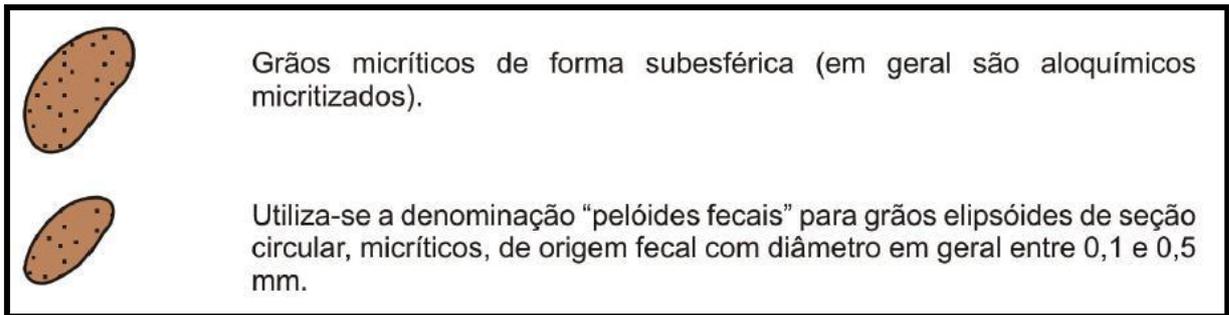


Figura 10 – Pelóides e pelóides fecais (modificado de TERRA *et al.* 2010).

6.1.2.4 Intraclastos:

Os intraclastos são fragmentos de composição diversa, penecontemporâneos aos sedimentos carbonáticos, parcialmente litificados, que são remobilizados, erodidos e redepositados na bacia (Figura 11) (TERRA *et al.* 2010).

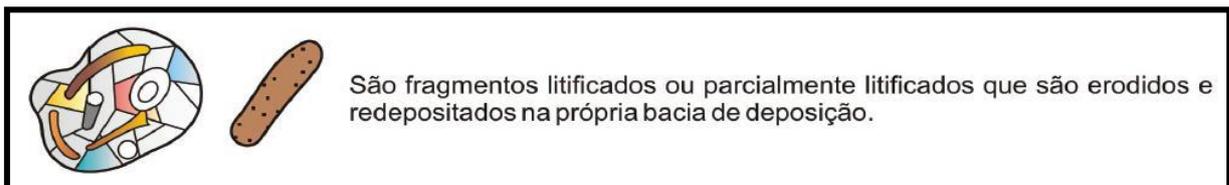


Figura 11 – Intraclastos (modificado de TERRA *et al.* 2010).

6.1.2.5 Bioclastos:

Os bioclastos são os principais constituintes das rochas carbonáticas e englobam todos os fósseis de estruturas calcárias de organismos ou os fragmentos destas estruturas (Figura 12). O método mais utilizado para a identificação dos bioclastos é a petrografia (TERRA *et al.* 2010).



Figura 12 – Bioclastos (modificado de TERRA *et al.* 2010).

6.1.2.6 Esferulitos

Os esferulitos foram definidos por partículas de forma esférica ou subesféricas menores que 2 mm, de estrutura interna variada (Figura 13). Podem ser *in situ* ou retrabalhados, ocorrendo de forma isolada ou amalgamada, conforme descrito por Terra *et al.* (2010).

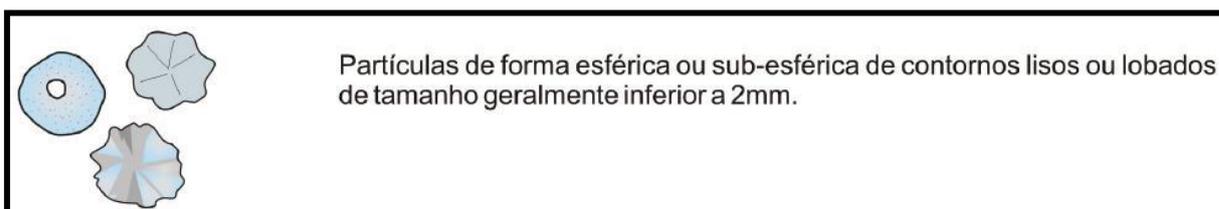


Figura 13 – Esferulitos (modificado de Terra *et al.* (2010).

6.1.2.7 Shrubs:

O termo *shrub* foi descrito pela primeira vez por Kitano (1963) e subsequentemente referido por Folk & Chafetz (1983) e Chafetz & Folk (1984), que declararam como “formas de crescimento arborescente semelhantes a arbustos ou samambaias que se ramificam para formar colônias de 2 a 8 cm de altura, dando a aparência de uma sucessão de florestas em miniatura”. Mais tarde, Chafetz & Guidry (1999) separaram em “arbustos bacterianos”, mostrando formas muito irregulares, e “arbustos de cristal” e “crostas de cristais de raios” exibindo padrões geométricos regulares.

Erthal *et al.* (2017), relacionaram as estruturas/morfologias de *shrubs* encontrados em Tivoli - Itália (pustular, arbustiforme, arborescentes, dendriformes ou em forma de crosta) com o fluxo de energia da água de precipitação e influência microbial (Figura 14).

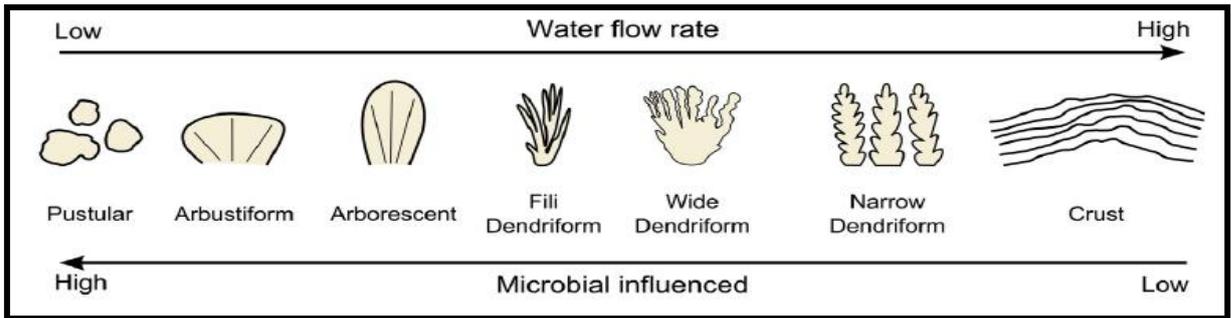


Figura 14 – Morfologias dos *shrubs* segundo influência microbial e fluxo de água. Modificado de ERTHAL *et al.* (2017).

Claes *et al.* (2017) utilizaram como objeto de estudo travertinos do sudoeste da Turquia para classificar os diferentes tipos de rochas baseado na morfologia dos *shrubs* (Figura 15 e 25).

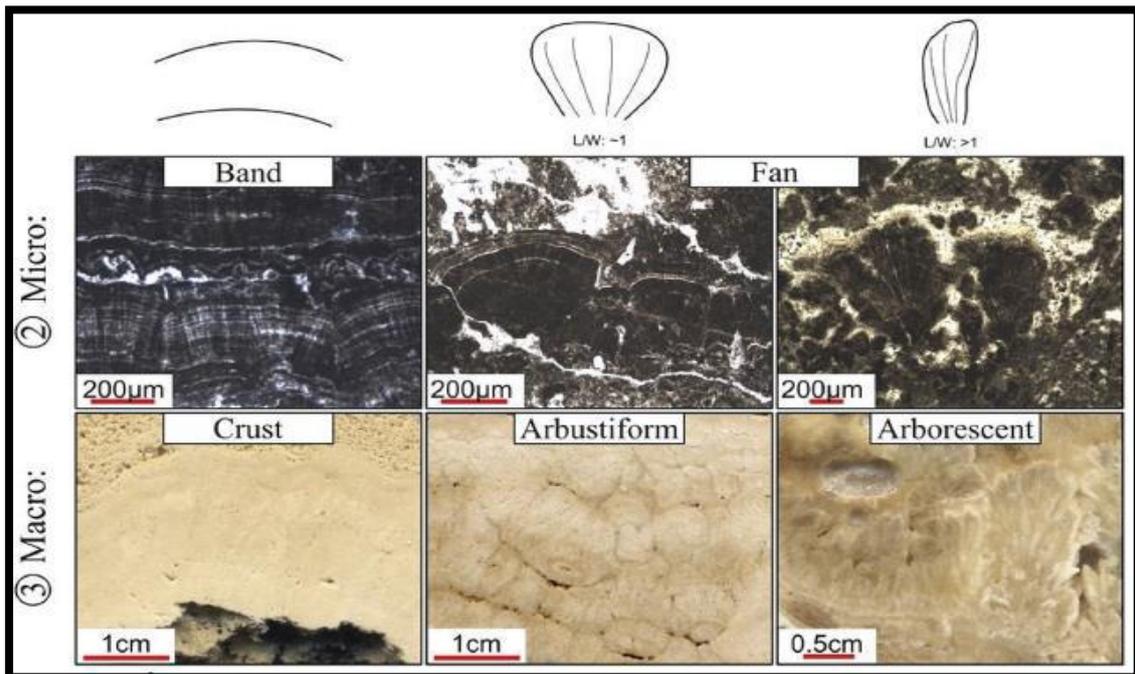


Figura 15 - Morfologia macro e micro de *shrubs* (modificado de CLAES *et al.* 2017).

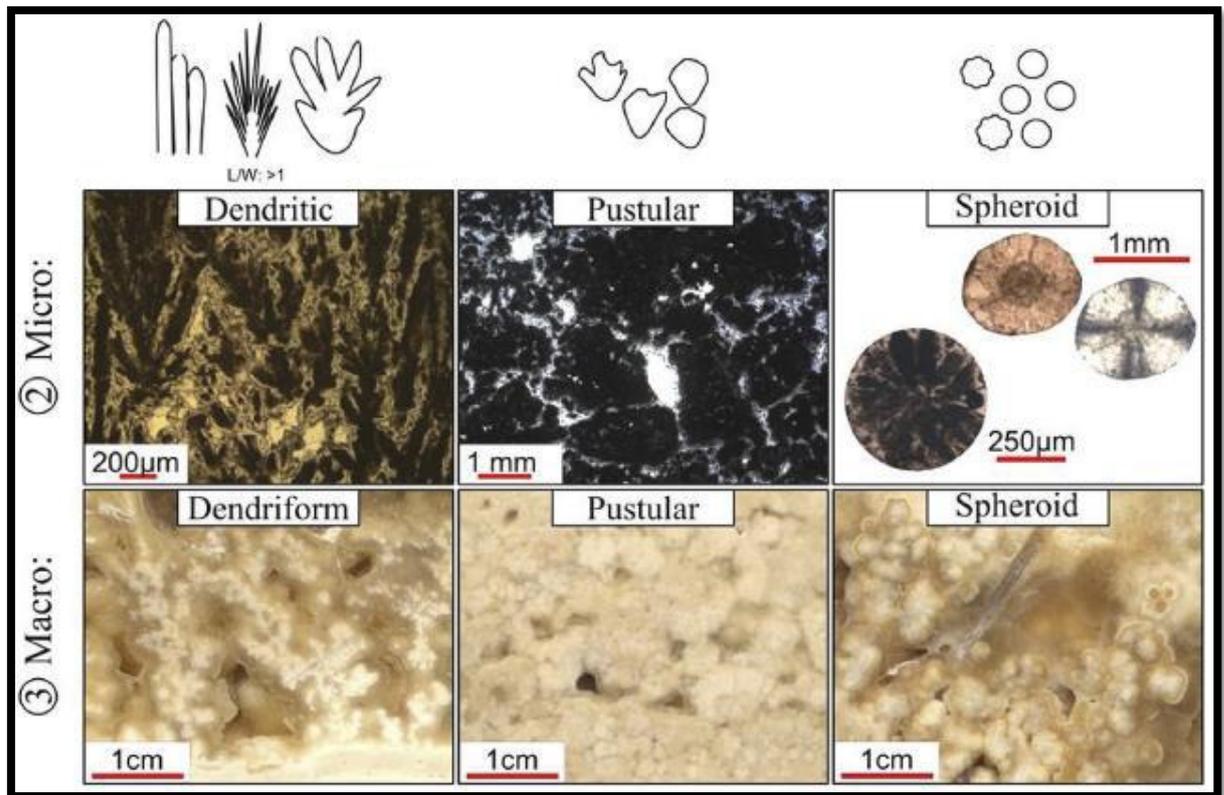


Figura 16 - Morfologia macro e micro de *shrebs* (modificado de CLAES *et al.* 2017).

6.1.3 Cimento:

Material quimicamente precipitado que preenche espaços porosos, de origem primária ou secundária (PETTIJOHN, 1957), podendo apresentar diversas composições: silicosos, carbonáticos, ferruginosos, dentre outras. Dependem exclusivamente dos íons disponíveis nos fluidos que ocupam o espaço poroso da rocha. É um dos fatores condicionantes das propriedades permoporosas das rochas.

6.2 Classificação de rochas carbonáticas:

A classificação de uma rocha carbonática sempre foi, e continua sendo atualmente, um tema bastante discutido pelo meio acadêmico. Granulometria, composição do arcabouço/matriz, presença de cimento e textura deposicional são alguns parâmetros norteadores das classificações utilizadas pelos estudiosos da área.

O primeiro a se dedicar ao assunto foi Grabau (1904) que descreveu diversos recifes de corais do Paleozoico. Seu estudo aponta para uma divisão das rochas carbonáticas em dois grandes grupos conforme gênese: orgânica ou clástica; e principalmente, granulometria dos detritos formadores dessas rochas.

Os carbonatos de origem orgânica seriam precipitados *in situ*, tais como os corais, caracterizados por massas carbonáticas que permanecem e se desenvolvem no local de origem. Os de origem clástica são definidos como brechas, conglomerados, arenitos, siltitos e lama de composição carbonática, encontrados nas margens dos recifes e em regiões mais distais desses ambientes.

Entretanto, essa primeira classificação proposta se mostrou muito generalizada, abrangendo majoritariamente o aspecto granulométrico dos grãos constituintes definindo: calcilito – rocha carbonática clástica com granulometria menor que 0,062 mm; calcarenito – rocha carbonática clástica com granulometria entre 0,062 e 2 mm; e, por fim, calcirrudito – rocha carbonática clástica com granulometria maior que 2 mm.

O trabalho de Folk (1959, 1962) (Figura 17) utilizou da constituição dos componentes aloquímicos, da matriz calcita microcristalina (micrita) e do cimento calcítico em seus estudos (aspectos composicionais). Ele dividiu sua classificação em: rochas aloquímicas (formadas por grãos carbonáticos retrabalhados) constituídas de intraclastos, oólitos, bioclastos ou pelóides e caracterizou a presença de cimento (calcita espática) ou matriz (micrítica); rochas ortoquímicas (precipitação *in situ* dos constituintes), formadas essencialmente por micrita ou micrita e

cimento (dismicrito); rochas cristalinas de composição calcítica ou dolomítica, e por último, rochas autóctones recifais – biolitos:

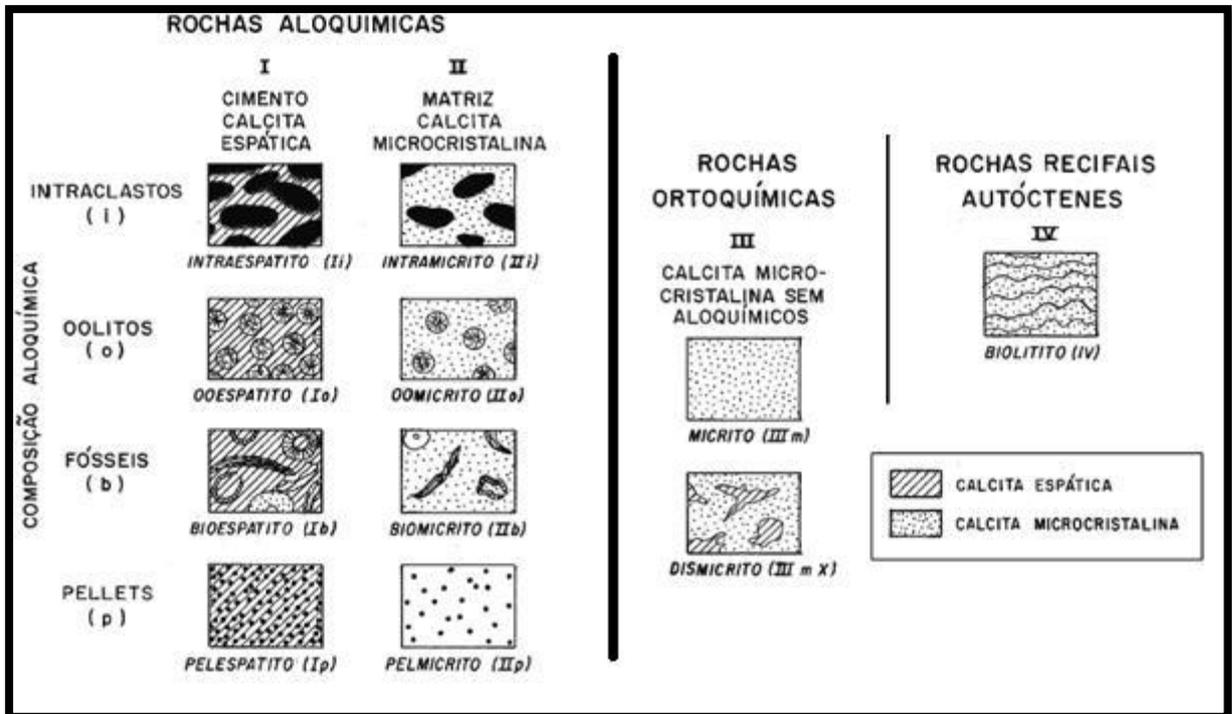


Figura 17 – Classificação de rochas carbonáticas (modificado de FOLK 1962 *apud* Terra *et al.* 2010).

Dunham (1962) utilizou de aspectos texturais deposicionais para embasar sua classificação, subdividindo-a em rochas com textura deposicional reconhecível (*mudstone*, *wackestone*, *packstone* e *grainstone*) e textura deposicional não reconhecível (calcário cristalino) (Figura 18).

Dentro das rochas com textura deposicional reconhecível, o autor define *mudstone* e *wackestone* como rochas suportadas por matriz, sendo a primeira constituída por menos de 10% de grãos e a segunda mais de 10%. *Packstone* e *grainstone* como rochas suportadas por grãos, sendo a lama carbonática presente na primeira litologia e ausente na segunda. *Boundstone* foi definido como bioconstruções cujos componentes originais foram ligados durante a deposição, diferentemente das litologias antes definidas.

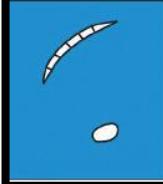
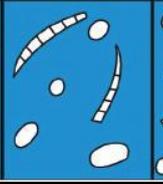
TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					Textura deposicional não-reconhecível
Componentes originais não-ligados durante a deposição				Componentes originais ligados durante a deposição	
Contém Matriz (Partículas tamanho argila/silte fino)			Sem matriz, grão-suportado		
Suportado pela matriz		O arcabouço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

Figura 18 – Classificação de rochas carbonáticas (modificado de DUNHAM (1962) *apud* Terra *et al.* 2010).

Embry & Klovan (1971) ampliaram os conceitos e adaptaram a classificação proposta por Dunham (1962). Inseriram aspectos como tamanho do grão aloquímico (maiores ou menores que 2 mm), definiram novas rochas denominadas *floatstone* e *rudstone*, além de subdividir o *boundstone* em: *bafflestone*, *bindstone* e *framestone* a partir dos organismos geradores dessas litologias.

Terra *et al.* (2010) faz uma síntese das principais classificações de carbonatos anteriormente utilizadas, modifica e insere novos conceitos visando abranger as fácies carbonáticas dos depósitos do Pré-Sal (Figura 19). Os autores dividiram as rochas em quatro grupos cujo parâmetro é a textura deposicional, sendo estes:

1. Elementos não ligados durante a formação (*mudstone*, *wackestone*, *packstone*, *grainstone*, *floatstone*, *rudstone*, bioacumulado, brecha);
2. Elementos ligados durante a formação ou *in situ* (*boundstone*, estromatolito, estromatolito arborecente, estromatolito arbustiforme, estromatolito dendriforme, trombolito, dendrolito, leiolito, esferulitito, travertino e tufa);

3. Elementos ligados ou não durante a formação (laminito, laminito liso, laminito crenulado); e, por último:
4. Textura deposicional irreconhecível (calcário cristalino, dolomito).

BR										
Classificação de Rochas Carbonáticas Aplicável às Bacias Sedimentares Brasileiras										
	NOMENCLATURA PRINCIPAL	TEXTURA	DEFINIÇÃO	NOMENCLATURA COMPLEMENTAR	REFERÊNCIA DO MODIFICADO DE	TERMOS CORRELATOS	TEXTURAS MODIFICADORAS	TAMANHO MÉDIO DOS ELEMENTOS EM CORTE VERTICAL E EMPACOTAMENTO	FORMA EXTERNA (exceto de lamelinhos)	
Elementos não ligados durante a formação	MUDSTONE		Rocha suportada pela matriz com menos de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM (Caso ocorram grãos) colóides, oncolíticos, pelóides, pelóides locais, intracelásticos, biolíticos, esferulíticos ou CALCILUTITO A BIRDEYES= rocha suportada pela matriz com porosidade fenestral ou lentes de calcita espática	Dunham (1962)	Calcilutito, Diamirrito, mudstone e birdseyes.				
	WACKESTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% de grãos (tamanho areia ou maior).	COM (para os grãos) - colóides, oncolíticos, pelóides, pelóides locais, intracelásticos, biolíticos, esferulíticos.	Dunham (1962)					
	PACKSTONE		Rocha suportada pelos grãos com matriz.	*+ (composição principal): colítico, oncolítico, peloidal, peloidal local, intracelástico, biocelástico, esferulítico, com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitas, leiolito, dendrolito	Dunham (1962)	Calcarenito, oomirrito, biomirrito, petromirrito, intramirrito				
	GRAINSTONE		Rocha suportada pelos grãos, sem matriz (< 5% de matriz).	*+ (composição principal): colítico, oncolítico, peloidal, peloidal local, intracelástico, biocelástico, esferulítico, com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitas, leiolito, dendrolito	Dunham (1962)	Calcarenito, oospático, biocapático, paleospático, intracapático	CF feições de exposição: Com falhas pedogênicas; Si turbado; Dolomitizado; Si bicado; Com Hangground; etc.			
	FLOATSTONE		Rocha suportada pela matriz com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	COM (para os grãos) - colóides, oncolíticos, pelóides, pelóides locais, intracelásticos, biolíticos, esferulíticos. Com fragmentos de estromatolitos, trombolitos, laminitas, leiolito, dendrolito.	Embry & Kiwan (1971)					
	RUDSTONE		Rocha suportada pelos grãos com mais de 10% dos grãos maiores que 2 mm.	*+ (composição principal): colítico, oncolítico, peloidal, peloidal local, intracelástico, biocelástico, esferulítico, com fragmentos de estromatolito, trombolito, laminita, leiolito, dendrolito, esferulítico.	Embry e Kiwan (1971)	Brecha				
	BIOACUMULADO		Rocha constituída pela dominância de um tipo de organismo sem entrelaçamento (in situ) e granulometria areia ou maior.	*+ organismo formador: ex. ostracodes, bivalves, macrobraziliários, crinídeos, etc...	Carozzi (1972)	Coquina				
	BRECHA		Rocha suportada pelos grãos com mais de 50% dos grãos angulosos maiores que 2 mm.	*+ (composição principal): intracelástico, com fragmentos de estromatolito, trombolito, laminita, leiolito, dendrolito, esferulítico.	Figal (2004), Pettijohn (1974)	Brecha de Colapso, Brecha, Rudstone com clastos angulosos				
Elementos ligados durante a formação - in situ	BOUNDSTONE		Rocha formada in situ cujos componentes da trama original (fibrilha original) foram ligados durante a deposição.	*+ principais organismos formadores: ex. coralgas, a rudistas, a estromatoparióides, etc...	Dunham (1962)	Biolito, Bafflestone, Bindstone, Framestone.	CF feições de exposição; CF feições pedogênicas; Si turbado; Dolomitizado; Si bicado, etc			
	ESTROMATOLITO		ESTROMATOLITO							
			ESTROMATOLITO ARBORESCENTE - os componentes internos se organizam de forma ramificada divergente e possuem comprimento maior que a largura.							
			ESTROMATOLITO ARBUSTIFORME - os componentes internos se ramificam ou não desde a base e a razão altura/largura é aproximadamente 1:1							
			ESTROMATOLITO DENDRIFORME - os componentes internos se organizam de forma intensamente ramificada divergente em que o comprimento é muito maior que a largura.		Riding (2000)					
	TROMBOLITO		Depósito com textura macroscópica coagulada (clotted), maciça e dómica. Na maioria das vezes de origem microbial.					Micagulado (notified) Si turbado		
	DENDROLITO		Depósito microbial de estrutura dendrítica formada por cianobactérias esqueléticas.					CF feições de Espelho CF feições pedogênicas Dolomitizado, Sulfidado, etc		
	LEIOLITO		Carbonato microbial dómico, sem laminação ou coágulos.						Levante dómico, Dómico, Colunar	
	ESFERULITITO		Rocha composta por partículas de formas esféricas ou subesféricas de contornos lisos ou lobados (esferulíticos) de tamanho geralmente inferior a 2 mm e que podem ocorrer de forma amalgamada ou isolados.	Esferulito-suportado com argila (<10%)= ESFERULITITO COM ARGILA. Argila-suportado, com esferulitos= ARGILITO COM ESFERULITOS; No caso de argila ocorrer em lamelas= ARGILITO LAMELAR COM ESFERULITOS	Este trabalho				Levante dómico, Dómico	
TRAVERTINO & (TUPA)		Rocha carbonática bandada formada pela precipitação em superfície de soluções concentradas em CaCO ₃ ao redor de fontes, (em geral quentes) devido a perda de CO ₂ por evaporação. A variedade mais esponjosa e menos compacta é denominada TUPA.		Riding (2000), Pettijohn (1957)						
Elementos ligados ao não	LAMINITO		Rocha carbonática de granulose fina (areosa a silu peloidal) formada pela recristalização de laminações delgadas. As laminações tendem a ser plano-paralelas, com superfície lisa (origem microbial) ou ondulada (origem microbial).	LISO CRENJULADO	Demicco (1994)	Estere, estere microbial, tapete microbial, estere algal, laminito microbial, biolaminito				
Textura original não reconhecível	CALCÁRIO CRISTALINO		Rocha carbonática totalmente recristalizada não sendo possível identificar sua textura original (deposicional). CALCÁRIO MICROCRISTALINO: cristais entre 5 e 50 µm		Folk (1962), Dunham (1962)	Espático, Microespático				
	DOLOMITO		Rocha carbonática totalmente dolomitizada não sendo possível identificar sua textura original (deposicional). MICRODOLOMITO: cristais entre 5 e 50 µm			Doloespático, Microdoloespático				

Figura 19 – Classificação de rochas carbonáticas por Terra *et al.* (2010).

Gomes *et al.* (2020) também propõem uma classificação para rochas carbonáticas baseada na quantificação de elementos como *shrubs*, esferulitos e conteúdo de lama carbonática (Figura 20 e 20).

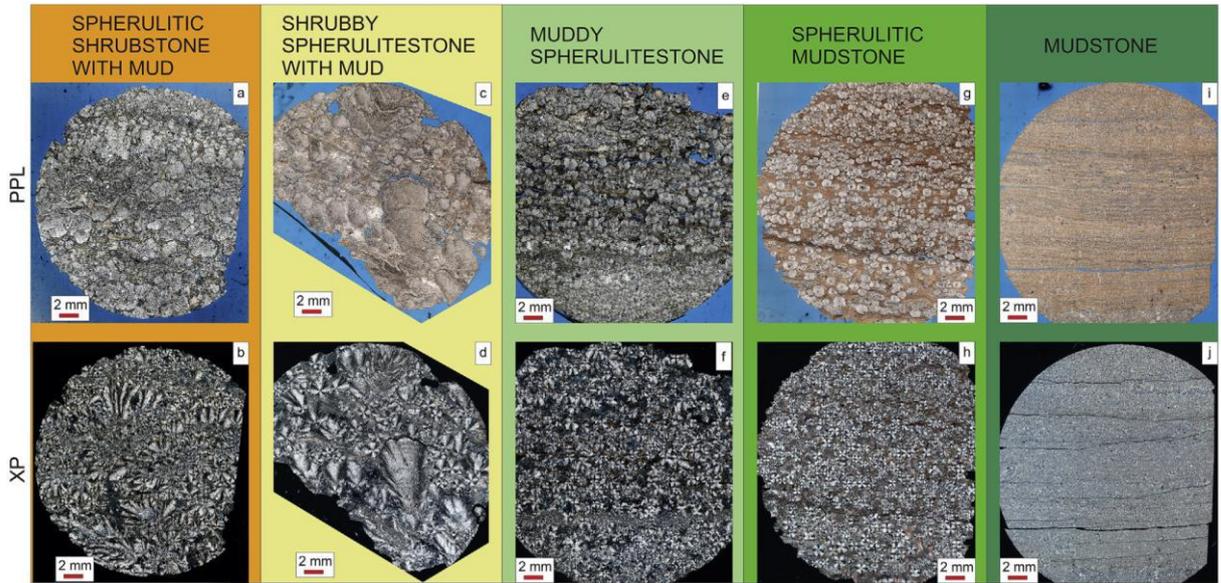


Figura 20 - Classificação de litofácies carbonáticas *in situ* a partir dos seus constituintes por Gomes *et al.* (2020).

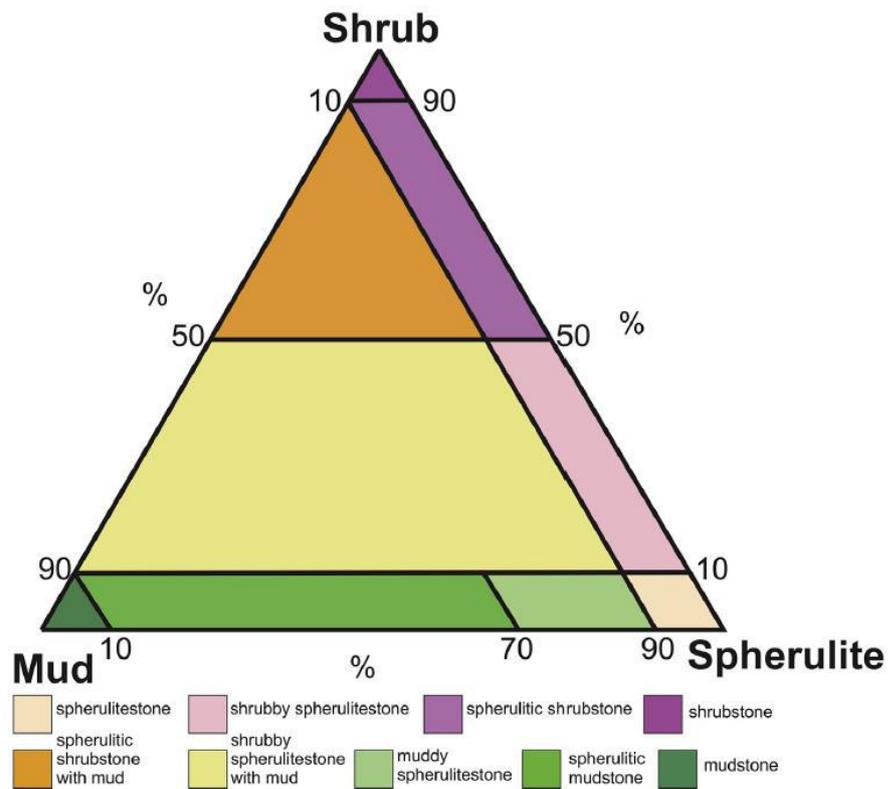


Figura 21 – Diagrama ternário da classificação de litofácies carbonáticas *in situ* a partir dos seus constituintes por Gomes *et al.* (2020).

6.3 Tufa, Travitufa e Travertino:

Diversos autores apresentam variadas definições do termo travertino (Lorah & Herman, 1988; Ford & Pedley, 1990; Riding, 2000; Pedley, 2009; Capezzuoli *et al.* 2014).

Riding (2000) define travertino como carbonatos autóctones, não marinhos, laminados, depositados a partir de fontes termais e comumente exibem abundante fábrica arbustiva (*shrubs*). Sua precipitação é abiogênica, comum em água doce e resulta da eliminação de gases ricos em CO₂ (*degassing*) conforme mostrado em estudos por Lorah & Herman (1988). Esses depósitos, precipitados em águas com altas temperaturas, não são propícios para o crescimento de plantas e árvores (macrófitas), ainda que haja colonização por bactérias e cianobactérias, como apontam Ford & Pedley (1990), Pentecost (2005) e Pedley (2009).

Capezzuoli *et al.* (2014) fazem uma síntese bibliográfica, com os diversos parâmetros já propostos para definir e diferenciar depósitos de tufa e travertino. Temperatura da água de formação, fonte de dióxido de carbono, mecanismos de precipitação e mediação biológica/bioquímica são alguns dos fatores determinantes na escolha da nomenclatura para definir essas rochas carbonáticas. De um modo geral, tufa se refere a depósitos de carbonatos precipitados pela ação de águas superficiais, saturadas principalmente em íons Ca⁺² e Mg⁺², também presentes em áreas cársticas, contendo texturas originadas pela ação de microrganismos. O termo travertino está mais associado a depósitos carbonáticos oriundos de locais tectonicamente ativos gerando falhas, que, por sua vez, carregam fluidos quentes enriquecidos em cálcio, magnésio e outros íons, com pouca ou nenhuma influência biológica.

Pedley & Rogerson (2010), esquematizam a precipitação de carbonatos integrando os sistemas cársticos, ambientes de riachos, lagos e pântanos (tufas) e em situações subterrâneas (espeleotemas) (Figura 22).

Ainda segundo Capezzuoli *et al.* (2014), o termo travitufa foi utilizado para distinguir as tufas com assinatura hidroquímica de água superficial das aquecidas geotermicamente por estarem localizadas em regiões periféricas a áreas tectonicamente ativas.

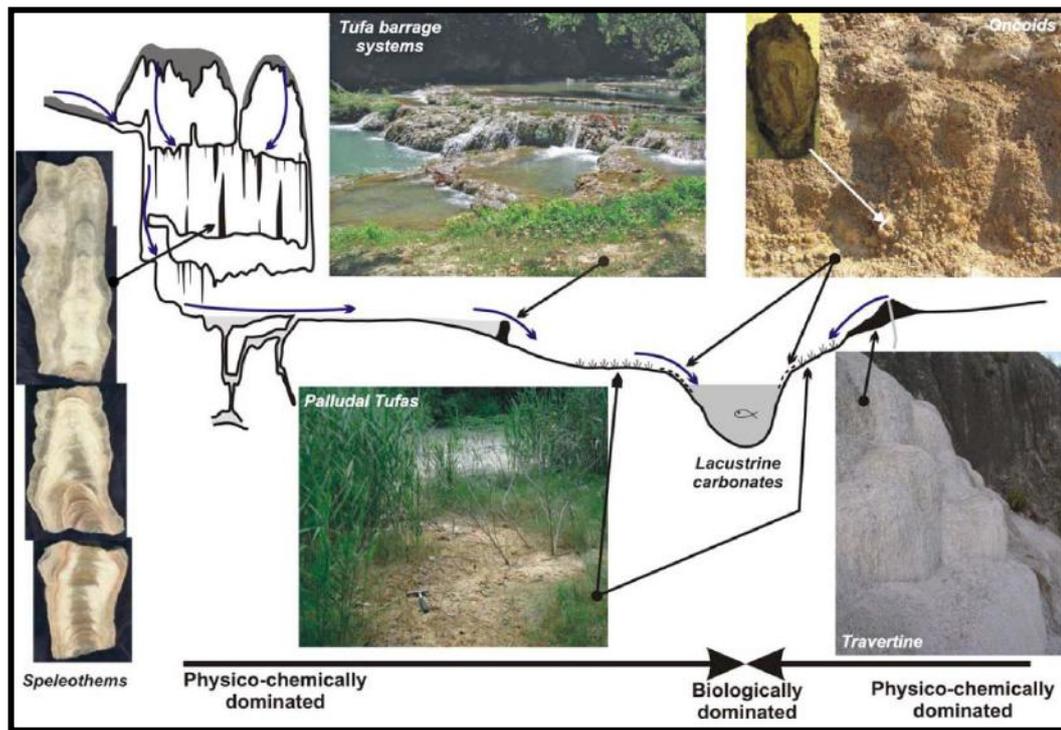


Figura 22 – Diagrama esquemática da precipitação de carbonato terrestre de forma interligada por Pedley & Rogerson (2010).

6.3.1 Exemplo de estudo comparativo (pré-sal X travertino):

Diversos autores propõem nomenclaturas para as diferentes litofácies encontradas em sistemas de travertino como Falcão (2015), Claes *et al.* (2017), Erthal *et al.* (2017) entre outros.

Falcão (2015) descreve as litofácies sedimentares carbonáticas de um poço da seção Pré-Sal da Bacia de Santos, denominado SB-1 (Figura 23), e as compara com as litologias vistas num sistema de travertino na região de San Juan, Argentina.

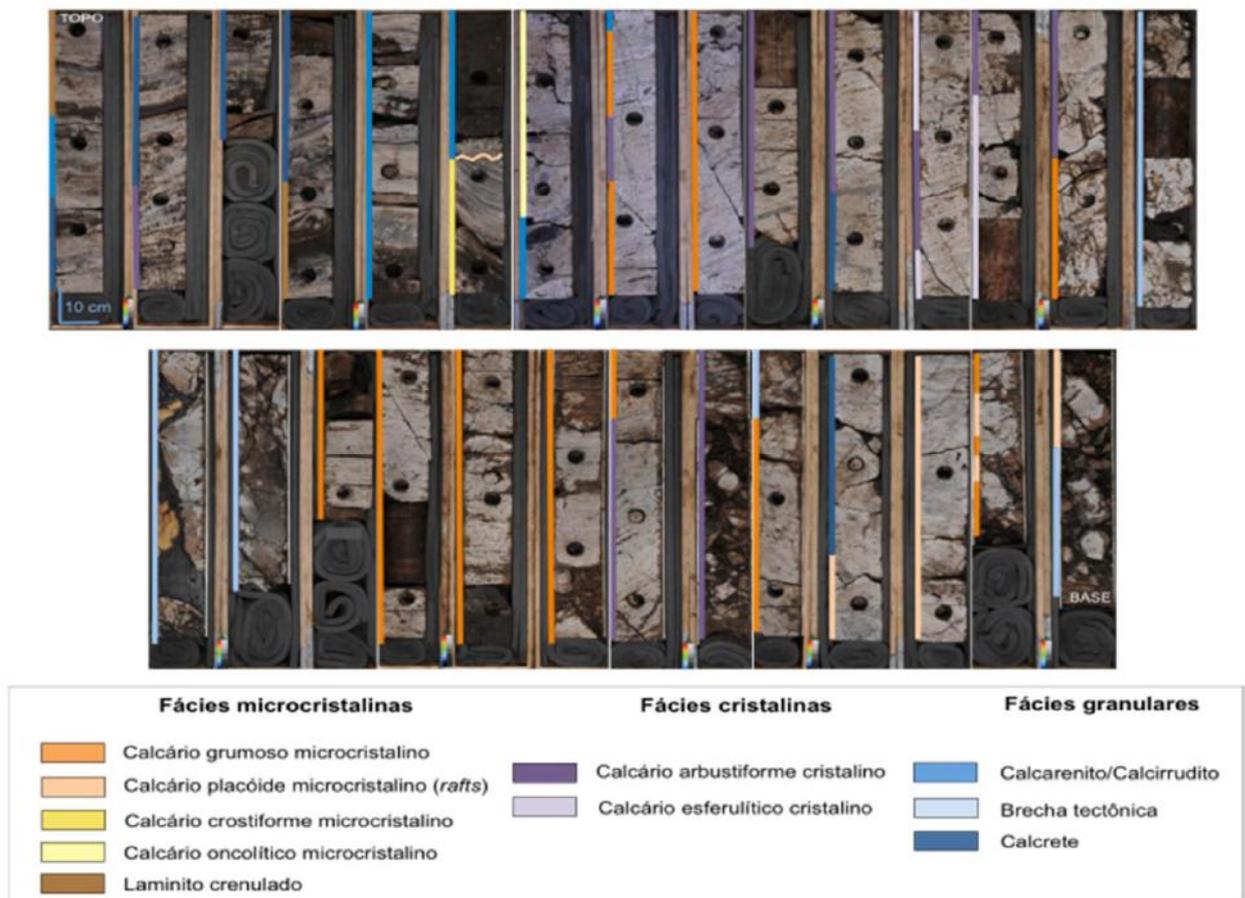


Figura 23 – Distribuição geral dos principais grupos de litofácies (microcristalinas, cristalinas e granulares) identificadas no intervalo estudado do poço SB-1 por Falcão (2015).

A autora separa as litofácies em: microcristalinas (calcário grumoso, calcário placóide, calcário crostiforme, calcário oncolítico e laminito crenulado), cristalinas (calcário arbustiforme e calcário esferulítico) e granulares (calcarenito/calcirrudito, brecha tectônica e calcrete).

Falcão (2015) ainda sugere que as litofácies carbonáticas encontradas no poço SB-1 possam indicar que as rochas foram precipitadas em um sistema de travertino subaéreo e são também reconhecidas na pedreira de travertino em San Juan, Argentina.

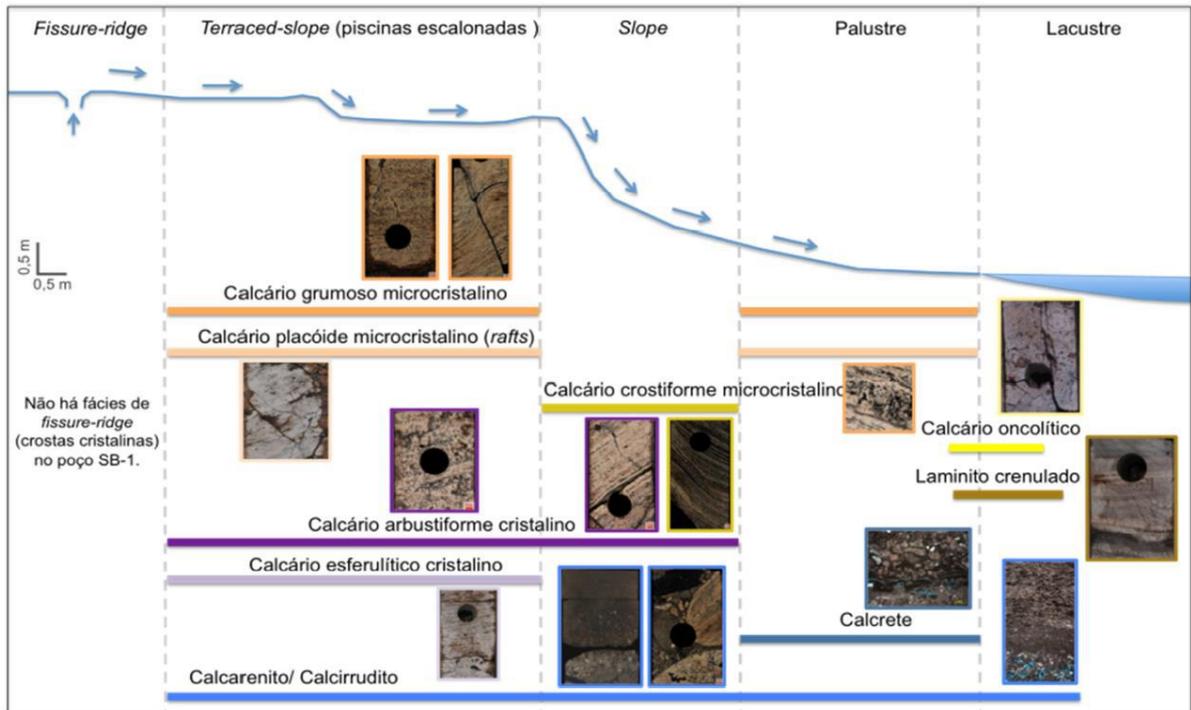


Figura 24 - Perfil esquemático com a distribuição das litofácies do poço SB-1 por Falcão (2015).

6.4 Espeleotema em ambiente cárstico:

Segundo Ford & Pedley (1996), os ambientes cársticos se desenvolvem em muitos locais ao redor do mundo, onde calcários e dolomitas (e menos comumente gipsita) emergem, e onde há água corrente suficiente para dominar processos de dissolução. Essa interação entre rochas solúveis e intemperismo por dissolução produz um conjunto único de formas terrestres superficiais e subterrâneas e um terreno normalmente dominado pela drenagem subterrânea. Embora as paisagens cársticas sejam caracterizadas por formas de relevo derivadas da dissolução, há algumas outras formas deposicionais espetaculares, como barragens de tufa e cascatas.

Os depósitos cársticos são produzidos por processos deposicionais físicos, químicos e biomedidos (Figura 25). Os processos físicos são mais típicos em regiões tectonicamente jovens, enquanto a precipitação química em larga escala é comum quando o carste está maduro. Sedimentos clásticos em ambientes endocársticos compreendem todos os tamanhos, desde matações até argila, incluindo brechas que se formam a partir do colapso do telhado da caverna e conglomerados de deposição por rios subterrâneos. A argila é o produto comum do intemperismo em calcário e dolomita e pode formar depósitos espessos no chão da caverna. (Frisia & Borsato, 2010).

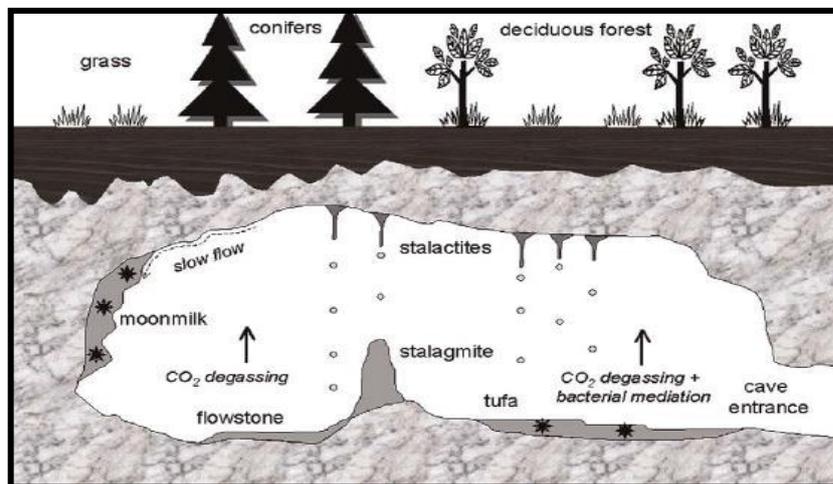


Figura 25 – Estruturas resultantes da dissolução de rochas carbonáticas presentes em ambiente de caverna: estalactite, estalagmite, tufa, entre outros (FRISIA & BORSATO, 2010).

6.5 Caliche e Paleossolo:

Caliche ou calcrete são um dos tipos de carbonatos não marinhos que receberam muita atenção de vários cientistas. Esse interesse em calcretes resulta de sua ampla ocorrência em ambientes continentais, e porque são importantes repositórios de informações sobre a reconstrução de ecossistemas e ambientes passados e sobre os regimes tectônico, climático e sedimentar em que se formaram. A classificação dos calcretes é complexa, pois vários critérios podem ser utilizados. (ALONSO-ZARZA & WRIGHT, 2010).

Os calcretes podem ser separados em dois tipos (WRIGHT & TUCKER, 1991; WRIGHT, 2007): pedogênicos ou vadosos, associados a desenvolvimento de perfis de solos e freáticos, relacionados a zona saturada por águas subterrâneas ricas em carbonato de cálcio (Figura 26).

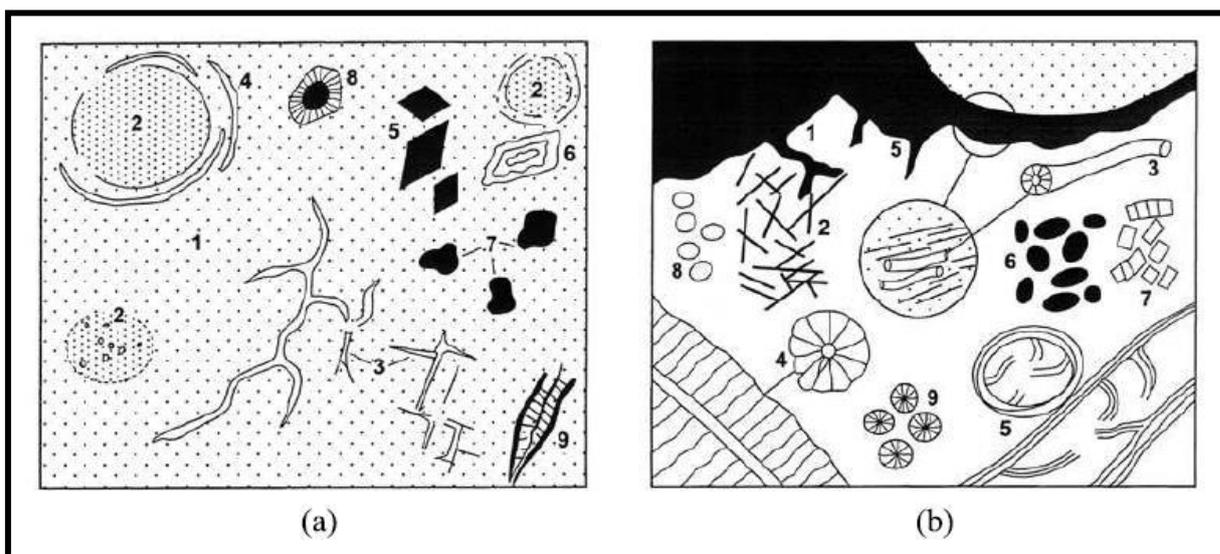
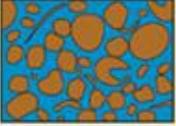
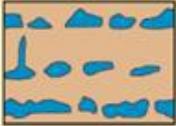
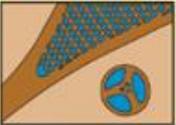


Figura 26 – Tipos de associações de microestruturas de calcres (Wright e Tucker, 1991, Wright, 2007). Convenções de alfa (quadro a): 1. Matriz micrítica-microesparítica densa, 2. Nódulos, 3. Rachaduras complexas e *crystallaria*, 4. Rachaduras circungranulares, 5. Cristais romboédricos de calcita, 6. Cristais de calcita corroídos, 7. Grãos detríticos flutuantes (corroídos), 8. Coroa acicular de calcita em torno de grãos, 9. Calcita deslocativa (p.ex. com micas); de beta (quadro b): 1. Revestimento microbiano e oóides, 2. Calcita acicular, 3. Túbulos calcificados (principalmente fúngicos), 4. *Microcodium*, 5. Trama septal alveolar, 6. Pelotilhas calcificadas, 7. células vegetais calcificadas, 8. Calciesferas (fúngicas, perithecium), 9. Esferulitos.

6.6 Porosidade:

A classificação de porosidade adotada nessa monografia tem como base os trabalhos de Choquette & Pray (1970). Os autores definem como porosidade primária aquela gerada pelos processos deposicionais originais, e porosidade secundária como resultado dos processos diagenéticos e/ou tectônicos que modificam a estrutura original da rocha. E as subdividem em petrotrama seletiva, petrotrama não seletiva e petrotrama seletiva ou não (Figura 27).

Tipos de Poros - Petrotrama seletiva			
Interparticular		Fenestral	
Intraparticular		Abrigo	
Intercristalina		Estrutura em crescimento	
Móldica			

Tipos de Poros	
Petrotrama não seletiva	Petrotrama seletiva ou não
 Fratural	 Brecha
 Canal	 Buraco
 Vugular	 Toca
 Caverna	 Greta de contração

Figura 27 - Tipos de poros da classificação modificado de Choquette e Pray (1970).

6.7 Diagênese

Diagênese é o termo utilizado para todos os processos que afetam os sedimentos durante sua fase de deposição e consolidação como rocha sedimentar, antes de chegar aos estágios iniciais de metamorfismo segundo Choquette & Pray (1970). Essas transformações podem ser de origem mecânica (compactação, brechação e fraturamento), química (dissolução, cimentação, substituição e recristalização) ou biológica (micritização, bioerosão, pedogenização etc.). Atuam de forma isolada ou combinada a depender do ambiente geológico referido.

Choquette & Pray (1970) subdividiram os processos diagenéticos em: eogenéticos, mesogenéticos e telogenéticos (Figura 28). A eodiagênese refere-se aos estágios iniciais da sedimentação onde os sedimentos encontra-se sob forte influência de processos superficiais. A mesodiagênese é a fase em que os sedimentos estão fora da influência dos processos intempéricos, já consideravelmente soterrados. A telodiagênese corresponde a processos mais tardios da diagênese, onde o soterramento é mais efetivo. Em qualquer fase pode ocorrer processos tectônicos capazes de soerguer essas rochas, tornando-as novamente passivas às ações de intemperismo e erosão, gerando novas transformações.

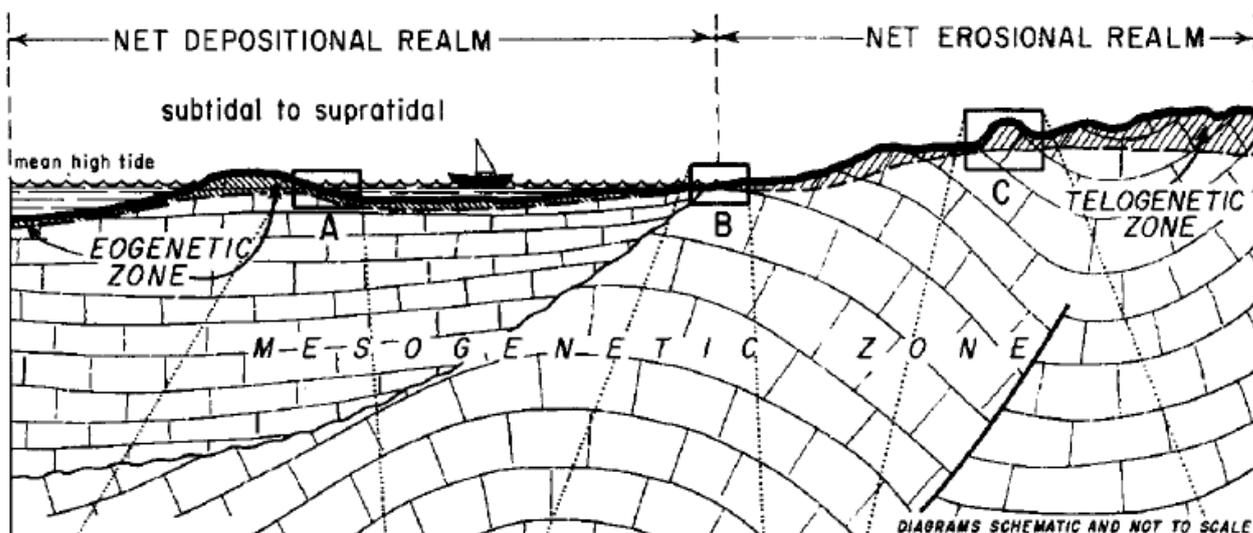


Figura 28 - Regiões de influência dos processos diagenéticos. Choquette e Pray (1970).

7. RESULTADOS

O poço estudado teve, em sua fase de perfuração, coleta de amostras de calhas, amostras laterais e testemunhos de sondagem. A descrição faciológica foi realizada em 38,40 metros testemunhado de rochas carbonáticas da seção Pré-Sal. Por questão de segurança na informação, não será utilizada a profundidade original da amostragem, apenas sua totalização em metros.

7.1 Classificação das rochas descritas:

Diante da revisão bibliográfica realizada previamente e das descrições macroscópicas e microscópicas objeto de estudo desse trabalho, observou-se uma semelhança e potencialidade de aplicação, ao menos parcial, das classificações e nomenclaturas presentes nos trabalhos realizados por Falcão (2015), Claes *et al.* (2017), Lima & De Ros (2019) e Gomes *et al.* (2020).

Para a descrição das rochas aqui estudadas adotou-se a seguinte terminologia: sua composição predominante (ex.: calcário) e morfologia dominante dos constituintes (ex.: *shrub* arborescente, arbustiforme, dendriforme, crostiforme ou granular).

Seis litofácies sedimentares carbonáticas foram identificadas no transcorrer da descrição dos segmentos de testemunho (Tabela 1). São elas: Brecha, Calcário Arborescente, Calcário Arbustiforme, Calcário Crostiforme, Calcário Dendriforme e Calcário Granular.

Tabela 1 - Relação entre litofácies e dimensões dos constituintes:

ABREVIÇÃO	FÁCIES SEDIMENTAR CARBONÁTICA	DIMENSÕES
BRC	Brecha	Grânulos a Calhau: 2-256 mm
CAR	Calcário Arborescente	Muito pequeno: <0,2 cm; Pequeno: 0,2 - 0,5 cm; Médio: 0,5 - 1,5 cm; Grande: > 1,5 cm
CAB	Calcário Arbustiforme	
CCT	Calcário Crostiforme	
CDF	Calcário Dendriforme	
CGR	Calcário Granular	

A seguir, serão descritas as litofácies descritas: **Calcário Arborecente:** rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são predominantemente *shrubs* arborescentes (relação aproximada de 2:1 entre altura/largura do elemento), podem ocorrer de forma subordinada *shrubs* arbustiformes e/ou esferulitos. O arranjo desses elementos pode variar de frouxo, normal ou denso.

Calcário Arbustiforme: rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são predominantemente *shrubs* arbustiformes (relação aproximada de 1:1 entre altura/largura do elemento), podem ocorrer de forma subordinada *shrubs* arborescentes e/ou esferulitos. O arranjo desses elementos pode variar de frouxo, normal ou denso.

Calcário Crostiforme: rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são predominantemente *shrubs* arborescentes e, em menor quantidade, arbustiformes. O arranjo desses elementos é denso e ocorrem em bandas/crostas comumente observadas com algum grau de inclinação.

Calcário Dendriforme: rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são predominantemente *shrubs* dendriformes (a altura do elemento é muito maior que sua largura, distribuídos em ramificações). O arranjo desses elementos pode variar de frouxo, normal ou denso.

Calcário Granular: rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são partículas de *shrubs* arborescentes, arbustiformes, dendriformes, esferulitos, pelóides e outros elementos carbonáticos indiferenciados, normalmente arredondados com pouca ou nenhuma feição de retrabalhamento.

Brecha: rocha de composição predominantemente calcítica cujos constituintes são partículas de *shrubs* arborescentes, arbustiformes, dendriformes, esferulitos, pelóides, intraclastos e outros elementos carbonáticos indiferenciados, todos angulosos a subangulosos e com feições de fraturamento presentes.

De um modo geral, todas as litofácies sedimentares carbonáticas descritas anteriormente podem ou não conter matriz (lama carbonática) e podem ter sido submetidas a processos diagenéticos de cimentação, substituição e/ou dissolução, recristalização entre outros.

7.2 Descrição faciológica:

O testemunho foi dividido em sete seções e descrito macroscopicamente (Figuras 29 a 35). Cada litofácies foi detalhada com o auxílio de lâmina petrográfica para melhor identificação dos constituintes, forma de ocorrência, porosidade, cimentação entre outros aspectos. Além disso, foi obtido o mapeamento mineralógico (QEMSCAN) representativo de cada litofácies sedimentar.

Litofácies interpretada da seção 1 (intervalo 0,00 – 6,00 m):



Figura 29 – BRC: Brecha, em vermelho; CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa; CAR: Calcário Arborescente, em lilás.

Litofácies interpretada da seção 2 (intervalo 6,00 – 13,30 m):



Figura 30 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo e CAR: Calcário Arborescente, em lilás.

Litofácies interpretada da seção 3 (intervalo 13,30 – 18,35 m):

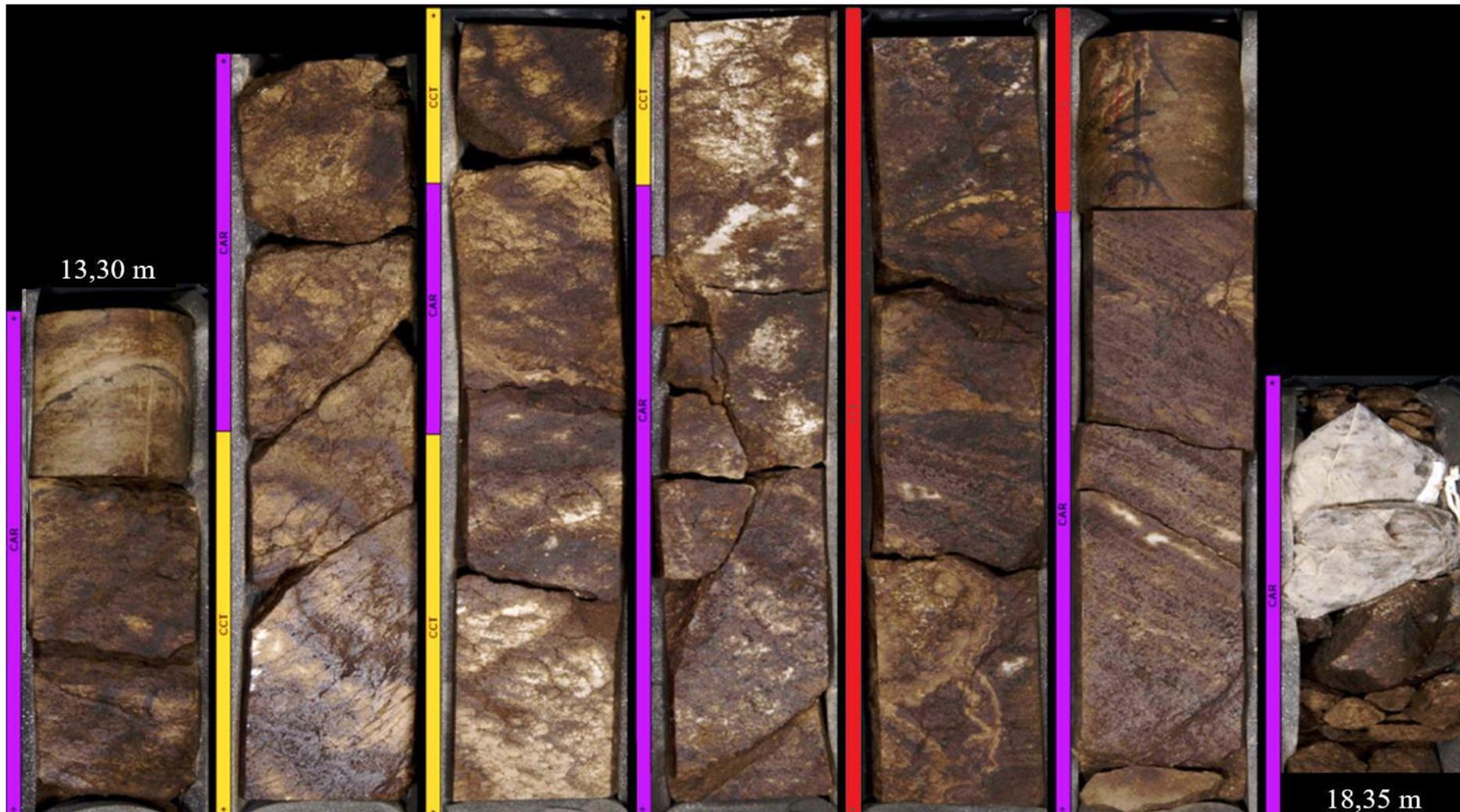


Figura 31 – BRC: Brecha, em vermelho; CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo e CAR: Calcário Arborescente, em lilás.

Litofácies interpretada da seção 4 (intervalo 18,35 – 24,65 m):

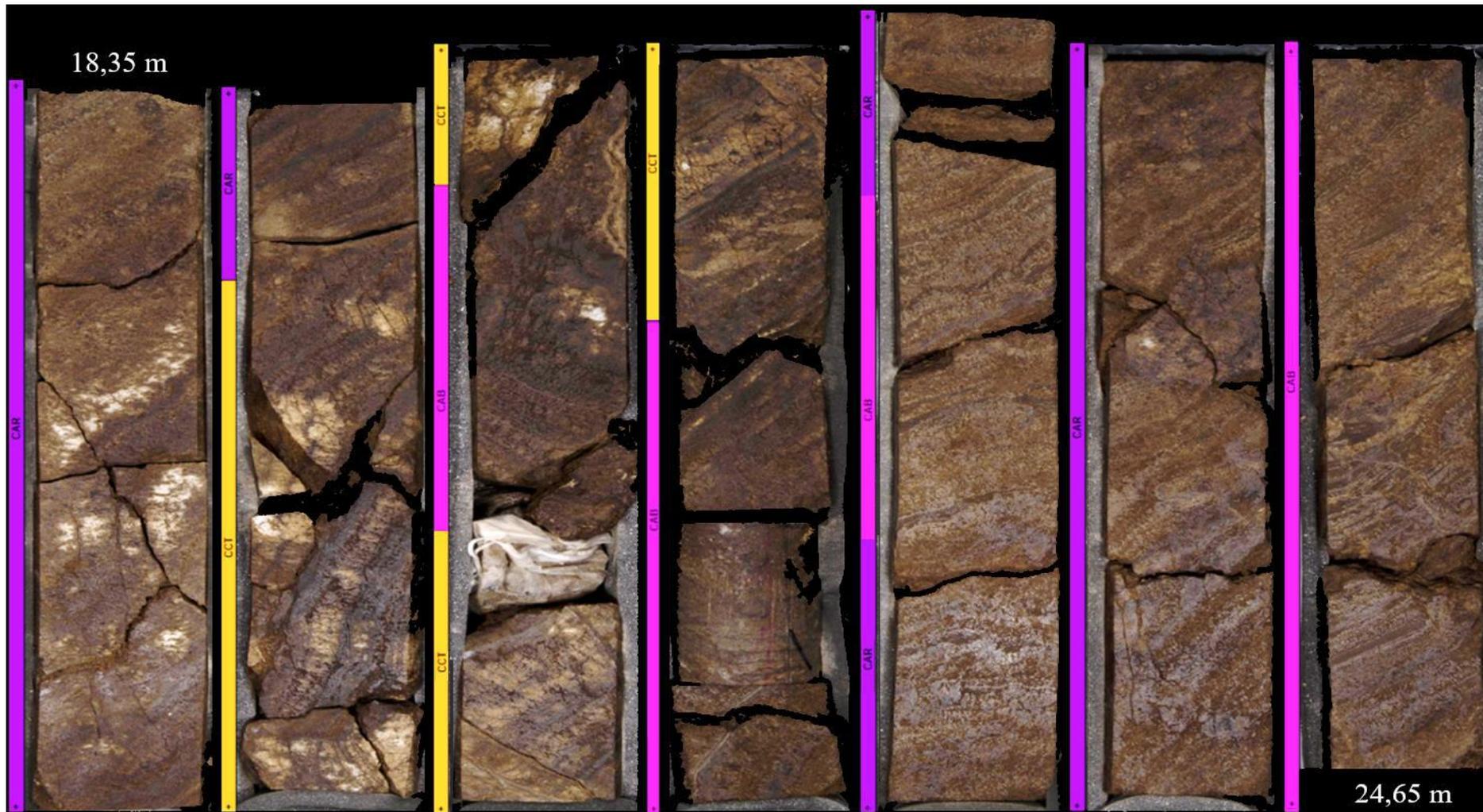


Figura 32 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo; CAR: Calcário Arborescente, em lilás e CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa.

Litofácies interpretada da seção 5 (intervalo 24,65 – 30,95 m):

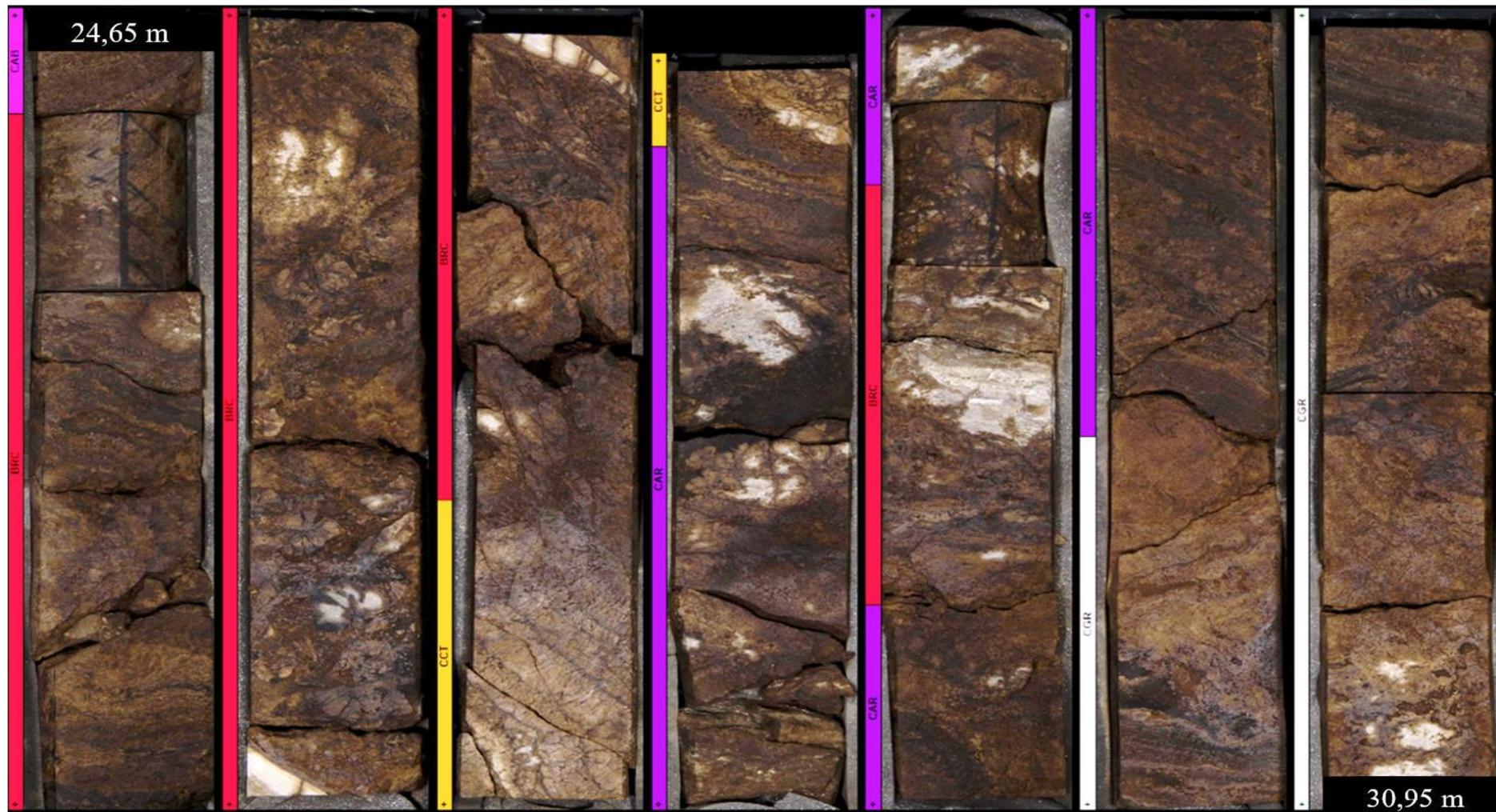


Figura 33 – CCT: Calcário Crostiforme, em amarelo; CAR: Calcário Arborecente, em lilás, CAB: Calcário Arbustiforme, em rosa; BRC: Brecha, em vermelho e CGR: Calcário Granular, em branco.

Litofácies interpretada da seção 6 (intervalo 30,95 – 36,70 m):

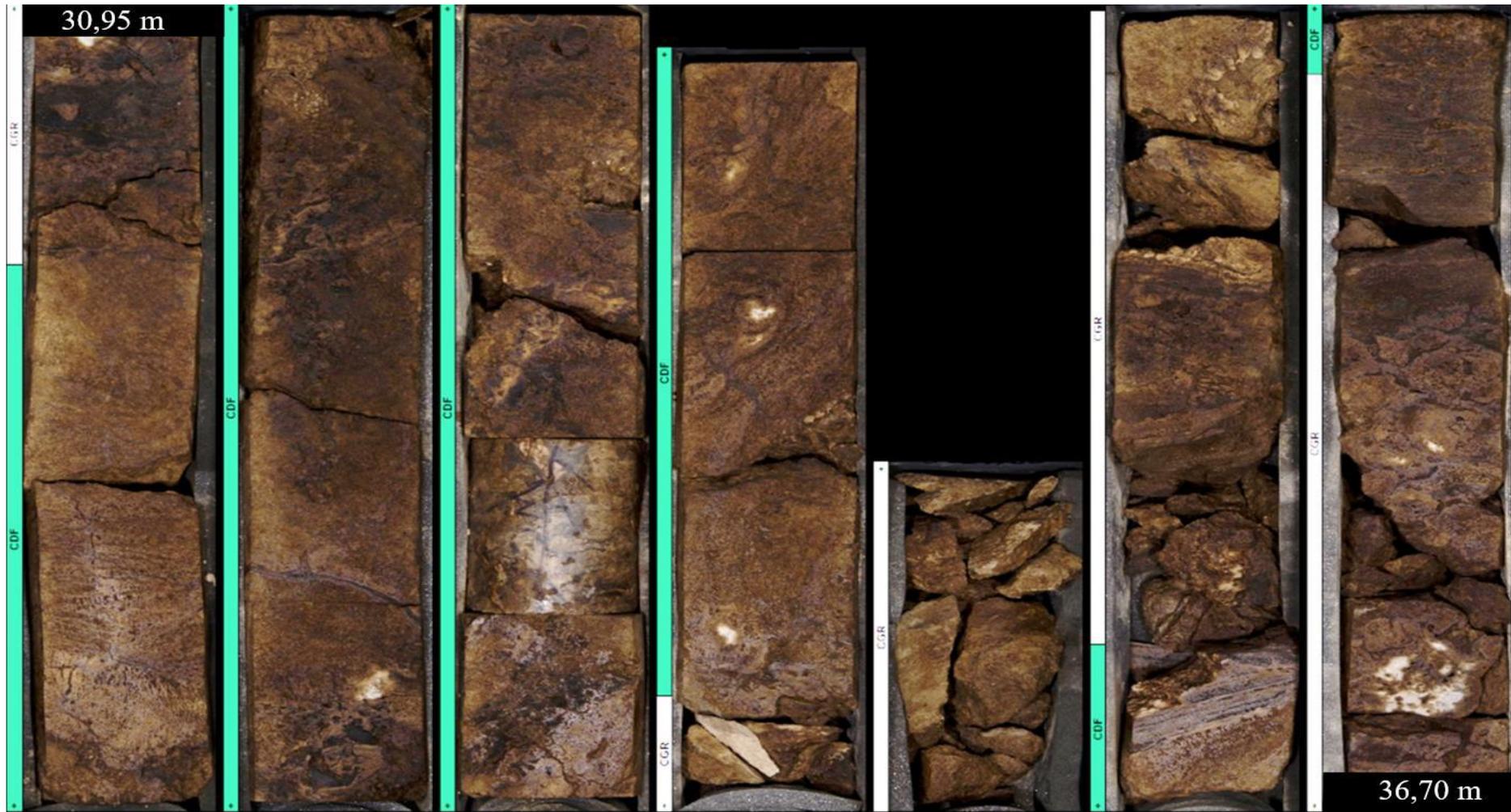


Figura 34 – CGR: Calcário Granular, em branco e CDF: Calcário Dendriforme, em verde.

Litofácies interpretada da seção 7 (intervalo 36,70 – 38,40 m):

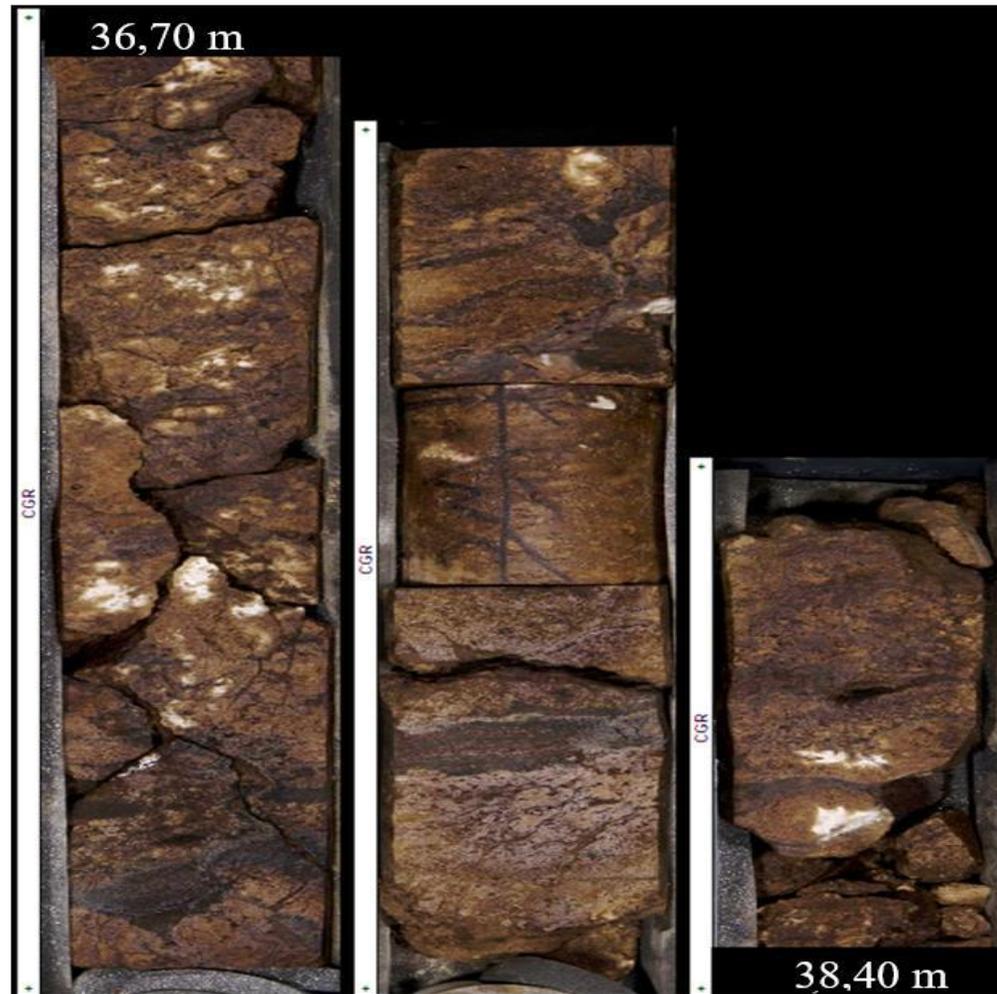


Figura 35 – CGR: Calcário Granular, em branco.

7.2.1 Brecha:

Rocha de composição calcítica formada por partículas (0,5 – 3cm) de calcários arborescentes, calcários arbustiformes, outras formas indiferenciadas (fragmentos micritizados) e agregados angulosos distribuídos de forma heterogênea (Figura 36). Apresenta cimento de barita de coloração branca a amarelada. A rocha encontra-se intensamente fraturada e microfraturada, apresentando partículas micritizadas de cor castanho e granulação silte a areia muito fina entre partículas (abrasão de partículas/material infiltrado). Porosidade moderada: intrapartícula, interpartícula, fratura e móldica. Essa litofácies ocorre nas seções 1, 3 e 5 em camadas de espessura entre 45cm e 1,5m.

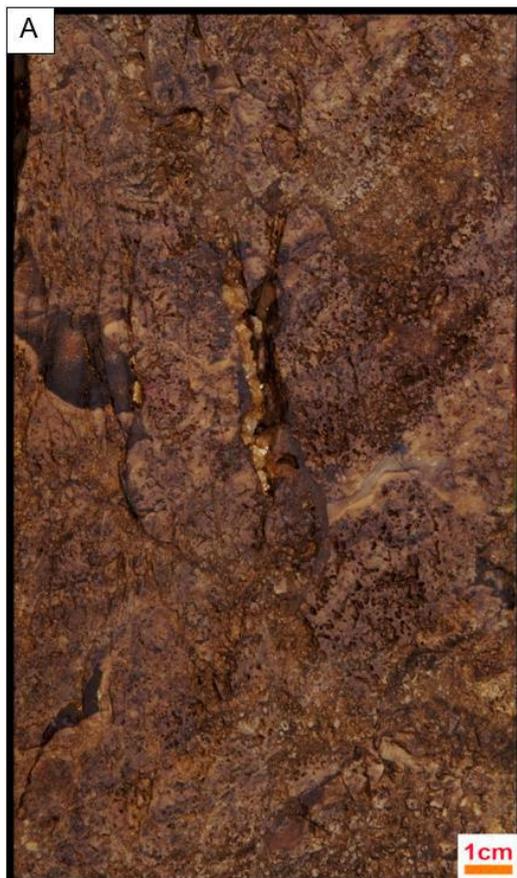


Figura 36 – (A) Foto de detalhe: Litofácies Brecha.

Petrografia microscópica: rocha composta por intraclastos de calcários arborescentes, de tamanho pequeno a médio, calcários arbustiformes (calcita com extinção ondulante), pelóides arredondados a alongados, outras formas indiferenciadas (intraclastos) e agregados angulosos.

Presença de material infiltrado castanho escuro de granulação silte a areia fina infiltrado formado por micrita, e fragmentos de calcita com extinção ondulante indiferenciado (*shrub*/esferulito) gerados pela cominuição dos fragmentos (Figura 37A e 37B), e parcialmente dolomitizados. Localmente observa-se cimento de barita blocosa (cristais com tamanho médio variando de 2-10mm) no espaço interpartícula (Figura 37C e 37D). Porosidade baixa a moderada dos tipos: interpartícula, intrapartícula, intercrystalina, intracrystalina e fratura.

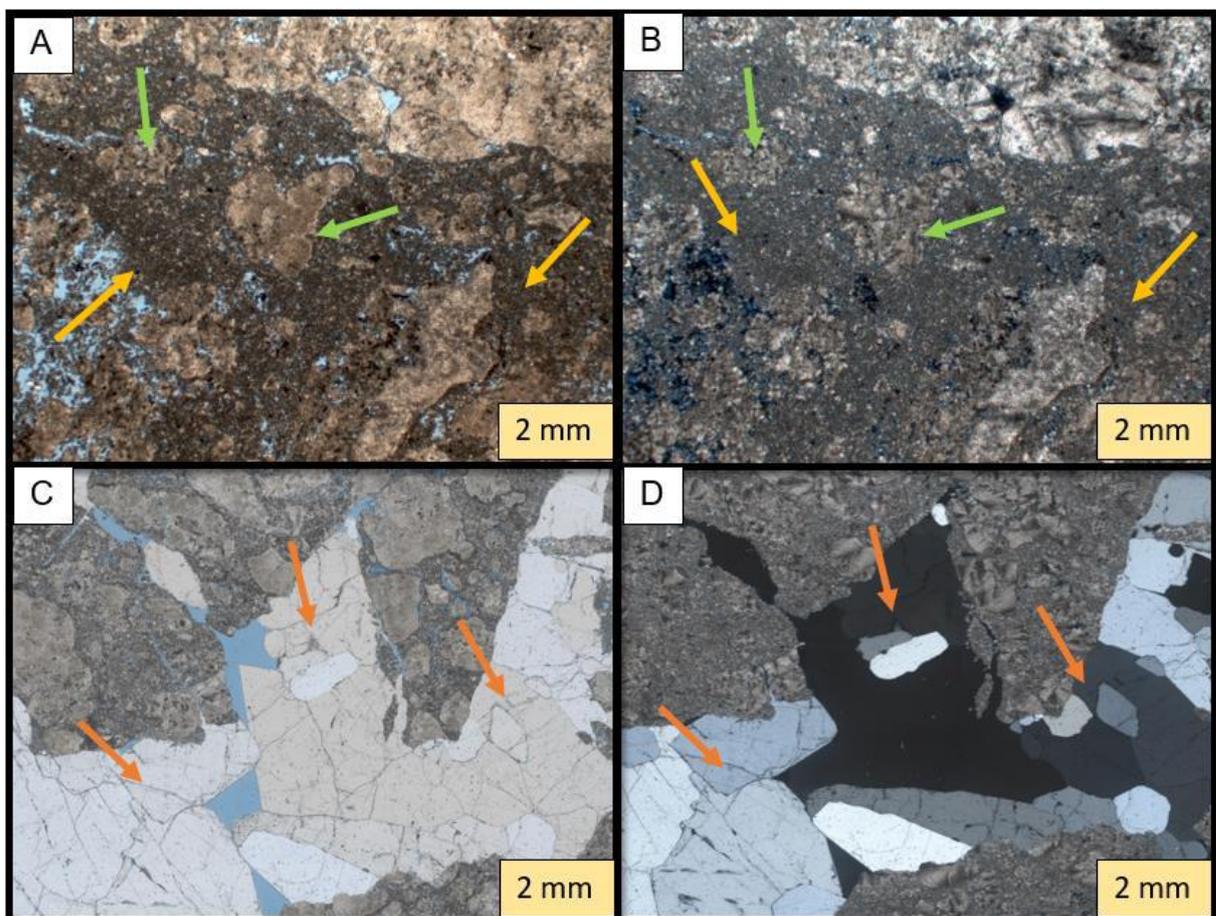
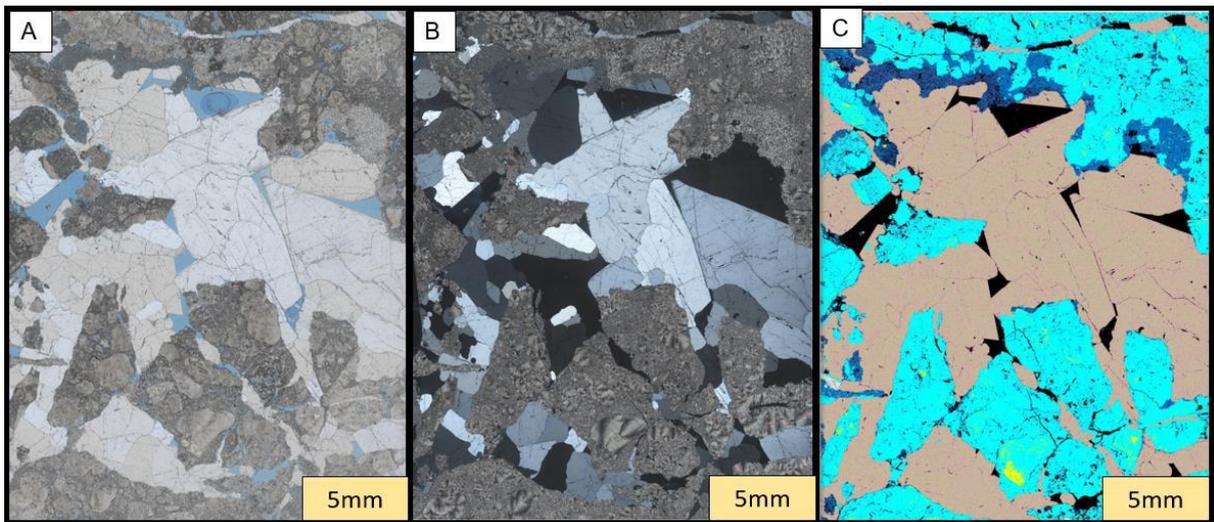


Figura 37 – Litofácies Brecha: A e B – Detalhe em material castanho resultado da cominuição dos grãos/partículas do material infiltrado composto por micrita (setas amarelas) e fragmentos de calcita com extinção ondulante indiferenciado (setas verdes) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em do cimento de barita blocosa em nicóis paralelos e cruzados (setas laranjas), respectivamente.

Mapeamento mineralógico (QEMSCAN): A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principal composta por barita, calcita e dolomita (Figura 38). Outros minerais como acessórios: quartzo, Sr-barita, apatita e goyazita. Outros minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

Os megacristais de barita blocosa ocorrem na porção central da lâmina petrográfica na forma de cimento, ligando os intraclastos e partículas brechadas. A composição dos constituintes principais é calcítica e as porções mais próximas da barita estão dolomitizadas, evidenciadas na parte superior.



Mineral	% massa	% área	Mineral	% massa	% área
Barita	60.09	42.50	Pirita	0.01	0.01
Calcita	33.39	39.03	Mg-Argilominerais	0.01	0.01
Dolomita	4.94	5.50	K-Feldspato	0.01	0.01
Quartzo	0.80	0.96	Quartzo+MC	0.01	0.01
Calcita+MC	0.26	0.31	Fluorita	0.00	0.00
Apatita	0.23	0.23	Estroncianita	0.00	0.00
Sr-Barita	0.10	0.07	Caulinita	0.00	0.00
Dolomita+MC	0.07	0.08	Material Rico em Carbono (MC)	0.00	3.48
Goyazita	0.04	0.03	Poros	0.00	7.74
Outros	0.02	0.02			
Al-Micas+Ilita+Al-Esmectitas	0.01	0.02			

Figura 38 – A: Brecha em nicóis paralelos; B: Brecha em nicóis cruzados e C: Mapa mineralógico brecha.

7.2.2 Calcário Arborescente:

Rocha de composição calcítica formada por *shrubs* arborescentes, em menor quantidade arbustiformes (Figura 39). Os *shrubs* apresentam arranjo normal, tamanho médio de 1-2cm, estando dispostos em camadas horizontais a sub-horizontais. Ocorrem elementos indiferenciados entre os *shrubs* (dolomita) e há a presença de fraturas preenchidas com cimento de quartzo e calcita. A porosidade é moderada do tipo: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intracristalina, intercristalina, fratura e vugular. Essa litofácies ocorre nas seções 1 a 5, por vezes intercalada com camadas de calcários arbustiformes. Suas camadas possuem espessura variando de 20 cm a 1,5m.



Figura 39 (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Arborescente.

Petrografia microscópica: rocha composta por *shrubs* arborescentes de tamanho pequeno a médio, em um arranjo normal, raramente arbustiformes e pelóides. Os *shrubs* são de

composição calcítica com extinção ondulante. São registradas feições de microfraturamento (Figura 40A e 40B), e de dissolução com material de granulação silte a areia muito fina intensamente dolomitizado. A rocha encontra-se parcialmente dolomitizada no espaço inter-*shrub*. Observa-se cimento de dolomita romboédrica no espaço intersticial e cimento de calcita do tipo franja localmente recobrindo elementos e cristais de dolomita (Figura 40C e 40D). A porosidade é moderada dos tipos: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intercrystalina, intracrystalina, vugular e fratura.

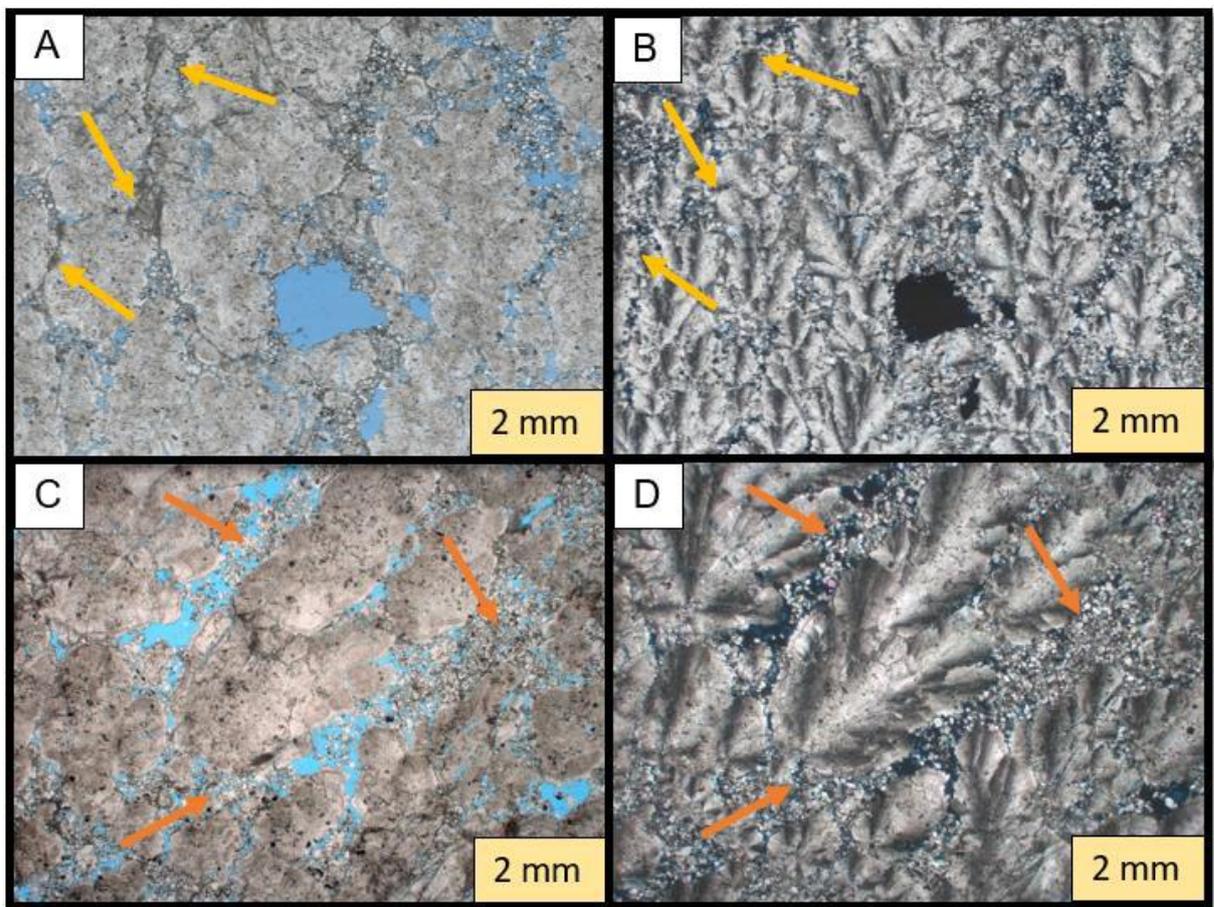


Figura 40 – Litofácies Calcário arborescente: A e B – Detalhe em material castanho resultado da cominuição dos grãos/partículas (microfraturamento) em nicóis paralelos e cruzados (setas amarelas), respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de dolomita romboédrica em nicóis paralelos e cruzados (setas laranjas), respectivamente.

Mapeamento mineralógico (QEMSCAN): A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principalmente composta por calcita e dolomita (Figura 41). Outros minerais como acessórios: quartzo, K-feldspato, argilominerais aluminosos, apatita e goyazita. Outros minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

Os *shrubs* arborescentes são de composição calcítica e ocupam a maior parte da lâmina. Observa-se uma considerável quantidade de dolomita que ocorre no espaço inter-*shrub* e dolomitização das regiões onde há microfraturamento.

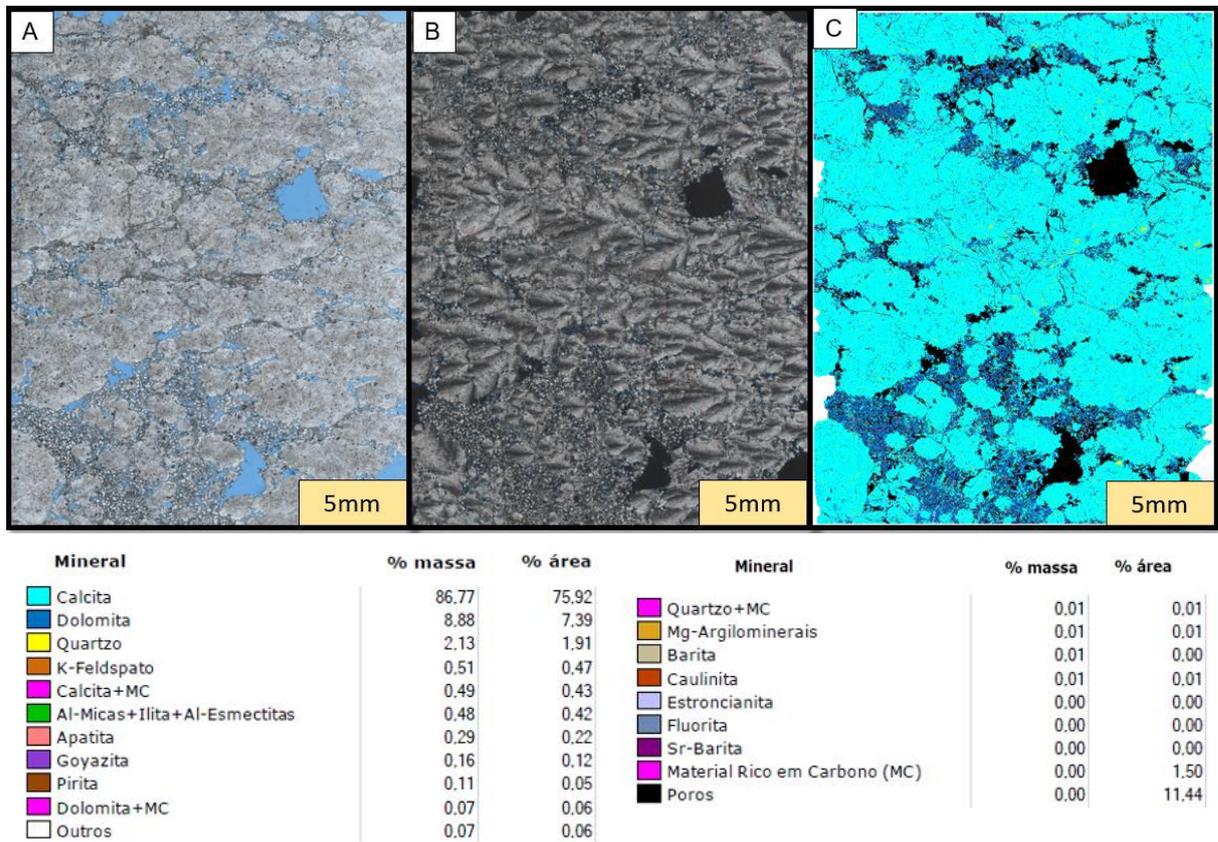


Figura 41 – F: Calcário arborescente em nicóis paralelos; G: Calcário arborescente em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário arborescente.

7.2.3 Calcário Arbustiforme:

Rocha de composição calcítica formada por *shrubs* arbustiformes e, em menor quantidade pustulares (Figura 42). Os *shrubs* apresentam arranjo normal, tamanho médio 0,5-1cm e dispostos em camadas horizontais a sub-horizontais. A rocha possui feições de dissolução e elementos indiferenciados entre os *shrubs* (dolomita e calcita com extinção ondulante indiferenciada). A porosidade é moderada do tipo: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intracristalina, intercristalina e móldica. Essa litofácies ocorre nas seções 1 a 5, por vezes intercalada com camadas de calcários arborescentes. Suas camadas possuem espessura variando de 20cm a 1,8m.

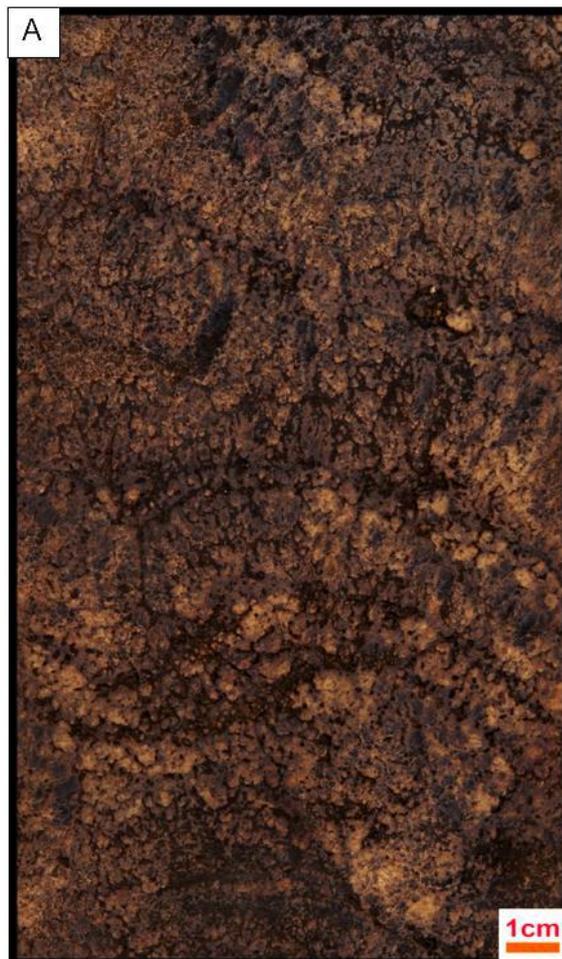


Figura 42 – (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Arbustiforme.

Petrografia microscópica: rocha composta por calcita do tipo *shrub* arbustiforme de tamanho pequeno a médio. Em menor quantidade, observa-se também calcita com extinção ondulante pustular, arborescente e pelóides (dispersos e, por vezes, inclusos aos *shrubs*). Os *shrubs* são de composição calcítica e extinção ondulante. A rocha é pouco fraturada e sua dissolução moderada ocorre parcialmente nos *shrubs* em que o arranjo é mais denso. A dolomitização é moderada no espaço inter-*shrub* e ocorre por cristais de dolomita romboédrica (Figura 43C e 43D). Observa-se localmente cimento de calcita tipo franja e quartzo microcristalino substituindo parcialmente os *shrubs* (Figura 43A e 43B). A porosidade é moderada dos tipos: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intercristalina, intracristalina e fratura.

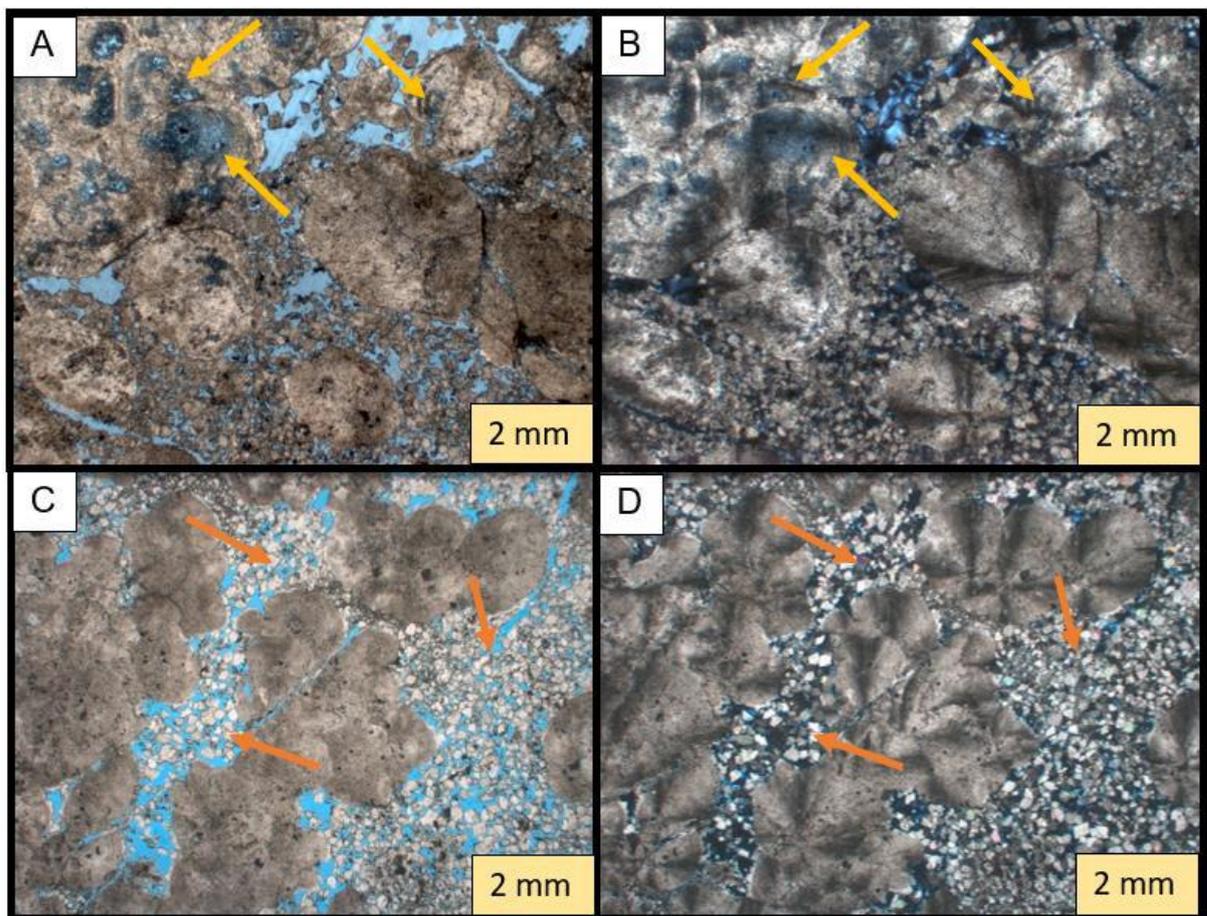
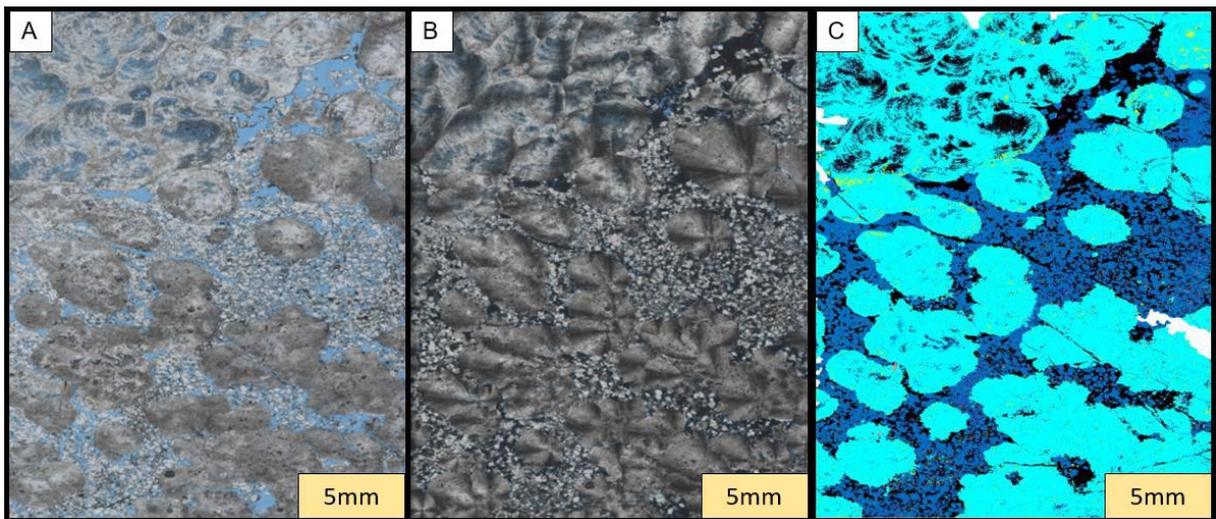


Figura 43 – Litofácies Calcário Arbustiforme: A e B – Detalhe em dissolução parcial dos *shrubs* arbustiformes (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em dolomita romboédrica em espaço inter-*shrub* (setas laranjas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

Mapeamento mineralógico (QEMSCAN): A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principal composta por calcita e dolomita (Figura 44). Outros minerais como acessórios: quartzo, K-feldspato, argilominerais aluminosos, apatita e goyazita. Outros minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

Os *shrubs* arbustiformes são de composição calcítica e encontram-se em um arranjo denso na parte superior e arranjo aberto (dispersos) ao longo da seção. A dolomita romboédrica ocorre cimentando intensamente o espaço inter-*shrub*. Foi registrada escassa substituição rara de calcita por quartzo microcristalino nos elementos.



Mineral	% massa	% área	Mineral	% massa	% área
Calcita	72.29	60.37	Outros	0.03	0.02
Dolomita	25.26	20.06	Quartzo+MC	0.02	0.02
Quartzo	1.42	1.21	Mg-Argilominerais	0.00	0.00
Calcita+MC	0.22	0.19	Barita	0.00	0.00
K-Feldspato	0.22	0.19	Fluorita	0.00	0.00
Al-Micas+Ilita+Al-Esmectitas	0.21	0.17	Caulinita	0.00	0.00
Dolomita+MC	0.15	0.12	Estroncianita	0.00	0.00
Goyazita	0.08	0.06	Celestita	0.00	0.00
Apatita	0.06	0.04	Material Rico em Carbono (MC)	0.00	1.35
Pirita	0.04	0.02	Poros	0.00	16.18

Figura 44 – F: Calcário arbustiforme em nicóis paralelos; G: Calcário arbustiforme em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário arbustiforme.

7.2.4 Calcário Crostiforme:

Rocha apresentando bandamento através de alternância de crostas de composição calcítica. Observa-se que as crostas são compostas por *shrubs* arbustiformes e arborescentes em um arranjo denso (Figura 45). As crostas apresentam ângulo variando de 30° a 90° paralelas a subparalelas de coloração branca a acastanhada. A porosidade é baixa a moderada dos tipos: inter-*shrub*, intra-*shrub*, interlaminada, fratura e vugular. Essa litofácies ocorre em intervalos com espessuras que variam de 30cm a 2m, ao longo das seções 2,3,4 e 5.



Figura 45 – (A) Foto de detalhe: Litofácies Calcário Crostiforme.

Petrografia microscópica: rocha composta por *shrubs* (calcita com extinção ondulante) arbustiformes e arborescentes de tamanho médio a grande, com extinção ondulante, em arranjo denso (Figura 46A e 46B). Alguns *shrubs* estão parcialmente dissolvidos e substituídos por

dolomita. A rocha apresenta cimentos de quartzo dos tipos microcristalino, mosaico e rosetas de calcedônia, além de cimento de dolomita que ocorre como cristais romboédricos no espaço inter-*shrub* e como franja (Figura 46C e 46D)..

De um modo geral, a litofácies carbonática crostiforme se distingue das litofácies Calcário Arborecente e Calcário Arbustiforme principalmente pelo arranjo denso dos elementos formadores e bandamento forte, que confere um aspecto de crosta. A porosidade é baixa e dos tipos inter-*shrub*, intra-*shrub*, intercristalina, intracristalina e fratura.

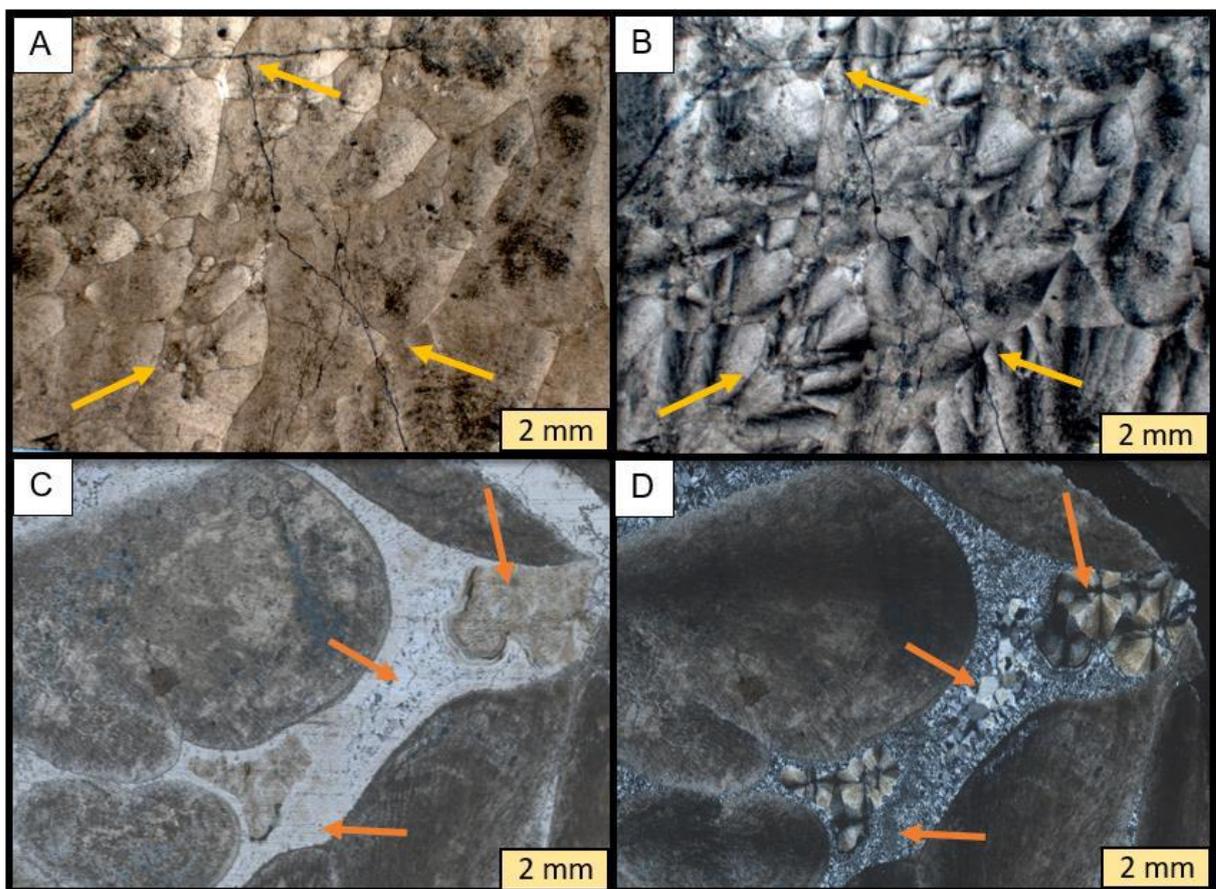
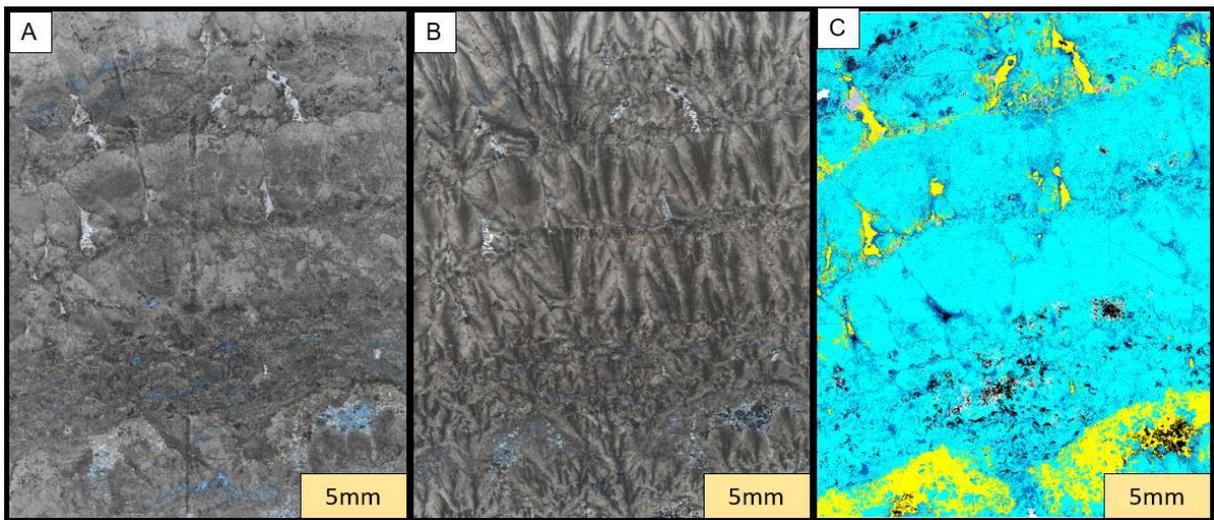


Figura 46 – Litofácies Calcário Crostiforme: A e B – Detalhe em arranjo denso dos elementos e fraturas (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de quartzo microcristalino, em mosaico e rosetas de calcedônia (setas laranjas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente;

Mapeamento mineralógico (QEMSCAN): A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principal composta por calcita, dolomita e quartzo (Figura 47). Outros minerais ocorrem como acessórios, sendo registrados estroncianita, barita, apatita e Mg-argilominerais. Os demais minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

As crostas de *shrubs* arborescentes são de composição essencialmente calcítica. Observa-se cimentação do espaço inter-*shrub* por quartzo nas porções superiores da lâmina e de forma mais intensa na parte inferior onde os elementos também foram parcialmente dissolvidos. Cristais de dolomita estão presentes de forma heterogênea ao redor e entre os *shrubs*.



Mineral	% massa	% área	Mineral	% massa	% área
Calcita	73.17	71.02	Al-Micas+Ilita+Al-Esmectitas	0.01	0.01
Dolomita	14.79	13.65	Pirita	0.00	0.00
Quartzo	10.25	10.17	Sr-Barita	0.00	0.00
Outros	0.81	0.79	Celestita	0.00	0.00
Estroncianita	0.54	0.37	K-Feldspato	0.00	0.00
Calcita+MC	0.17	0.17	Goyazita	0.00	0.00
Mg-Argilominerais	0.12	0.09	Caulinita	0.00	0.00
Barita	0.05	0.03	Material Rico em Carbono (MC)	0.00	0.46
Apatita	0.05	0.04	Poros	0.00	3.15
Dolomita+MC	0.03	0.03			
Quartzo+MC	0.02	0.02			

Figura 47 – F: Calcário crostiforme em nicóis paralelos; G: Calcário crostiforme em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico calcário crostiforme.

7.2.5 Calcário Dendriforme:

Rocha de composição calcítica formada por *shrubs* dendriformes, em um arranjo normal a denso, dispostos em cristais alongados (Figura 48) cuja altura é maior que a sua largura (aspecto de dedo) de tamanho pequeno a médio. Os *shrubs* crescem a partir de uma superfície, porém, em posição invertida (possível estalactite). Fraturas e feições de dissolução são abundantes. A porosidade é moderada a alta dos tipos: intracristalina, intercristalina, fratura e móldica. Essa litofácies ocorre preservada na seção 6, em camadas com espessuras entre 30 e 45cm.

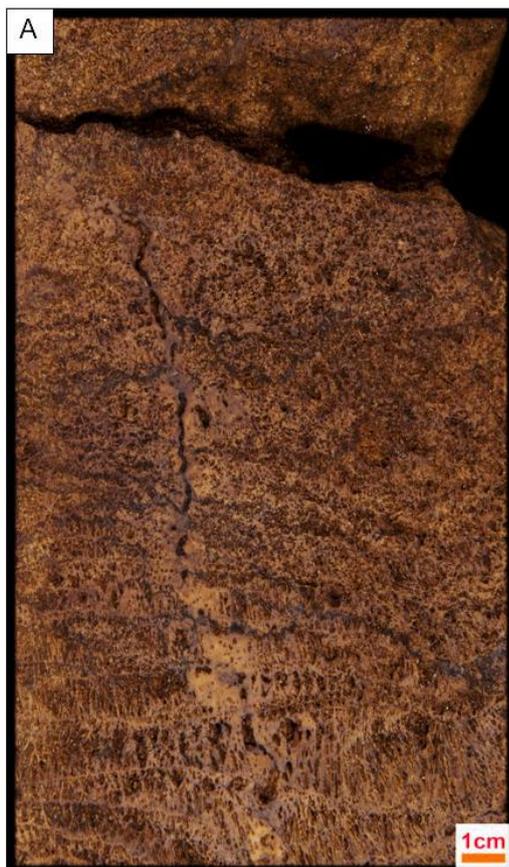


Figura 48 – (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Dendriforme.

Petrografia microscópica: rocha composta por calcita com extinção ondulante formada por *shrubs* dendriformes de tamanho pequeno a médio, em arranjo normal a frouxo. Na base ocorrem *shrubs* de tamanho pequeno, aumentando para tamanho médio, recristalizados e

processo de substituição por dolomita fraca. Cimentos de calcita escalenóedrica (por vezes zonados), calcedônia e quartzo microcristalino ocorrem em forma de franja nos *shrubs* e no espaço *intra-shrub* e *inter-shrub* (Figura 49). A porosidade é moderada a alta dos tipos: *inter-shrub*, *intra-shrub*, intercristalina e intracristalina.

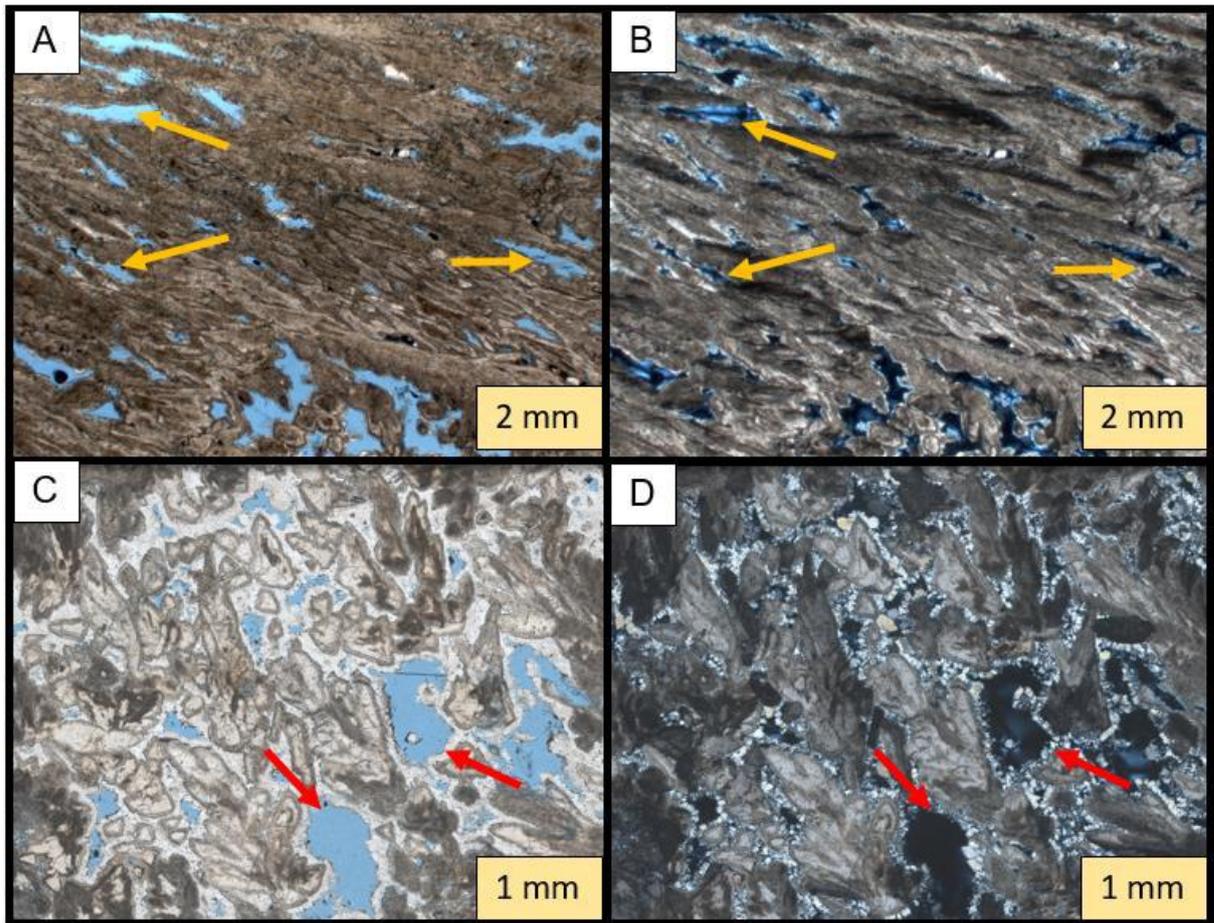
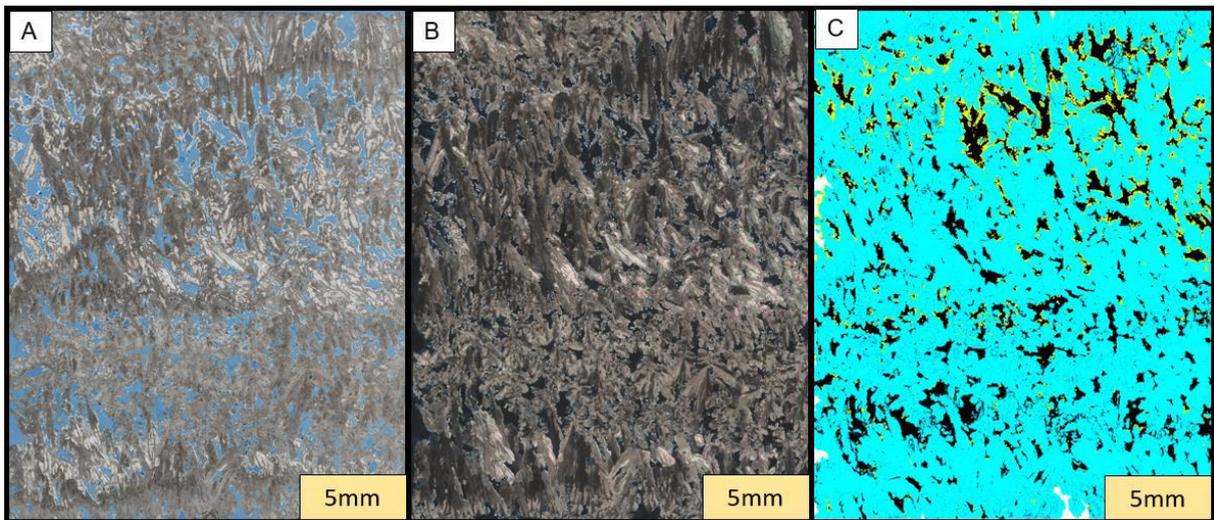


Figura 49 – Litofácies Calcário Dendriforme: A e B – Detalhe em porosidade *inter-shrub* (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em cimento de quartzo do tipo franja ao redor de porosidade intercristalina (setas vermelhas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

Mapeamento mineralógico (QEMSCAN): A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principal composta por calcita e quartzo (Figura 50). Outros minerais como acessórios: dolomita, estroncianita, apatita e fluorita. Outros minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

Os *shrubs* dendriformes são de composição calcítica e ocupam toda a seção. Observa-se quartzo na forma de franja na parte superior da seção e dolomita rara.



Mineral	% massa	% área	Mineral	% massa	% área
Calcita	93,17	80,36	Mg-Argilominerais	0,00	0,00
Quartzo	4,91	4,33	Sr-Barita	0,00	0,00
Dolomita	1,50	1,23	Al-Micas+Ilita+Al-Esmectitas	0,00	0,00
Calcita+MC	0,28	0,25	Pirita	0,00	0,00
Quartzo+MC	0,05	0,05	Caulinita	0,00	0,00
Apatita	0,05	0,04	K-Feldspato	0,00	0,00
Fluorita	0,01	0,01	Goyazita	0,00	0,00
Estroncianita	0,01	0,01	Material Rico em Carbono (MC)	0,00	0,35
Outros	0,01	0,01	Poros	0,00	13,37
Celestita	0,00	0,00			
Dolomita+MC	0,00	0,00			
Barita	0,00	0,00			

Figura 50 – H: Calcário dendriforme em nicóis paralelos; I: Calcário dendriforme em nicóis cruzados e J: Mapa mineralógico Calcário dendriforme.

7.2.6 Calcário Granular:

Rocha de composição calcítica com extinção ondulante e micrítica, com forma sub-esférica o que ressalta um aspecto granular a rocha, com presença de *shrubs* arbustiforme e outros elementos indiferenciados com extinção ondulante e micríticos (Figura 51). As partículas apresentam diâmetro em torno de 7cm, são porosas, com laminação incipiente e encontram-se dispersas, por vezes cimentadas por material castanho e cinza (calcita e em menor quantidade, quartzo). A rocha apresenta feições que se assemelham a estruturas biogênicas. A porosidade é baixa a moderada do tipo: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intracristalina, intercristalina, vugular e móldica. Essa litofácies ocorre nas seções 5 a 7. E suas camadas possuem espessura variando de 60cm a 2m.



Figura 51 (A) – Foto de detalhe: Litofácies Calcário Granular.

Petrografia microscópica: rocha composta por partículas de calcário arbustiformes, arborescentes, dendriformes e uma porção grumosa composta por pelóides alongados e esféricos (por vezes, inclusos também aos *shrubs*), além de partículas indiferenciadas (intraclastos micríticos e agregados de calcita com extinção ondulante) (Figura 52). Os *shrubs* possuem extinção ondulante. A rocha apresenta forte dissolução e recristalização moderada a intensa em toda a rocha. Foi registrada a presença de estrutura alveolar-septal (feição biogênica) de composição calcítica, bem como de cimentos de calcita do tipo franja prismática. A porosidade é baixa a moderada dos tipos: inter-*shrub*, intra-*shrub*, intercrystalina, intracrystalina, vugular e móldica.

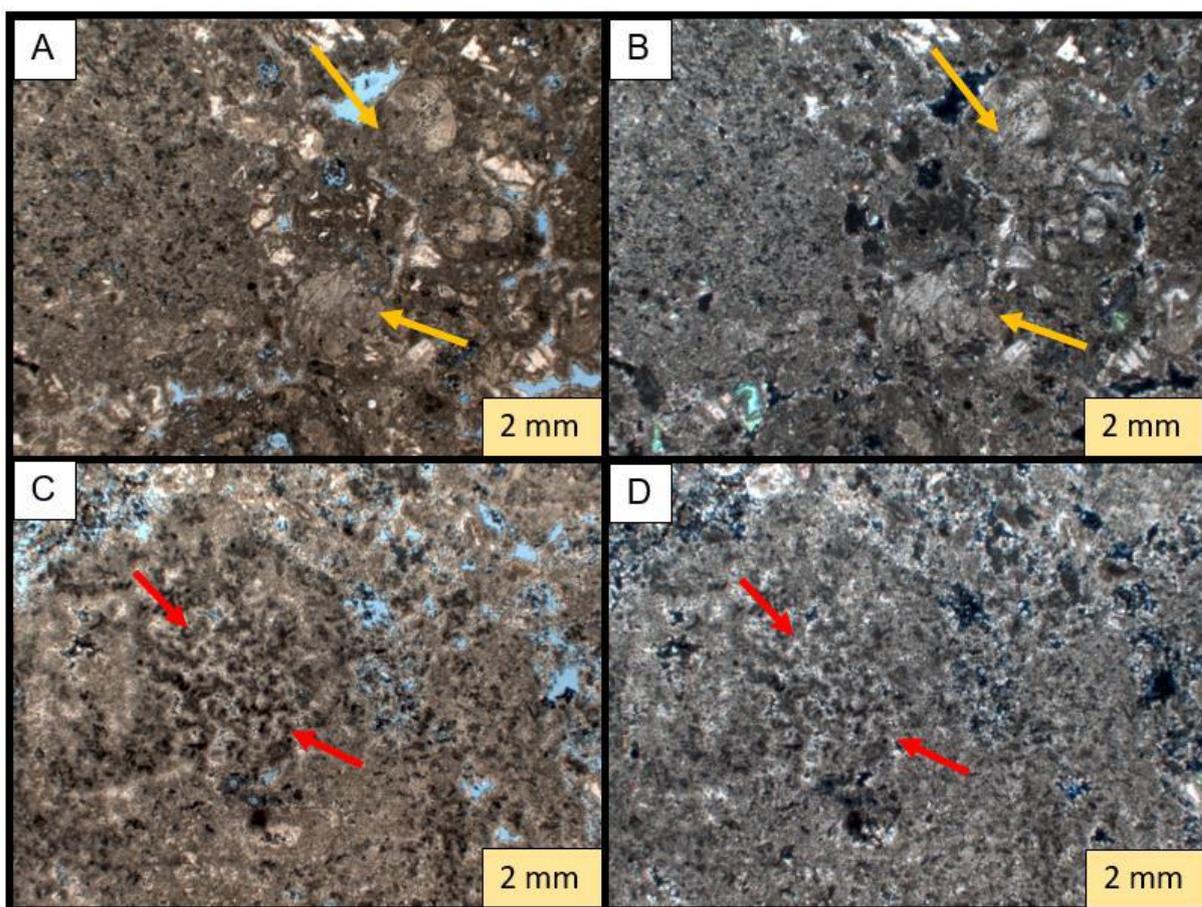


Figura 52 – Litofácies Calcário Granular: A e B – Detalhe em agregados de calcita com extinção ondulante indiferenciados (setas amarelas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em porção composta por pelóides esféricos a alongados (setas vermelhas) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

Mapeamento mineralógico: A lâmina petrográfica representativa dessa litofácies possui mineralogia principal composta essencialmente por calcita (Figura 53), ocorrendo também minerais como acessórios: dolomita, quartzo, apatita e estroncianita. Outros minerais tiveram detecção ao nível de traço, não sendo representativos ou podem representar erro analítico associado.

Toda a seção é composta essencialmente por calcita (partículas e cimentos).

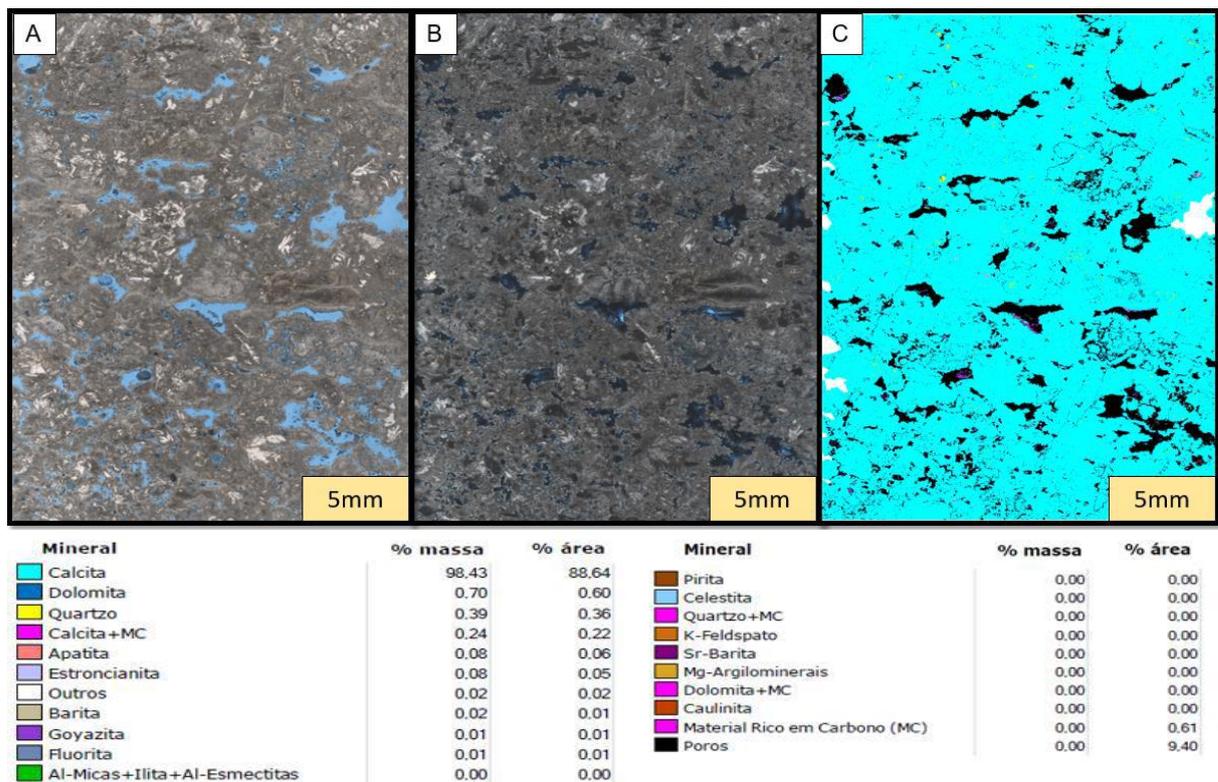


Figura 53 – F: Calcário Granular em nicóis paralelos; G: Calcário Granular em nicóis cruzados e H: Mapa mineralógico Calcário Granular

7.3 Processos diagenéticos:

7.3.1 Carstificação:

Durante a descrição dos testemunhos, observou-se áreas com estruturas e texturas (Figura 54 a 57) similares à geradas por processos de interação entre rocha e de possíveis fluidos meteóricos formando possíveis espeleotemas, além de preenchimento de cavidades.

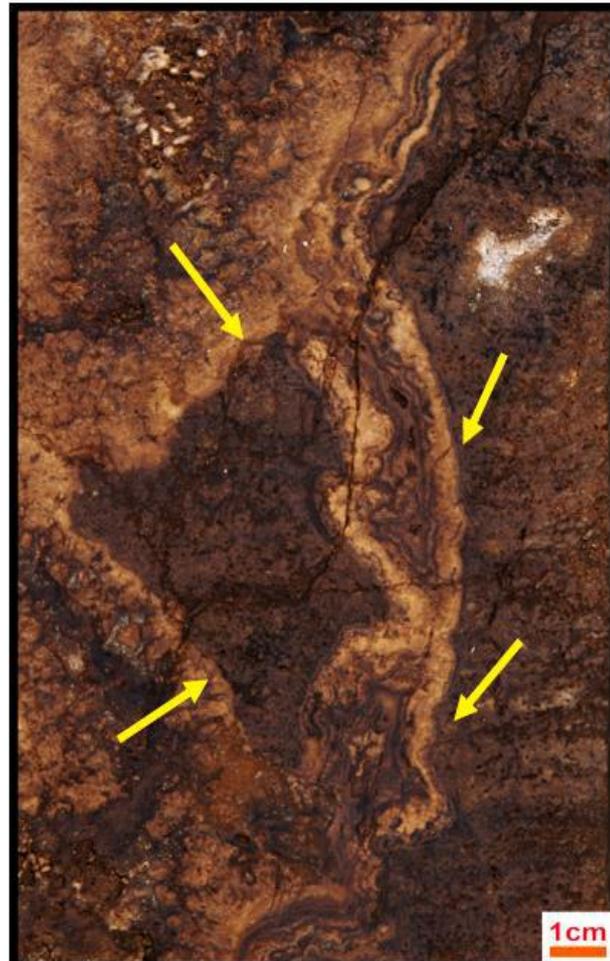


Figura 54– Seção com preenchimento de cavidade por calcita e quartzo (prof.: 16,60m – Litofácies Brecha).



Figura 55 - Seção com estruturas similares a espeleotemas (prof.: 35,40m – Litofácies Calcário Granular). Em azul, região de confecção da lâmina petrográfica.



Figura 56 - Precipitação de cristais dendriformes (possível teto de cavidade) (prof.: 35,80m - Litofácies Calcário Dendriforme).

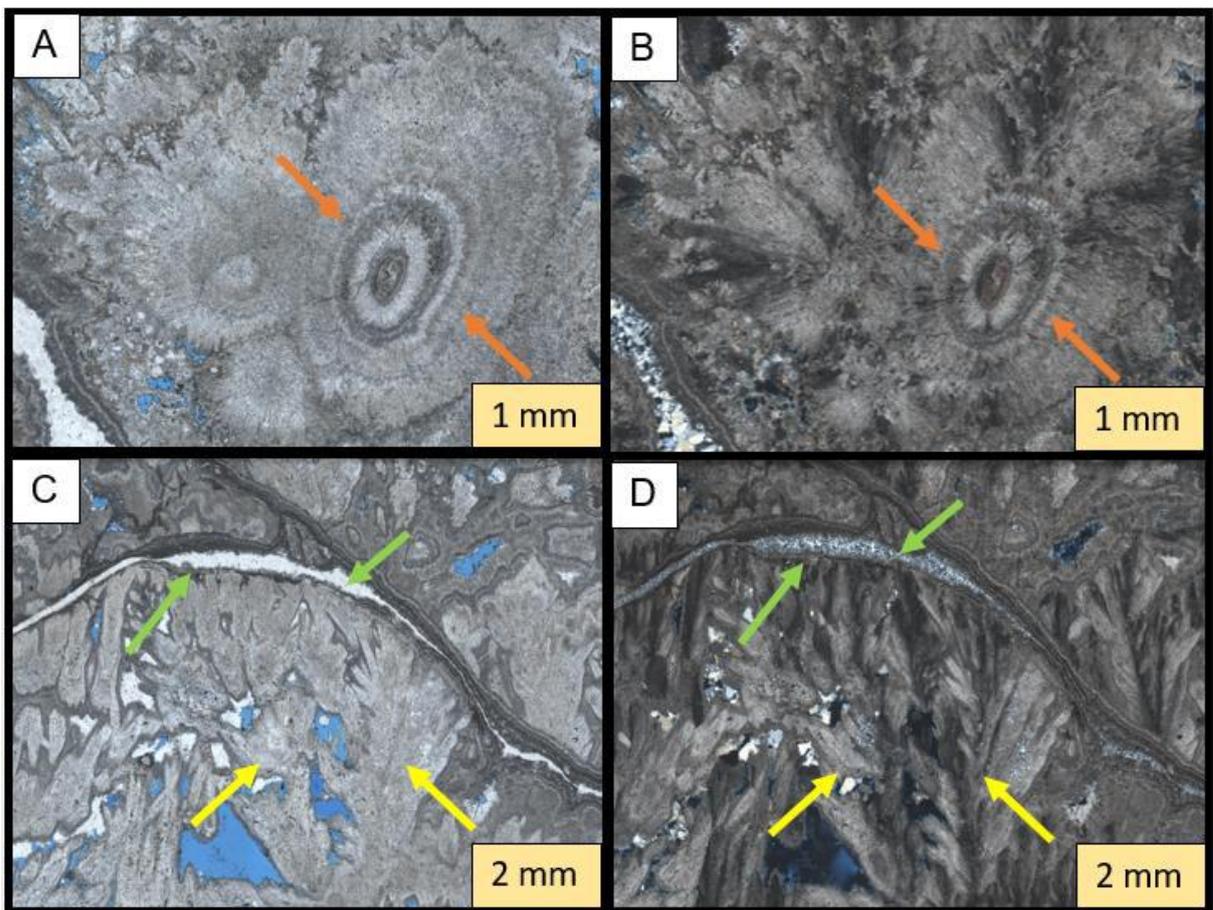


Figura 57 – Fotomicrografias da seção prof.: 35,40 m – Litofácies Calcário Dendriforme. A e B – Detalhe em feições calcítica concêntricas (possível corte basal de estalactite) (setas em laranja), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente; C e D – Detalhe em *shrubs* dendriformes (setas amarelas) e em preenchimento de fratura por quartzo em mosaico, em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

7.3.2 Cimentação:

Minerais diagenéticos ocorrem de forma abundante no espaço inter-*shrub* de todas as litofácies sedimentares descritas anteriormente, sendo comuns calcita, dolomita, quartzo e barita. Estes minerais constituem as fases diagenéticas mais evidenciadas nos testemunhos e lâminas petrográficas descritas, ocorrendo principalmente na forma de cimento.

A cimentação provavelmente apresenta diferentes origens, podendo estar relacionadas a fluidos da água do lago (supersaturada em íons), de origem meteórica ou hidrotermal. O processo de cimentação é controlado por diferentes condições de temperatura, pressão, salinidade, pH, dentre outros, condicionando assim o tipo de mineral que será precipitado.

A calcita foi identificada em forma de franja em *shrubs* nas litofácies calcário arborescente e arbustiforme, como cristais escalenoédricos na litofácies Calcário Dendriforme e envolvendo dolomita romboédrica na litofácies Calcário Arbustiforme (Figura 58). Também ocorre como crostas na litofácies Calcário Granular.

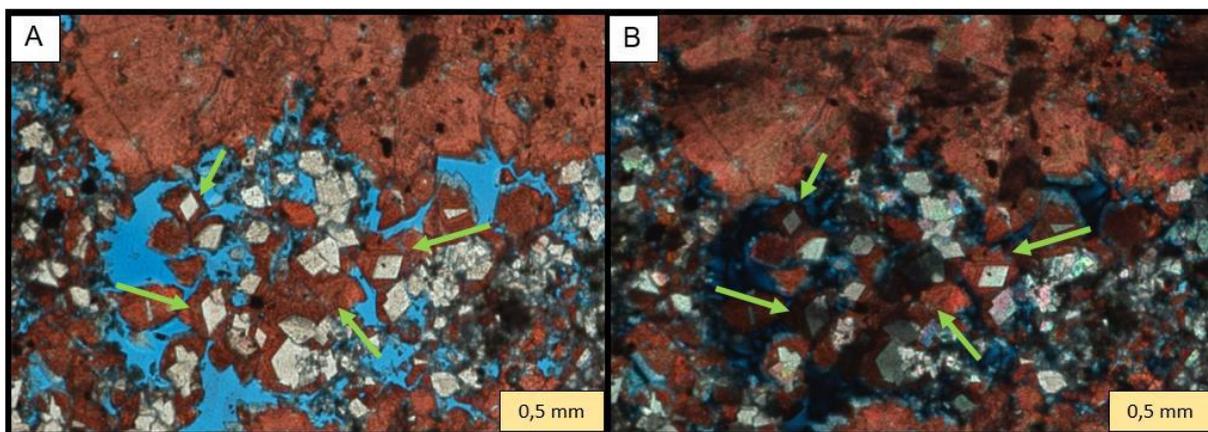


Figura 58 – A e B – Cimento de calcita (em vermelho tingido por solução de alizarina) englobando cristal de dolomita romboédrica (setas verdes) em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

A dolomita ocorre em forma de franja nos *shrubs* da litofácies Calcário Crostiforme e em cristais romboédricos no espaço inter-*shrub* nas litofácies Crostiforme, Arborescente e

Arbustiforme (Figura 59). Análises de catodoluminescência mostram zoneamento composicional desses cristais (Figura 60).

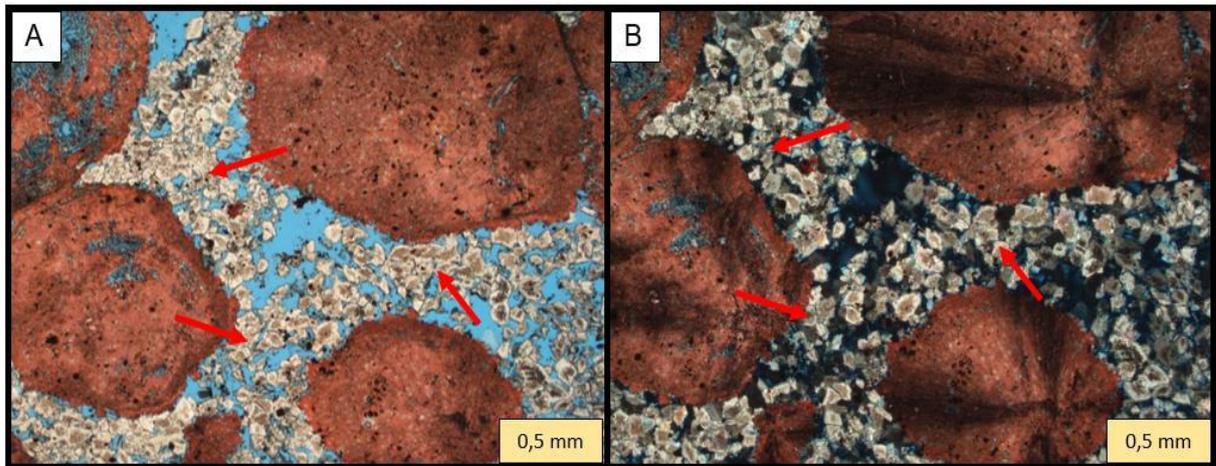


Figura 59 – A e B – Cristais romboédricos de dolomita preenchendo intensamente o espaço inter-*shrub* presentes na litofácies Calcário Arbustiforme (setas vermelhas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

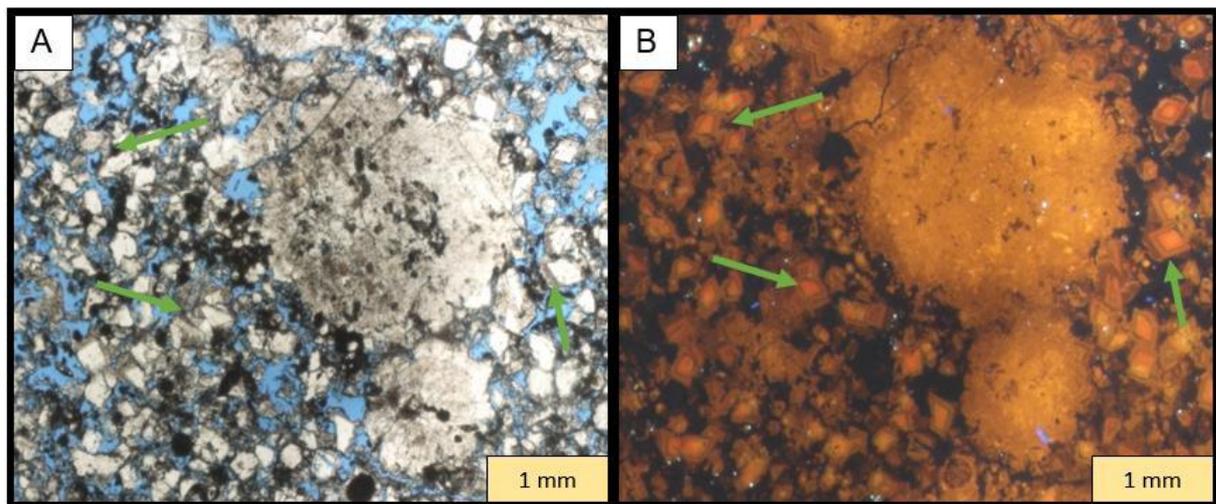


Figura 60 – A e B – Cristais romboédricos de dolomita preenchendo intensamente o espaço inter-*shrub* na litofácies Calcário Arborescente (setas verdes), em nicóis paralelos e imagem por catodoluminescência, respectivamente.

Cristais raros de barita ocorrem em todas as litofácies sedimentares de forma pontual. Na litofácies Brecha está presente de forma significativa, com aspecto blocoso, interligando todas as partículas.

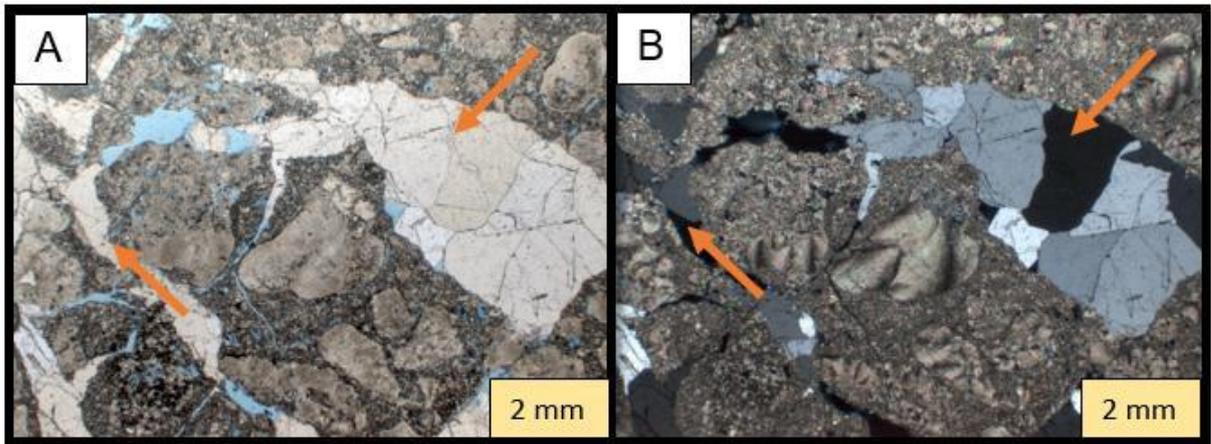


Figura 61 – A e B – Cristais de barita blocosa (setas laranjas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente, encontradas na litofácies Brecha.

Quartzo está presente na forma de cristais microcristalinos, pequenos e médios, como calcedônia e em mosaico/blocoso. Ocorre nas litofácies Calcário Crostiforme, Calcário Dendriforme e Calcário Granular.

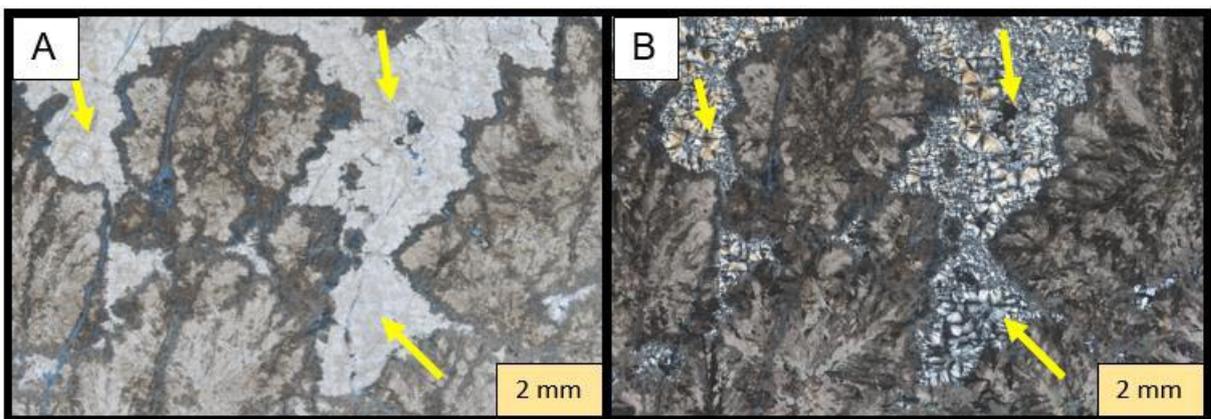


Figura 62 – A e B – Cimento de quartzo preenchendo intensamente o espaço inter-*shrub* (setas amarelas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente, presentes na litofácies Calcário Dendriforme.

7.3.3 Substituição/Dolomitização:

Processos diagenéticos de substituição de fases minerais foram observadas ao longo das litofácies sedimentares carbonáticas descritas (Figura 63), sendo que mudanças de pH podem estar diretamente ligadas com essas transformações.

Uma das mudanças importantes identificadas foi a dolomitização parcial dos *shrubs* (substituição de calcita primária por dolomita) visto nas litofácies Calcário Arborescente, Calcário Arbustiforme e Calcário Crostiforme. Quartzo microcristalino também foi frequentemente encontrado substituindo parcialmente os *shrubs* e o carbonato.

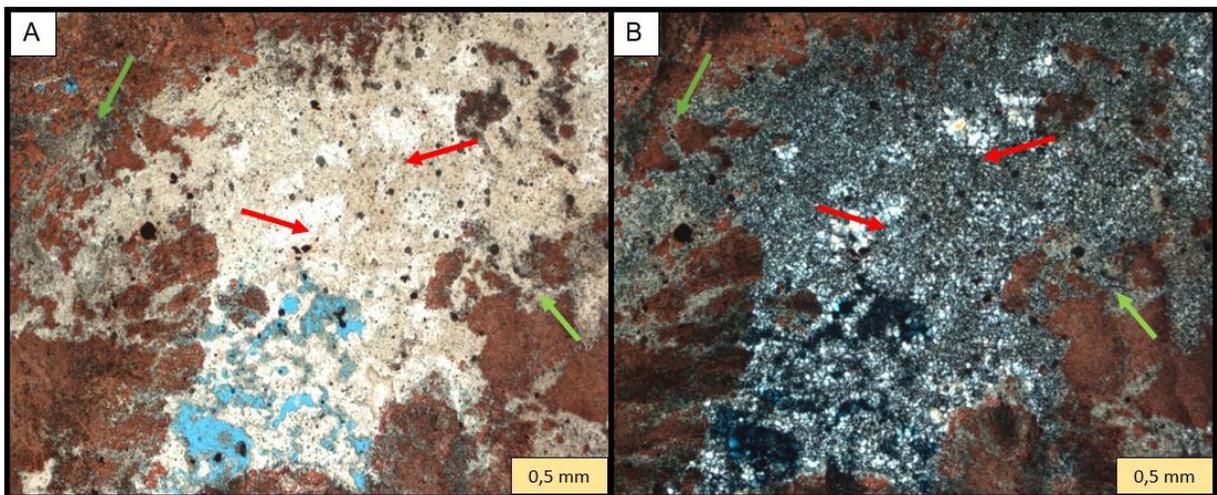


Figura 63 - A e B – Litofácies Calcário Arborescente mostrando substituição de calcita por dolomita (setas verdes) (tingimento vermelho dos elementos por solução de alizarina) e substituição de carbonato por sílica (setas vermelhas), em nicóis paralelos e cruzados, respectivamente.

7.4 Empilhamento das litofácies:

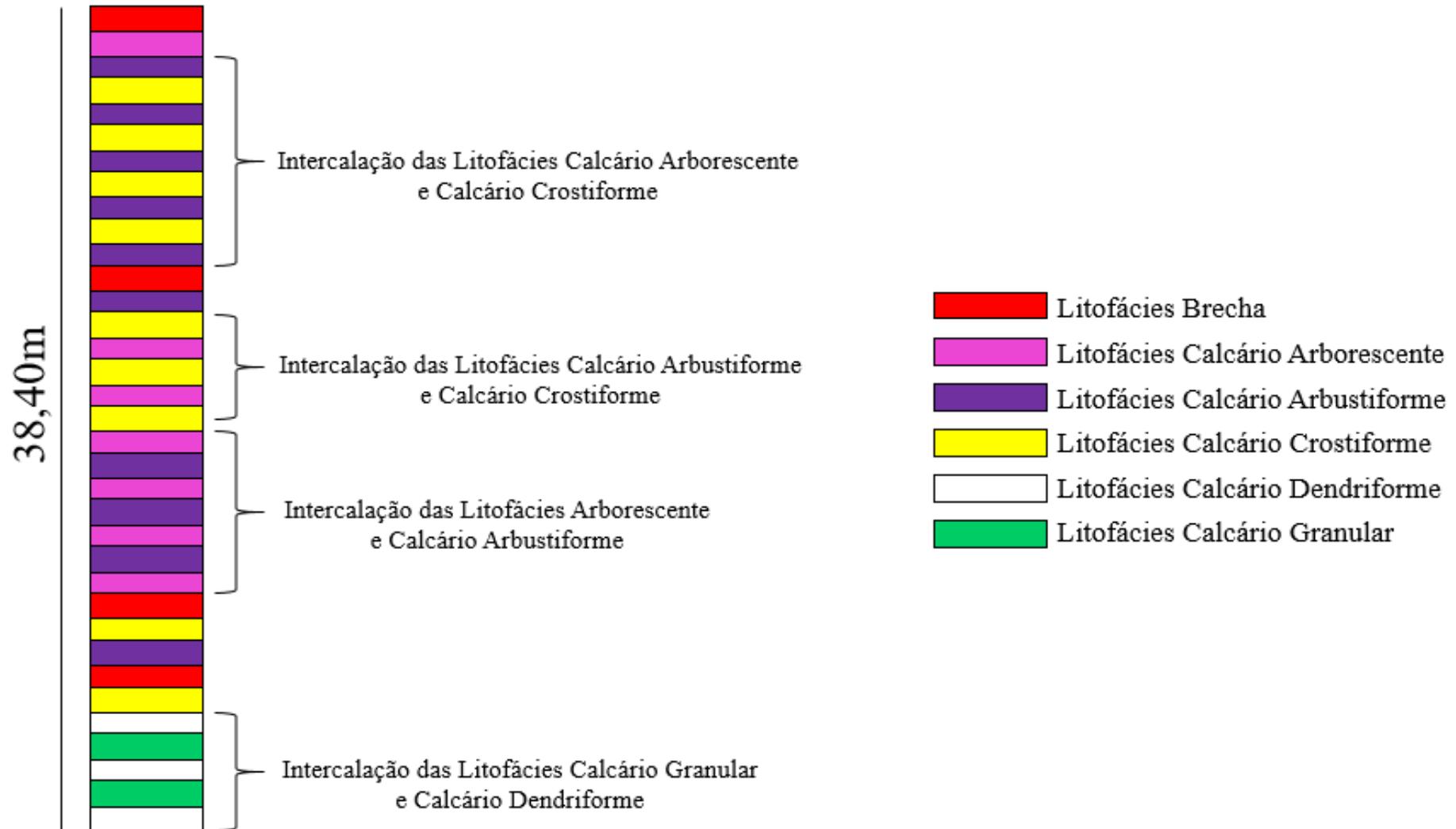


Figura 64 - Perfil Esquemático do Empilhamento das Litofácies

7.5 Ambiente deposicional:

Identificar e reconstituir o ambiente deposicional das rochas do pré-sal não é algo trivial e necessita do subsídio de diversas ferramentas analíticas. Diversos autores têm se debruçado sobre o tema: Falcão (2015), Wright & Barnett (2017), Lima & De Ros (2019) e Gomes *et al* (2020). Na maioria das vezes, as rochas passaram por processos diagenéticos intensos, estão cimentadas, substituídas, brechadas e, em alguns casos, bastante recristalizadas. Carstificação epigênica e hipogênica também podem estar associadas.

Para sugerir um modelo de ambiente deposicional mais fidedigno possível, além das análises apresentadas anteriormente, seria necessário obter mais dados geológicos e estatísticos, tais como: isótopos (carbono e oxigênio), MEV morfológico, DRX, inclusões fluidas e utilizar lâminas petrográficas de amostras laterais do poço. Portanto, as considerações feitas a respeito de ambientes de deposição das fácies descritas são de caráter hipotético, baseado em semelhanças encontradas em trabalhos presentes em literatura.

As fácies sedimentares carbonáticas apresentadas ao longo dessa monografia apresentam algumas similaridades com as encontradas no poço SB-1, também localizado na bacia de Santos, descritas por Falcão (2015). A autora compara suas fácies (microcristalinas, cristalinas e granulares) com um sistema travertínico subaéreo (

Figura 65) e as insere em uma sucessão/alternância de ambientes de *slope/pool*, terraço e palustre.

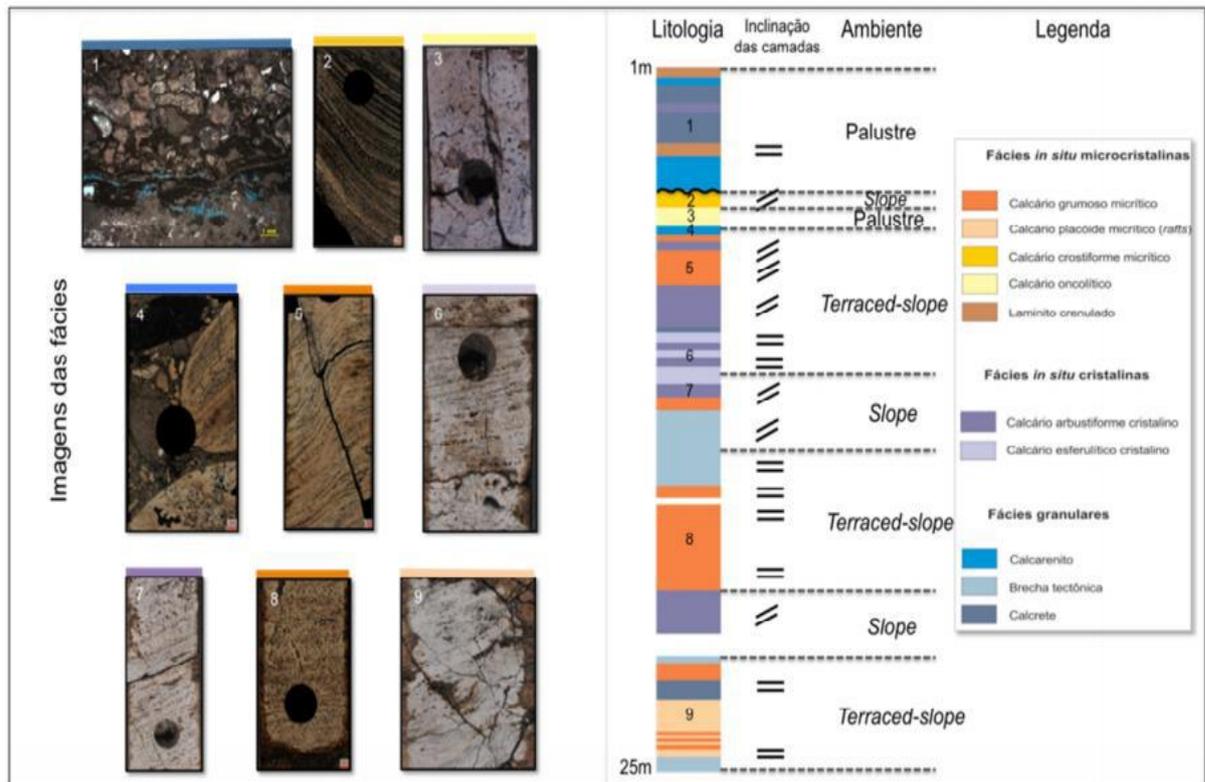


Figura 65 – À direita, aspecto geral das fácies do poço SB-1. À esquerda, empilhamento das fácies com ambiente deposicional sugerido, modificado de Falcão 2015.

Observando o aspecto geral das litofácies, pode-se sugerir que as litofácies Calcário Arbórescente, Calcário Arbustiforme e Calcário Crostiforme podem estar associados a ambientes de *slope* e *pools*. Dentro desse contexto de ambiente, há a possibilidade de formação de cavidades e microambientes de caverna, onde as litofácies de Brecha e Calcário Dendriforme poderiam se desenvolver. A litofácies Calcário Granular pode estar mais relacionada à um ambiente palustre, alagado e mais distal, com possível influência pedogenética, como mostrado no trabalho de Mancini *et al.* (2019) (Figura 66).

A grande quantidade de determinadas fases minerais identificadas através da técnica de QEMSCAN, principalmente as ricas em estrôncio (barita, Sr-barita, estroncianita, celestina e outros), podem estar relacionadas à influência e interação de fluidos hidrotermais.

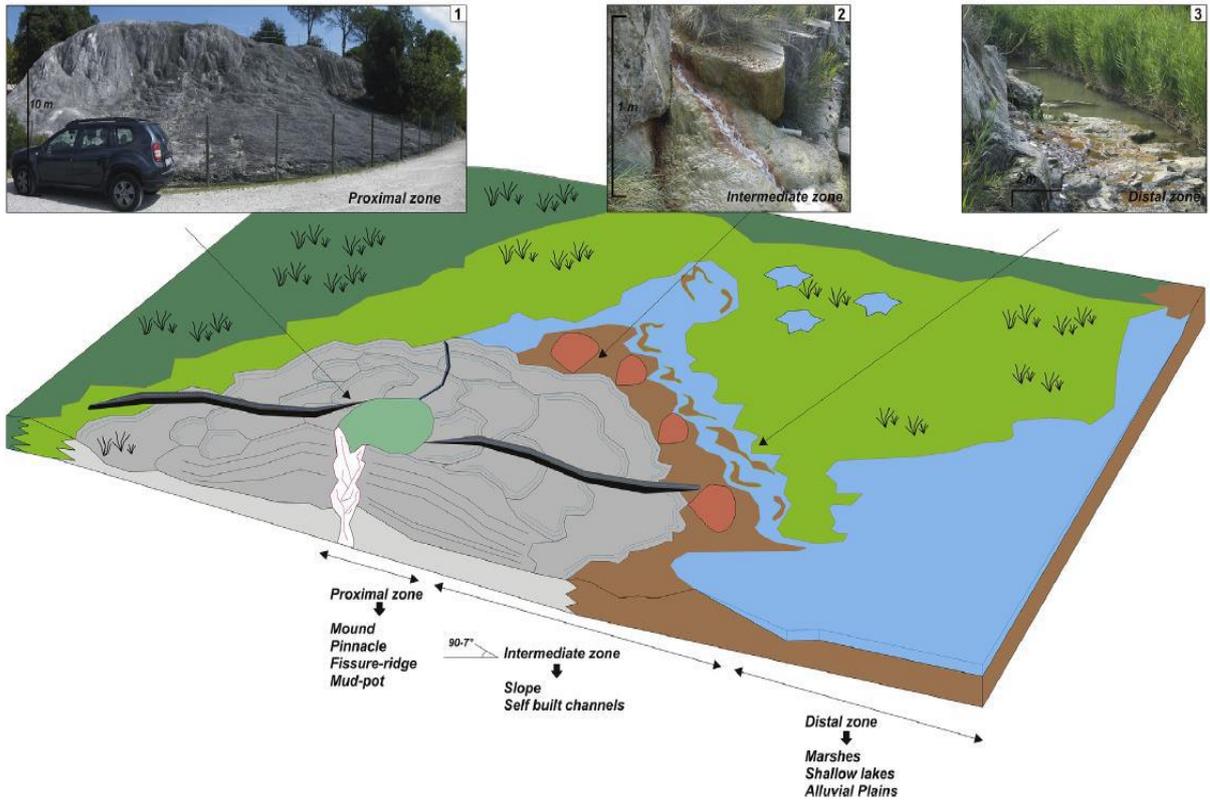
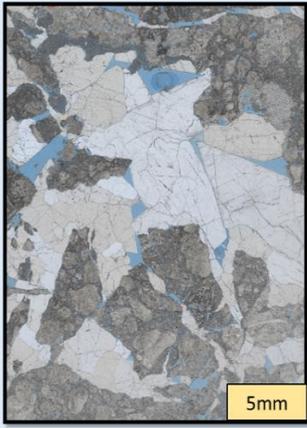
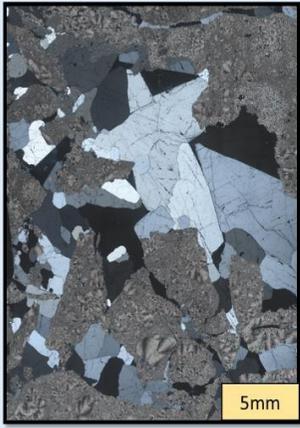
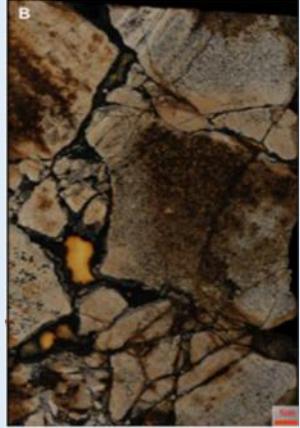
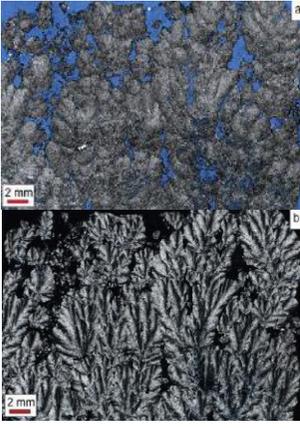
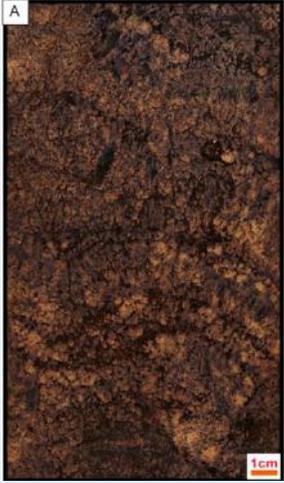
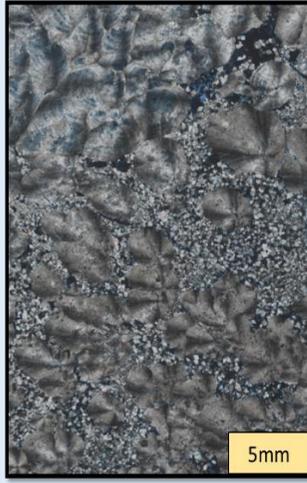
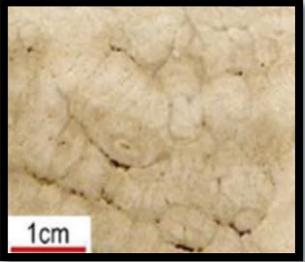
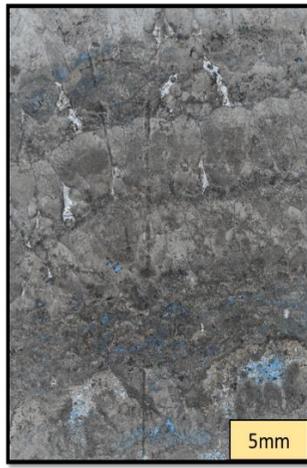
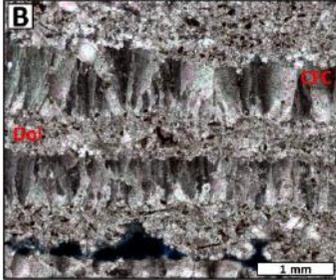


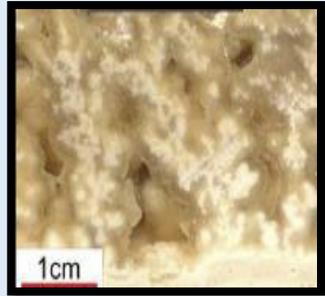
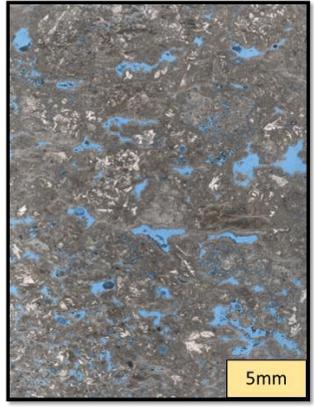
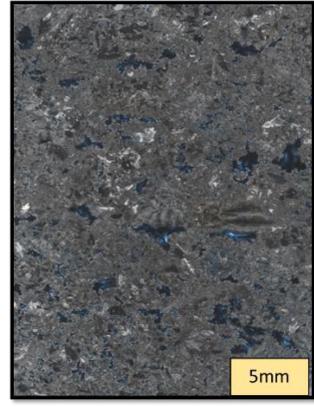
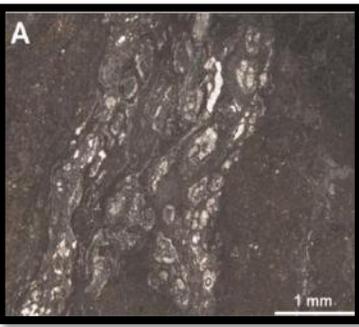
Figura 66 - Ambiente deposicional de travertino subaéreo (Mancini et al. 2019).

7.6 Tabela de Litofácies:

Tabela 2 - Litofácies carbonáticas interpretadas com sua estrutura, imagens macroscópicas, microscópicas e exemplos na bibliografia.

LITOFÁCIES	ESTRUTURA	MACRO	MICRO (PP)	MICRO (PX)	BIBLIOGRAFIA	
BRECHA	BRECHADA					Amostra de litofácies brecha (macro) do poço SB-1, Bacia de Santos. FALCÃO (2015)
CALCÁRIO ARBORESCENTE	ARBORESCENTE					Amostra de litofácies <i>shrubstone</i> (micro PP e PX). GOMES <i>et al.</i> (2020)

LITOFÁCIES	ESTRUTURA	MACRO	MICRO (PP)	MICRO (PX)	BIBLIOGRAFIA
CALCÁRIO ARBUSTIFORME	ARBUSTIFORME				 <p>Amostra de litofácies arbustiforme (macro). CLAES <i>et al.</i>(2017)</p>
CALCÁRIO CROSTIFORME	CROSTIFORME				 <p>Amostra de litofácies <i>com fascicular-optic calcite crusts</i> (micro PX). LIMA & DE ROS (2019)</p>

LITOFÁCIES	ESTRUTURA	MACRO	MICRO (PP)	MICRO (PX)	BIBLIOGRAFIA
CALCÁRIO DENDRIFORME	DENDRIFORME				 <p>Amostra de litofácies dendriforme (macro). CLAES <i>et al.</i> (2017)</p>
CALCÁRIO GRANULAR	GRANULAR				 <p>Calcrete. Feições biogênicas: estrutura alveolar-septal. ALONSO-ZARZA & WRIGHT, (2010)</p>

7.7 Considerações:

A descrição faciológica resultou na classificação de seis fácies sedimentares carbonáticas distintas: Brecha, Calcário Arborescente, Calcário Arbustiforme, Calcário Crostiforme, Calcário Dendriforme e Calcário Granular. A quantidade de diferentes tipos de *shrubs* ao longo dos 38,40 metros de testemunho é algo marcante pois não segue a ciclicidade laminito-esferulítico-*shrub* (Figura 67) descrita por Wright & Barnett (2017) e visto em outros poços do pré-sal.

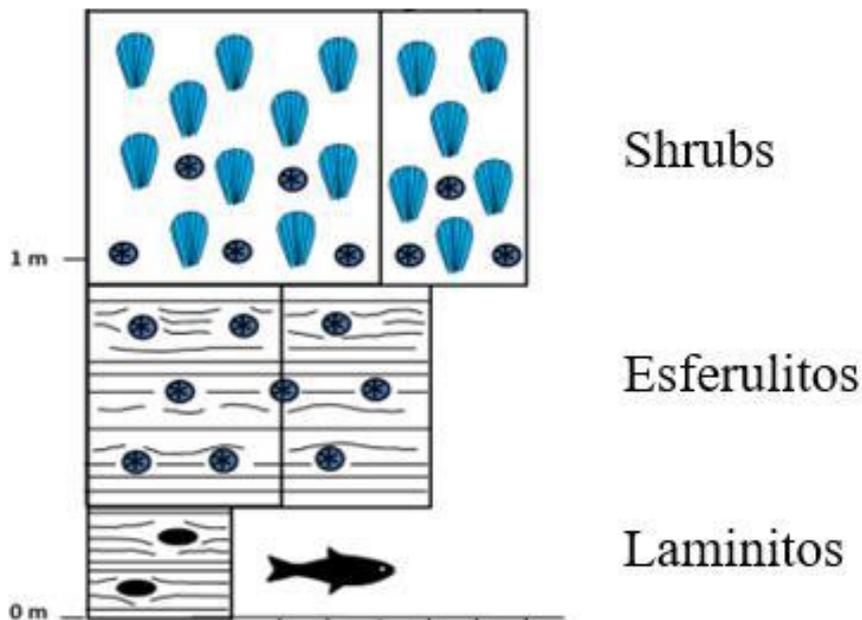


Figura 67 – Perfil esquemático da ciclicidade Laminito-Esferulito-Shrub. Modificado de Wrigt & Barnett (2017).

A litofácies Brecha difere das demais por possuir uma quantidade significativa de cimento de barita unindo seus intraclastos. É provável que sua origem tenha sido a partir da ascensão de fluidos hidrotermais por condutos (falhas) causando o aspecto brechado à rocha e cimentando suas partículas.

As litofácies Calcário Arborescente e Calcário Arbustiforme são semelhantes nos quesitos composicionais, de arranjo/estrutura e tipos de cimento presentes (principalmente de dolomita romboédrica). Ocorrem sempre intercaladas em camadas paralelas a subparalelas

presentes em praticamente todas as seções. Gomes *et al.* (2020) descreve essas mesmas litofácies, sem levar em consideração a relação entre altura e comprimento dos elementos, como litofácies *shrubstone*.

A litofácies Calcário Crostiforme é uma litofácies formada por *shrubs* arborescentes, e em menor quantidade arbustiformes cuja principal característica é o arranjo denso e bandamento marcante evidenciado nas amostras macroscópicas e microscópicas. É similar à litofácies *fascicular-optic calcite crusts* descrita por Lima & De Ros (2019).

A litofácies Calcário Dendriforme está mais restrita às seções basais dos testemunhos e aparentam morfologia de dedos, como visto nas amostras macro de Claes *et al.* (2017). Ocorre comumente associada às feições de carstificação descritas anteriormente. Também preenchem fraturas e/ou tem seus cristais precipitados muitas vezes de ponta cabeça a partir de superfícies planas (possíveis estalactites).

A litofácies Calcário Granular é formada por partículas sub-esféricas porosas, muitas vezes com laminação interna incipiente e aspecto geral de provável exposição. Microscopicamente esses fragmentos estão cimentados por crostas de composição calcíticas e há estrutura alveolar-septal em toda a seção. Estas últimas que podem indicar ações de microrganismos, assim como nas feições biogênicas descritas em calcretes por Alonso-Zarza & Wright (2010).

Os processos diagenéticos que afetaram esses reservatórios carbonáticos mostra o quão suscetível às mudanças mineralógicas essas rochas são. A interação entre rocha e fluido (deposicional, meteórico ou hidrotermal) podem alterar significativamente as texturas encontradas, recristalizar os minerais, substituí-los ou precipitar novas assembleias. Essas transformações estão presentes em todas as litofácies vistas anteriormente.

8. CONCLUSÕES

O objetivo desta monografia foi o estudo sedimentológico de rochas carbonáticas de idade aptiana a partir de amostras de rocha extraídas de um poço de petróleo localizado no campo de Sururu, bacia de Santos, Sudeste brasileiro. Tais litologias fazem parte da seção conhecida como Pré-sal (mais especificadamente dos carbonatos da Formação Barra Velha).

A pesquisa bibliográfica realizada previamente auxiliou no entendimento do contexto geológico de precipitação dessas rochas. Além disso, o estudo detalhado dos componentes carbonáticos, elementos do pré-sal, das classificações de carbonato construída ao longo dos anos e de ambientes análogos (tufa, travitufa, travertino, caliche e paleossolos) serviram como substrato para elaboração da classificação aplicada nesse trabalho.

A partir da descrição de segmentos de testemunho (38,40m) foi possível classificar as litologias em seis litofácies sedimentares. Técnicas de descrição microscópica (com o auxílio de microscópio ótico por luz transmitida e catodoluminescência) e mapeamento mineralógico (QEMSCAN) foram utilizadas para entender melhor os processos formadores.

As litofácies Brecha, Calcário Arborescente, Calcário Arbustiforme, Calcário Crostiforme, Calcário Dendriforme e Calcário Granular possuem constituintes com morfologias distintas e os processos diagenéticos atuantes são similares em algumas seções e/ou únicas em outras. Essencialmente são compostas por *shrubs* com arranjos, estruturas, texturas, feições diagenéticas e composição bastante peculiares.

Processos diagenéticos de carstificação, cimentação (por calcita, quartzo, dolomita e barita), substituição e dolomitização são presentes em todas as seções descritas. Atuam de forma significativa nas alterações mineralógicas e texturais evidenciadas ao longo da monografia de forma intensa em todas as litofácies carbonáticas descritas.

Ainda que não tenha sido possível estabelecer o ambiente deposicional específico desses depósitos, há exemplos na literatura que sugerem certa semelhança com sistemas de travertinos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO-ZARZA, A.M. WRIGHT, V.P. 2010. Palustrine carbonates. In: Alonso-Zarza, A.M. Tanner, L.H. (Eds.), Carbonates in continental setting: facies, environments and processes, pp. 103–131 Developments in Sedimentology, 61.
- BANCO DE DADOS ANP Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 10/01/2020.
- CAPEZZUOLI, E. GANDIN, A. PEDLEY, M. 2014. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: the state of the art. *Sedimentology* 61, 1–21.
- CARMINATTI, M. WOLFF, B. GAMBOA, L. 2008. New exploratory frontiers in Brazil. In: Proceedings of the 19th World Petroleum Congress, Madrid, Spain, June 29-July 3, 2008, 11.
- CHAFETZ, H.S. FOLK, R.L. 1984. Continental carbonates: depositional, morphology and the bacterially constructed constituents. *J. Sediment. Petrol.* 54, 289–316.
- CHAFETZ, H.S. GUIDRY, S.A. 1999. Bacterial *shrubs*, crystal *shrubs*, and ray-crystal *shrubs*: bacterial vs. abiotic precipitation. *Sedimentary Geology* 126, 57–74.
- CHOQUETTE, P.W. PRAY, L.C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 54, 207–250.
- CLAES, H. MARQUES-ERTHAL, M. SOETE, J. ÖZKUL, M. SWENNEN, R. 2017a. *Shrub* and pore type classification: Petrography of travertine *shrubs* from the Ballık-Belevi area (Denizli, SW Turkey). *Quat. Int.* 217, 147–163.
- DUNHAM, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: In: HAM, W.E. (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, vol. 1. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, Tulsa, pp. 108–122.
- EMBRY, A.F. KLOVAN, J.E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 19 (4), 730–781.
- ERTHAL, M.M. CAPEZZUOLI, E. MANCINI, A. CLAES, H. SOETE, J. SWENNEN, R. 2017. *Shrub* morpho-types as indicator for the water flow energy – Tivoli travertine case (Central Italy). *Sediment. Geol.* 347, 79–99.
- FALCÃO, L.C. 2015. Estudo Faciológico de um interval aptiano do poço SB-1 (Bacia de Santos) e sua comparação com travertinos quaternários de San Juan, Argentina. Master thesis. UFF (in Portuguese).
- FOLK, R.L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, 43, p. 1-38.
- FOLK, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestones types. In: In: HAM, W.E. (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, vol. 1. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, Tulsa, pp. 62–85.

- FOLK, R.L. CHAFETZ, H.S. 1983. Pisoliths (pisoids) in Quaternary travertines of Tivoli, Italy. In: Peryt, T.M. (Ed.), Coated Grains. Springer-Verlag, Berlin, pp. 474–487.
- FORD, T.D. PEDLEY, H.M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Sci. Rev.* 41 (3–4), 117–175.
- FRISIA, S. BORSATO. A. Karst. In: A.J. Van Loon, editor: Development sin Sedimentology, Vol 61, Carbonates in Continental Settings, A.M. Alonso-Zarza and L.H. Tanner. The Netherlands: Elsevier, 2010, pp. 269 – 318.
- GOMES, J.P. BUNEVICH, R.B. TEDESCHI, L.R. TUCKER, M. E. WHITAKER, F.F. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt. Elsevier, 2020, pp. 1 – 21.
- GRABAU, A. W. 1904. On the classification of sedimentary rocks: *Am. Geologist*, v. 33, p. 228-247.
- KITANO, Y. 1963. Geochemistry of calcareous deposits found in hot springs. *Journal of Earth Sciences Nagoya University II*, 68–100.
- LIMA, B.E. DE ROS, L.F. 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil. *Sediment. Geol.* 383, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.01.006>.
- LORAH, M.M. HERMAN, J. 1988. The Chemical Evolution of a Travertine-Depositing Stream' *Geochemical Processes and Mass Transfer Reactions. Water resources research, VOL. 24, NO. 9, P. 1541-1552, SEPTEMBER 1988.*
- MANCINI, A., Capezzuoli, E., Erthal, M., Swennen, R. Hierarchical approach to define travertine depositional systems: 3D conceptual morphological model and possible applications. Elsevier, 2019, pp. 549 – 563.
- MOREIRA, J. MADEIRA, C. GIL, J. e MACHADO, M. (2007). Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (2), pp. 531-549.
- PEDLEY, M. 1990. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology* 68, 143–154.
- PEDLEY, M. 2009. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology* 56, 221–246.
- PEDLEY, M.H. Rogerson, M. 2010. Introduction to tufas and speleothems. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 336, 1–5.
- PENTECOST, A. 2005. Continental Carbonate. Springer-Verlag, London, pp. 1–445.
- PEREIRA, M. J. e FEIJÓ, F. J. (1994). Bacia de Santos. Estratigrafia das Bacias Sedimentares do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8, pp. 219-234.

PEREIRA, M. J. e MACEDO, J. M. (1990). A Bacia de Santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. Boletim Geociências da Petrobras, 4, 3-11.

PETTIJOHN, F. P. 1957, Sedimentary rocks, 2d ed.: New York, Harper and Bros.

PETROBRAS. Pré-sal. Rio de Janeiro. Disponível em:<<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 10/01/2020.

RIDING, R. Microbial carbonates the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, v. 47, supplement 1, p. 179-214, 2000.

TERRA, G.J.S. SPADINI, A.R. FRANCA, 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. DA SILVA, N.G.C.MORETTI Jr. P.A. D'AVILA, R.S.F. DE SOUZA, R.S. TONIETTO, S.N. DOS ANJOS, S.M.C.CAMPINHO, V.S. WINTER, W.R. 2010. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. Bol. Geociências Petrobras 18, 9–29 (in Portuguese).

TUCKER, M.E.; 1981. Sedimentary petrology: an introduction. London, Blackwell Scientific Publications. 225p.

TUCKER, M.E. & WRIGHT, V.P.; 1990. Carbonate Sedimentology, Blackwell Science Publications. 482p.

WRIGHT, V.P. BARNETT, A.J. 2017. Critically Evaluating the Current Depositional Models for the Pre-salt Barra Velha Formation. Offshore Brazil. AAPG Search and Discovery Article #51439.

WRIGHT, V. P. (2007). Calcrete. In: D. J. Nash, e S. J. McLaren (Eds.), *Geochemical Sediments and Landscapes* (pp. 10-45). Oxford: Blackwell.

WRIGHT, V. P. e TUCKER, M. E. (1991). Calcretes: an Introduction. In: V. e. Wright (Ed.), *Calcretes* (pp. 1-22). Oxford: Blackwell.