

Análise quantitativa das propriedades petrográficas de amostras de rochas carbonáticas do pré-sal brasileiro

Quantitative analysis of the petrographic properties of carbonate rock samples from the Brazilian pre-salt

DOI:10.34117/bjdv9n5-057

Recebimento dos originais: 04/04/2023

Aceitação para publicação: 06/05/2023

Luis Augusto Antoniossi Mansini

Mestrando em Geociências

Instituição: Centro de Estudos de Energia e Petróleo, Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária, Campinas – SP,
CEP: 13083-896

E-mail: 1182868@dac.unicamp.br

Najlah Zeitoum

Mestranda em Ciências e Engenharia do Petróleo

Instituição: Centro de Estudos de Energia e Petróleo, Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária, Campinas – SP,
CEP: 13083-896

E-mail: nah.zeitoum@gmail.com

Leonardo Fernandes Godoi

Mestrando em Ciências e Engenharia do Petróleo

Instituição: Centro de Estudos de Energia e Petróleo, Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária, Campinas – SP,
CEP: 13083-896

E-mail: l201162@dac.unicamp.br

Nathália Rocha Amorim

Graduanda em Geologia

Instituição: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária, Campinas – SP,
CEP: 13083-896

E-mail: n222831@dac.unicamp.br

Alexandre Campana Vidal

Doutor em Geologia Regional

Instituição: Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas

Endereço: Rua Cora Coralina, 350, Cidade Universitária, Campinas – SP,
CEP: 13083-896

E-mail: vidal@unicamp.br

RESUMO

O início da exploração do pré-sal é um dos marcos mais importantes da história geológica e econômica do Brasil. Com a enorme disparidade positiva entre a produção prevista antes e após a exploração do pré-sal, há cada vez mais mobilização por parte de empresas e pesquisadores por estudos caracterizando as rochas-reservatório dessa camada. O presente trabalho tem como finalidade a caracterização petrográfica de amostras de rochas carbonáticas de um reservatório do pré-sal brasileiro na Bacia de Santos, que visa analisar a gênese de seus principais componentes sedimentares e diagenéticos através de descrições macro e microscópicas, além da análise de dados petrofísicos correlacionando valores de porosidade e permeabilidade. O objetivo é definir o potencial de reservatório dessas rochas e correlacioná-las com as principais fácies definidas para o intervalo do pré-sal: (i) Esferulitos; (ii) Shrub-Like Limestone; (iii) Grainstone Intraclástico; (iv) Packstone Intraclástico; (v) Dolostone; e (vi) Mudstone/Siltstone. Acerca de todas as amostras analisadas, esferulitos, *shrubs* e matriz (argilosa, sílica e/ou carbonática) são elementos comuns, tanto *in situ*, quanto retrabalhados ou substituídos parcialmente. A cimentação das rochas é de dois tipos: sílica, com *chert* bordejando os grãos, calcedônia e cristais de quartzo, nessa ordem na direção grão-poro; e carbonática, com a cristalização de calcita e dolomita romboédrica por substituição, pelo processo diagenético de dolomitização. Com a análise estatística aplicada nas lâminas delgadas, foi medido o diâmetro de esferulitos e o comprimento de estruturas *shrub* preservadas, além de espessuras de fraturamentos. Os esferulitos apresentaram média de diâmetro de $1,60 \pm 0,76$ mm, com o menor e maior grão com 0,25 e 6,92 mm, respectivamente. O comprimento dos grãos com estruturas *shrub* apresentaram uma média de $3,05 \pm 1,44$ mm, com menor e maior estrutura com 0,71 e 12,9 mm, respectivamente. Por fim, as fraturas apresentaram espessura média de $0,16 \pm 0,07$ mm, com menor e maior intervalo de espessura equivalente a 0,01 a 1,47 mm, respectivamente. As medições permoporosas indicaram porosidade com média de $13,77 \pm 5,78$ % e permeabilidade com média de $172,63 \pm 474,90$ mD. De forma geral, os valores de porosidade estão entre 10 e 15% e os valores de permeabilidade são muito dispersos e pouco correlacionados com os respectivos valores de porosidade, sugerindo um sistema poroso complexo e heterogêneo.

Palavras-chave: caracterização da porosidade, reservatórios carbonáticos, bacia de santos.

ABSTRACT

The start of pre-salt exploration is one of the most important milestones in Brazil's geological and economic history. With the enormous positive disparity between the expected production before and after pre-salt exploration, there is an increasing mobilization on the part of companies and researchers for studies characterizing the reservoir rocks of this layer. The present work aims at the petrographic characterization of samples of carbonate rocks from a Brazilian pre-salt reservoir in the Santos Basin, which aims to analyze the genesis of its main sedimentary and diagenetic components through macro and microscopic descriptions, in addition to the analysis of petrophysical data correlating porosity and permeability values. The objective is to define the reservoir potential of these rocks and correlate them with the main facies defined for the pre-salt interval: (i) Spherulites; (ii) Shrub-Like Limestone; (iii) Intraclastic Grainstone; (iv) Intraclastic Packstone; (v) Dolostone; and (vi) Mudstone/Siltstone. About all analyzed samples, spherulites, shrubs and matrix (clayey, silica and/or carbonate) are common elements, both in situ and reworked or partially replaced. The cementation of the rocks is of two types: silica, with chert bordering the grains, chalcedony and quartz crystals, in

that order in the grain-pore direction; and carbonate, with the crystallization of calcite and rhombohedral dolomite by substitution, through the diagenetic process of dolomitization. With the statistical analysis applied to the thin sections, the diameter of spherulites and the length of preserved shrub structures were measured, in addition to the thickness of fractures. The spherulites had an average diameter of 1.60 ± 0.76 mm, with the smallest and largest grains measuring 0.25 and 6.92 mm, respectively. Grain length with shrub structures averaged 3.05 ± 1.44 mm, with minor and major structures having 0.71 and 12.9 mm, respectively. Finally, the fractures had a mean thickness of 0.16 ± 0.07 mm, with a smaller and larger interval of thickness equivalent to 0.01 to 1.47 mm, respectively. Permoporous measurements indicated porosity with an average of $13.77 \pm 5.78\%$ and permeability with an average of 172.63 ± 474.90 mD. In general, the porosity values are between 10 and 15% and the permeability values are very dispersed and little correlated with the respective porosity values, suggesting a complex and heterogeneous porous system.

Keywords: characterization of porosity, carbonate reservoirs, Santos basin.

1 INTRODUÇÃO

O anúncio da descoberta do pré-sal, no ano de 2007, é um dos marcos mais importantes na história geológica e econômica do Brasil, uma vez que, com ele, o país atingiu sua autossuficiência de petróleo. Após sua descoberta, novos desafios surgiram principalmente na área de geologia, pois não existem análogos geológicos atuais. Por isso, há cada vez mais a mobilização por estudos caracterizando as rochas-reservatório dessa camada, principalmente em relação a suas propriedades petrofísicas, além da classificação de tipos litológicos e padrões de deposição dessas rochas.

Nas últimas décadas, a compreensão geológica das fácies carbonáticas foi aperfeiçoada principalmente pela apreciação dos processos biológicos e diagenéticos e seus produtos (Gomes *et al.*, 2020). Classificações originalmente conceituadas para carbonatos marinhos (Folk (1959, 1962), Dunham (1962), Embry e Klovan (1971), Riding (2000) e Wright (1992)) têm sido usadas para depósitos lacustres com algumas variações. Porém, se tratando dos carbonatos lacustres do pré-sal na Bacia de Santos, que diferem em vários aspectos dos depósitos lacustres convencionais, como na presença de três principais componentes: *shrub*, esferulitos e lâminas fibrosas coalescidas de calcita (Wright Barnett, 2015), foi estabelecida a seguinte classificação de fácies: (i) Esferulitos, (ii) Shrub-like Limestone, (iii) Grainstone Intraclástico, (iv) Packstone Intraclástico, (v) Dolostone, e (vi) Mudstone/Siltstone.

O objetivo deste trabalho é caracterizar algumas amostras de rochas carbonáticas (plugue e lâmina delgada) de um reservatório pré-sal brasileiro da Bacia de Santos, em

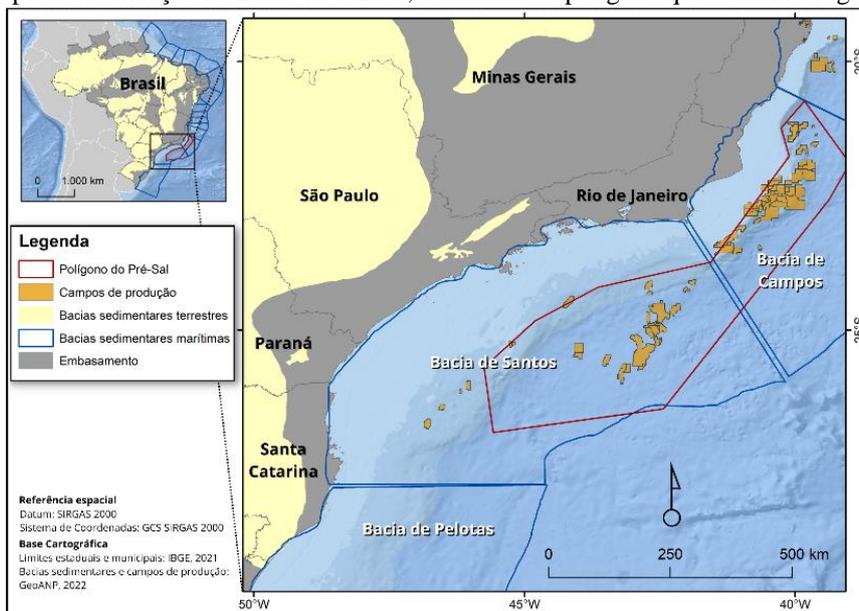
relação à gênese de seus principais componentes sedimentares e fases diagenéticas, relacionando estas informações com dados de permeabilidade e porosidade.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 BACIA DE SANTOS

A Bacia de Santos tem sua origem e evolução relacionadas aos processos de ruptura do paleocontinente Gondwana e formação do Oceano Atlântico Sul, eventos que impactaram os depósitos do pré-sal (CASTRO, 2019). Possui área de aproximadamente 350.000 km² e limita-se ao norte pelo Alto de Cabo Frio e a sul pela Zona de Fratura de Florianópolis (figura 1).

Figura 1: Mapa de localização da Bacia de Santos, detalhando o polígono que contém a região do pré-sal.



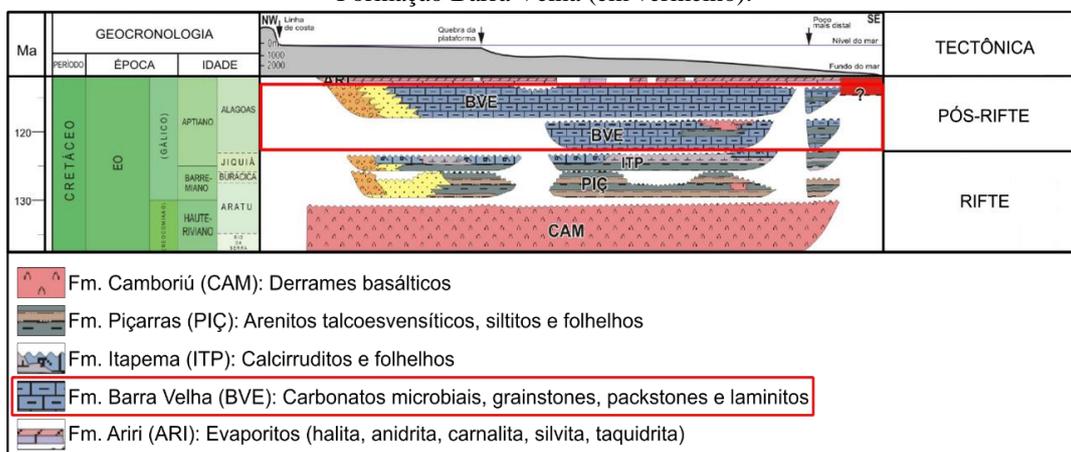
O arcabouço tectônico da bacia compreende três Supersequências (Moreira *et al.*, 2007), correspondente às fases Rife, Pós-Rife e Drite, das quais as duas primeiras abrigam o sistema petrolífero em questão. Sua evolução, segundo Petersohn (2013), está relacionada à formação da margem passiva, uma vez que há registros de processos como rompimento da crosta continental, distensão litosférica, estiramento crustal e subsidência termal.

A Supersequência Rife compreende as formações Camboriú, Piçarras e Itapema. A Formação Camboriú é composta por derrames basálticos sobre os quais se assenta a Formação Piçarras, composta por arenitos talcoestevensíticos, siltitos e folhelhos. Por

fim, a Formação Itapema é caracterizada por apresentar intercalações de calcirruditos e folhelhos escuros.

A segunda Supersequência, Pós-Rifte, compreende as formações Barra Velha e Ariri. A primeira é composta por calcários microbiais, estromatólitos, laminitos, *grainstones* e *packstones* compostos por fragmentos de estromatólitos e ostracodes. O autor conclui a Supersequência Pós-Rifte com a Formação Ariri, que ocorre sobreposta à Formação Barra Velha, é constituída por depósitos de evaporitos, compostos principalmente por halita e anidrita. A seção estratigráfica das duas Supersequências está exposta na figura 2.

Figura 2: Seção estratigráfica (Supersequências Pós-Rifte e Rifte) da Bacia de Santos, com destaque a Formação Barra Velha (em vermelho).



Adaptado de Moreira *et al.*, 2007

Analisando o sistema petrolífero do pré-sal na Bacia de Santos, temos que as potenciais rochas geradoras de hidrocarbonetos são folhelhos negros ricos em matéria orgânica intercalados com carbonatos das formações Itapema e Piçarras depositados na fase rifte e, como rochas-reservatórios, temos as coquilhas (calcirruditos) e microbialitos das formações Itapema e Barra Velha (MOREIRA *et al.*, 2007), respectivamente. Desse modo, os hidrocarbonetos foram gerados na seção rifte e migraram pelo contato direto das rochas geradoras e reservatórios, tendo os evaporitos da Formação Ariri como principal selante desse sistema (PAPATERRA, 2010).

2.1.1 Formação Barra Velha

Os carbonatos da Formação Barra Velha apresentam composição constante, abrangendo três principais componentes e materiais detríticos derivados destes: *shrubs*,

esferulitos e lâminas fibrosas, que atuam como matriz em algumas rochas (Wright & Barnett, 2015).

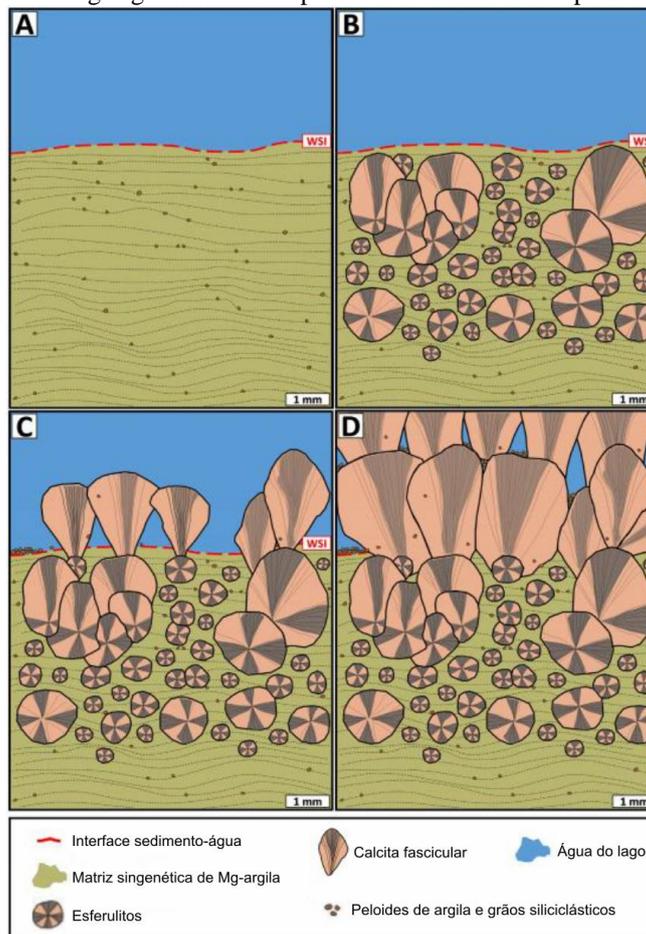
Os *shrubs* são interpretados como estruturas de calcita fibrosa radial, com feição arbustiva de crescimento *in situ* a partir de um substrato. Em trabalho recente, Saller *et al.* (2016) compara os *shrubs* a recifes bióticos da Bacia de Kwanza, em que estão todos orientados entre si, com estruturas topográficas positivas com crescimento orientado para a luz. Posteriormente, Ceraldi & Green (2017) sugeriram que essas estruturas são afetadas potencialmente pela profundidade da zona fótica, sendo uma fácies influenciada por bactérias, podendo representar deposição em águas rasas.

Os esferulitos por sua vez são compostos por esferas calcíticas fibro-irradiadas. Por se encontrarem muitas vezes inseridos em uma matriz carbonática e em alguns casos em matriz argilosa, conclui-se foram formados dentro da matriz de forma substitutiva (LIMA & DE ROS, 2019) ou de forma deslocada (WRIGHT & BARNETT, 2019), no subsolo muito raso abaixo da interface sedimento-água.

Por fim, as lâminas fibrosas são constituídas por minerais de calcita coalescida, sendo cristais alongados irradiados que geram lâminas isópacas planas ou levemente onduladas (CASTRO, 2019). Esses carbonatos laminados são compostos por fragmentos de esferulitos e *shrubs* muito pequenos e agem, por vezes, como matriz em *packstones* mais comumente em texturas *wackstone* a *calcimudstone* (CASTRO, 2019).

Em trabalho recente, Lima & De Ros (2019) também pontuam a origem e as fases de transição dos principais componentes, propondo uma forma cíclica de geração dessas rochas. A primeira fase é composta por depósitos laminados de argilas magnesianas singenéticas que posteriormente são substituídas por esferulitos de calcita, simétricos na base e assimétricos próximo a interface sedimento-água. Posteriormente, com a ascensão dos esferulitos próximo a interface sedimento-água, há a precipitação da calcita criando estruturas fasciculares (*shrubs*) com porosidade de estrutura de crescimento inter-agregado. Por fim, na última fase é possível ver o sistema completo formado por uma crosta singenética de *shrubs* no topo, matriz de Mg-argila substituída por esferulitos de calcita no meio do sistema e a mesma matriz preservada na base, conforme a figura 3.

Figura 3: (A) Depósitos laminados de argilas magnesianas singenéticas, com pelóides de argila dispersa e grãos siliciclásticos; (B) Parcial substituição da matriz de Mg-argila por esferulitos de calcita; (C) *Shrubs* precipitados na interface sedimento-água; (D) Crosta singenética de calcitas fasciculares coalescidas no topo e matriz de Mg-argila substituída por esferulitos no meio e preservada na base.



Adaptado de Lima & De Ros, 2019

3 MATERIAS E MÉTODOS

Para este trabalho foram disponibilizadas 169 amostras de rochas carbonáticas de diferentes poços de dois reservatórios da Bacia de Santos, sendo 116 plugues e 53 lâminas delgadas. Com esse material, foram realizadas descrições microscópicas convencionais e, utilizando um software, medidas quantitativas de diâmetros de esferulitos e *shrubs*, e também espessuras de fraturas. Além disso, foram aferidos, no Centro de Estudos de Energia e Petróleo (CEPETRO), os valores de porosidade e permeabilidade através do porosímetro e permeâmetro Ultrapore-300 e UltraPerm 500, respectivamente.

A análise microscópica foi subdividida em duas partes, em que a primeira consistiu na descrição das lâminas, utilizando um microscópio petrográfico com aumento máximo de 40x e polarizadores, possibilitando a identificação dos minerais, texturas, granulação e porosidade, e também aspectos diagenéticos, representados pela cimentação, processos de dissolução e fraturas.

Após isso, na segunda parte dessa etapa, foram produzidas imagens (luz natural e luz polarizada) das lâminas a partir de um scanner de alta resolução (6400 x 9600 dpi). Essas imagens foram analisadas utilizando o software livre denominado InkScape, que possibilitou fazer medidas precisas dos diâmetros dos esferulitos e dos comprimentos dos *shrubs*. Para cada amostra, foram feitas 30 medidas dos eixos principais de esferulitos e *shrubs*, e das espessuras ao longo das fraturas.

Para as aferições petrofísicas, previamente as amostras laterais passaram por aferições de comprimento, diâmetro e massa. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao porosímetro e ao permeâmetro, ambos equipados com o gabinete de amostragem, bomba hidráulica de pressão, software WinPerm e termômetro.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DE FÁCIES

4.1.1 Esferulitos

Essa fácies é caracterizada por conter o predomínio de esferulitos em sua composição, mesmo com a presença, em menores proporções, de *shrubs* em algumas amostras. É possível verificar que parte das amostras apresentam núcleo dos esferulitos composto por quartzo microcristalino e dolomita microcristalina (figura 4A). Os esferulitos possuem diâmetro que varia de 0,25 a 6,92 mm, com média de $1,60 \pm 0,76$ mm (figura 5).

O tipo de porosidade predominante nessas amostras é do tipo interpartícula, variando em tamanho entre 1 a 5 mm, comumente preenchida por cristais de dolomita romboédrica, calcita, quartzo e, em alguns raros casos, por matriz de argila.

Figura 4: (A) Esferulito (SPH) com extinção radial rodeado de dolomitas romboédricas e com núcleo formado por dolomita e quartzo microcristalinos (seta vermelha) (luz polarizada); (B) Esferulito com extinção radial rodeado por dolomitas (DOL) romboédricas (luz polarizada).

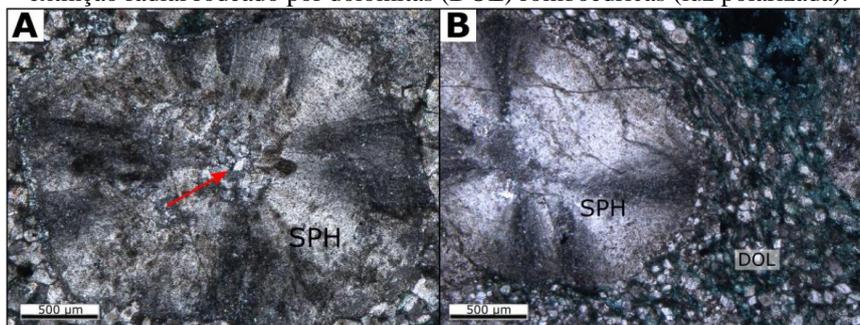
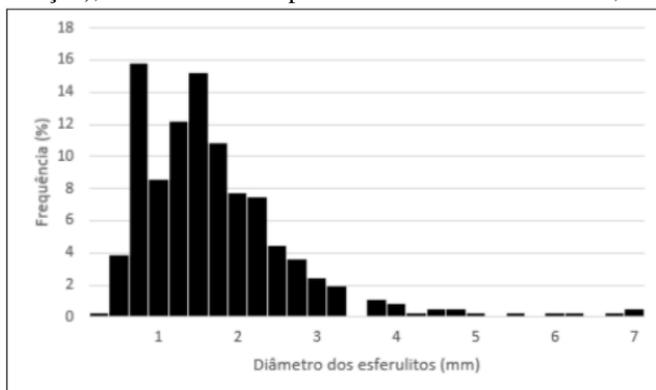
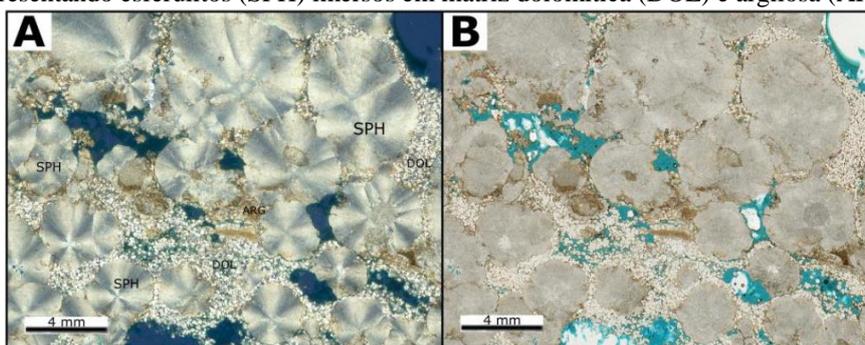


Figura 5: Distribuição dos diâmetros dos esferulitos (mm) com base em 360 medidas em 12 seções (30 medidas por seção), com as colunas apresentando um intervalo de 0,25 mm entre si.



Na maioria das amostras, como por exemplo na figura 6, nota-se esferulitos inseridos em matriz carbonática e/ou argilosa, sugerindo um ambiente sem correntes fortes, caso contrário, o material fino teria sido removido do ambiente de precipitação.

Figura 6: (A e B) Amostra em luz polarizada e luz normal respectivamente (imagens de scanner), apresentando esferulitos (SPH) imersos em matriz dolomítica (DOL) e argilosa (ARG).



De acordo com Lima & De Ros (2019) (figura 3), esferulitos com tamanhos maiores são aqueles mais próximos da interface sedimento-água e estão mais próximos da Fácies 1 (*shrubs in situ*), ao topo do sistema, em processo de transição para *shrubs* e, por isso são mais assimétricos. Já os esferulitos menores, que são mais simétricos e arredondados, estão mais próximos da Fácies 3 (laminitos), na base do sistema.

4.1.2 Shrub-like limestone

Essa fácies é caracterizada pela presença de *shrubs* (feição arbustiva (figura 7)) em sua maioria, porém, em alguns casos, pode ter a presença de esferulitos, em menores proporções. As formas arbustivas comumente são orientadas paralelamente umas às outras em seu eixo principal, apresentando estruturas alongadas e ligeiramente convexas.

Os *shrubs* apresentam tamanhos que variam de 0,71 a 12,9 mm, com uma média de 3,05 ± 1,44 mm (distribuição apresentada no gráfico da figura 8).

Figura 7: (A) *Shrubs* (SHR) apresentando sua estrutura ramificada, com a presença de dolomitas (DOL) e cimentação de calcedônia (CHAL) (luz polarizada). (B) *Shrubs* fraturados e porosidade da amostra preenchida, em ordem de cristalização, por *chert* (borda dos grãos), calcedônia e cristais de quartzo (QZ) (em direção ao centro do poro) (luz polarizada).

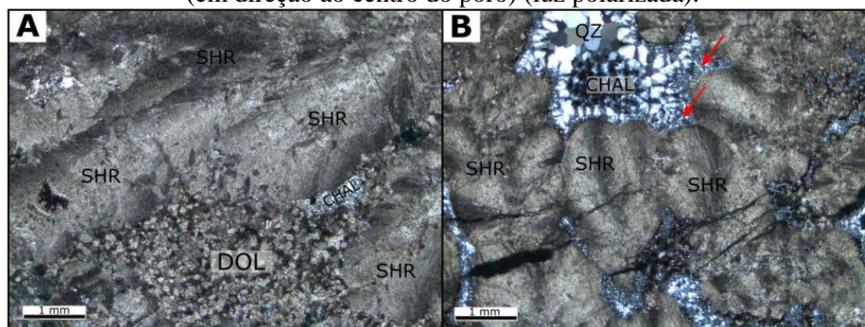
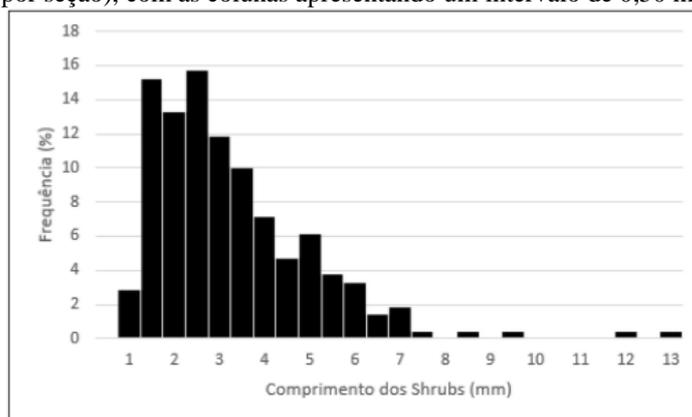
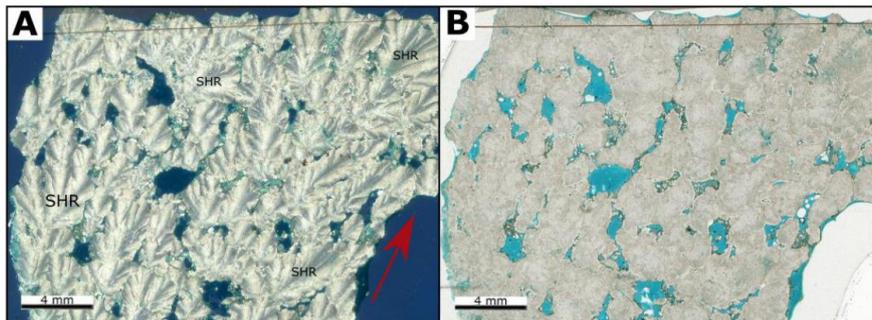


Figura 8: Distribuição dos comprimentos dos *shrubs* (mm) com base em 210 medidas em 7 seções (30 medidas por seção), com as colunas apresentando um intervalo de 0,50 mm entre si.



A medição dos comprimentos dos *shrubs* é realizada pelo fato de conterem a maior porosidade primária, localizada entre as estruturas de crescimento. Ao relacionar as amostras analisadas com os trabalhos de Wright & Barnett (2015), Saller *et al.* (2016), Ceraldi & Green (2017) e Lima & De Ros (2019), é possível constatar que o crescimento das estruturas *shrub* acompanha a zona fótica (aumento do nível do lago), ocorrendo na interface sedimento-água através do processo de agradiação.

Figura 9: (A e B) Amostra em luz polarizada e luz normal respectivamente (imagens de scanner), apresentando *shrubs* (SPH) orientados entre si, com sentido médio de orientação representado pela seta vermelha.

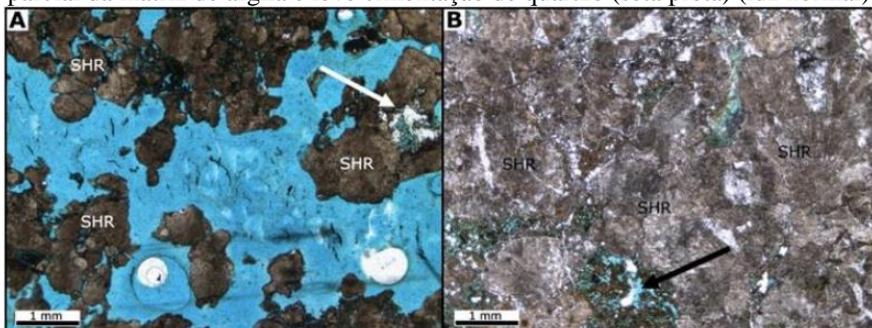


4.1.3 Grainstone Intraclástico

Essa fácies é basicamente composta por intraclastos de esferulitos e *shrubs* (figura 10), com dimensões de grãos que variam de 0,5 mm a 5 mm. Nesse caso, há alguns fragmentos relativamente preservados, porém a maioria deles são identificados pela extinção radial e estrutura ramificada remanescentes nos grãos retrabalhados. Há uma pequena porcentagem, inferior a 5%, de argila dispersa nas amostras, além de uma intensa recristalização entre os intraclastos, por dolomita/calcita e quartzo (*chert* em alguns casos), que dificultam a identificação dos limites dos grãos.

A porosidade é do tipo vugular variando de 0,5 a 6 mm. Em algumas amostras, os esferulitos e os *shrubs* encontram-se intercalados com camadas milimétricas de cristais de dolomita romboédrica e grãos de quartzo, formando uma textura de “ponte” pela relação das dolomitas conectadas.

Figura 10: (A) Intraclastos de *shrubs* retrabalhados e fraturados com leve cimentação de quartzo (seta branca) na amostra (luz normal). Em azul, o espaço poroso. (B) Porosidade formada por dissolução parcial da matriz de argila e leve cimentação de quartzo (seta preta) (luz normal).

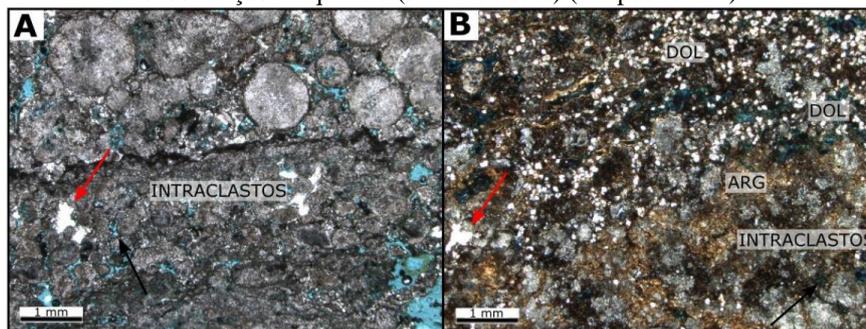


4.1.4 Packstone Intraclástico

Igualmente ao Grainstone Intraclástico, a fácies Packstone Intraclástico também possui grãos retrabalhados de esferulitos e *shrubs*, porém o diferencial ocorre pela

quantidade de matriz de argila, visto que nessa fácies essa quantidade é superior a 15% (figura 11). Os intraclastos observados não possuem uma boa seleção, variando de 0,5 mm a 5 mm, com uma média que varia de 1 a 2 mm de diâmetro. Comumente nessas rochas, é notável a presença de recristalização de dolomita romboédrica.

Figura 11: (A) Intraclastos parcialmente dissolvidos (seta preta) e substituídos por quartzo (seta vermelha) (luz normal). (B) Intraclastos inseridos em uma matriz argilosa (ARG) e dolomitas (DOL) romboédricas ao redor dos intraclastos, nota-se também o processo de dissolução de intraclastos (seta preta) e substituição de quartzo (seta vermelha) (luz polarizada).

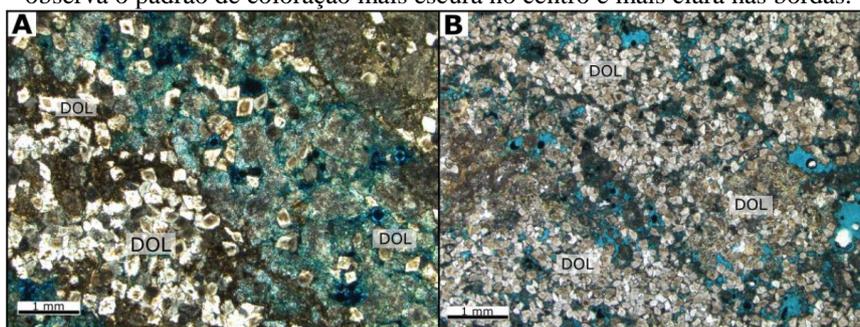


4.1.5 Dolostone

A fácies Dolostone é composta por uma grande intensidade de grãos de dolomitas (>50%) associados a grãos de esferulitos e *shrubs* modificados pelo processo de dolomitização, modificando sua estrutura. Há a presença nessas amostras de cristais dispersos de quartzo e calcedônia. Os cristais de dolomitas romboédricas possuem tamanho inferior ou igual a 0,5 mm e apresentam-se em torno dos grãos maiores, que podem ser interpretados como *shrubs* ou esferulitos primitivos, que tiveram suas estruturas originais extintas.

As dolomitas tendem a substituir a matriz de argila (figura 12A), mas podem ocorrer também substituindo grãos calcínicos. Esses cristais aqui são planares e, em alguns casos, possuem o centro “turvo” e bordas claras (figura 12), indicando que podem ter sido originados em ambientes com baixa concentração de magnésio e, ao serem expostos a condições diferentes, ocorre uma dissolução magnesiana no centro dos cristais gerando microcavidades.

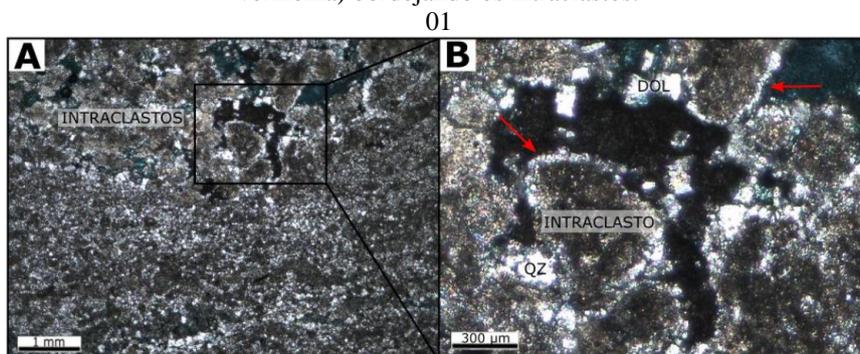
Figura 12: Amostras compostas basicamente por dolomitas (DOL) romboédricas, em que na maioria se observa o padrão de coloração mais escura no centro e mais clara nas bordas.



4.1.6 Mudstone/Siltstone

Por fim, temos que esta fácies é composta basicamente por grãos finos (figura 13), possuindo laminações onduladas de cerca de 1 mm de espessura. É uma amostra que, em sua parte superior fina, a argila modifica-se gradualmente para intraclasto carbonático com cerca de 1 mm. Sua porosidade é interpartícula, e mais acentuada na região dos intraclastos.

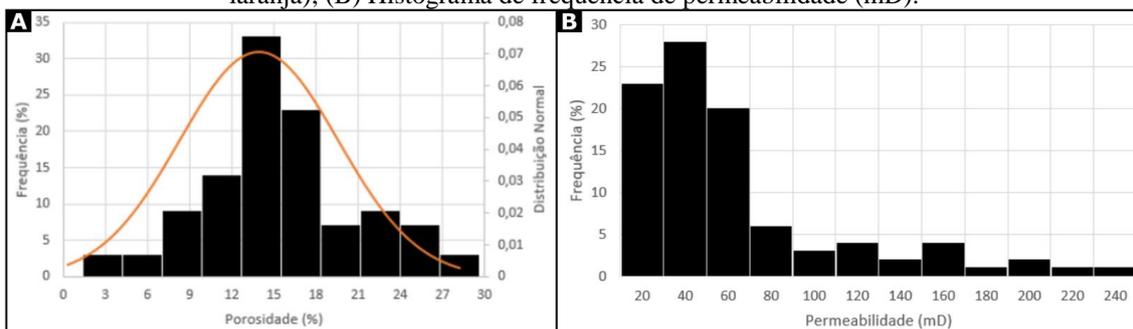
Figura 13: (A) amostra em luz polarizada; (B) Detalhe da amostra, também em luz polarizada, indicando uma matriz muito fina, com alguns cristais de dolomita (DOL) e quartzo (QZ), além de calcedônia (seta vermelha) bordejando os intraclastos.



4.2 ANÁLISES PETROFÍSICAS

As medições de porosidade apontaram valores que variam de 0,1 % a 28,2 %, com média de $13,77 \pm 5,78$ %. No caso da permeabilidade, os valores obtidos variam de 0,01 a 3.260 mD, com média de $172,63 \pm 474,90$ mD. Os histogramas de frequência das medidas de porosidade e permeabilidade estão expostos na figura 14. O valor de corte máximo utilizado no histograma de permeabilidade foi de 240 mD, visto que acima desse valor encontram-se apenas 4 amostras, que foram desconsideradas a fim de se obter um gráfico mais representativo dos valores de permeabilidade. Quando considerados, não há distribuição normal dos valores, e portanto, a curva de distribuição normal não foi traçada.

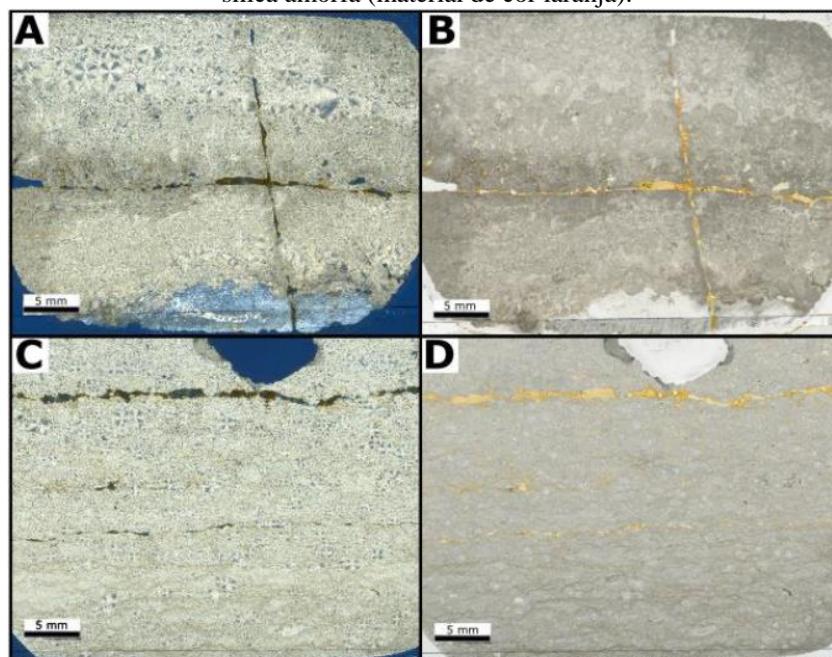
Figura 14: (A) Histograma de frequência de porosidade (%), com curva de distribuição normal (em laranja); (B) Histograma de frequência de permeabilidade (mD).



4.3 FRATURAS

Dentre as lâminas analisadas, 12 delas apresentaram algum tipo de fratura. As fraturas apresentam-se abertas em algumas amostras e, em outras, preenchidas por sílica amorfa, ou ambas as representações em uma mesma amostra. Em três havia a presença de 2 fraturas, ora paralelas entre si (figura 15C e D), ora oblíquas (figura 15A e B). Nesses casos, foram calculadas as espessuras das 2 fraturas, com 30 medidas em cada uma delas, totalizando assim 60 medidas nessas lâminas.

Figura 15: (A e B) Amostra em luz polarizada e luz normal respectivamente, apresentando duas fraturas oblíquas entre si; (C e D) Amostra em luz polarizada e luz normal respectivamente, apresentando duas fraturas paralelas entre si. Nos dois casos as fraturas estão praticamente preenchidas por completo por sílica amorfa (material de cor laranja).

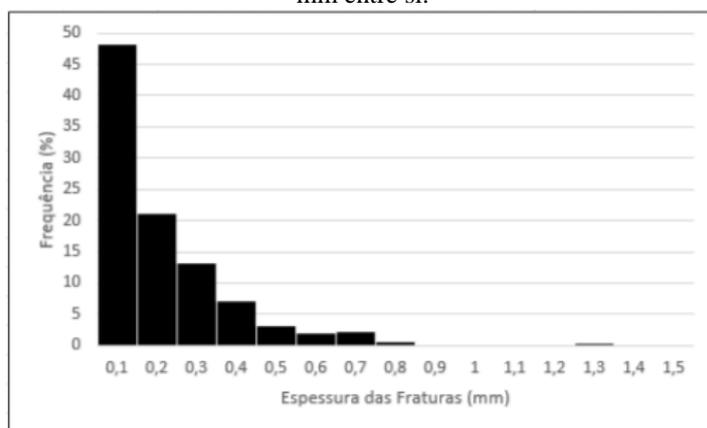


A espessuras variam de 0,01 a 1,47 mm e possuem média de $0,16 \pm 0,07$ mm (gráfico de distribuição na figura 16). Há ainda algumas microfaturas que ocorrem dentro

de grãos de esferulitos e *shrubs*, e outras entre cristais como resultado da dissolução, causada provavelmente pelo processo de fraturamento posterior.

O fraturamento em rochas carbonáticas pode afetar os valores de porosidade e permeabilidade, favorecendo a migração de fluidos entre os espaços porosos secundários. Porém, em algumas amostras com fraturamento aberto, não há necessariamente um aumento da permeabilidade, assim como não há um padrão de diminuição em todos os casos com fraturas fechadas. Dessa forma, na análise dos valores de permeabilidade, deve-se levar em consideração outros fatores que afetam esse parâmetro, como a forma e o tamanho do sistema poroso, processos de dissolução e classificação da rocha.

Figura 16: Distribuição das espessuras das fraturas(mm) com base em 450 medidas em 12 lâminas (9 lâminas com 30 medidas e 3 lâminas com 60 medidas), com as colunas apresentando um intervalo de 0,10 mm entre si.



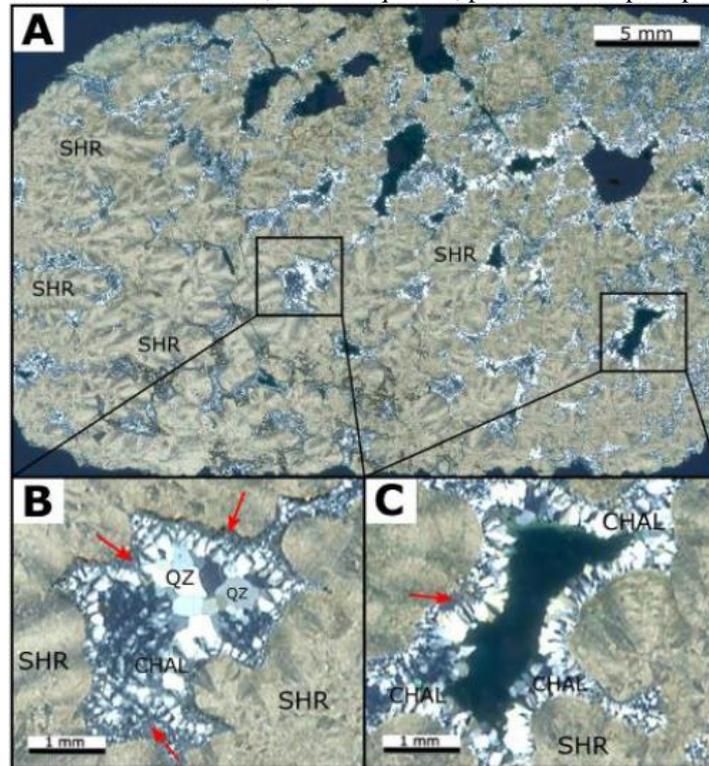
4.4 CIMENTAÇÃO

A cimentação nas amostras ocorre por dois tipos principais de minerais, sílica e carbonática. No primeiro caso, a cimentação de sílica ocorre em três tipos: *chert*, calcedônia, cristais de quartzo, nessa ordem na direção grão-poro. O *chert* ocorre primeiro de maneira precoce obliterando a porosidade original, visto que se cristalizam nas bordas dos grãos, seguido da calcedônia, uma sílica fibrosa, e por fim, entre a calcedônia e o espaço poroso, há a cristalização de quartzo, com cristais grandes atingindo 1 mm de diâmetro. Em alguns casos, esse tipo de substituição é intensa, ocupando quase 70 % da amostra.

Na amostra apresentada na figura 17, nota-se o padrão de cimentação sílica. Na figura 17B, temos a presença do ciclo completo de cimentação, com *chert*, calcedônia e quartzo preenchendo o poro. Já na Figura 17C, referente a mesma lâmina, temos também

a cimentação sílica, porém nesse caso não há a cristalização de quartzo, e então o poro permanece aberto, favorecendo o processo de percolação e transmissão de fluidos.

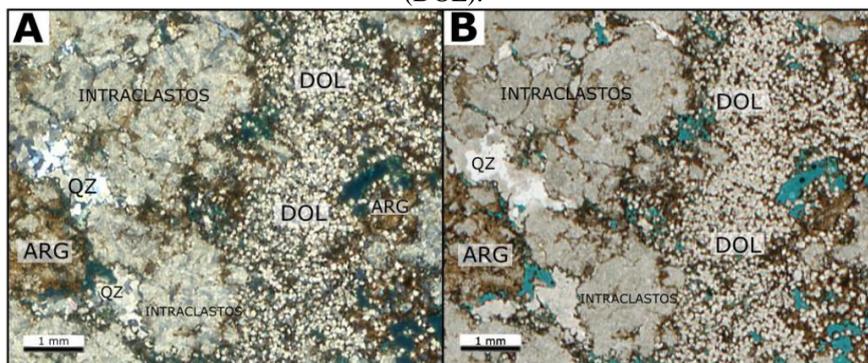
Figura 17: (A) Amostra m luz polarizada (imagem de scanner); (B) Detalhe de uma porção da amostra, onde há a tripla cimentação de sílica: *chert* (setas vermelhas), seguido de calcedônia (CHAL) e por fim, cristais de quartzo (QZ) preenchendo o poro; (C) Detalhe de uma porção da amostra, onde há a cimentação apenas de *chert* e calcedônia, e não de quartzo, preservando o poro parcialmente aberto.



Por fim, a cimentação carbonática (figura 18) ocorre com a formação de minerais como a calcita e dolomita microcristalina, que substituíram os minerais argilosos (LIMA & DE ROS, 2019). A calcita pode ser substituída por dolomita, na qual a primeira pode ter sido formada dentro do ambiente de deposição ou durante a diagênese muito precoce e, a última, precipitada por meio de um precursor metaestável (GOMES *et al.*, 2020). A substituição ocorre por pequenos cristais euédricos (inferiores a 0,1 mm) de dolomitas romboédricas, substituindo os grãos carbonáticos e a matriz de argila, e, em alguns casos, preenchendo parcialmente o espaço poroso das amostras ocasionando um arcabouço correspondendo à grãos “flutuantes”.

Em algumas amostras a dolomitização é intensa, caracterizando-as na fácies Dolostone, em que predomina a presença de cristais planares de dolomita.

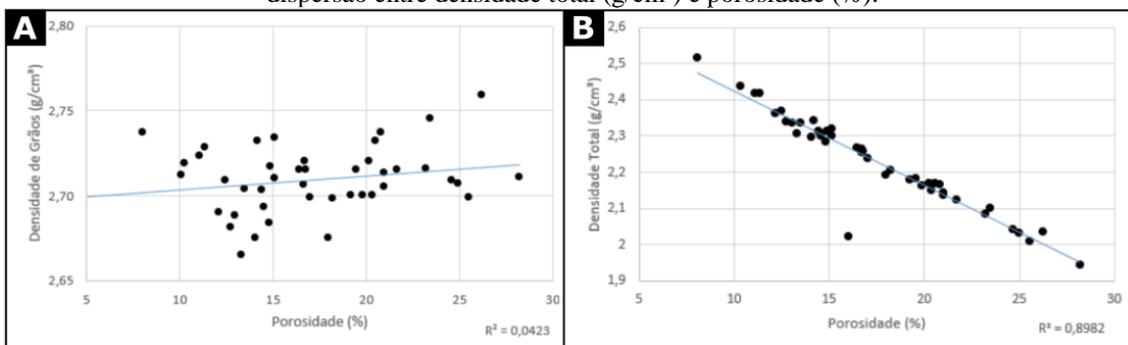
Figura 18: (A e B) Amostra em luz polarizada e luz normal respectivamente (imagens de scanner), intraclastos imersos em matriz argilosa (ARG), silicática de quartzo (QZ) e carbonática de dolomita (DOL).



4.5 CORRELAÇÕES PETROFÍSICAS

A partir das aferições de porosidade, permeabilidade, densidade de grãos e as medidas de comprimento, diâmetro e massa dos plugues, foram estabelecidas 3 correlações: 1) porosidade e densidade de grãos; 2) porosidade e densidade total; 3) e porosidade e permeabilidade. As duas primeiras correlações estão expostas nos gráficos de dispersão da figura 19.

Figura 19: (A) Gráfico de dispersão entre densidade de grãos (g/cm^3) e porosidade (%); (B) Gráfico de dispersão entre densidade total (g/cm^3) e porosidade (%).

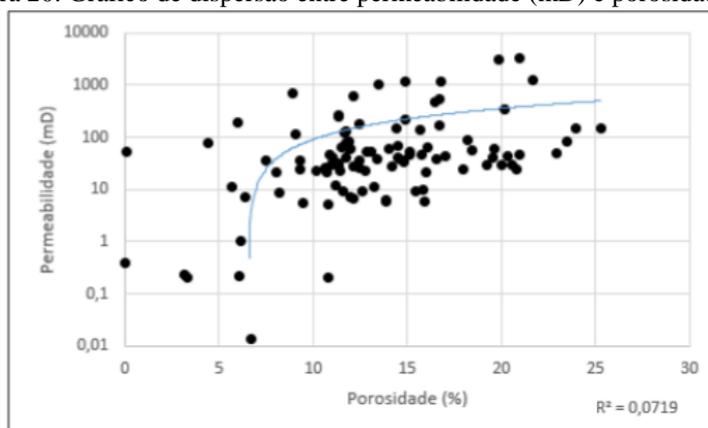


Analisando a correlação entre densidade de grãos e porosidade (figura 19A), tem-se que muitas amostras apresentam um valor de densidade de grãos menor do que o esperado ($2,70 \text{ g}/\text{cm}^3$ para calcários e $2,84 \text{ g}/\text{cm}^3$ para dolomitos), devido a presença de porosidade, além de minerais de quartzo e argila (ALMEIDA *et al.*, 2016). Outro fator relevante que interfere nesse valor é a presença de matéria orgânica nas amostras, que apresenta baixa densidade. Por outro lado, as amostras com os maiores valores de densidade de grãos correspondem justamente a fácies Dolostone, pois a dolomita apresenta densidade de $2,75 \text{ g}/\text{cm}^3$.

A segunda correlação, porosidade e densidade total (figura 19B), apresenta correlação elevada negativa, ou seja, com o aumento da porosidade há a diminuição da densidade total, o que é justificado pelo fato de que o aumento de espaços porosos faz com que aumente a presença de ar nas amostras, que no caso possui densidade menor do que os minerais constituintes das rochas.

Por fim, tem-se a terceira correlação, entre permeabilidade e porosidade, ilustrada na figura 20.

Figura 20: Gráfico de dispersão entre permeabilidade (mD) e porosidade (%)



Nota-se que esta correlação é positiva e fraca, em que os pontos apresentam um elevado grau de dispersão. De forma geral, temos que o aumento da permeabilidade não está diretamente ligado ao aumento da porosidade. O considerável grau de dispersão, pode estar relacionado com a complexidade do sistema poroso das rochas carbonáticas (altamente heterogêneas), ou seja, com a conectividade escassa dos poros, dificultando o estabelecimento de uma correlação clara entre a porosidade e a permeabilidade das amostras.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a caracterização de 116 plugues e 53 lâminas delgadas de rochas carbonáticas do pré-sal brasileiro, analisando parâmetros descritivos e petrofísicos, a fim de avaliar a potencialidade de reservatório dessas amostras, além de classificá-las em fácies cujo seus principais elementos formadores são matriz (argilosa, sílica e/ou carbonática), esferulitos e *shrubs*, em diferentes graus de retrabalhamento e cristalização mineral. A cimentação presente nas amostras foi definida como sendo de dois tipos, cimentação de sílica e carbonática.

Os esferulitos apresentam diâmetro médio de $1,60 \pm 1,04$ mm, com valores que variam de 0,25 e 6,92 mm. Os *shrubs* apresentam comprimento médio de $2,90 \pm 1,34$ mm, com o menor *shrub* com 0,71 mm e o maior com 12,9 mm de comprimento. Alguns fraturamentos nas amostras foram notados em 12 seções, em que a análise estatística apontou uma média de espessura das fraturas de $0,17 \pm 0,09$ mm, com valor mínimo e máximo de 0,01 e 1,47 mm, respectivamente.

As aferições petrofísicas apontaram valores de porosidade que variam de 0,1 a 28,2%, com média de $13,77 \pm 5,78$ %, e de permeabilidade variando entre 0,01 a 3260 mD, com média de $172,63 \pm 474,90$ mD.

De forma geral, os valores de porosidade estão entre 10 e 15% e os valores de permeabilidade são muito dispersos e pouco correlacionados com os respectivos valores de porosidade, sugerindo a complexidade no sistema poroso.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R. B.; SOARES, J. A.; TABOSA, L. D. G. 2016. **Propriedades petrofísicas de padrões internacionais de rochas sedimentares**. Universidade Federal de Campina Grande. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 6p.
- CASTRO, T. M. 2019. **Avaliação dos reservatórios carbonáticos do pré-sal no Campo de Búzios, Bacia de Santos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 182pp.
- CERALDI, S. & GREEN, D. 2017. **Evolution of the South Atlantic lacustrine deposits in response to Early Cretaceous rifting, subsidence and lake hydrology**. Petroleum Geoscience of the West Africa Margin. Geological Society, London, vol. 438, Special Publications, pp. 77-98.
- DUNHAM, R. J. 1962. **Classification of carbonate rocks according to depositional texture**. W.E. HAM (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, vol. 1, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, Tulsa (1962), 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) (1971), pp. 730-781.
- FOLK, R. L. 1959. **Practical petrographic classification of limestones**. Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 43 (1) (1959), pp. 1-38.
- FOLK, R. L. 1962. **Spectral subdivision of limestones types**. W.E. HAM (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, vol. 1, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, Tulsa (1962), pp. 62-85.
- GOMES, J. P., BUNEVICH, R. B., TEDESCHI, L. R., TUCKER, M. E., WHITAKER, F. F. 2020. **Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt**. Marine and Petroleum Geology, v. 113, 21p.
- 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., v. 383, pp. 55-81.
- MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. 2007. **Bacia de Santos**. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, n. 2, p. 531-549.
- PAPATERRA, G. E. Z. 2010. **Pré-Sal: conceituação geológica sobre uma nova fronteira exploratória no Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências. Rio de Janeiro, 81p.
- PETERSOHN, E. 2013. **Bacia de Santos: Sumário Geológico e área em oferta**. ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Seminário Técnico, 34p.
- RIDING, R. 2000. **Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms**. Sedimentology, 47 (2000), pp. 179-214.

SALLER, A., RUSHTON, S., BUAMBUA, L., INMAN, K., MCNEIL, R., DICKSON, J. A. D. 2016. **Pre-Salt stratigraphy and depositional systems in the Kwanza Basin, offshore Angola.** AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull., 100, pp. 1135-1164.

WRIGHT, V. P. 1992. **A revised classification of limestones.** Sediment. Geol., 76 (1992), pp. 177-185.

WRIGHT, V. P. & BARNETT, A. J. 2015. **Na abiotic model for the development of textures in some South Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates.** Geological Society, London, Special Publications, v. 418, pp. 209 – 219.

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.

WRIGHT, V. P. & BARNETT, A. J. 2019. **The Textural Evolution and Ghost Matrices of the Cretaceous Barra Velha Formation Carbonates from the Santos Basin, offshore Brazil.** Facies, v. 66, n°. 7.