

Classificação textural de rochas carbonáticas do pré-sal da Bacia de Santos e análise do sistema permoporoso: uma abordagem baseada na interpretação de imagens de tomografia computadorizada de raios X

Textural classification of pre-salt carbonate rocks from the Santos Basin and analysis of the permoporous system: an approach based on the interpretation of X-ray computed tomography images

Ana Carolina Carius Lisboa Barboza¹ , Luiz Landau¹ 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação de Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Engenharia Civil, Parque de Tecnologia do Rio de Janeiro, Rua Sydney Martins Gomes dos Santos, 179, Cidade Universitária, CEP 21941-859, Rio de Janeiro, RJ, BR (carolcarius@gmail.com; landau@lamce.coppe.ufrj.br)

Recebido em 23 de janeiro de 2023; aceito em 4 de dezembro de 2023.

Resumo

Os carbonatos lacustres do pré-sal continuam em evidência por serem rochas de elevada complexidade e responsáveis pelo grande potencial econômico da Bacia de Santos. Visando contribuir para os estudos nessa temática, o objetivo desta pesquisa consistiu em definir as principais texturas das rochas carbonáticas em imagens de tomografia computadorizada (TC) de raios X. Para a realização desta pesquisa, foram utilizados testemunhos de sondagem provenientes de dois poços, e a metodologia adotada compreende a descrição geológica em detalhe, a caracterização do sistema permoporoso, a definição das principais texturas em imagens de TC e a análise da relação das texturas com seus sistemas permoporosos. A descrição das principais propriedades permitiu a definição de seis litofácies e, por meio da análise das imagens de TC, a identificação de um padrão de repetição de alguns atributos texturais em determinadas litofácies. Assim, chegou-se a uma proposta representativa com quatro classes texturais: laminada, arbustiforme, fragmentada clastiforme e recristalizada. Foi observada uma relação direta de determinadas texturas com os avanços dos processos diagenéticos, assim como nos sistemas permoporosos. Por fim, a classificação textural das imagens de TC aplicada às rochas carbonáticas lacustres do pré-sal brasileiro proposta nesta pesquisa apresenta eficácia para a segmentação padrão realizada por técnicos especialistas, possibilitando identificar de maneira rápida os intervalos de interesse do reservatório. Para futuros trabalhos, recomenda-se a aplicação dessa classificação como base de entrada para treinamento de algoritmos com técnicas de *machine learning*.

Palavras-chave: Carbonato lacustre; Formação Barra Velha; Litofácies; Esferulitos; *Shrubs*; Processos diagenéticos.

Abstract

Pre-salt lacustrine carbonates remain in evidence for being rocks of high complexity and responsible for the great economic potential of the Santos Basin. Aiming to contribute to studies in this field, the objective of this research was to define the key textures of the carbonate rocks in X-ray computed tomography (CT) images. For the execution of this study, core samples from two wells were used, and the adopted methodology comprises detailed geological description, characterization of the permoporous system, definition of the main textures in CT images, and analysis of the relationship between textures and their permoporous systems. The description of the main properties enabled the definition of six lithofacies and, through the analysis of CT images, a recurring pattern of certain textural attributes in specific lithofacies was identified. Thus, a representative proposal with four textural classes was established: *laminated*, *shrubby*, *clastiform fragmented*, and *recrystallized*. A direct relationship was observed between certain textures and the progression of diagenetic processes, as well as their corresponding permoporous systems. Finally, the proposed textural classification of CT images applied to Brazilian pre-salt lacustrine carbonate rocks demonstrates effectiveness in standard segmentation performed by expert technicians, enabling rapid identification of reservoir intervals of interest. For future work, it is recommended to employ this classification as an input base for training algorithms using machine learning techniques.

Keywords: Lacustrine carbonate; Barra Velha Formation; Lithofacies; Spherulites; *Shrubs*; Diagenetic processes.

INTRODUÇÃO

A Bacia de Santos está inserida na costa Leste do Brasil e corresponde a uma das principais bacias sedimentares produtoras de petróleo e gás natural do território brasileiro, em razão dos reservatórios do pré-sal. Esses reservatórios são constituídos predominantemente de carbonatos que correspondem às rochas mais difíceis de serem compreendidas, em razão da elevada heterogeneidade associada às intensas ocorrências de alterações diagenéticas, da localização em águas profundas e por não apresentar rochas emersas completamente análogas a esses depósitos. Isso dificulta o entendimento da comunidade científica, uma vez que o acesso a essas rochas se encontra restrito às empresas e, geralmente, com conteúdo sigiloso.

As rochas carbonáticas constituem um grande desafio no que se refere ao seu reconhecimento, à sua interpretação geológica e ao seu papel exercido em sistemas petrolíferos, devido às suas características geológicas, petrográficas e da elevada variabilidade composicional e estrutural.

Segundo Wright e Barnett (2015), as rochas carbonáticas do pré-sal da Bacia de Santos são de origem lacustre, porém há controvérsia entre diversos autores sobre o processo de formação dos elementos deposicionais e diagenéticos dessas rochas. A princípio, esses reservatórios carbonáticos foram reportados como sendo de origem microbiana (conhecido também como microbialitos, ou seja, de origem biótica formada pela influência de micro-organismos) (Moreira et al., 2007; Rezende e Pope, 2015); entretanto, Wright e Barnett (2015) afirmam que o desenvolvimento dos carbonatos lacustres por meio microbiano é equivocado em razão da ausência de feições microbianas tanto em escala macro quanto microscópica, defendendo o desenvolvimento através de meios abióticos. Com o avanço das pesquisas, Souza (2016) passou a defender a formação híbrida desses carbonatos lacustres, por meios abiótico e biótico, sendo que um não exclui a presença do outro.

A tomografia computadorizada (TC) de raios X tem sido frequentemente aplicada às rochas e tem ganhado espaço nas empresas do setor petrolífero, uma vez que possibilita acessar a rocha de forma rápida por meio do escaneamento dos testemunhos e por obter importantes informações principalmente do sistema permoporoso de forma não destrutível por meio de *softwares* específicos. Essa técnica ainda permite a geração de modelos digitais de rocha que podem ser utilizados em muitas simulações numéricas multifísicas, além de preservar as características arquiteturais da rocha, contornando a natural e inevitável degradação das amostras físicas de rocha ao longo do tempo.

Baseado na importância econômica dos depósitos do pré-sal brasileiro, o objetivo desta pesquisa foi elaborar uma proposta de classificação textural de imagens de TC aplicadas às rochas carbonáticas de origem lacustre com base na

caracterização geológica em detalhe e no sistema permoporoso com a finalidade de identificar as texturas que melhor representam as fácies tidas como reservatório.

Este artigo apresenta uma nova metodologia de classificação e identificação de níveis de interesse a partir de imagens de TC que pode ser utilizada na forma tradicional a partir da segmentação padrão realizada por um técnico especialista, além de contribuir para futuras aplicações de técnicas de *machine learning* com o intuito de automatizar essa classificação, adicionando agilidade no fluxo de trabalho e nas decisões de negócio.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo encontra-se inserida na Bacia de Santos, localizada na margem divergente do Atlântico Sul. A Bacia de Santos abrange uma área de aproximadamente 350.000 km² até a cota batimétrica de 3.000 m, que vai desde o Alto de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro, até a Plataforma de Florianópolis, em Santa Catarina, sendo limitada a norte pela Bacia de Campos e a sul pela Bacia de Pelotas (Pereira e Macedo, 1990; Moreira et al., 2007; Mohriak, 2012).

A formação da Bacia de Santos está associada à ruptura do Supercontinente Gondwana por meio de processos extensionais que promoveram a separação dos continentes sul-americano e africano, ocasionando a abertura do oceano Atlântico Sul (Macedo, 1991; Chang et al., 2008; Riccomini et al., 2012). Conforme Moreira et al. (2007), a evolução tectono-estratigráfica da Bacia de Santos é dividida em embasamento da Faixa Ribeira e três supersequências: *rifte*, *pós-rifte* (transicional) e *drifte* (margem passiva).

A unidade geológica de interesse para este estudo corresponde à Formação Barra Velha por ser um dos principais reservatórios do pré-sal da Bacia de Santos contendo hidrocarbonetos. Segundo Moreira et al. (2007), a Formação Barra Velha é dividida em sequências inferior e superior com base na inconformidade denominada Intra-Alagoas por Wright e Barnett (2015), que marca o início da fase Sag (Lupinacci et al., 2023).

A Formação Barra Velha foi depositada em ambiente lacustre e estressante com elevada salinidade e alcalinidade (Wright e Barnett, 2015; Pedrinha et al., 2018; Lima e De Ros, 2019), no qual a variação do nível do lago está associada ao influxo de água subterrânea e à consequente alteração dos valores de pH, afetando a geração de fácies (Gomes et al., 2020).

Wright e Barnett (2015) reconheceram uma distribuição cíclica dos carbonatos lacustres da Formação Barra Velha, definida por três ciclotemas: laminados constituídos de argila magnesianas singenética (na base); depósitos magnesianos singenéticos substituídos e deslocados por esferulitos de calcita fibrorradial (no meio); e *shrubs* de calcita fascicular

(no topo). Pedrinha et al. (2018) reconheceram sete fácies divididas em carbonatos *in situ*, carbonatos retrabalhados e carbonatos com feições de dissolução. Gomes et al. (2020) afirmam que a Formação Barra Velha é constituída de três principais componentes (esferulitos, *shrubs* e lama — micrita e argilas magnesianas) e propuseram uma classificação de fácies com base na proporção desses elementos, reconhecendo fácies *in situ*, retrabalhadas e argilosas. Pietzsch et al. (2020) identificaram sete fácies na Formação Barra Velha (esferulitos calcítico com matriz dolomitizada, crostas de calcita fascicular dolomitizada, *grainstones* com intraclastos, *boundstone* microbial, laminitos dolomitizados, dolomito e *chert*) e sugerem um sistema deposicional lacustre hidrologicamente fechado.

METODOLOGIA E DADOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dados de dois poços localizados em um dos campos petrolíferos da Bacia de Santos, sendo o Poço 1 com um testemunho, totalizando 12 m disponíveis para descrição litológica, além de suas respectivas imagens de perfis tomográficos, e o Poço 2 com cinco testemunhos, totalizando 66,94 m dispostos em fotografias, além das imagens de perfis tomográficos dos testemunhos e 195 lâminas delgadas dispostas em fotomicrografias e dados laboratoriais de porosidade e permeabilidade. Por razões de confidencialidade, não será revelado o nome do poço e nem do campo de exploração.

A metodologia adotada nesta pesquisa foi dividida em quatro estágios:

- I. Caracterização geológica detalhada: a definição das principais litofácies foi baseada na análise em escalas macroscópica, a partir do reconhecimento da litologia (elaboração de perfis litológicos), e microscópica, a partir das descrições de fotomicrografias de lâminas delgadas com base na petrografia;
- II. Caracterização permoporosa: obtida por meio da análise de fotomicrografias de lâminas delgadas levando em consideração os tipos de poros, a estimativa visual da porosidade, a conectividade entre poros e a presença de cimento, além da análise de dados laboratoriais de permoporosimetria a gás de porosidade e permeabilidade. Vale destacar que os dados laboratoriais de porosidade e permeabilidade foram cedidos para esta pesquisa e que nenhuma amostra foi descartada;
- III. Definição das principais texturas de imagens de TC: com base nas imagens de perfis tomográficos dos testemunhos, levando em consideração as litofácies. A Figura 1 exibe o desenho esquemático da aquisição de imagem de TC;
- IV. Relação textura – fácies deposicionais – características permoporosas: para uma análise integrada entre

litofácies, textura de imagem de TC e o sistema permoporoso (porosidade, tipos de poro, conectividade entre poros e permeabilidade), todas as informações relevantes foram compiladas em planilha excel, o que possibilitou a elaboração de gráficos.

O fluxo de trabalho está exposto na Figura 2.

RESULTADOS

Caracterização geológica

A partir das litologias identificadas nos Poços 1 e 2 e em suas principais características macroscópicas e microscópicas, chegaram-se aos principais atributos diagnósticos que possibilitaram reconhecer seis litofácies (Tabela 1) denominadas laminito (LL), carbonato arbustiforme (LA), esferulítico (LE), arbustiforme-esferulítico (LAE), carbonato brechado (LB) e dolomito (LD).

A litofácies *laminito* (LL), de origem autóctone, é caracterizada por um conjunto de laminações milimétricas formadas por crostas de micrita e/ou agregados de argila magnesiana, com espessuras que variam de 1 a 5 mm, normalmente contínuas com morfologia crenulada a plano-paralela e cor marrom-claro (carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 6/3) alternado com marrom-escuro (carta de cor de Munsell: Bruno-escuro, matriz 7,5YR, 3/4). Em escala microscópica, é possível observar crostas de micrita, peloides e matriz argilosa intercaladas a laminações constituídas de esferulitos ou de crostas de calcita fascicular óptica. Geralmente a porosidade observada é do tipo fenestral com estimativa visual que varia de nula a 17%, e os principais processos diagenéticos identificados correspondem a dissolução e substituição de micrita por dolomita e sílica e de argilominerais por dolomita e sílica microcristalinas.

A litofácies carbonato *arbustiforme* (LA), de origem autóctone, é marcada pelos depósitos de *shrubs* (ou *arbustos*) caracterizados principalmente por apresentar elementos com morfologia similar a arbustos ou ramos de couve-flor e coloração marrom-claro (carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 6/3) a marrom (carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 4/4). O crescimento dos arbustos é ascendente e nos poços analisados foram registrados arbustos com tamanhos diversos que variam desde inferior a 1 cm até 17 cm, sendo comum observar acamamento paralelo de crescimento provocado pelo desenvolvimento dos arbustos que proporciona a ideia de laminações (quando milimétricas) ou camadas plano-paralelas (quando centimétricas). No geral, a estratificação varia de planar a ondulada, contínua a descontínua e o topo crenulado. Em escala microscópica, a LA apresenta poros dos

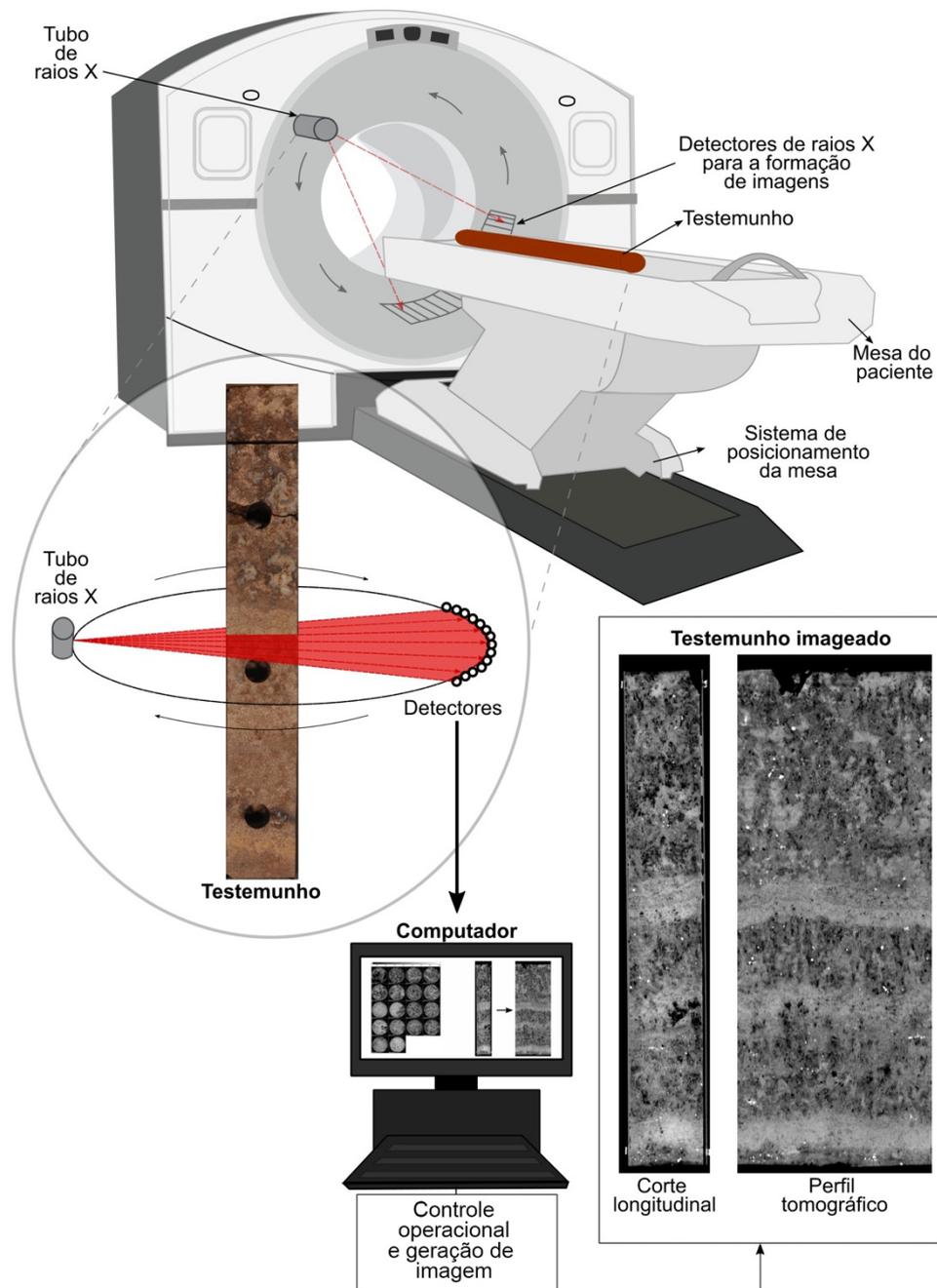


Figura 1. Desenho esquemático da aquisição de imagem de testemunho por meio da tomografia computadorizada de raios X.

tipos de crescimento (*growth framework*), interelemento, intraelemento, móldico, vugular e de fraturas, em menor proporção, com estimativa visual de porosidade variando entre 5 e 18%, em que os menores valores estão associados à maior presença de cimento, e os maiores valores, à intensa dissolução. As principais alterações diagenéticas identificadas na LA são dissolução, substituição (de elementos por quartzo, dolomita e calcedônia) e recristalização (de elemento geralmente por calcita microcristalina).

De origem autóctone, a litofácies *esferulítico* (LE) é marcada pela presença de esferulitos, que correspondem a grãos esféricos e/ou ovais com granulometria que varia de tamanho areia muito fina (0,062 mm) a muito grossa (2 mm). A LE pode apresentar textura esferulítica ou granular, estrutura laminada ou não conter estrutura aparente (mais raro), além de coloração marrom-claro (carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 6/3) a marrom (carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 4/4). Em escala

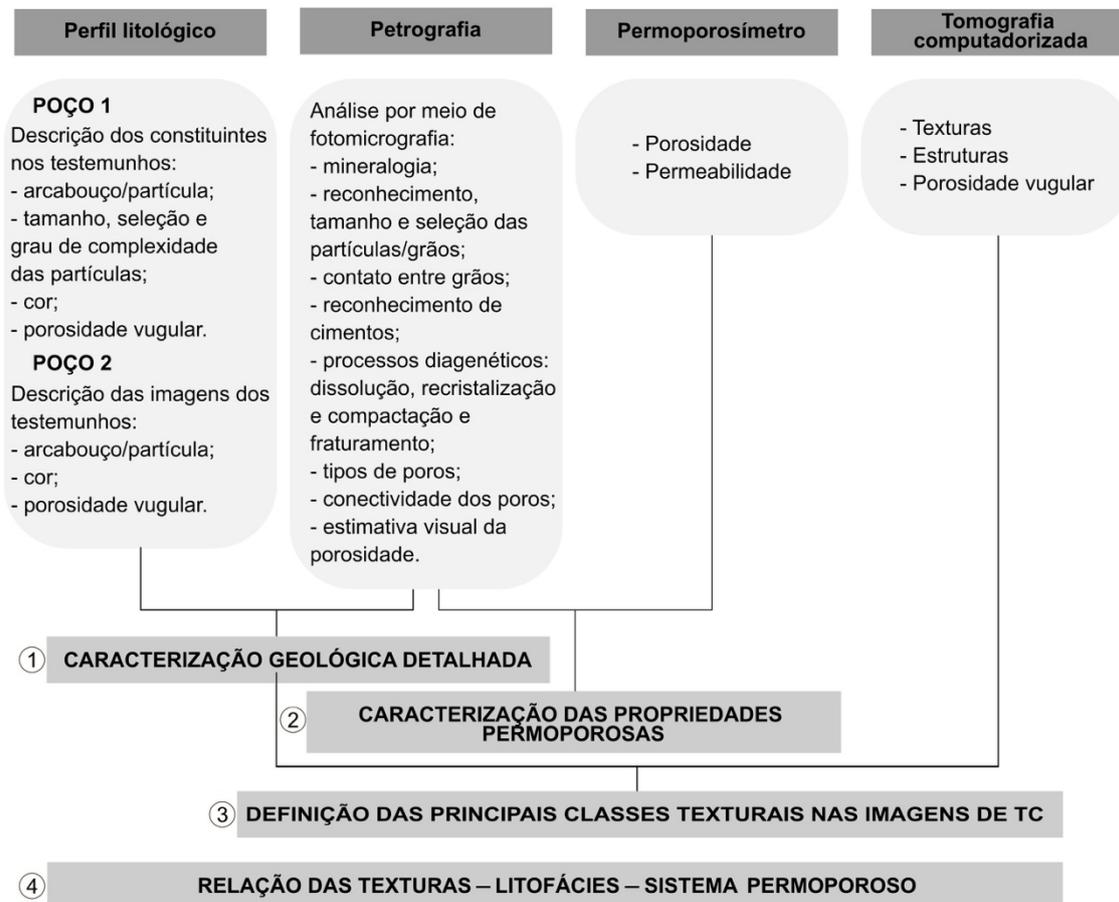


Figura 2. Fluxo do trabalho da pesquisa dividido em quatro estágios: (1) Caracterização geológica detalhada; (2) Caracterização das propriedades permoporosas; (3) Definição das principais classes texturais de imagens de TC; (4) Relação das texturas – litofácies – sistema permoporoso.

microscópica, essa litofácies pode apresentar presença de matriz entre os grãos de esferulito e, por vezes, é possível notar um deslocamento da matriz; poros dos tipos interelemento, intraelemento, vugular e móldica com estimativa visual da porosidade variando entre nula e 20%; e cimentos de quartzo, calcita e dolomita podem ser observados. Os principais processos diagenéticos identificados na LE são dissolução e substituição de matriz argilosa por matriz dolomitizada e de esferulito por calcedônia.

A litofácies *arbustiforme-esferulítica* (LAE), de origem alóctone, é caracterizada pela presença de depósitos de carbonatos retrabalhados constituídos de fragmentos de *shrubs* e esferulitos, ora dominados por *shrubs*, ora por esferulitos, podendo ocorrer uma mistura equilibrada entre os componentes, e a coloração varia de castanho-claro a médio. Nesses depósitos, é possível observar, com o auxílio de lupa de mão, grãos híbridos entre esferulitos e arbustos que estão associados ao crescimento assimétrico dos esferulitos. Microscopicamente, esses grãos híbridos são formados a partir do crescimento preferencial de uma das estruturas

fibrorradiadas do grão de esferulito de composição calcítica, formando um braço que pode se desenvolver ou não em um ramo de arbusto a depender da precipitação de calcita. A estimativa visual da porosidade observada nessa litofácies varia de < 5 a 15% e os tipos de poros identificados são interelemento, intraelemento, intercristalina e móldica. Pode ocorrer cimento de dolomita romboédrica preenchendo espaços interelementos, bem como de quartzo e de calcita em franja contornando os elementos, e os processos diagenéticos comuns são dissolução e substituição de elementos/partículas indiferenciadas por dolomitas.

Nos testemunhos avaliados foram observadas ocorrências de brechas e *chert*. As brechas identificadas estão relacionadas a processos tanto pedogênicos (depósitos laminados com fraturas verticais possivelmente causadas por marcas de raízes) quanto tectônicos (depósitos com matriz suportada com clastos planares a angulosos com textura caótica relacionados a fluxo de massa). Os *cherts* correspondem a depósitos carbonáticos que sofreram intensa silicificação, podendo estar totalmente substituídos por sílica ou ainda

Tabela 1. Principais atributos diagnósticos que foram levados em consideração na definição das litofácies*.

Código das litofácies	Litofácies	Origem	Diagnose				
			Escala macroscópica		Escala microscópica		
			Principais características	Cor	Estrutura/Textura	Principais tipos de poros	Cimento (tipo e % total)
LL	Laminito	Autóctone	Conjunto de laminações milimétricas formadas por material de granulometria muito fina	Marrom-claro alternado com escuro	Laminada, normalmente contínua e crenulada	Fenestral	Dolomita, quartzo e calcita/< 5%
LA	Carbonato arbustiforme	Autóctone	<i>Shrubs</i> com crescimento vertical em direção ao topo dando origem ao acamamento paralelo e topo crenulado ou ondulado	Marrom-claro a marrom	Arbustiva, laminada ou sem estrutura aparente, a depender do tamanho dos <i>shrubs</i>	Fenestral, de crescimento, vugular, interelemento e intraelemento	Dolomita, quartzo e calcita/< 5 a 10%
LE	Esferulítico	Autóctone	Esferulitos, laminado e/ou granular	Marrom-claro a marrom	Esferulítica, laminada ou sem estrutura aparente	Interelemento, intraelemento, móldica e vugular	Dolomita, quartzo e calcita/< 5 a 10%
LAE	Arbustiforme-esferulítica	Alóctone	Presença de fragmentos de <i>shrubs</i> e de esferulitos (retrabalhada)	Marrom-claro a marrom	Com resquícios de laminação ou sem estrutura aparente	Interelemento, intraelemento e vugular	Dolomita, calcita e quartzo/5 a 10%
LB	Carbonato brechado	Modificada	Brecha ou <i>chert</i> com elevada silicificação, quebras/fraturas, deformações e descontinuidade	Marrom	Brechada/Caótica	Ausente ou intercrystalino	Sílica, calcita e dolomita/> 10%
LD	Dolomito	Modificada	Dolomito, difícil identificação, pode conter aspecto sacaroidal	Marrom-claro a marrom-alaranjado	Com resquícios de laminação ou sem estrutura aparente	Intercristalino	Dolomita, calcita e quartzo/> 10%

*Métrica de avaliação qualitativa do cimento: < 5%: pouco; 5–10%: moderado; > 10%: muito.

apresentar resquícios dos carbonatos de origem e são intensamente fraturados. Nesta pesquisa, os depósitos de *chert* aparecem constantemente associados aos depósitos de brecha como clastos de *chert* angulosos inseridos em uma textura caótica brechada, e, por isso, consideramos mais apropriado tratá-los juntos. De origem modificada, a litofácies *carbonato brechado* (LB) é constituída de brecha e *chert*, marcada principalmente pela presença de fraturas/quebra, descontinuidade das camadas, deformação, cor variegada, além de conter clastos e textura caótica ou brechada. Em escala microscópica, os depósitos da LB apresentam muitas vezes uma estimativa visual de porosidade nula ou com

valores muito baixos, entre nula e 5%, sendo 10% o máximo observado. Os tipos de poros identificados correspondem a intercrystalino e de fratura; além disso, é possível notar com frequência a presença de cimento, inclusive preenchendo as fraturas. Os processos diagenéticos identificados na LB correspondem principalmente à substituição de elementos ou partículas por sílica microcristalina.

A litofácies *dolomito* (LD), de origem modificada, é formada por dolomitos, que são caracterizados por terem mais de 50% de dolomita cristalina, sendo considerado de difícil identificação macroscópica. No entanto, são indicativos dessa litofácies o aspecto sacaroidal e a coloração marrom-claro

(carta de cor de Munsell: Bruno-claro, matriz 7,5YR, 6/3) a marrom-alaranjado (carta de cor de Munsell: Bruno-forte 7,5YR, 5/8). Em geral, a LD não apresenta estrutura visível (tende ao maciço), porém pode apresentar resquícios de estratificação da rocha de origem. Em escala microscópica, é possível identificar cristais de dolomita euédricos (bem facetados), romboédricos e subédricos (cristais com faces imperfeitas). Ocorre predomínio de porosidade intercrystalina com estimativa visual variando de nula a 15%, e comumente é observada intensa cimentação de dolomita em mosaico e em menor proporção, quartzo e calcita preenchendo espaços intercrystalinos. A LD é marcada por um intenso grau de dolomitização, representado principalmente por substituição e recristalização dos constituintes por dolomita.

Caracterização textural das imagens de tomografia computadorizada de raio X

A partir da descrição geológica detalhada analisada junto às imagens dos perfis tomográficos foi possível notar que alguns atributos texturais das imagens de TC ocorrem com frequência em litofácies específicas.

É importante ressaltar a dificuldade de definição de uma classificação textural sucinta, em razão da elevada

heterogeneidade das rochas carbonáticas que influencia diretamente a textura da imagem do perfil tomográfico, gerando uma elevada diversidade textural. Contudo, uma construção de classificação sucinta diminui a ocorrência de confusão entre classes, pois evita detalhes minuciosos e poucas diferenças de forma geral.

Após uma análise cautelosa, chegamos a uma proposta de classificação representativa com apenas quatro classes texturais: *laminada*, *arbustiforme*, *fragmentada clastiforme* e *recristalizada* (Figura 3).

As texturas *laminada* e *arbustiforme* são marcadas pelos atributos texturais de origem primária, sendo possível notar as estratificações bem definidas, enquanto as texturas *fragmentada clastiforme* e *recristalizada* apresentam resquícios de estratificação tendendo à ausência de estratificação (aspecto homogêneo) devido à intensa alteração diagenética (Figura 4).

Associada às litofácies laminito e esferulítico, a textura *laminada* (Figura 5) é de fácil reconhecimento, sendo caracterizada por um conjunto de laminações milimétricas, contínuas ou descontínuas, com o topo variando entre crenulado e planar e o tom de cinza intercala entre claro e escuro, podendo apresentar homogeneidade (com aspecto liso) ou granular (com aspecto áspero) nas laminações.

TEXTURA DE IMAGEM DE TC	IMAGEM DE TC	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	CORRESPONDÊNCIA LITOFACIOLOGICA
Laminada (LAM)		Conjunto de laminações milimétricas paralelas, contínuas com topo variando entre crenulado a planar, tom de cinza claro intercalado com escuro, podendo apresentar homogeneidade (aspecto liso) ou granulação fina (aspecto áspero).	Laminito (LL) e Esferulítico (LE)
Arbustiforme (ARB)		Marcada pela presença de poros alongados visíveis, acamamento paralelo relacionado ao crescimento ascendente de arbustos que também controlam a espessura das camadas que varia de milimétrica a centimétrica. Em camadas muito espessas, essa textura perde a característica de estratificada plana e pode ser considerada sem estrutura. A tonalidade varia de cinza claro a preto (sendo o preto associado aos poros).	Carbonato arbustiforme (LA)
Fragmentada clastiforme (FRC)		Caracterizada pela presença de manchas com tom de cinza muito escuro ocorrendo aleatoriamente em meio conturbado (formato anguloso) ou acompanhando o plano de acamamento (subarredondadas ou sem forma). A tonalidade escura do cinza está relacionada à presença de silicificação, que contém valor baixo de densidade (2,65 g/m ³). Essa textura pode apresentar descontinuidade, deformidade e fraturamento.	Brechada (LB)
Recristalizada (REC)		Marcada pela presença de fracos indícios ou ausência de estratificação com tom de cinza esbranquiçado (como se houvesse uma névoa escondendo a textura de origem). Essa textura apresenta um aspecto homogêneo relacionado à elevada diagênese de substituição e recristalização marcada pela micritização e dolomitização (a dolomita apresenta densidade de 2,84 g/cm ³ , que gera o tom de cinza muito claro).	Dolomito (LD) e Arbusto-esferulítico (LAE)

Figura 3. Principais texturas identificadas em tomografia computadorizada de raios X aplicadas às rochas carbonáticas do pré-sal e suas características.

A textura *arbustiforme* (Figura 5) está relacionada à litofácies carbonato arbustiforme e apresenta atributos marcantes como formas de arbustos, poros alongados visíveis dos tipos *growth framework*, fenestral e vugular, o tom de cinza varia de cinza claro a preto (que registram elementos constituintes e os poros, respectivamente), além de limites planos reconhecíveis relacionados ao crescimento ascendente dos *shrubs*, que também controlam a espessura das camadas, que varia de milimétrica a centimétrica. Em camadas muito espessas, a textura *arbustiforme* perde a característica de estratificada e pode ser considerada sem estrutura tendendo ao maciço.

A textura *fragmentada clastiforme* (Figura 5) está diretamente associada à litofácies carbonato brechado, sendo caracterizada principalmente pela presença de manchas em tom de cinza escuro imersas em um tom de cinza mais claro e pela fragmentação causando descontinuidade das camadas. Essas manchas escuras podem ocorrer aleatoriamente em um meio conturbado ou acompanhar um plano de acamamento, sendo o primeiro caso característico de brecha, e o segundo, de *chert*. Possivelmente, o tom de cinza mais escuro está relacionado à presença de sílica, que tem densidade de baixo valor ($2,65 \text{ g/cm}^3$) e ocorre com frequência nos depósitos da LB. É importante destacar que o formato dessas manchas escuras varia de angular a formas aleatórias (a depender do carbonato que sofreu silicificação), com tamanhos variados (clastos entre 1 e 10 cm — eixo maior — e camadas com espessura de até 45 cm). A textura *fragmentada clastiforme* pode apresentar fraturamento e deformidade.

A textura *recristalizada* ocorre com frequência nas imagens de TC dos testemunhos dos poços analisados e está

associada às litofácies dolomito e arbustiforme-esferulítica (Figura 5), sendo caracterizada pela ausência de estratificação ou por fracos resquícios de estratificação, tom de cinza muito claro (praticamente esbranquiçado, como se houvesse uma névoa mascarando a textura de origem) e aspecto homogêneo relacionado à elevada presença de dolomitização. É provável que a intensa presença de dolomita, mineral com densidade de $2,84 \text{ g/cm}^3$ e observado com frequência nos depósitos da LD, seja a principal responsável pelo tom de cinza muito claro identificado na textura *recristalizada*.

Os Poços 1 e 2 foram submetidos à segmentação manual utilizando a classificação textural proposta, conforme o exemplo na Figura 6.

Caracterização do sistema permoporoso em relação à classificação textural de imagens de tomografia computadorizada

Os poços foram analisados a partir da plotagem dos dados de porosidade *versus* permeabilidade para cada classe textural de imagem de TC (Figura 7). É importante mencionar a presença de poucos dados laboratoriais de porosidade e permeabilidade disponíveis para o Poço 1, o que dificulta uma análise eficaz do comportamento permoporoso em relação às texturas analisadas.

A Figura 7 permite notar que o Poço 2 apresenta um melhor sistema permoporoso que o Poço 1, entretanto há similaridades no comportamento permoporoso entre as amostras dos dois poços, além de correlação positiva entre porosidade (ϕ) e permeabilidade (k) para cada textura. O Poço 1 apresenta valores de ϕ entre 2,7 e 15,5% e k entre

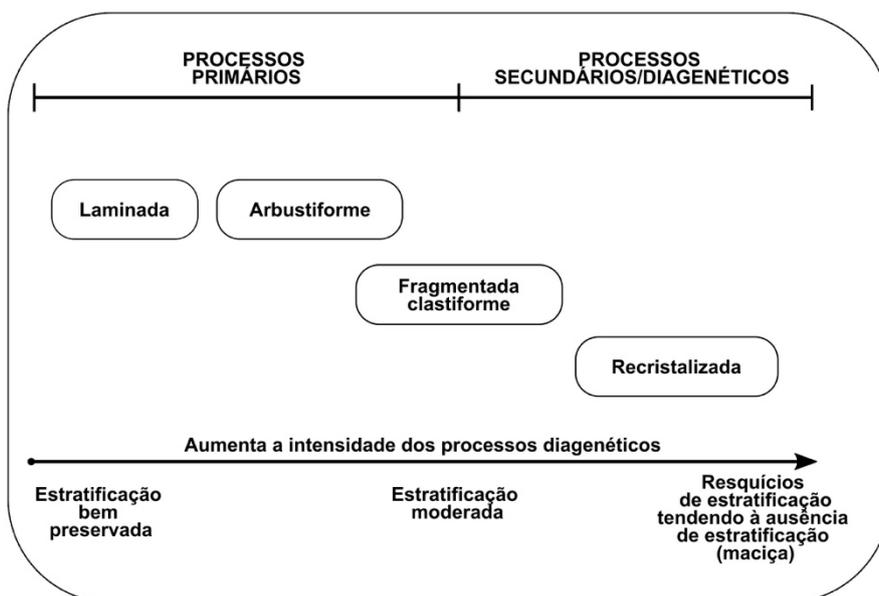


Figura 4. Relação das principais texturas de rochas carbonáticas definidas a partir de imagens de tomografia computadorizada de raios X com o avanço dos processos diagenéticos.

1 e 781 mD, enquanto o Poço 2 é marcado por ϕ entre 1 e 27% e k entre 1 e 4.920 mD.

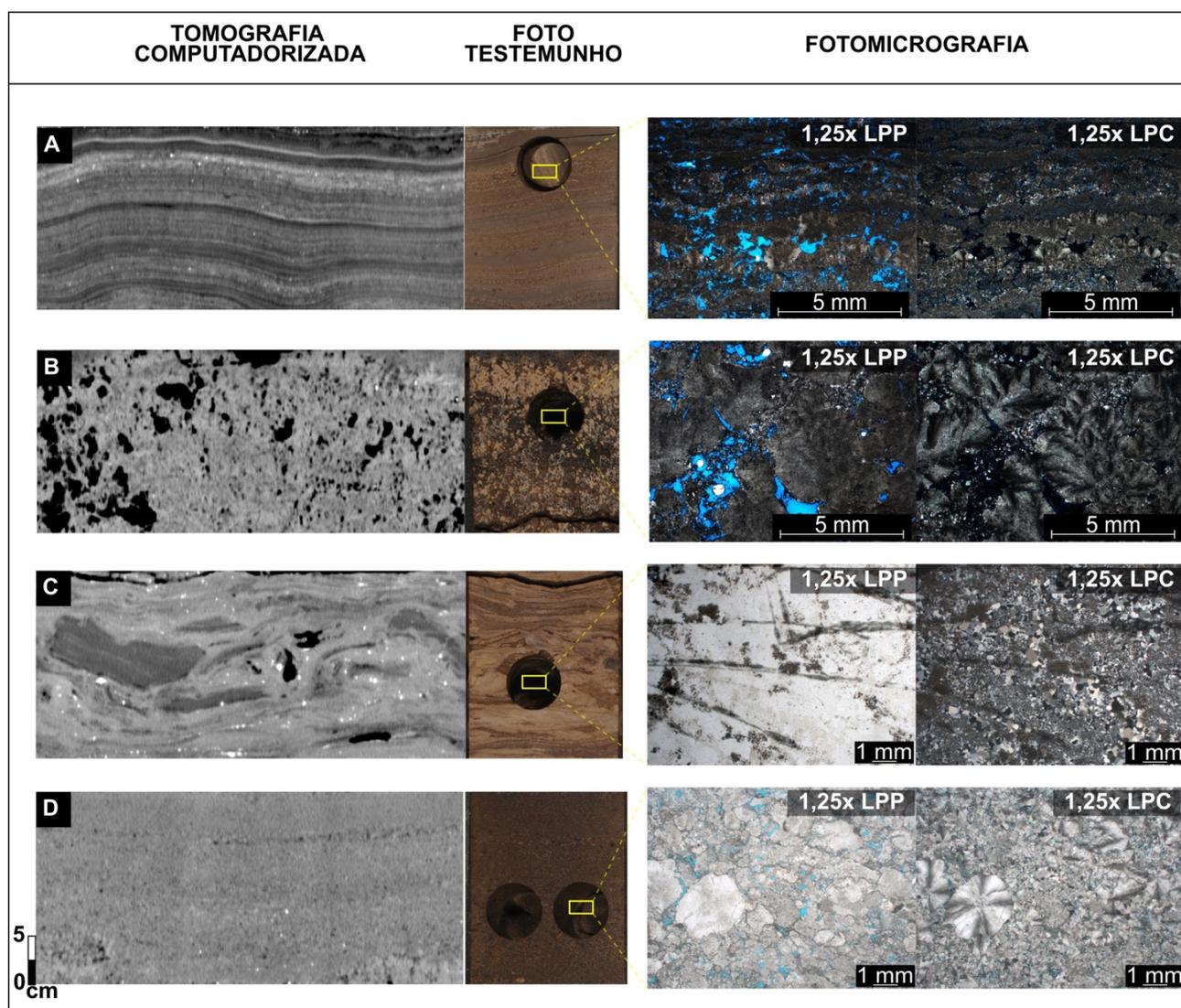
A maior parte das amostras que têm dados laboratoriais de porosidade e permeabilidade avaliadas nesta pesquisa encontra-se classificada como textura *recristalizada* e *arbustiforme*, enquanto a minoria corresponde à textura *laminada*, nos dois poços analisados.

As linhas de tendência exponencial, elaboradas para cada textura para os dois poços, indicam que a alteração diagenética atua diretamente no comportamento do sistema permoporoso de cada textura de imagem de TC, em que as texturas *fragmentada clastiforme* e *recristalizada* que apresentam maior intensidade dos processos diagenéticos

exibem linha de tendência iniciando em 1 mD, enquanto as das texturas *arbustiforme* e *laminada* (marcadas por processos primários) iniciam acima de 10 mD (Figura 7). Não foi possível realizar a linha de tendência exponencial para a textura *laminada* do Poço 1 em razão do baixo número de amostras.

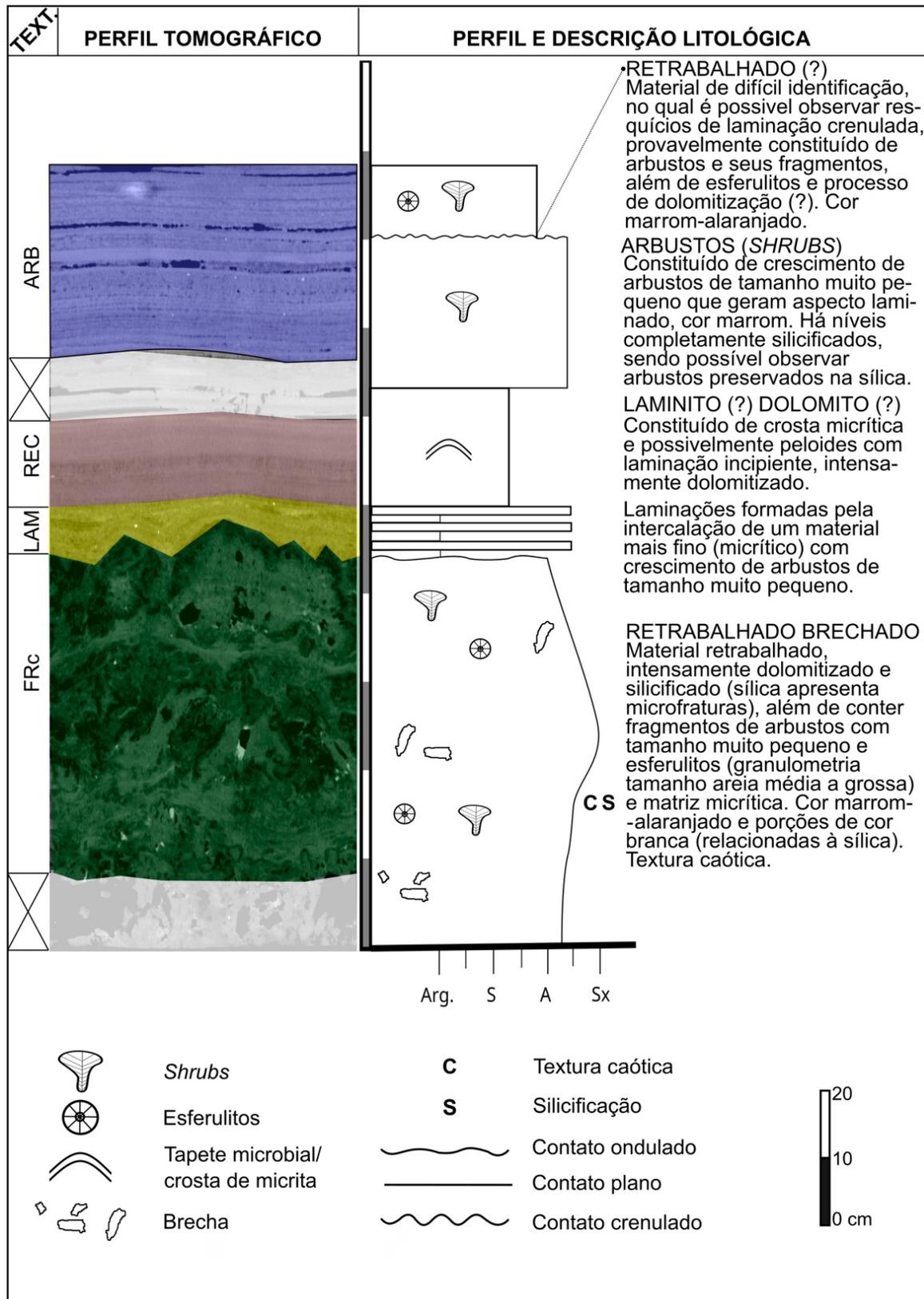
Os principais resultados da caracterização do sistema permoporoso em relação às classes texturais podem ser sumarizados a seguir:

I. Textura *laminada*: no Poço 1, os valores de ϕ e k variam de 10 a 12% e 320 a 365 mD, respectivamente, enquanto no Poço 2 variam de 10 a 15% e de 10 a 1.000 mD, respectivamente. De modo geral, essa textura apresenta



LPP: luz polarizada paralela; LPC: luz polarizada cruzada.

Figura 5. Exemplos das texturas em imagens de tomografia computadorizada de raios X associadas aos seus depósitos litológicos. É possível observar: (A) a textura laminada associada à litofácies laminítico; (B) a textura arbustiforme associada à litofácies carbonato arbustiforme; (C) a textura fragmentada clastiforme associada à litofácies carbonato brechado (depósito de *chert*); (D) e a textura recristalizada associada à litofácies dolomito.



ARB: arbustiforme; REC: recristalizada; LAM: laminada; FRC: fragmentada clastiforme.

Figura 6. Exemplo da segmentação do perfil tomográfico com base na classificação textural proposta na pesquisa junto ao perfil litológico à direita.

valores baixos de porosidade e permeabilidade, entretanto, localmente, podem se tornar um potencial reservatório em razão da porosidade secundária provocada pela dissolução da matriz argilosa. Entretanto, as amostras que apresentaram maiores valores de permeabilidade coincidem com a formação de *shrubs* de tamanho milimétrico, que são responsáveis pela geração de laminações nas imagens de TC provocadas pelo próprio crescimento. Logo, esses valores elevados de permeabilidade observados nessa textura estão associados ao bom sistema poroso que os depósitos de carbonatos

arbustiformes apresentam, ou seja, com poros alongados e interconectados;

II. Textura *arbustiforme*: apresenta o melhor sistema permoporoso e, conseqüentemente, o melhor reservatório, apresentando valores elevados de permeabilidade. O Poço 1 exibe valores de ϕ e k que variam de 8,4 a 14,1% e de 27,9 a 781 mD, respectivamente, enquanto o Poço 2 apresenta valores entre 6 e 24% de ϕ e entre 12 e 5.000 mD de k . Os menores valores de permeabilidade estão associados à presença de cimento de dolomita e sílica, que preenchem a

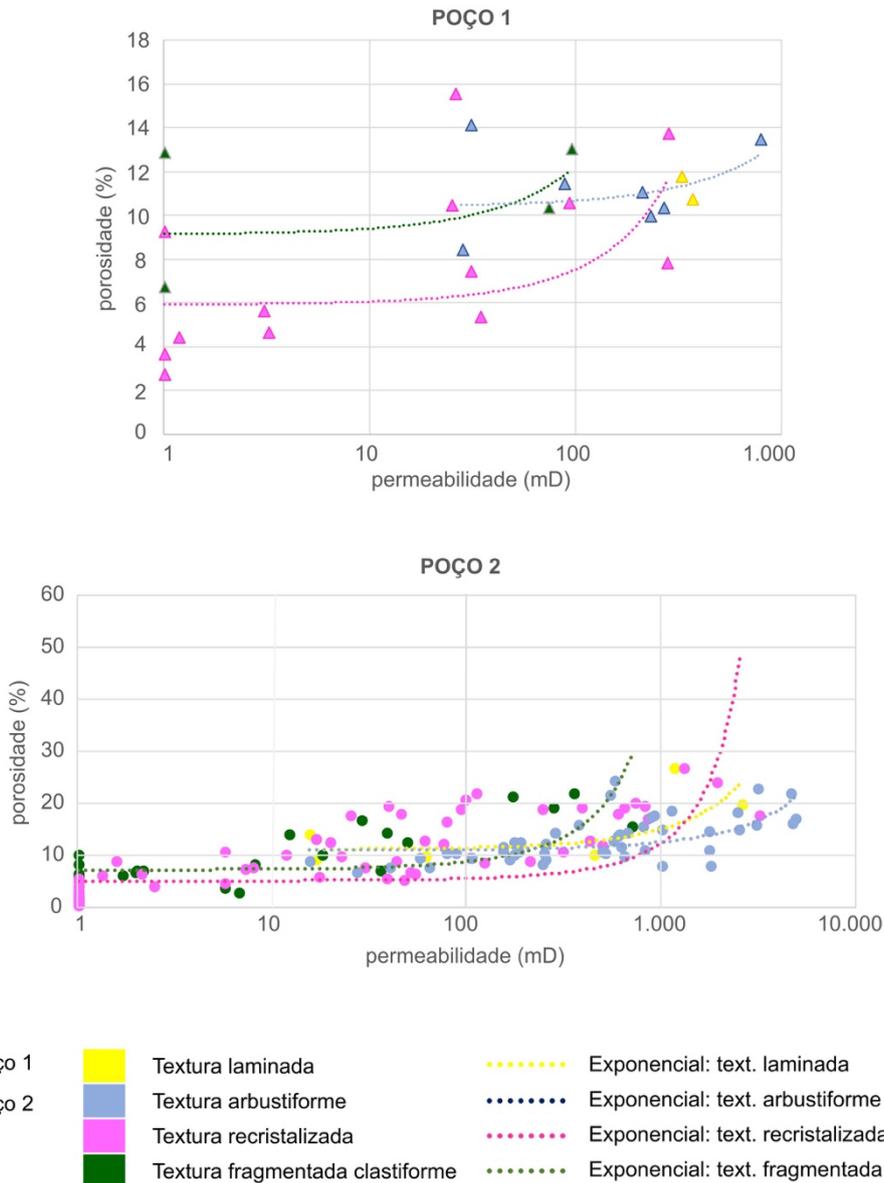


Figura 7. Plotagem de porosidade *versus* permeabilidade para cada textura de imagem de tomografia computadorizada analisada nos Poços 1 e 2 e suas respectivas linhas de tendência exponencial (exceto para a textura laminada do Poço 1, que tem apenas duas amostras com dados de permoporosidade).

porosidade primária dos *shrubs* (poros de crescimento e interelementos), reduzindo a conectividade e impactando o sistema permoporoso;

III. Textura *fragmentada clastiforme*: apresenta um sistema permoporoso de um não reservatório, possivelmente por estar associada a depósitos com intensa silicificação, que preenchem os poros, reduzindo a conectividade entre poros, e conseqüentemente diminui a permeabilidade da rocha. A silicificação compromete o sistema permoporoso e impacta de forma negativa a qualidade do reservatório. Os valores de porosidade e permeabilidade observados nas amostras classificadas nessa textura variam, respectivamente, de 6,5 a 13% e de 1 a 100 mD no Poço 1, enquanto no Poço 2 variam de 2 a 22% e de 1 a 1.000 mD, respectivamente. É importante destacar que a maioria das amostras do Poço 2 está concentrada na faixa de permeabilidade entre 1 e 100 mD, e as que extrapolam esse valor estão associadas aos depósitos de *shrubs* brechado, com características originais marcantes dos *shrubs* e menor concentração de silicificação;

IV. Textura *recristalizada*: o sistema permoporoso pode variar desde muito ruim a bom, entretanto a maior parte das amostras avaliadas apresenta valores de permeabilidade muito baixo, menor que 100 mD, caracterizando rochas carbonáticas não reservatório. Os valores de ϕ e k observados no Poço 1 variam de 2,7 a 15% e de 1 a 281 mD, respectivamente, enquanto no Poço 2 variam de 0,5 a 27% e de 1 a > 1.000 mD, respectivamente. As amostras com baixos valores de porosidade e permeabilidade estão associadas à presença de dolomitização, enquanto as que têm valores mais altos estão relacionadas à intensa dissolução. De acordo com Herlinger et al. (2017), o início da dolomitização reduz consideravelmente a porosidade primária e a secundária inicial, pois os cristais de dolomita preenchem a garganta dos poros, afetando a permeabilidade, e, em contrapartida, quando a rocha se torna um dolomito, os valores podem ser elevados. Segundo Wright (2020), ocorre uma fase posterior de dissolução de carbono, que aumenta a porosidade e a permeabilidade das rochas após diversas fases de substituição e cimentação de dolomita, o que pode explicar os valores mais altos de permeabilidade nessa textura.

A Figura 8 apresenta a plotagem dos dados de ϕ versus k para cada textura identificada nos dois poços de forma separada e suas respectivas nuvens de pontos que proporcionam uma visualização rápida das áreas de concentração de cada textura e revelam uma similaridade no comportamento do sistema permoporoso entre os poços.

A partir da delimitação dessas áreas de concentração foi elaborada uma síntese do comportamento do sistema

permoporoso (Figura 9) para cada textura de imagem de TC, no qual é possível observar melhor comportamento nas texturas primárias (texturas *arbustiforme* e *laminada*), enquanto as que apresentam processos diagenéticos avançados (texturas *fragmentada clastiforme* e *recristalizada*) evidenciam um sistema permoporoso que varia de ruim a regular, podendo alcançar um sistema bom. Isso pode ser justificado, pois as rochas marcadas por intensos processos diagenéticos apresentam elevada concentração de cimento e/ou recristalização (de argilominerais e calcita por dolomitas) que diminuem a conectividade entre poros, e, conseqüentemente, a permeabilidade reduz. Por outro lado, há o processo diagenético de dissolução responsável pelos poros aumentados, no qual a conectividade entre poros é melhor, favorecendo a permeabilidade, caracterizando os casos de textura *recristalizada* que apresentam um sistema permoporoso bom.

CONCLUSÕES

Para chegar a uma classificação textural de uma rocha intensamente heterogênea e de alta complexidade, que é o caso das rochas carbonáticas de origem lacustre do pré-sal da Bacia de Santos, foi necessário analisar detalhadamente, em escala macro e microscópica, os depósitos litológicos. Isso permitiu a definição das principais litofácies que foram analisadas de forma integrada com as imagens de tomografia computadorizada (TC), com a finalidade de identificar os principais atributos texturais diagnósticos que se repetem em cada litofácies. Nesse contexto, foi proposta uma classificação textural sucinta com apenas quatro classes: *laminada*, *arbustiforme*, *fragmentada clastiforme* e *recristalizada*.

Uma das principais observações é a relação direta entre processos diagenéticos e as texturas identificadas nas imagens de TC, assim como em seus sistemas permoporosos. Texturas que apresentam processos diagenéticos avançados, como a *fragmentada clastiforme* e a *recristalizada*, são marcadas por resquícios ou ausência de estruturas (tendendo ao aspecto homogêneo) e um sistema permoporoso ruim a regular apresentando valores baixos de porosidade e permeabilidade que estão associados principalmente à presença de cimentação, silicificação e recristalização, que preenchem os espaços porosos, diminuem a conectividade entre poros — conseqüentemente, a permeabilidade é reduzida. Porém, essas texturas podem apresentar um sistema permoporoso mais elevado que está diretamente associado à dissolução, provocando poros aumentados principalmente na textura *recristalizada*. Já as texturas *laminada* e *arbustiforme*, que exibem pouca ou nenhuma alteração diagenética, ou seja, são marcadas pelos processos primários, apresentam estratificação primária bem preservada e

um sistema permoporoso variando de bom a muito bom, em razão da menor intensidade de cimentação e da maior conectividade entre poros que possibilitam maiores valores de permeabilidade.

Por fim, a classificação textural das imagens de TC de raios X aplicadas às rochas carbonáticas lacustres do pré-sal da Bacia de Santos, proposta nesta pesquisa, fundamentada na caracterização geológica detalhada e em seu sistema permoporoso, apresenta eficácia para a segmentação realizada manualmente por um técnico

especializado, possibilitando identificar de maneira rápida os intervalos de interesse reservatório. Para futuros trabalhos, recomenda-se a aplicação dessa metodologia proposta de classificação textural em imagens de TC em rochas carbonáticas lacustres de outros campos petrolíferos do pré-sal brasileiro, além de utilizar essa classificação como forma de entrada para treinar algoritmos por meio de técnicas de *machine learning*, com o intuito de automatizar e agilizar o processo de identificação dos intervalos reservatórios de interesse.

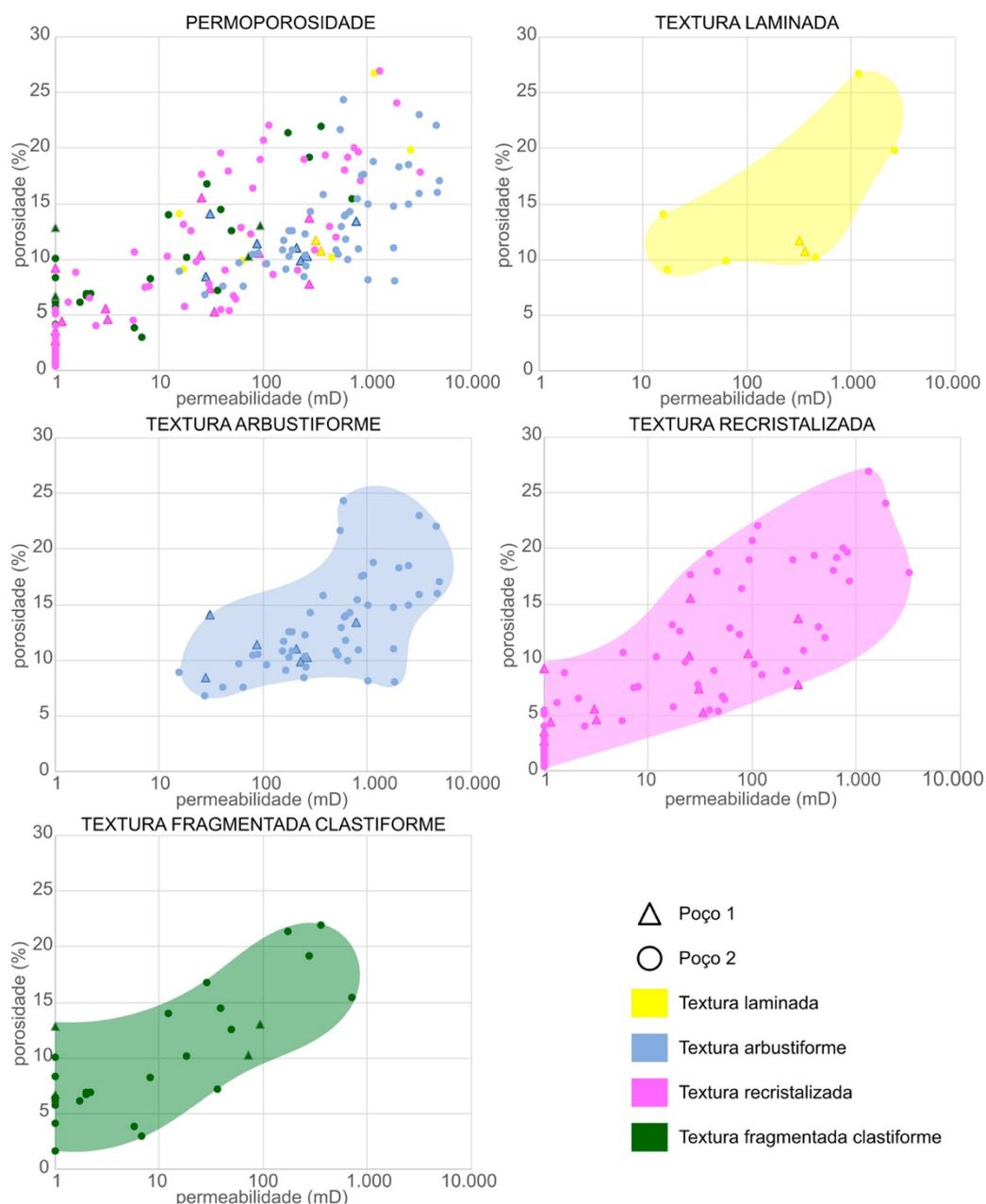


Figura 8. Plotagem de porosidade versus permeabilidade para cada textura observada nos Poços 1 e 2 e gráficos de nuvens gerados que permitem uma visualização rápida das áreas de concentração de cada textura.

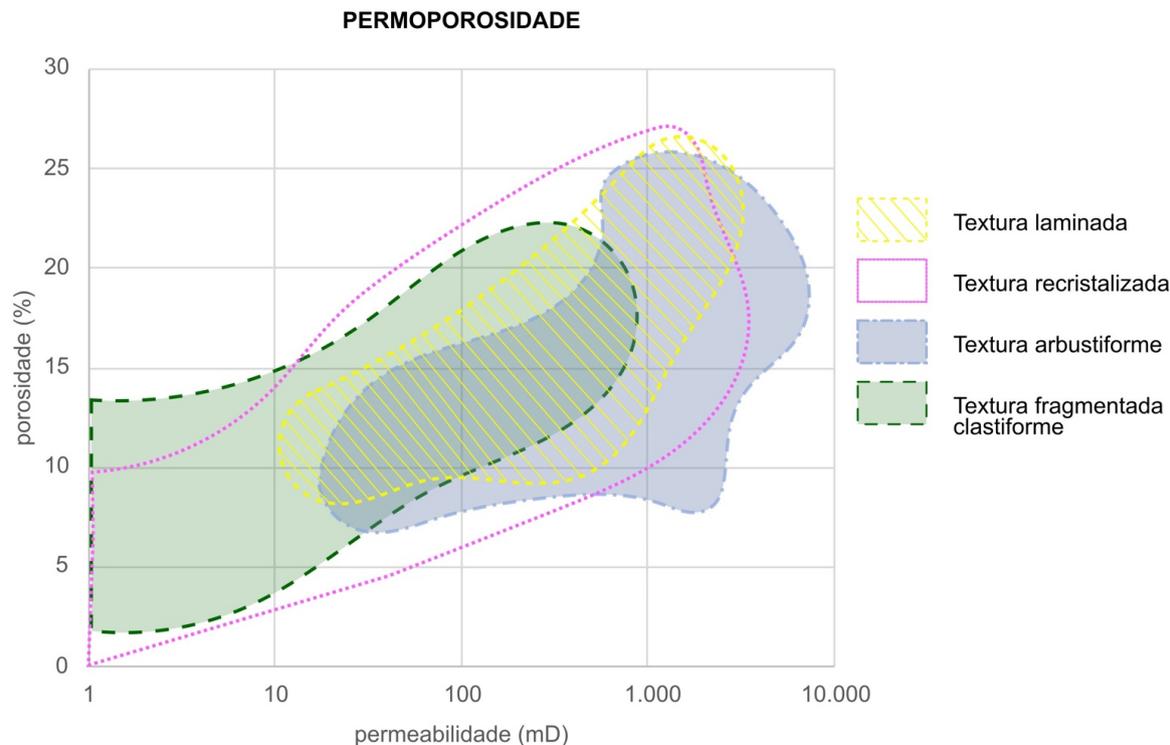


Figura 9. Síntese do comportamento do sistema permoporoso para cada textura identificada nos Poços 1 e 2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) o suporte institucional e financeiro na realização desta pesquisa. Ao Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ (LAMCE-COPPE-UFRJ) o apoio financeiro e a oportunidade de fazermos pesquisa por meio dos dados disponibilizados. À PETREC por disponibilizar o acesso e dados de um dos poços para a elaboração desta pesquisa. A Andre Souza Pelech, João Claudio Conceição e Bruno de Souza Silva a análise crítica deste manuscrito. Aos Professores Wagner Lupinacci e Ricardo Jahner a gentileza de avaliarem um dos termos adotados na classificação textural. Aos revisores e ao editor adjunto as críticas e sugestões que contribuíram significativamente para a melhoria do artigo.

REFERÊNCIAS

Chang, H. K., Assine, M. L., Corrêa, F. S., Tinen, J. S., Vidal, A. C., Koike, L. (2008). Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2), 29-46. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008382S2946>

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*, 113, 104176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104176>

Herlinger, R., Zambonato, E. E., De Ros, L. F. (2017). Influence of diagenesis on the quality of Lower Cretaceous pre-salt lacustrine carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 87(12), 1285-1313. <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.70>

Lima, B. E. M., De Ros, L. F. (2019). Deposition, diagenetic and hydrothermal process in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, Offshore Brazil. *Sedimentary Geology*, 383, 55-81. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.01.006>

Lupinacci, W. M., Fatah, T. Y. A., Carmo, M. C., Freire, A. F. M., Gamboa, L. A. P. (2023). Controls of fracturing on porosity in pre-salt carbonate reservoirs. *Energy Geoscience*, 4(2), 100146. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.100146>

- Macedo, J. M. (1991). Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In: Gabaglia, G. P. R., Milani, E. J. (Eds.). *Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobras. p. 361-376.
- Mohriak, W. U. (2012). Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo. In: Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M. de, Bartoreli, A. (Eds.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca. v. 19b, p. 481-496.
- Moreira, J. L. P., Madeira, C. V., Gil, J. A., Machado, M. A. P. (2007). Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 531-549.
- Pedrinha, S., Artagão, V. M., Moreira, T. P., Freitas, L. C., Richter, E., Santos, B. T. (2018). Reservoir geology aspects of Lula Supergiant Field, Santos Basin – Brazilian Pre-Salt Province, *AAPG Annual Convention and Exhibition*, Salt Lake City.
- Pereira, M. J., Macedo, J. M. (1990). A Bacia de Santos: Perspectivas de uma província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4(1), 3-11.
- Pietzsch, R., Tedeschi, L. R., Oliveira, D. M., Anjos, C. W. D., Vazquez, J. C., Figueiredo, M. F. (2020). Environmental conditions of deposition of the Lower Cretaceous lacustrine carbonates of the Barra Velha Formation, Santos Basin (Brazil), based on stable carbon and oxygen isotopes: a continental record of pCO₂ during the onset of the Oceanic Anoxic Event 1a (OAE 1a) interval? *Chemical Geology*, 535, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119457>
- Rezende, M. F., Pope, M. C. (2015). Importance of depositional texture in pore characterization of subsalt microbialite carbonates, offshore Brazil. In: Bonsence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T., Vining, B. A. (Eds.). *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. London: Geological Society. v. 418(1), p. 193-207. <https://doi.org/10.1144/SP418.2>
- Riccomini, C., Sant'anna, L. G., Tassinari, C. C. G. (2012). Pré-Sal: Geologia e exploração. *Revista USP*, (95), 33-42. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i95p33-42>
- Souza, R. S. (2016). Carbonatos biogênicos (microbialitos) e abiogênicos: diferenças conceituais e características petrográficas. *48º Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre: SBG. Disponível em: http://cbg2017anais.siteoficial.ws/st27/ID6586_111463_52_48_Congresso_Brasileiro_de_Geologia_2016_Sinopse_Biogenico_vs_Abiogenico_Schiffer.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.
- Wright, V. P. (2020). The mantle, CO₂ and the giant Aptian chemogenic lacustrine carbonate factory of the South Atlantic: Some carbonates are made, not born. *Sedimentology*, 69, 47-73. <https://doi.org/10.1111/sed.12835>
- Wright, V. P., Barnett, A. J. (2015). An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates. In: Bonsence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T., Vining, B. A. (Eds.). *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. London: Geological Society. v. 418(1), p. 209-219. <https://doi.org/10.1144/SP418.3>