

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DIAGÊNESE E QUALIDADE DE RESERVATÓRIO DAS ROCHAS INTRACLÁSTICAS DO CAMPO DE BÚZIOS, PRÉ-SAL, BACIA DE SANTOS

AUTORES:

Mariane Cristina Trombetta^{1,2,*}, Amanda Goulart Rodrigues¹, Luiz Fernando De Ros¹

INSTITUIÇÃO:

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Instituto do Petróleo e Recursos Naturais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

DIAGÊNESE E QUALIDADE DE RESERVATÓRIO DAS ROCHAS INTRACLÁSTICAS DO CAMPO DE BÚZIOS, PRÉ-SAL, BACIA DE SANTOS

Resumo

Os reservatórios intraclásticos do Pré-sal são produto da erosão e redeposição dos depósitos *in situ*, essencialmente constituídos por agregados fasciculares e esferulíticos de calcita, associados a intraclastos, oóides e pelóides de argila magnesianas. Reservatórios intraclásticos apresentam grande espessura e extensão, e excelente qualidade no Campo de Búzios da Bacia de Santos. O objetivo deste estudo foi caracterizar os processos diagenéticos e suas relações entre si e com os constituintes primários, bem como com a porosidade dos calcarenitos e calcirruditos intraclásticos em dois poços do Campo de Búzios, a fim de entender o impacto da diagênese na qualidade desses reservatórios. Para isso, foram propostos modelos de evolução diagenética a partir da análise petrográfica quantitativa de 81 lâminas delgadas, combinada com dados petrofísicos. Os processos diagenéticos ocorreram de forma heterogênea, diminuindo, preservando ou aumentando a porosidade. Dolomitização e silicificação foram os principais processos de substituição e cimentação. Pelo menos duas fases de sílica ocorrem: a calcedônia fibrosa cobrindo ou substituindo as partículas e circundando os poros, e quartzo macrocristalino preenchendo os poros remanescentes. A dolomita ocorre predominantemente na forma de cristais blocosos e zonados, substituindo partículas, e como cimento nos poros interpartículas. Dolomita em sela ocorre preenchendo poros vulgares, associada com calcita macrocristalina, analcima e barita. Além da dissolução de constituintes primários e diagenéticos, cimentação e substituição, os sistemas porosos foram heterogeneamente afetados por processos de compactação física e química controlados pela cimentação precoce de dolomita e pela variação da textura primária. Mesmo com essas mudanças diagenéticas, os intervalos intraclásticos correspondem aos valores mais altos e verticalmente contínuos de porosidade petrográfica e nos perfis de ressonância magnética. A compreensão das características, controles e distribuição da porosidade nas rochas intraclásticas do Campo de Búzios é crucial para otimizar a produção do campo, assim como a de reservatórios equivalentes em outras áreas do Pré-sal.

Palavras-chave: diagênese, porosidade, rochas intraclásticas, Formação Barra Velha.

Abstract

Pre-salt intraclastic reservoirs were formed by erosion and redeposition of *in situ* carbonate deposits, essentially constituted of fascicular and spherulitic calcite aggregates, associated with magnesian clay matrix, ooids and peloids. Intraclastic reservoirs show large thickness and extension, and excellent quality in the Búzios Field of the Santos Basin. The objective of this study was to characterize the diagenetic processes and their relationships among each other and with the primary constituents, as well as with the porosity of the intraclastic calcarenites and calcirudites in two wells in the Búzios Field, in order to understand the impact of diagenesis on the quality of these reservoirs. Diagenetic evolution models were proposed based on the quantitative petrographic analysis of 81 thin sections, combined with petrophysical data. Diagenetic processes occurred heterogeneously, decreasing, preserving, or increasing porosity. Dolomitization and silicification were the main replacement and cementation processes. At least two phases of silica occur: fibrous chalcedony covering or replacing

the particles and surrounding the pores, and macrocrystalline quartz filling the remaining pores. Dolomite occurs predominantly as blocky zoned crystals, replacing particles, and as cement in interparticle pores. Saddle dolomite occurs filling vugular pores, associated with macrocrystalline calcite, analcime, and barite. The original pore system was affected by the dissolution of primary and diagenetic constituents, cementation, replacement, and heterogeneously by physical and chemical compaction processes, controlled by early dolomite cementation and primary textural variation. Even with these diagenetic changes affecting their pore systems, the intraclastic intervals correspond to the highest and vertically continuous values of porosity in petrographic analyses and magnetic resonance logs. Understanding the characteristics, controls, and distribution of porosity in the intraclastic rocks of the Búzios Field is crucial to optimize the production from the field, as well as from equivalent reservoirs in other pre-salt areas.

Keywords: diagenesis, porosity, intraclastic rocks, Barra Velha Formation.

Introdução

Depósitos lacustres intraclásticos são comumente pouco espessos, quando comparados à depósitos similares formados em ambientes marinhos (Olsen, 1990; Olariu et al., 2021). A limitação da espessura em ambientes lacustres se dá pelas distâncias restritas que o vento e as ondas atuam em corpos lacustres. De forma distinta, os depósitos lacustres de calcarenitos e calcirruditos intraclásticos do Pré-sal da Bacia de Santos apresentam significativas espessuras (localmente em escala decamétrica) e extensão (Barnett et al., 2021). Além disso, reservatórios intraclásticos da Formação Barra Velha no Campo de Búzios apresentam excelentes valores de porosidade e permeabilidade, porém padrões heterogêneos e anisotrópicos (Ferreira et al., 2019; Tavares dos Santos & Gordon, 2021).

A Formação Barra Velha é limitada na sua base pela discordância Pré-Alagoas, que separa as seções rifte e pós-rifte ('sag'; Moreira et al., 2007). A discordância também separa sistemas lacustres distintos registrados pelos depósitos essencialmente bioclásticos da Formação Itapema ("coquinas"), e depósitos essencialmente químicos, originalmente interpretados como "microbialitos", da Formação Barra Velha (Barnett et al., 2021). As principais fácies dos depósitos químicos caracterizam-se pela ocorrência de filossilicatos magnesianos, agregados fasciculares e esferulitos de calcita (Wright & Barnett, 2015).

Os depósitos intraclásticos nesta unidade foram gerados pela ressedimentação de fragmentos dos agregados fasciculares e esferulitos de calcita, oóides e pelóides de argilominerais magnesianos, e outros materiais associados (Carramal et al., 2022). Nos últimos anos, vários estudos relacionados à gênese dos depósitos *in situ* da seção Pré-sal foram publicados (Wright & Rodriguez, 2018; Lima & De Ros, 2019; Gomes et al., 2020; Carramal et al., 2022; Wright, 2022; Schrank et al., 2024). No entanto, os depósitos intraclásticos, que constituem importantes reservatórios do Pré-sal, como no Campo de Búzios, foram muito pouco estudados (Altenhofen et al., 2024).

Além das características deposicionais das rochas intraclásticas (fácies, seleção, distribuição, espessura) serem favoráveis para as ótimas propriedades de reservatório registradas (Tavares dos Santos & Gordon, 2021), a evolução diagenética também atuou na preservação ou aumento da porosidade, embora de forma heterogênea. As modificações diagenéticas dos depósitos *in situ* do Pré-sal são

abordadas em diversos trabalhos, porém poucos buscaram entender a heterogeneidade dos depósitos retrabalhados (Medeiros et al., 2024). O objetivo desta pesquisa é compreender como as alterações diagenéticas ocorrem nestas rochas e como impactaram seu sistema poroso.

Metodologia

A metodologia utilizada para entender os controles diagenéticos na qualidade dos reservatórios intraclásticos compreendeu a caracterização petrográfica quantitativa de 81 lâminas delgadas dos poços 9-BUZ-1-RJS e 9-BUZ-2-RJS do Campo de Búzios (Fig. 1). As composições modais foram obtidas por meio da contagem de 300 pontos por lâmina, seguindo transectas perpendiculares à estrutura deposicional da rocha. As amostras retrabalhadas foram classificadas de acordo com o sistema De Ros & Oliveira (2023) para os depósitos do Pré-sal. Oito amostras foram examinadas com epifluorescência UV para caracterizar remanescentes orgânicos e argilosos, relações diagenéticas e zonações cristalinas. Os dados petrográficos foram sistematicamente adquiridos e armazenados no sistema Petroledge® (De Ros et al., 2007), integrados a registros geofísicos e litológicos, a fim de identificar padrões e correlações entre características petrográficas, sedimentológicas e de qualidade do reservatório.

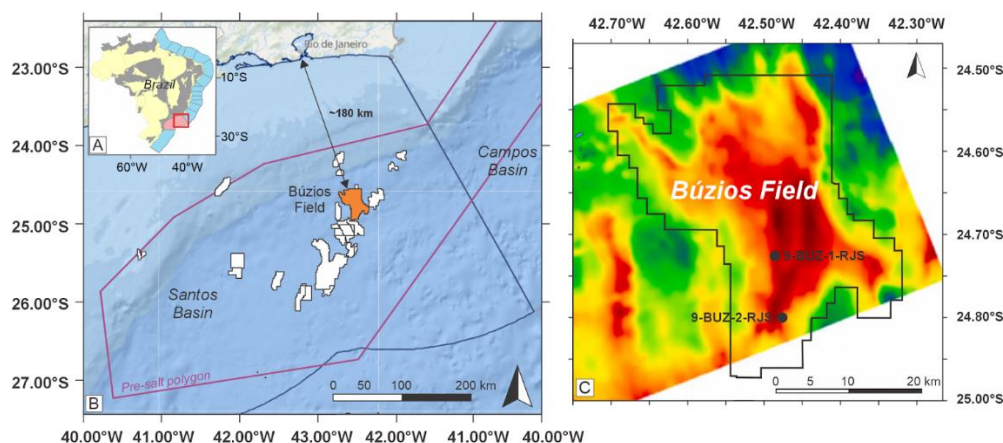


Figura 1. (A) Localização da Bacia de Santos na margem leste brasileira. (B) Localização do Campo de Búzios (laranja) na Bacia de Santos, a cerca de 180 km da cidade do Rio de Janeiro. Outros campos em branco. (C) Localização dos poços de estudo (9-BUZ-1-RJS e 9-BUZ-2-RJS) no Campo de Búzios (modificada de Siqueira et al., 2024)

Resultados e Discussão

As rochas redepositadas dos poços 9-BUZ-1-RJS e 9-BUZ-2-RJS correspondem a calcirruditos, calcirruditos arenosos, calcarenitos rudáceos, calcarenitos levemente rudáceos e calcarenitos (*sensu* De Ros & Oliveira, 2023; Fig. 2), maciços ou irregularmente laminados. Além disso, as rochas redepositadas incluem arenitos peloidais e rochas híbridas formadas pela mistura de intraclastos carbonáticos com pelóides e oóides argilosos (composição híbrida carbonática-silicática) e rochas laminadas formadas pela intercalação de níveis de partículas carbonáticas com níveis de crostas carbonáticas singenéticas precipitadas *in situ*.

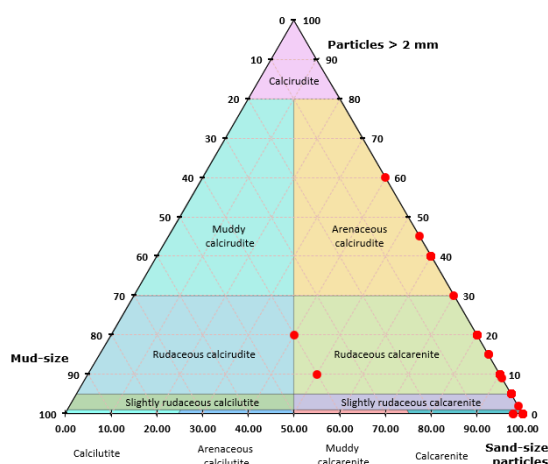


Figura 2. Classificação textural para as rochas intraclásticas estudadas segundo o sistema proposto por De Ros & Oliveira (2023).

Os pelóides e os envelopes argilosos dos oóides ocorrem completamente substituídos por calcita microcristalina. Os envelopes originalmente argilosos dos oóides foram parcialmente erodidos pelo retrabalhamento, e descolados dos núcleos carbonáticos por contração da argila na eodiagênese ou durante compactação (Fig. 3), além de parcialmente dissolvidos (Fig. 4A e 4D). Sob altas taxas de vazão dos fluidos durante a produção dos calcarenitos, esses fragmentos dos envelopes dos oóides podem migrar, bloqueando as gargantas dos poros. A composição original da argila magnesiana dos envelopes (Carramal et al., 2022) não foi preservada nas amostras analisadas. Contatos suturados e fraturamento das partículas nos pontos de contato interpartícula são também comuns, evidenciando que os processos de compactação foram importantes nessas rochas.

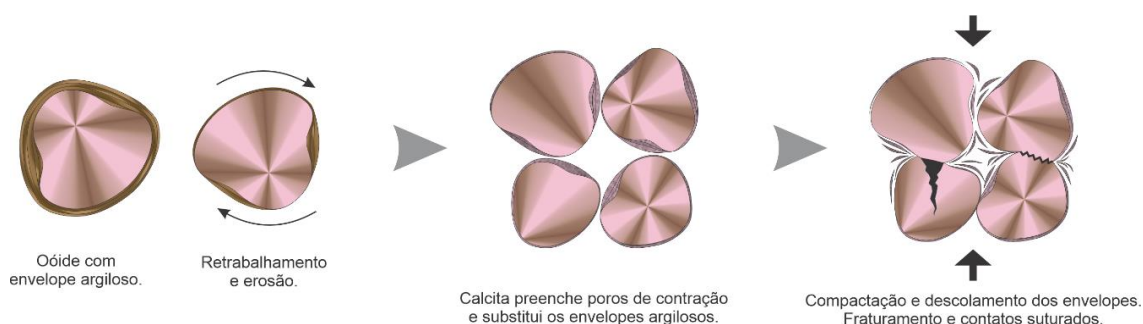


Figura 3. Modelo de evolução diagenética dos oóides originalmente argilosos.

Além da compactação, os calcarenitos e calcirruditos intraclásticos são comumente afetados por dissolução, dolomitização, silicificação e cimentação por calcita, pirita, barita, fluorita, zeolita (analcima), dawsonita e caulinita. A dolomita é o principal constituinte diagenético, e ocorre predominantemente substituindo os constituintes primários. Constituintes fortemente substituídos são vistos apenas como fantasmas, localmente com restos de calcita dos grãos originais. Pelóides argilosos foram amplamente substituídos por dolomita microcristalina. Dolomita blocosa e em sela ocorre preenchendo parcial ou totalmente os espaços interpartícula antes da compactação. Rochas com cimentação parcial apresentam porosidade primária preservada entre os cristais de dolomita (Fig. 4B). Outras amostras apresentam cimentação dolomítica abundante, com pouca preservação da porosidade (Fig. 4E). A dolomita em sela ocorre preenchendo poros vulgares, frequentemente associada à barita, dawsonita, analcima e fluorita. A dolomita em sela é uma fase carbonática característica de altas

temperaturas, entre 60 e 150°C equivalente à janela de óleo, característica de ambiente de soterramento profundo ou ambientes hidrotermais (Radke & Mathis, 1980). A calcita é o segundo constituinte diagenético mais abundante nas amostras analisadas. Os intraclastos são comumente cobertos por franjas de calcita blocosa. Além disso, a calcita comumente ocorre preenchendo os poros como fase tardia com hábito blocoso e macrocristalino.

A sílica ocorre como criptocristalina, quartzo e calcedônia. A sílica criptocristalina comumente substituiu restos de matriz argilosa laminada. Quartzo microcristalino, macrocristalino, prismático e calcedônia se concentram no topo da Formação Barra Velha no poço 9-BUZ-2-RJS. O quartzo muitas vezes substituiu completamente as partículas, dificultando ou impossibilitando a identificação de composição original. Corpos de sílica pré-compactação tabulares e ovais descritos no trabalho de Pereira et al. (2023) nos campos de Sapinhoá e Búzios correspondem às fases eodiagenéticas (sílica criptocristalina, quartzo microcristalino e calcedônia). Diferentes formas de sílica ocorrem preenchendo os poros vulgares, da borda para o centro, compreendendo: franjas de calcedônia, franjas de quartzo microcristalino, franjas de quartzo prismático e quartzo drusiforme preenchendo os poros. O quartzo macrocristalino tem a sua formação relacionada à diagênese em alta temperatura dos reservatórios pré-sal, muitas diretamente pela precipitação a partir de fluidos hidrotermais (Lima et al. 2020).

Poros não totalmente preenchidos por sílica foram comumente preenchidos por fases minerais tardias como dolomita em sela, barita e calcita macrocristalina. Minerais tardios identificados como hidrotermais (e.g., por Lima et al., 2020) incluem barita, dawsonita, fluorita, zeolita, caulinita/dickita, dolomita em sela e calcita macrocristalina. Esses minerais ocorrem preenchendo poros interpartícula, vulgares e de fratura. A barita ocorre em hábitos prismáticos e macrocristalinos. A caulinita/dickita ocorre em seis amostras próximas, em característico hábito de *booklets*. Zeolita (analcima) e fluorita apresentam hábitos macrocristalinos ou blocosos. Dawsonita ocorre como cristais aciculares dispostos radialmente.

O sistema poroso das rochas redepositadas é constituído principalmente por porosidade interpartícula, intrapartícula e vulgar. Tipos de poros menos representativos incluem poros inter- e intracristalinos, móldicos, de fratura, e de contração. A dissolução dos intraclastos é o principal processo de criação de porosidade secundária, porém tendendo a gerar porosidade móldica não conectada aos espaços interpartícula em rochas intensamente silicificadas ou dolomitizadas (Fig. 4C). A porosidade vulgar e de fratura é abundante nas rochas intensamente silicificadas, o que altera completamente o sistema poroso original (Fig. 4F). A porosidade intercristalina é importante em rochas intensamente dolomitizadas, onde os espaços entre os cristais de dolomita passam a controlar o sistema poroso.

Conclusões

- As rochas intraclásticas do Pré-sal são importantes reservatórios na Bacia de Santos, comumente apresentando boa qualidade de reservatório. Apesar das boas propriedades de reservatório originais das rochas intraclásticas, os processos diagenéticos impactam sua qualidade e determinam sua heterogeneidade.
- Além da compactação, a cimentação e a substituição por sílica e dolomita são os principais processos diagenéticos que impactaram a qualidade dos reservatórios.

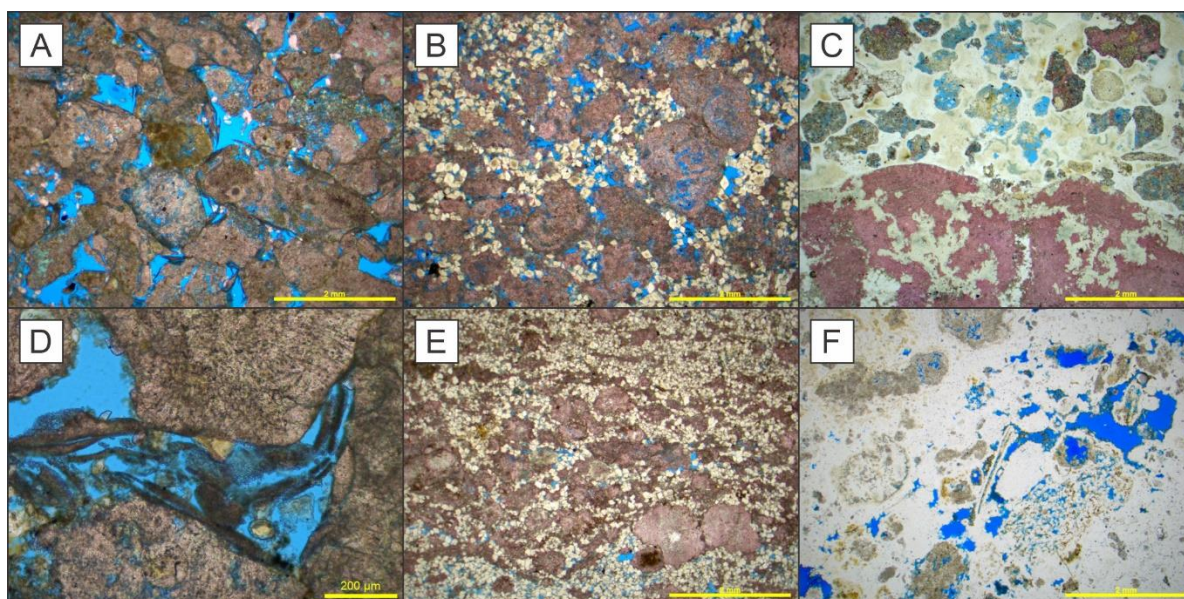


Figura 4. Principais aspectos diagenéticos que afetam o sistema poroso das rochas intraclásticas estudadas. Todas fotos adquiridas com polarizadores descruzados. (A) Calcarenito rudáceo ooidal-intraclástico compactado. (B) Calcarenito parcialmente cimentado por dolomita blocosa. (C) Contato entre crosta singenética de calcita fascicular e calcarenito intensamente silicificado com porosidade móldica. (D) Detalhe dos envelopes descolados dos núcleos dos oóides. (E) Calcarenito intensamente dolomitizado. (F) Calcarenito intensamente silicificado com porosidade essencialmente vugar.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e financiamento ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP). Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo suporte para realização do doutorado. Ao IPR-PUCRS pelo suporte e parceria na obtenção das análises de epifluorescência.

Referências Bibliográficas

- ALTENHOFEN, Sabrina D.; RODRIGUES, Amanda G.; BORGHI, Leonardo; ROS, Luiz F. de. Dynamic re-sedimentation of lacustrine carbonates in the Búzios Field, pre-salt section of Santos Basin, Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 138, p. 104863, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104863>.
- BARNETT, A.J.; OBERMAIER, M.; AMTHOR, J.; SHARAFODIN, M.; BOLTON, M.; CLARKE, D.; CAMARA, R. Chapter 6: origin and significance of thick carbonate grainstone packages in nonmarine successions. **Memoir 124: The Supergiant Lower Cretaceous Pre-Salt Petroleum Systems of the Santos Basin, Brazil**, [S.L.], p. 155-174, 2021. AAPG. <http://dx.doi.org/10.1306/13722318msb.6.1853>.
- CARRAMAL, Nívea G.; OLIVEIRA, Daniel M.; CACELA, Alessandra S.M.; CUGLIERI, Matheus A.A.; ROCHA, Natasha P.; VIANA, Samuel M.; TOLEDO, Sérgio L.V.; PEDRINHA, Saulo; ROS, Luiz F. de. Paleoenvironmental insights from the deposition and diagenesis of Aptian pre-salt

magnesium silicates from the Lula Field, Santos Basin, Brazil. **Journal Of Sedimentary Research**, [S.L.], v. 92, n. 1, p. 12-31, 11 jan. 2022. Society for Sedimentary Geology. <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2020.139>.

DE ROS, L.F., GOLDBERG, K., ABEL, M., VICTORETTI, F., MASTELLA, L., CASTRO, E. Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir rocks using the PETROLEDGE® system. In: AAPG Annual Convention and Exhibition. Long Beach, California, Expanded Abstracts, p. 6, 2007.

DE ROS, Luiz Fernando; OLIVEIRA, Daniel M.. An operational classification system for the South Atlantic pre-salt rocks. **Journal Of Sedimentary Research**, [S.L.], v. 93, n. 10, p. 693-704, 23 out. 2023. Society for Sedimentary Geology. <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2022.103>.

LIMA, Bruno Eustáquio Moreira; TEDESCHI, Leonardo Ribeiro; PESTILHO, André Luiz Silva; SANTOS, Roberto Ventura; VAZQUEZ, Joselito Cabral; GUZZO, Jarbas Vicente Poley; ROS, Luiz Fernando de. Deep-burial hydrothermal alteration of the Pre-Salt carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil: evidence from petrography, fluid inclusions, sr, c and o isotopes. **Marine And Petroleum Geology**, [S.L.], v. 113, p. 104143, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104143>.

MEDEIROS, Renato Sol Paiva de; BASSO, Mateus; CHINELATTO, Guilherme F.; SOARES, Marcus Vinícius Theodoro; MATHEUS, Gabriela F.; MORALES, Juan Francisco Villacreses; MENDES, Luiza de Carvalho; VIDAL, Alexandre Campana. Unravelling the origin of reworked deposits in Aptian lacustrine carbonate reservoirs of the Santos Basin, SE Brazil. **Marine And Petroleum Geology**, [S.L.], v. 161, p. 106700, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106700>.

MOREIRA, Jobel Lourenço Pinheiro; MADEIRA, Cláudio Valdetaro; GIL, João Alexandre; MACHADO, Marco Antonio Pinheiro. Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 531-549, 2007. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/354>.

PEREIRA, Tainá P.; TERRA, Silvia; SILVA, Douglas Renato da; PIRES, Gustavo L.C.; RIBEIRO, Andre. Distribution of silicification intervals throughout the Barra Velha and Itapema formations: host rock controls and chronology of silica precipitation (pre-salt, santos basin, brazil). **Journal Of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 128, p. 104446, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104446>.

RADKE, Bruce M.; MATHIS, Robert L.. On the Formation and Occurrence of Saddle Dolomite. **Sepm Journal Of Sedimentary Research**, [S.L.], v. 50, p. 1149-1168, 1980. Society for Sedimentary Geology. <http://dx.doi.org/10.1306/212f7b9e-2b24-11d7-8648000102c1865d>

SIQUEIRA, Raissa; FETTER, Marcos; CETALE, Marco. Structural geology and deformation analysis in the Búzios-Itapu area, Santos Basin — offshore Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 134, p. 104779, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104779>.

TAVARES DOS SANTOS, P.; GORDON, A.C.. Chapter 14: Búzios field. **Memoir 124: The Supergiant Lower Cretaceous Pre-Salt Petroleum Systems of the Santos Basin, Brazil**, [S.L.], p. 375-394, 2021. AAPG. <http://dx.doi.org/10.1306/13722365msb.14.1853>.