

ANÁLISE MULTIESCALAR DOS DEPÓSITOS FLUVIAIS DA FORMAÇÃO JAICÓS, BACIA DO PARNAÍBA

Mariah Metzner¹ ; Manoela Bettarel Bállico² ; Monica Oliveira Manna² ; Allan Ataide Ribeiro dos Santos¹ ;
Iara Frangiotti Mantovani³ ; Anderson Camargo Moreira⁴ 

1 - Laboratório de Geologia de Reservatórios, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil. E-mail:

mariahmetzner@hotmail.com

2 - Laboratório de Geologia de Reservatórios, Programa de Pós-Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil.

3 - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina.

4 - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina

Abstract: Braided fluvial deposits, such as the Jaicós Formation, Serra Grande Group, Parnaíba Basin, represent important aquifers and reservoirs that possess distinct properties due to different lithologies. Multiscale analysis of these deposits is an important tool for estimating fluid behavior within the reservoir. This study proposes a multiscale analysis, correlating petrophysical and petrographic parameters with architectural elements of the Jaicós Formation, through the characterization of identified deposits from a Digital Outcrop Model (DOM), correlated with three-dimensional images obtained by X-ray computed microtomography and thin sections. The correlation of architectural elements – gravel bars, simple and compound downstream accretion element, and sand bedforms – revealed significant variations in porosity and permeability, influenced by depositional facies and diagenetic processes. While gravel and downstream accretion element exhibit fair to good porosity and excellent permeability, sand bedforms have insignificant porosity and low permeability due to the high cementation identified in the samples, causing this element to act as a flow barrier. Petrographic analysis showed that the rocks are predominantly quartz arenites with indications of diagenetic processes, including intense mechanical compaction, cementation by iron oxides-hydroxides, clay infiltration, and authigenic clay formation, resulting in a drastic reduction of primary porosity. Secondary porosity, generated by feldspar dissolution and quartz grain fracturing, occurs locally and is generally filled with clays. The results indicate that, although the Jaicós Formation presents intervals of good porosity and permeability, internal heterogeneity and diagenetic processes control reservoir compartmentalization.

Keywords: Reservoir Heterogeneities; Multi-scale analysis; Jaicós Formation. Parnaíba Basin.

1. INTRODUÇÃO

A Formação Jaicós compreende a unidade superior do Grupo Serra Grande, Siluriano da Bacia do Parnaíba, depositada em um complexo sistema fluvial entrelaçado (Góes e Feijó, 1994; Vaz et al., 2007; Assis et al., 2019; Manna et al., 2021).

Esta unidade representa um importante reservatório de água subterrânea, compondo uma das unidades hidroestratigráficas do Aquífero Serra Grande (Andrade et al., 2003), e faz parte de um sistema petrolífero especulativo, o Tianguá-Jaicós (Cioccari; Mizusaki, 2019). Esta unidade apresenta heterogeneidades em várias escalas e o seu estudo constitui uma importante fase na caracterização de unidades análogas de reservatórios (Miall, 1996), que ainda carece deste tipo de análise, o que impede a compreensão da evolução desse sistema e suas heterogeneidades, apesar da Formação Jaicós possuir afloramentos amplos e lateralmente

contínuos. Estas informações podem auxiliar as campanhas de perfuração, assim como na modelagem do reservatório.

O objetivo geral deste trabalho foi obter dados quantitativos de porosidade e permeabilidade da área na Figura 1, através da análise de imagens obtidas pela técnica de microtomografia computadorizada 3D, analisar os impactos diagenéticos sobre as propriedades permoporosas, e correlacioná-las com elementos arquiteturais identificados na seção estratigráfica e no Modelo Virtual de Afloramento (MVA) da Formação Jaicós a fim de realizar considerações sobre as heterogeneidades de micro- a mesoescala. Como objetivos específicos têm-se: (i) obter análise quantitativa da porosidade e permeabilidade das rochas reservatórios e possíveis barreiras de fluxos (baffles) e; (ii) definir as heterogeneidades multiescalar dos depósitos fluviais da Formação Jaicós.

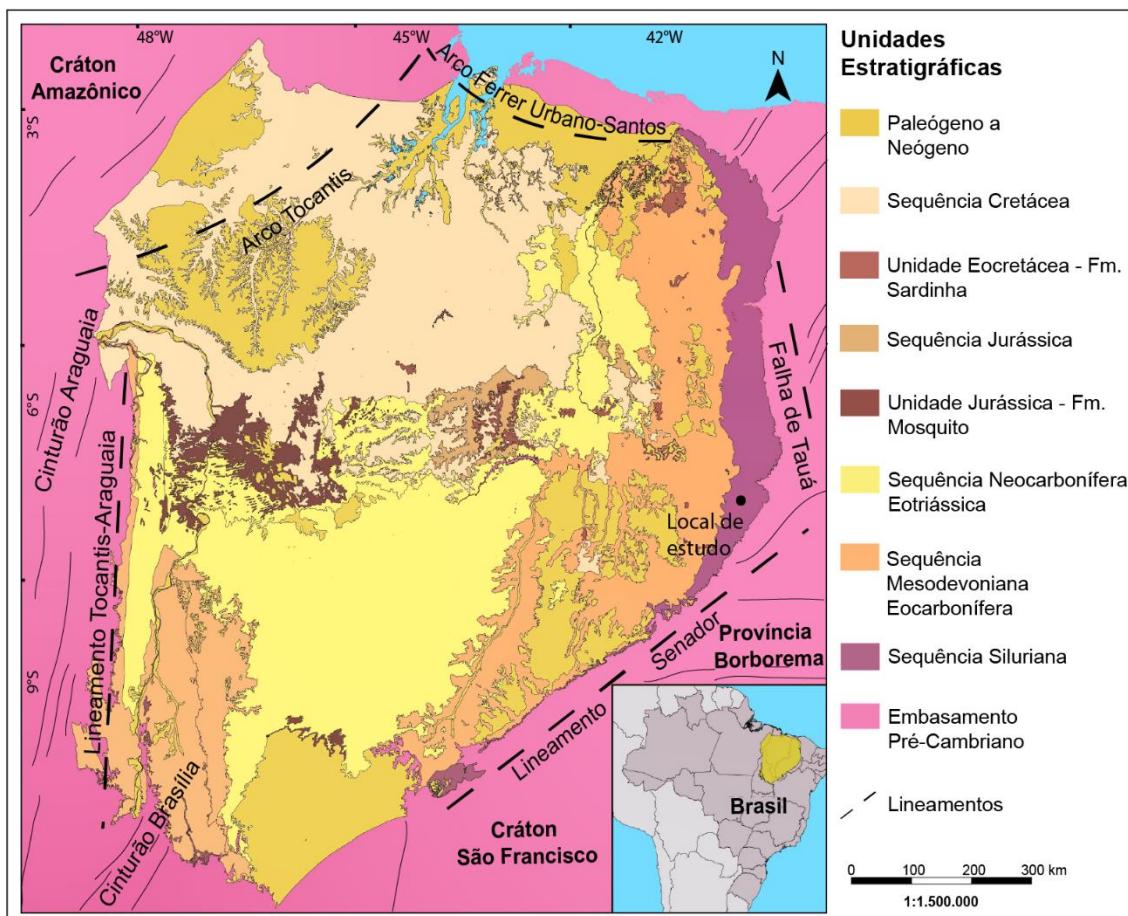


Figura 1. Mapa de localização e geológico da área de estudo no contexto da Bacia do Parnaíba. Fonte: adaptado de Manna et al., 2021.

2. METODOLOGIA

A metodologia consistiu em três fases: descrição em campo, laboratório e análise de dados. Na etapa de descrição em campo foi levantada a seção estratigráfica em escala 1:50, coleta de amostras e aquisição de imagens para geração de um Modelo Virtual de Afloramento (MVA) a partir de um afloramento em escarpa no município de Massapê do Piauí, Piauí. O MVA é um modelo tridimensional fotorrealístico georreferenciado de uma superfície geológica exposta, obtido em campo por meio da utilização de Veículos Aéreos Não-Tripulados. Desta forma, permite a descrição e interpretação de afloramentos de grande extensão e de difícil acesso (Roinseberg et al., 2022). A cidade de Massapê do Piauí foi selecionada devido a excelentes exposições da Formação Jaicós. Na etapa de laboratório foi realizada a geração do MVA, confecção de lâminas delgadas e aquisição de imagens 3D pela técnica de microtomografia computadorizada de raios X. O procedimento permite a visualização tridimensional do interior de materiais, determinada por variações de densidade ao serem atravessados por um feixe de raios X. É uma técnica não destrutiva, que requer mínimo preparo da amostra, obtida de forma rápida e eficaz (Palombo et al., 2015). O processamento das imagens envolveu a determinação de uma região de interesse, filtragem para redução de ruídos e segmentação dos espaços vazios para posterior determinação da porosidade e permeabilidade. As imagens foram obtidas no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Petrofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina (LMPT-UFSC) pelo equipamento Zeiss/Xradia, modelo Versa XRM –

500. O processamento se deu no software Avizo 8.0 e C3DE, este último desenvolvido no LMPT-UFSC; para determinação da porosidade e extração da rede de poros para simulação da permeabilidade através de imagem binarizada, respectivamente. Nesta etapa foram confeccionadas seis lâminas delgadas e impregnadas com resina epoxy azul para análise qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa contou com a descrição petrográfica por meio de microscopia convencional para determinação da textura (granulometria, arredondamento e seleção dos grãos), composição mineralógica, porosidade (primária e secundária), grau de empacotamento e classificação. A análise quantitativa foi elaborada a partir da contagem modal de 300 pontos de cada uma das seis lâminas. Esse processo foi realizado com o auxílio do software Petroledge. Os valores encontrados foram normalizados para porcentagens de quartzo-feldspato-líticos (QFL) e plotados no diagrama triangular de classificação de rochas segundo Folk (1980). Na última fase, foram analisados os dados petrofísicos e petrográficos das seis amostras, e correlacionados com os elementos arquiteturais identificados no MVA.

3. RESULTADOS

Com a análise e descrição do MVA (Figura 2), aliado à seção colunar estratigráfica (Figura 3) foi possível identificar quatro elementos arquiteturais, que possuem propriedades petrofísicas distintas, sendo elas: (1) barras cascalhosas, (2) barras de acresção frontal simples e (3) composta, e (4) formas de leito arenosas.

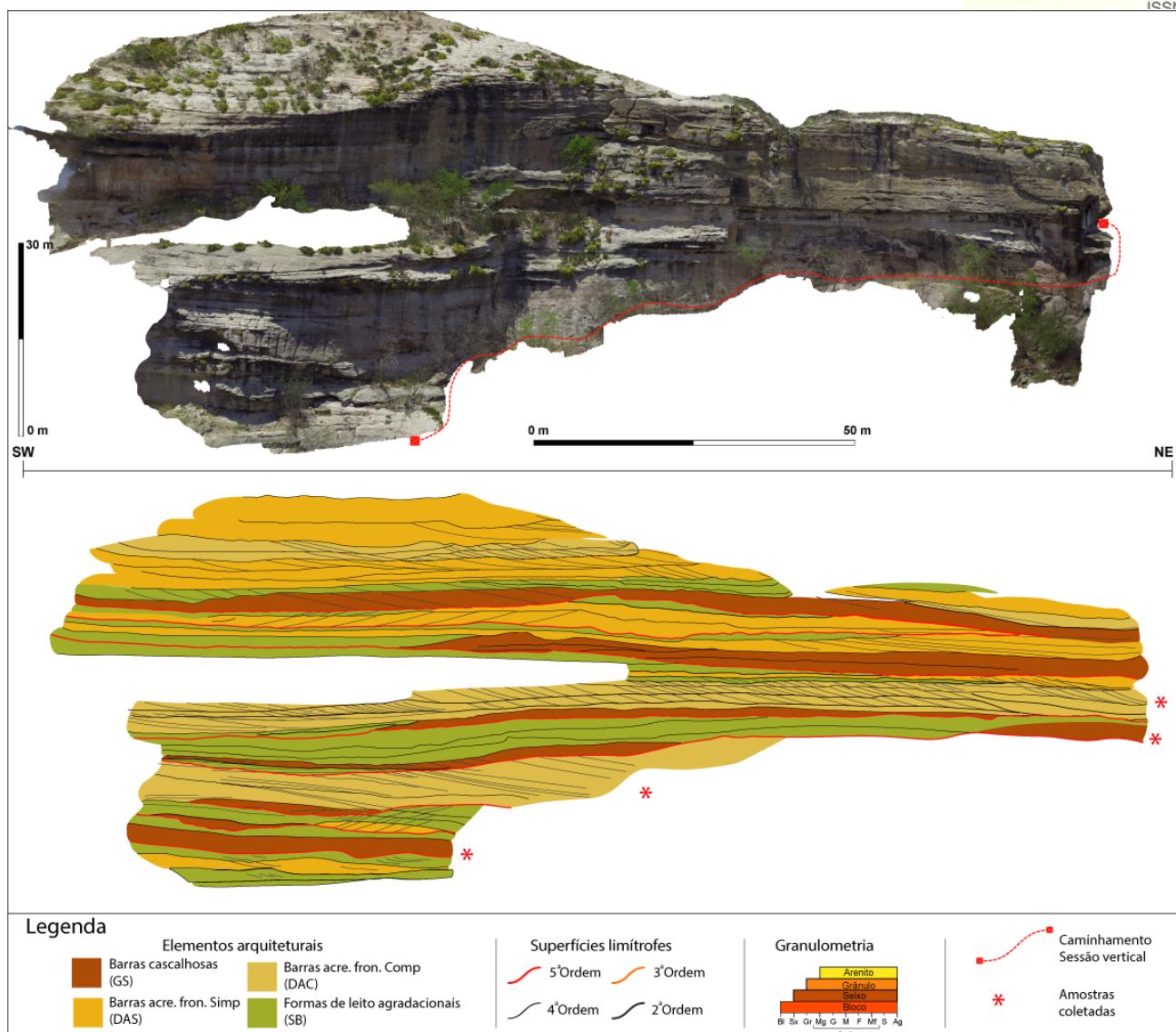


Figura 2. Modelo Virtual de Afloramento da Formação Jaicós e sua interpretação destacando os elementos arquiteturais definidos. Fonte: Dos Autores.

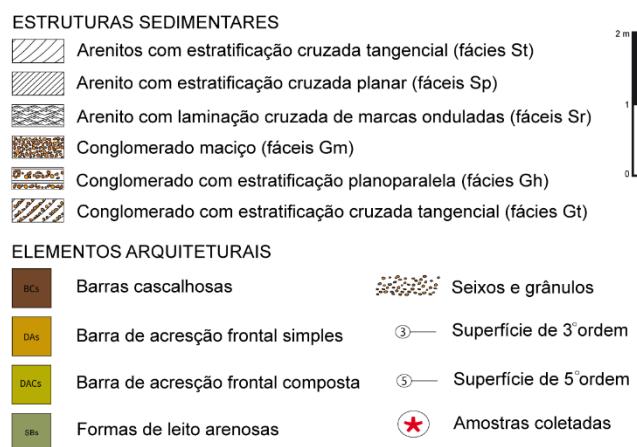
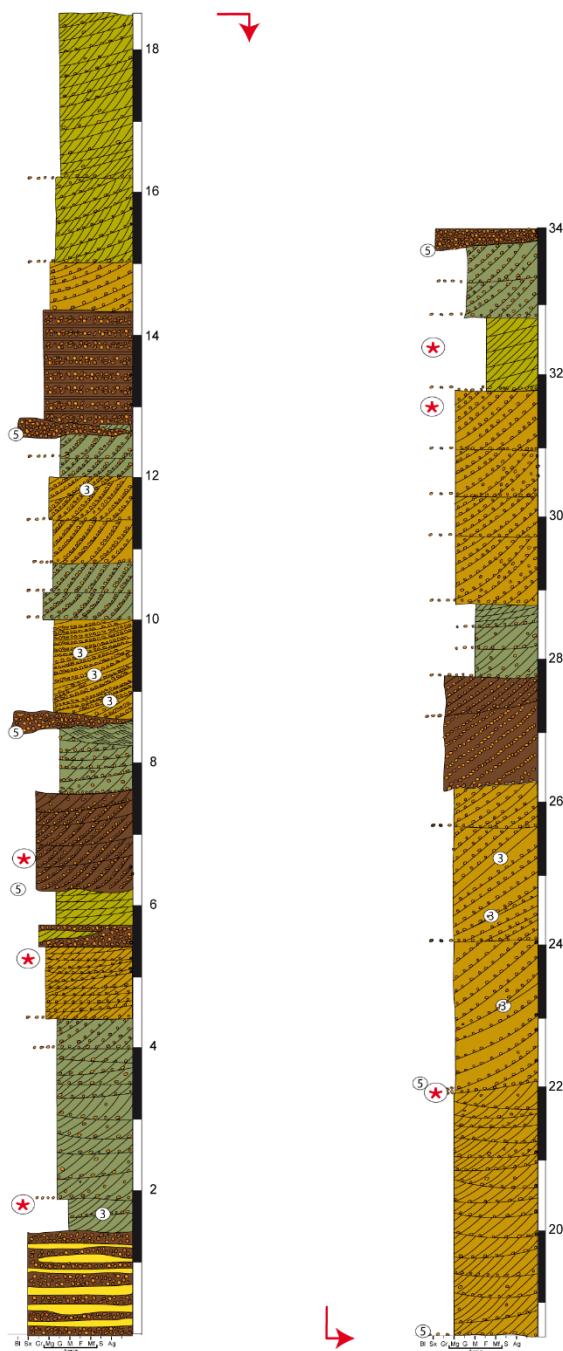


Figura 3. Seção colunar da Formação Jaicós representando as principais fácies e elementos arquiteturais do sistema fluvial entrelaçado. Fonte: Dos Autores.

As barras cascalhosas (Figura 4) são compostas por conglomerados clasto-suportados a arenosos, com estratificação cruzada tangencial (Gt) e horizontal (Gh), e conglomerados maciços (Gm). Apresentam espessuras variando de 0,20 a 1,5 metros, com geometria tabular a lenticular. Esses depósitos representam início de preenchimento de canal. Dados petrofísicos revelaram que este elemento possui porosidade regular a boa, e permeabilidade excelente. A

deposição deste elemento arquitetural ocorre por carga de fundo na forma de barras cascalhosas ou lençóis cascalhosos com baixo relevo. Desenvolve-se no leito do canal fluvial quando há uma rápida variação na descarga de sedimentos, migrando de forma paralela ao fluxo. A presença de conglomerados sugere um fluxo de alta energia (Miall, 1996).

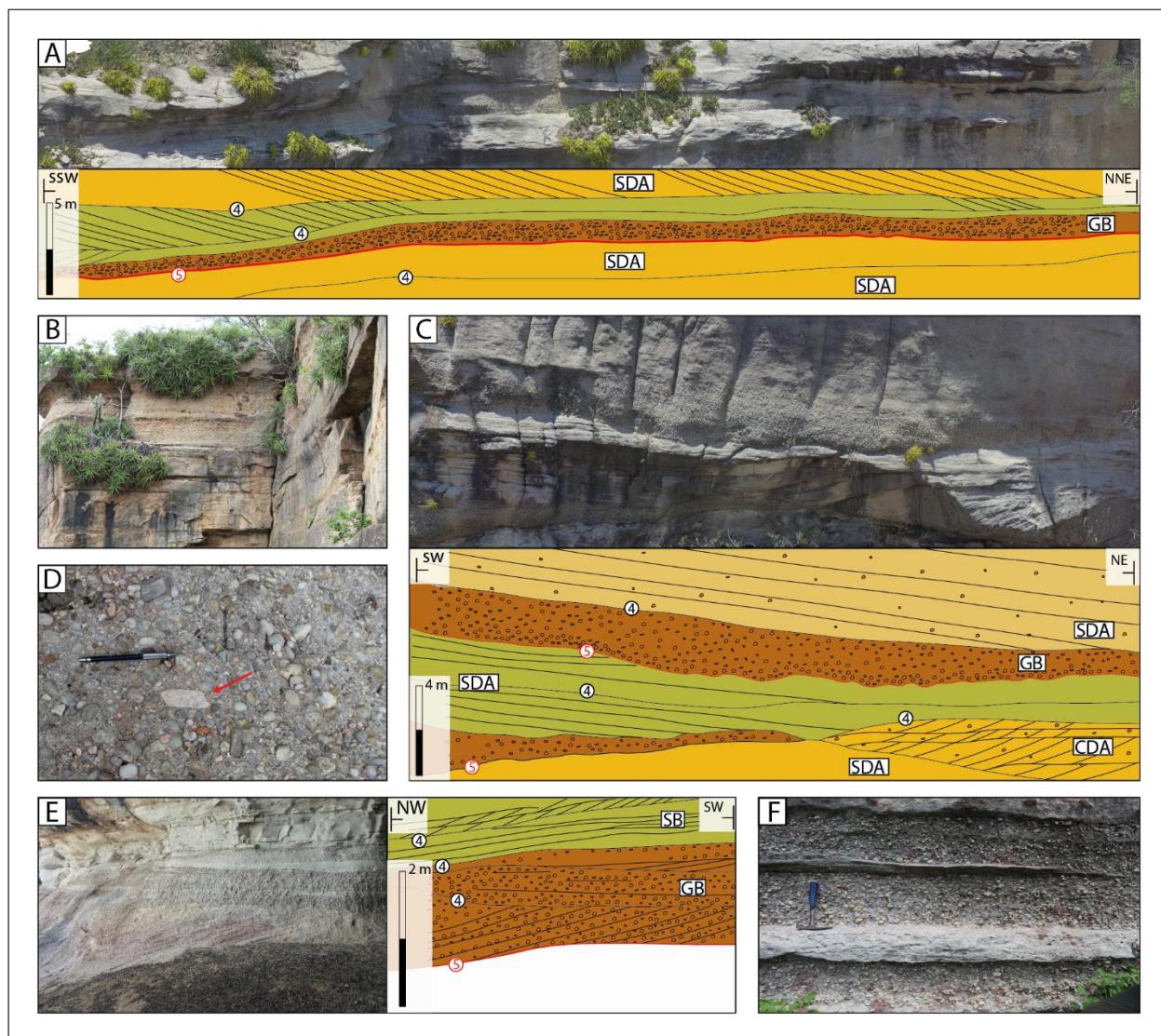


Figura 4. Elemento arquitetural: barras cascalhosas (GB). (A) Fotomosaico do MVA e sua interpretação mostrando uma geometria tabular. (B) É comum encontrar GB com geometria tabular. (C) Ortomosaico do MVA e sua interpretação destacando geometria lenticular. (D) Foto de incomum intraclasto. (E) Foto de litofácies Gt. (F) Internamente pode se encontrar depósitos arenosos lenticular. Fonte: dos Autores.

As barras de acresção frontal simples (Figura 5) são compostas de arenito grosso a conglomerático, com ocorrência de grânulos e seixos dispersos, apresentando estratificação cruzada tangencial (St) e planar (Sp). Apresentam geometria tabular ou lenticular, e espessuras variando de 0,53 a 3,42 metros. Esses depósitos foram interpretados como barras de meio de canal. Ocorrem superfícies de reativação internas. É uma forma de leito interpretada como produto da migração de barras arenosas com

uma face frontal bem desenvolvida, cuja migração se dá em direção ao fluxo, indicando variações na descarga fluvial de sedimentos. A presença de superfícies de reativação internas reflete variações locais na força da corrente, além de variações no aporte sedimentar (Miall, 1996). O processamento de imagens do microtomógrafo mostraram que este elemento apresenta porosidade boa com permeabilidade excelente.

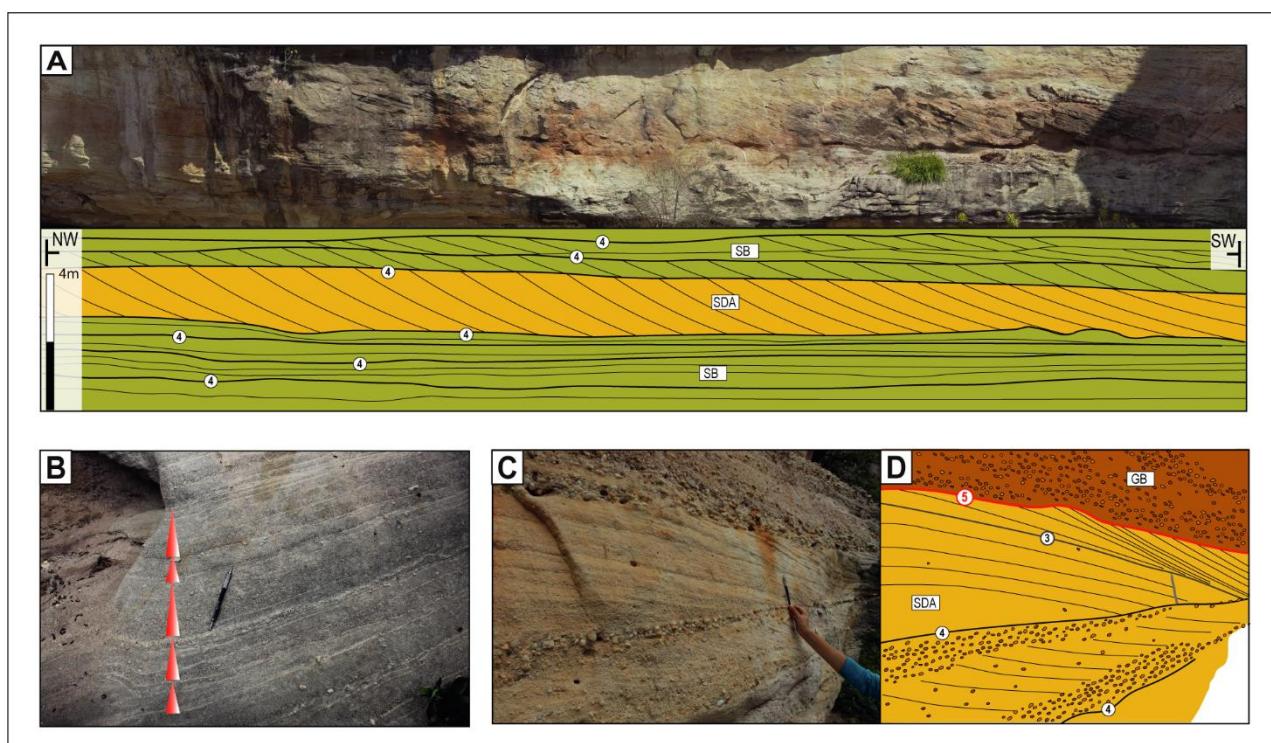


Figura 5. Elemento arquitetural: Barras de acresção frontal simples (SDA). (A) Fotomosaico do MVA e sua interpretação mostrando geometria tabular. (B) Gradação normal no foresets de estratificação cruzada. (C) Detalhe de superfícies de 3º ordem identificado entre os sets com estratificação cruzada. Fonte: dos Autores.

O elemento arquitetural de barra de acresção frontal composta (Figura 6) apresenta arenitos médios a grossos, com estratificação cruzada tangencial (St). Ocorrem dispostos em geometria tabular, com espessuras variando de 0,23 a 2,20 metros, representativos de elementos de meio de canal. Segundo Miall (1996), são formas de leitos que possuem dunas avançando em sua superfície. É um elemento arquitetural semelhante às barras de meio de canal. A

presença de estratos cruzados, como St, indicam a migração de dunas 3D, com crista sinuosa, provavelmente desenvolvendo-se ao longo da crista ou na frente da barra que migraram na mesma direção de fluxo, ao longo do canal fluvial (Miall, 1996). A porosidade deste elemento arquitetural se mostrou boa, com excelente permeabilidade.

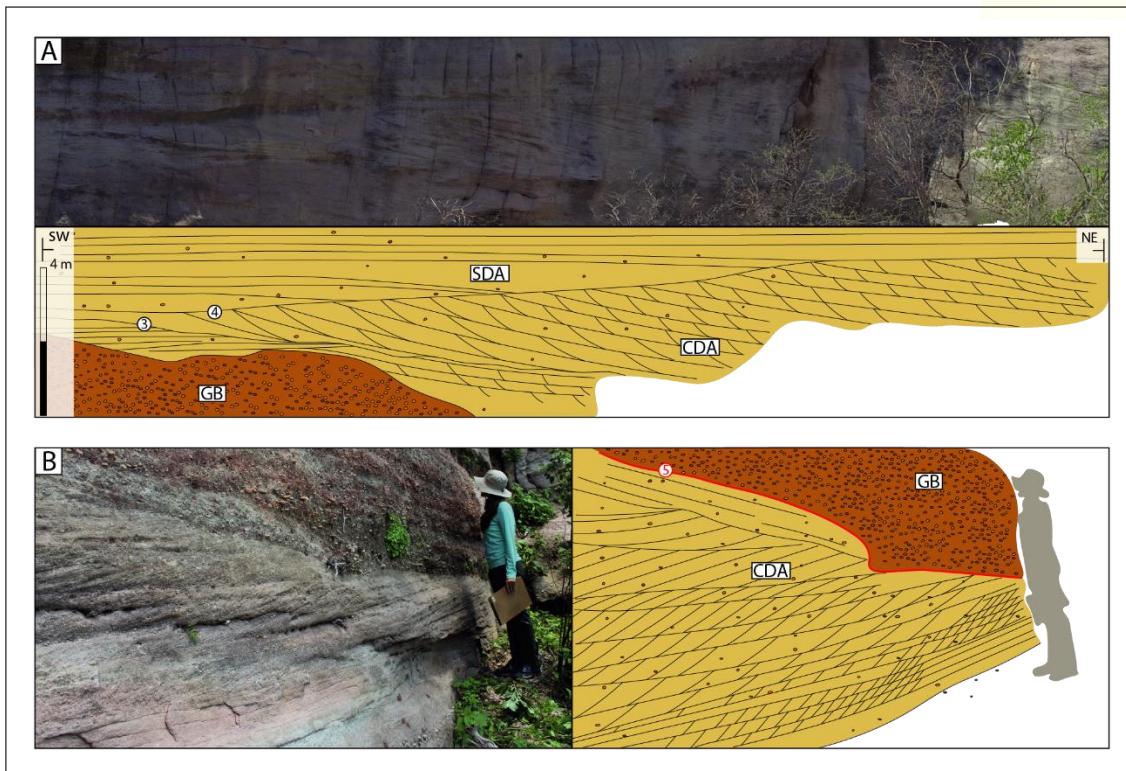


Figura 6. Elemento arquitetural: Barras de acresção frontal composta (CDA). (A) Fotomosaico obtido de MVA e sua interpretação destacando a geometria lenticular dos elementos. (B) Interpretação do CDA e suas litofácies. Fonte: dos Autores.

As formas de leito arenosas (Figura 7) representam arenitos finos a grossos com estratificação cruzada tangencial (St), planar (Sp) e laminações cruzadas de marcas onduladas (Sr). Apresenta geometria tabular, de espessura variando de 0,26 a 0,84 metros, e são interpretados como final de preenchimento de canal. Este elemento pode ser interpretado como sequências de formas de leito individuais que se formaram por agradação vertical associada a migração e cavalgamento de dunas subaquosas. A ocorrência de estruturas com estratificação cruzada tangencial (St) e planar (Sp) sugerem a migração de dunas subaquosas 3D e 2D, respectivamente, que podem representar depósitos acumulados na parte

profunda dos canais fluviais, e estruturas de estratos cruzados menores podem representar formas de leito de pequeno porte ocorrendo em zonas mais rasas dos canais, particularmente no topo das barras. Indicam mudanças de longo ou curto prazo no regime de fluxo (Miall, 1996). O processamento de imagens do microtomógrafo de raios X mostrou que este elemento arquitetural apresentou porosidade insignificante e permeabilidade baixa, causado pela alta cimentação observada na amostra. Essas características sugerem que este elemento arquitetural desempenha função importante dentro do Aquífero, podendo ser considerado uma barreira de fluxo.

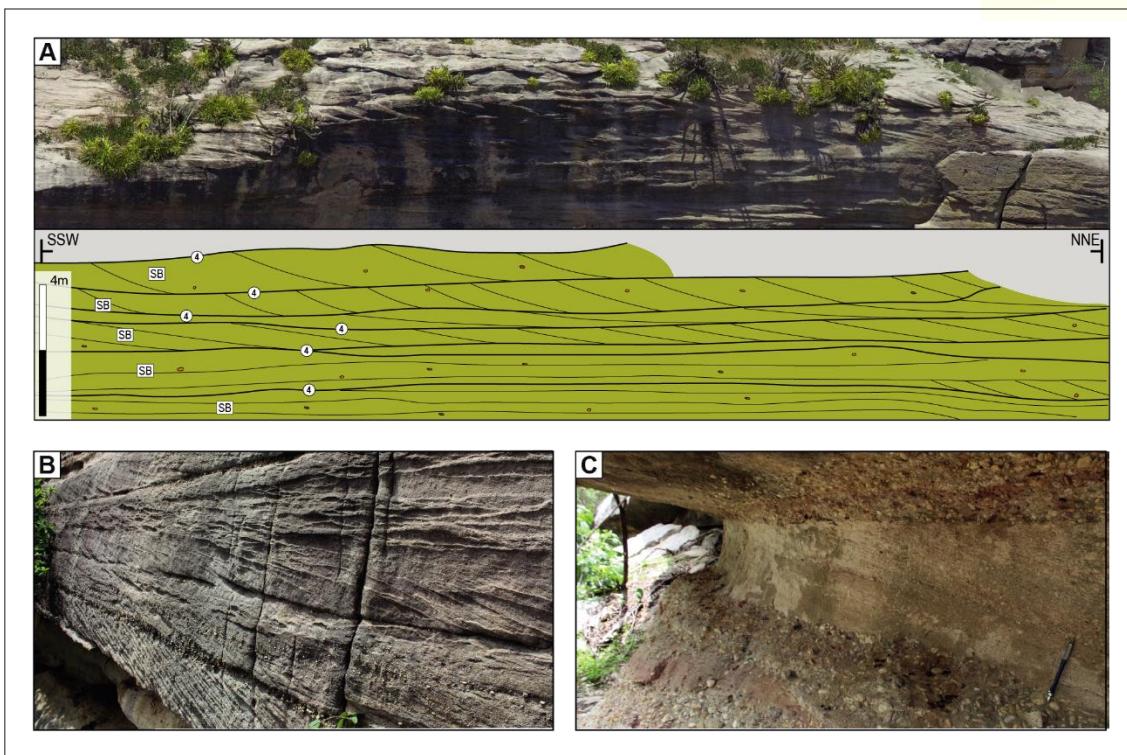


Figura 7. Elemento arquitetural: Formas de leito arenosas (SB). (A) Fotomosaico retirado de MVA e a interpretação dos SBs. (B) Detalhe de estratificação cruzada tangencial. (C) Detalhe de estratificação cruzada planar. Fonte: dos Autores.

As rochas analisadas apresentam laminações incipientes quando vistas em amostra de mão, e estrutura maciça na análise microscópica. Com relação a composição, as rochas são compostas predominantemente por quartzo monocristalino, quartzo policristalino subordinado, feldspato dissolvido ou alterado, muscovita como mineral acessório, minerais pesados isolados, além de alguns fragmentos líticos (ver Figura 8). Quanto aos estágios diagenéticos foi possível observar os processos eodiagenéticos, considerando um elevado volume de argilas infiltradas e autigênicas, principalmente nas barras cascalhosas e nas barras de acresção frontal composta, além dos processos mesodiagenéticos com a compactação mecânica (micas retorcidas e grãos fraturados) e

química (contatos côncavo-convexos predominantes e suturados), mais evidentes nas barras de acresção simples e nas formas de leito arenosas. Além da formação de cimentos de óxido-hidróxido de ferro recobrindo os grãos associado a processos telodiagenéticos. As amostras de rocha da Formação Jaicós foram classificadas como quartzoarenitos, e apresentam porosidade primária reduzida drasticamente pela compactação mecânica e pela cimentação diagenética. Em contrapartida, porosidade secundária foi observada, estando associada ao fraturamento mecânico dos grãos de quartzo e pela dissolução dos grãos de feldspatos geralmente preenchidas com argila infiltrada.

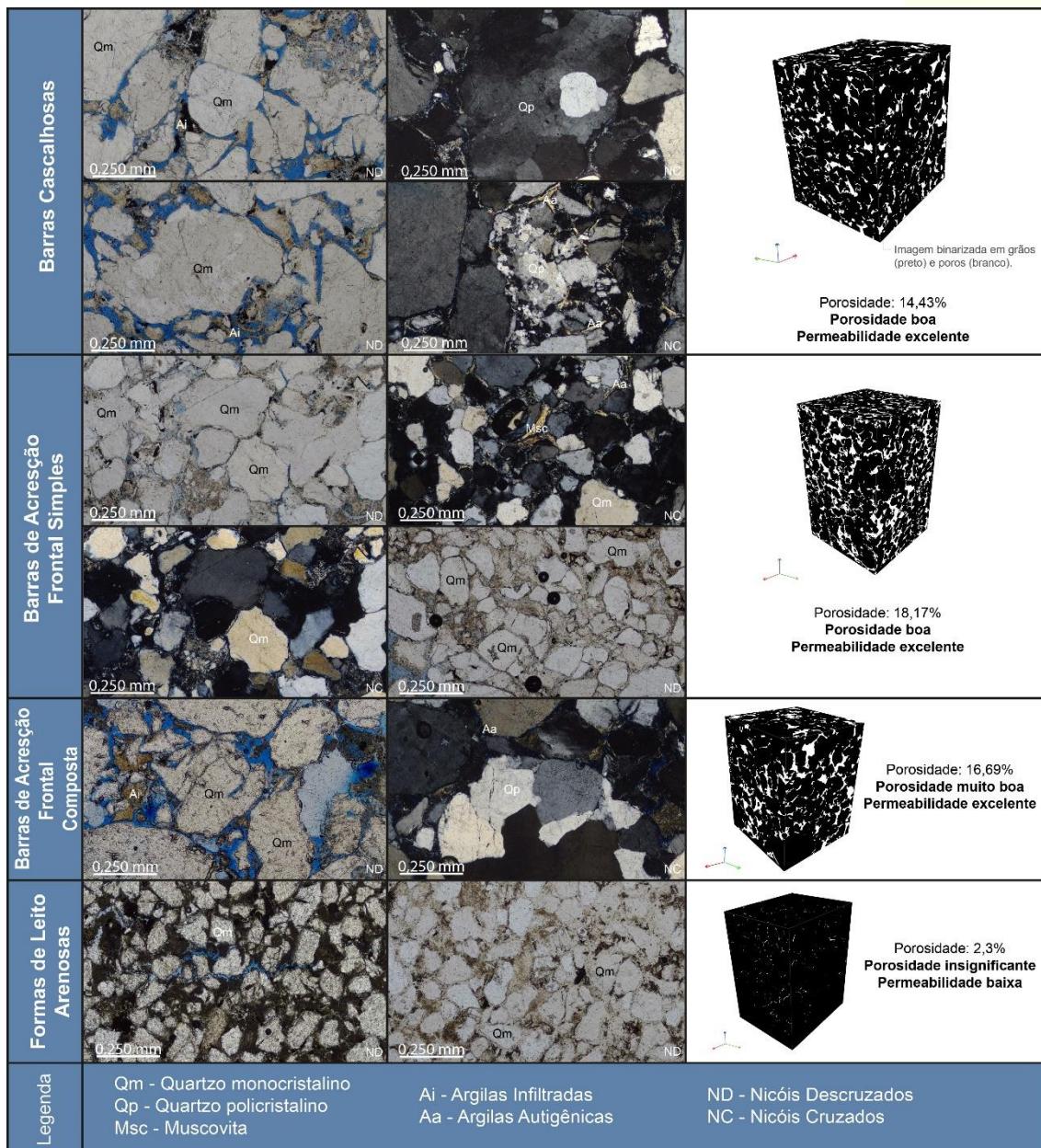


Figura 8. Tabela correlacionando elementos arquiteturais, análise petrográficas e propriedades petrofísicas. Fonte: dos Autores.

4. CONCLUSÃO

Com base nas propriedades petrofísicas dos depósitos fluviais entrelaçados da formação Jaicós é possível verificar que o reservatório possui em geral boa porosidade e excelente permeabilidade. Entretanto, o fato de ocorrer elementos arquiteturais com baixa permeabilidade e porosidade interfere na exploração do reservatório, o que é verificado pelos atributos petrográficos definidos. Os componentes diagenéticos observados em todos os elementos arquiteturais mostram que a porosidade primária foi reduzida

drasticamente pela compactação mecânica e pela cimentação diagenética. Em contrapartida, porosidade secundária é observada, estando associada ao fraturamento mecânico dos grãos de quartzo e pela dissolução dos grãos de feldspato geralmente preenchidas com argila infiltrada; evidenciando, portanto, a redução drástica nas propriedades permoporosas do reservatório. De modo que os arenitos e conglomerados da Formação Jaicós não se mostram boas rochas reservatórias.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Geologia de Reservatórios (LGR) e ao Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento por meio deste trabalho. A pesquisa contou com financiamento da Petrobras e com o apoio da infraestrutura disponibilizada pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), fundamentais para a realização dos experimentos e análises.

4. REFERENCES

ARONCHI, Daniela Goulios. Caracterização da porosidade e sua orientação preferencial em arenitos do Grupo Serra Grande (Bacia do Parnaíba-CE) com aplicação de nanopartículas de magnetita. 2017. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASSIS, A. P. et al. The Ordovician-Silurian tectono-stratigraphic evolution and paleogeography of eastern Parnaíba Basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 95, p. 102241, 2019.

BATISTA, Zenilda Vieira. Caracterização faciológica, petrográfica e diagenética das Sequências basais das bacias do Parnaíba, Araripe, São José do Belmonte e Lavras da Mangabeira: contribuição às possíveis correlações dos arenitos basais e suas implicações geotectônicas. 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia) – [Instituição não informada], 2015.

BOGGS JR, Sam. *Petrology of sedimentary rocks*. New Jersey: The Blackburn Press, 1992.

CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande-Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 1984.

CORREIA FILHO, F. L. et al. Aquífero Serra Grande: hidrogeologia e modelo tectônico – borda sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba – PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFORADORES DE POÇOS, 17., 2010. Anais [...]. [S.l.]: ABAS, 2010.

CIOCCARI, Giovani Matte; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. Sistemas petrolíferos atípicos nas bacias paleozoicas brasileiras – uma revisão. *Geociências* (São

Paulo), v. 38, n. 2, p. 367–390, 2019.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Aquífero Serra Grande: uso da água e forma de exploração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32., 2003, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: [s.n.], 2003.

FEITOSA, Fernando A. C. et al. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. 615 p.

GALLOWAY, William E. et al. Facies characterization of reservoirs and aquifers. In: *TERRIGENOUS CLASTIC DEPOSITIONAL SYSTEMS: APPLICATIONS TO FOSSIL FUEL AND GROUNDWATER RESOURCES*. p. 426–444, 1996.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, Flávio J. Parnaíba Basin; Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 8, p. 57–74, 1994.

MANNA, Monica Oliveira et al. Changes in fluvial architecture induced by discharge variability, Jaicós Formation (Silurian-Devonian), Parnaíba Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 420, p. 105924, 2021.

MANTOVANI, Iara Frangiotti. *Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos*. 2013. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MENZIES, L. A.; CARTER, Andrew; MACDONALD, David I. M. Evolution of a cratonic basin: insights from the stratal architecture and provenance history of the Parnaíba Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 472, n. 1, p. 157–179, 2018.

MIALL, Andrew. The facies and architecture of fluvial systems. In: MIALL, Andrew. *Fluvial depositional systems*. Toronto: Springer International Publishing, 2014. p. 9–68.

PALOMBO, Leandro et al. Caracterização de rochas reservatório por microtomografia de raios X. *HOLOS*, v. 5, p. 65–72, 2015.

PORTE, Adriana Lemos. Estimação de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares a partir de imagens

microtomográficas de raios-x. 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

UNITED NATIONS – UN WATER. Groundwater: making the invisible visible. The United Nations World Water Development Report, 2022.

SETTA, I. Caracterização petrográfica do Grupo Serra Grande (Siluriano) no Estado do Tocantins, borda oeste da Bacia do Parnaíba. 2010. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WATER, U. N. Groundwater: Making the invisible visible. The United Nations World Water Development Report, 2022.