

ANÁLISE FACIOLÓGICA E MORFOLÓGICA DAS ROCHAS HIPABISSAIS DA REGIÃO DE PICOS (PI), PORÇÃO LESTE DA BACIA PARNAÍBA

FACIES AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF HYPABYSSAL ROCKS IN THE PICOS REGION (PI), EASTERN PORTION OF THE PARNAÍBA BASIN

Felipe Mature Ribeiro da Silva ^{1*}, Carla Joana Santos Barreto ¹, Sara Gomes da Costa ¹ Jully Viviane de Albuquerque Alves ¹

¹ Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Avenida da Arquitetura s/n, Cidade Universitária, Recife - PE, 50.740-550, Brasil. *autor correspondente: e-mail: felipe.mature@ufpe.br.

<https://doi.org/10.51359/1980-8208.2024.264641>

RESUMO

A Bacia Parnaíba está localizada majoritariamente na região nordeste do Brasil, possui uma forma elíptica e uma área de aproximadamente 600.000 km², com depocentro alcançando mais de 3.000 m. Esta bacia foi palco de dois eventos magmáticos, sendo um mais antigo de idade jurássica e associado a Província Magmática do Atlântico Central (CAMP) e expressa na Bacia Parnaíba como a Formação Mosquito. O outro evento mais recente, gerou a Formação Sardinha, de idade cretácea, a qual é correlata por alguns autores à Província Magmática Paraná-Etendeka (PEMP). As rochas relacionadas à Formação Sardinha estão associadas a um complexo de soleiras, e por isso são menos aflorantes em comparação à Formação Mosquito. O objetivo deste trabalho consiste na caracterização da geometria dos corpos ígneos e análise de fácies pioneira de rochas intrusivas máficas aflorantes na porção leste da Bacia Parnaíba, região de Picos-PI, que serão suportadas por análises petrográficas. Sistemas ígneo-sedimentares são comuns no Brasil e o foco nas ocorrências ígneas podem ser uma ótima oportunidade para entender o papel de cada corpo magmático no sistema. Neste contexto, a utilização da análise faciológica se mostrou uma ferramenta muito útil na interpretação evolutiva destas rochas e no entendimento de *emplacement* em relação às rochas encaixantes. Durante este estudo, foi realizada petrografia microscópica de rochas intrusivas, representativas de seis perfis estratigráficos, e foi observado que a geometria principal para estas rochas é em formato de soleiras de médio a grande porte, sendo litologicamente aqui classificadas como diabásios e basaltos. Faciologicamente, estas rochas possuem estruturas de disjunções colunares, fraturamento por resfriamento e estrutura interna maciça. Texturalmente, estas rochas possuem características de resfriamento lento, típicos de rochas hipabissais, mas também apresentaram texturas relacionadas a perturbação de sistemas, comuns em ambientes vulcânicos rasos. Com base nas características descritas, e comparando com os dados da literatura, as rochas estudadas foram relacionadas a Formação Sardinha. A metodologia aplicada nas rochas intrusivas da região de Picos se mostrou uma ótima alternativa para se reconhecer e classificar as distintas rochas ígneas da Bacia Parnaíba, quando são ausentes informações estratigráficas ou datações geocronológicas.

Palavras-chave: análise de fácies; formação Sardinha; formação Mosquito; diabásio.

Recebido em 03/06/2024. Aprovado em 21/08/2024



Este artigo está sob uma [Licença Creative Commons 4.0 Internacional - CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ABSTRACT

The Parnaíba Basin is mainly located in the northeast region of Brazil, has an elliptical shape and an area of approximately 600,000 km², with a depocenter reaching more than 3,000 m. This basin was the site of two magmatic events, an older one of Jurassic age and associated with the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP), which occur in the Parnaíba Basin as the Mosquito Formation. The other more recent event generated the Sardinha Formation, of Cretaceous age, which is correlated by some authors with the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP). The rocks related to the Sardinha Formation are associated with a sill complex, and therefore are less outcropping compared to the Mosquito Formation. The objective of this work is to characterize the geometry of igneous bodies and analyze pioneer facies of mafic intrusive rocks outcropping in the eastern portion of the Parnaíba Basin, Picos-PI region, which will be supported by petrographic analyses. Igneous-sedimentary systems are common in Brazil and focusing on igneous occurrences can be a great opportunity to understand the role of each magmatic body in the system. In this context, the use of faciological analysis proved to be a very useful tool in the evolutionary interpretation of these rocks and in understanding emplacement in relation to the host rocks. During this study, microscopic petrography of intrusive rocks was carried out, representing six stratigraphic profiles, and it was observed that the main geometry for these rocks is in the shape of medium to large sills, being lithologically classified here as diabases and basalts. Faciologically, these rocks have structures of columnar disjunctions, cooling fracturing and massive internal structure. Texturally, these rocks have characteristics of slow cooling, typical of hypabyssal rocks, but they also presented textures related to system disturbance, common in shallow volcanic environments. Based on the characteristics described, and comparing with literature data, the rocks studied were related to the Sardinha Formation. The methodology applied to the intrusive rocks of the Picos region proved to be a great alternative to recognize and classify the different igneous rocks of the Parnaíba Basin when stratigraphic information or geochronological dating is absent.

Keywords: facies analysis; Sardinha formation; Mosquito formation; diabase.

1. INTRODUÇÃO

A colocação do magma em subsuperfície e na superfície (lava), é chamado de *emplacement*, e pode ser estudado com a finalidade de compreender a geometria de corpos, estilos eruptivos, movimentos de massas e até periodicidade dos episódios ígneos (Cox et al., 1979; McPhie et al., 1993).

Apesar do protagonismo das rochas sedimentares na indústria de exploração de hidrocarbonetos, as rochas ígneas vêm ganhando destaque nos últimos anos, como importantes agentes no setor petrolífero. O destaque destas rochas é reconhecido principalmente pelas ocorrências de intrusivas rasas e extrusivas, pois a depender do seu

emplacemnt, resfriamento e interação com as rochas encaixantes, há uma mudança nas suas características petrofísicas (Miranda, 2014; Cioccarri & Mizusaki, 2019). A contribuição deste tipo de rochas nos sistemas ígneo-sedimentar pode variar bastante, no caso de soleiras de diabásio com porosidade e permeabilidade baixa, podem atuar como excelentes trapas de hidrocarbonetos, entretanto, podem constituir rochas reservatórios de hidrocarbonetos, a depender da porosidade e permeabilidade (>40%) (Millet et al., 2024; Wang et al., 2024). Além disso, rochas intrusivas transportam calor, gerando uma auréola de contato e efeito térmico nas rochas encaixantes, possibilitando mudanças, como o craqueamento de matéria

orgânica (M.O), processo responsável pela geração de hidrocarboneto em rochas geradoras, como acontece na Formação Pimenteiras da Bacia Parnaíba (Góes & Feijó, 1994; Miranda, 2014).

Sabendo desta importância, o atual interesse na Bacia intracratônica Parnaíba na questão de sistemas de hidrocarbonetos não convencionais, está relacionada ao fato de que houve dois grandes eventos magmáticos nesta bacia, vinculados à abertura dos oceanos Atlântico Norte e Atlântico Sul. Estes eventos, intitulados Penatecaua e Paraná-Etendeka, foram responsáveis por gerar as formações Mosquito e Sardinha, respectivamente (Moore, 1961; Aguiar, 1971; Peate, 1997; Thomaz Filho et al., 2000; Mizusaki et al., 2002; Martins et al., 2008; Thomaz Filho et al., 2008; Rossetti et al., 2014; Marzoli et al., 2019; Gomes & Vasconcelos, 2021).

A distinção destas formações na Bacia Parnaíba, é em geral realizada através das características geográficas, petrológicas e geocronológicas (Sial, 1976; Oliveira et al., 2018; Fornero et al., 2023). A parte oeste da bacia é a área de maior concentração da Formação Mosquito, enquanto na parte leste, predomina a Formação Sardinha (Bellieni et al., 1990; Marzoli, 1999; De Min et al., 2003). A Formação Mosquito é mais reconhecida pelos derrames e fluxos de lava, enquanto na Formação Sardinha predominam geometria de soleiras (Oliveira et al., 2018; Macedo Filho et al., 2023). Estudos geocronológicos de datações absolutas em K-Ar nos basaltos têm apontado para idades entre 100 a 140 Ma para a Formação Sardinha e 160 a 200 Ma para a Formação Mosquito (Sial, 1976), sugerindo que dois processos magmáticos diferentes teriam ocorrido durante o Mesozoico (Aguiar et al., 1971).

Não obstante, os estudos na Bacia Parnaíba se concentrarem nas rochas

sedimentares e em alguns poucos aspectos das rochas ígneas, são ausentes os estudos com foco na geometria dos corpos e na análise faciológica das unidades hipabissais aflorantes. Além disso, poucos estudos desenvolvidos em bacias brasileiras têm correlacionado a análise de fácies com a análise textural e mineralógica detalhada, levando em consideração as porções de base, núcleo e topo dos corpos ígneos (Barreto et al. 2014; Rossetti et al., 2014; Marins et al., 2022).

Em virtude da carência de informações detalhadas sobre as rochas hipabissais da porção leste da Bacia Parnaíba, este trabalho tem como objetivo caracterizar a morfologia dos corpos ígneos aflorantes na região de Picos-PI, e realizar de forma pioneira uma caracterização de fácies detalhada das rochas básicas intrusivas, a qual será suportada por aspectos mineralógicos e texturais. Pretende-se com a aplicação desses métodos, uma melhor compreensão do comportamento do magma que influenciou no *emplacement* das intrusões na porção leste da Bacia Parnaíba.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia Parnaíba cobre cerca de 600.000 km² com uma espessura de 3.500 m de profundidade no seu depocentro (Pereira et al., 2012) e abrange parte dos Estados do Pará e Tocantins na região Norte, e os Estados da Bahia, Piauí, Ceará e Maranhão como representantes da região Nordeste (Vaz et al., 2007; Cioccarì & Mizusaki 2019) (Figura 1). Segundo Almeida & Carneiro, (2004) a bacia referida teria se desenvolvido no momento de estabilização da plataforma Sul-Americana).

Durante a abertura do Oceano Atlântico Sul, um evento de extensos derrames basálticos que atingiram principalmente a região sul da plataforma Sul-Americana e a região sudoeste da África, foi denominado Província Magmática Paraná-Etendeka (Bellieni et al., 1984a; Ewart et al., 2004). Segundo alguns autores, este evento magmático afetou também a Bacia Parnaíba, embora de maneira menos intensa, gerando a Formação Sardinha, cujas rochas ocorrem principalmente sob a forma de enxames de diques e em menor ocorrência soleiras (Aguiar, 1971; Goés & Feijó, 1994; Marzoli, 1999; Vaz et al., 2007; Thomaz Filho et al., 2008). Para esta formação é atribuída uma idade Eocretácea, cujas datações estão próximas a 130 Ma (Baski & Archibald, 1997; Thomaz Filho et al., 2000; Ngonge et al., 2016).

3. MÉTODOS

Para este estudo foi realizado um mapeamento para a região de Picos (PI), onde também foram incluídos os municípios de Paquetá, Wall Ferraz, Santa Cruz do Piauí e Oeiras. Ao todo, foram mapeados seis afloramentos, identificados aqui como, PI-02, PI-05, PI-06, PI-07, PI-34 e PI-40. Os afloramentos estudados foram majoritariamente em cortes de estradas, e ao longo de drenagens, embora também tenham sido visitados afloramentos em duas mineradoras (PI-05; PI-34 a oeste de Picos).

Durante a etapa de campo foram construídos seis perfis estratigráficos, em escala de afloramento, em que se

4. RESULTADOS

Durante a etapa de campo foi possível reconhecer três unidades (Figura 2), sendo elas, a Formação Pimenteiras, nas proximidades da cidade de Picos-PI, a Formação Cabeças a oeste da cidade, e

priorizou a descrição da geometria do corpo, tamanho e estruturas internas, além de caracterização granulométrica e mineralógica, objetivando uma caracterização detalhada da base, núcleo e topo das rochas intrusivas. Posteriormente, os perfis foram processados e digitalizados.

Ao longo da construção dos perfis estratigráficos foi utilizado o método de litofácies vulcânicas (McPhie et al., 1993; Jerram, 2002), metodologia comum na área da sedimentologia (Miall, 1982; Miall, 2000) adaptado para as rochas subvulcânicas na região de Picos, o qual consistiu na caracterização de seis litofácies. Para a caracterização destas litofácies definiu-se um código de litofácies, cujas letras maiúsculas indicam a litologia e as letras minúsculas subsequentes representam as estruturas vulcânicas presentes.

Na etapa pós-campo foram confeccionadas quatro lâminas delgadas para análise petrográfica, cujo objetivo consistiu na identificação mineral e reconhecimento das texturas diagnósticas dos processos magmáticos. A petrografia foi realizada utilizando um microscópio petrográfico de marca Olympus BX3, instalado no Laboratório de Microscopia Óptica, no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco. As fotomicrografias foram obtidas utilizando o microscópio óptico a luz refratada de marca e modelo ZEISS Axio Scope.A1, instalado no Laboratório de Geoquímica Aplicada do Petróleo e Energia (LGAPE) do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG) na UFPE.

as rochas magmáticas atribuídas a Formação Sardinha, ocorrendo localmente na região central. Os afloramentos da Formação Pimenteiras são constituídos de intercalações centimétricas a decimétricas de arenitos finos, siltitos e argilitos de coloração roxa.

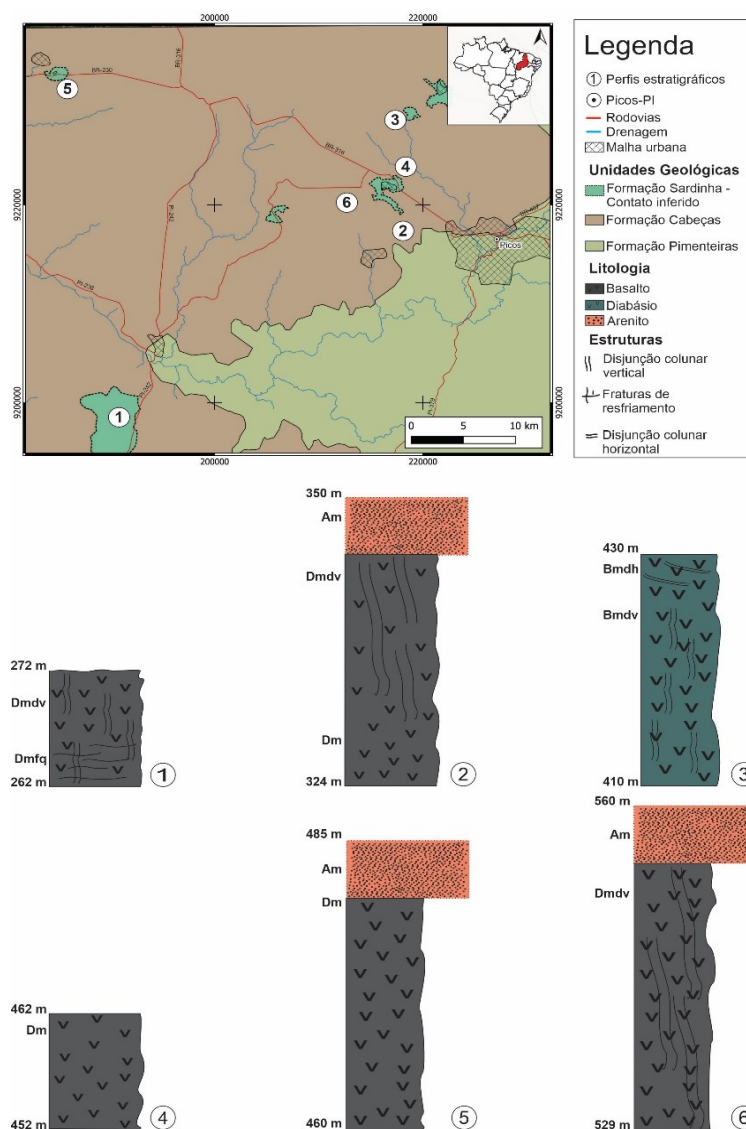


Figura 2. Mapa de ocorrências das rochas ígneas com a localização dos perfis estratigráficos. Fonte: Modificado de Angelim et al. (2004).

A Formação Cabeças foi a unidade litológica mais abundante durante o campo, ocorrendo por toda a área a oeste de Picos-PI, com uma morfologia bastante acidentada espalhada por toda a região. Essa unidade é constituída por arenitos médios a grossos, com estrutura maciça, embora, alguns afloramentos apresentam estratificação plano-paralela à cruzada com gradação normal, sendo estas não detalhadas aqui.

Em relação às rochas ígneas básicas, foram mapeadas diversas ocorrências de diabásios e uma de basalto (PI-40). Algumas rochas desta formação ocorrem em contato abrupto com os arenitos da Formação Cabeças, enquanto

em outros afloramentos não é possível observar contato geológico com as formações sedimentares.

4.1. Análise de Litofácies

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram construídos seis perfis estratigráficos (Figura 2), sendo quatro localizados na porção leste da área, um na parte noroeste e outro na porção sudoeste. A partir dos levantamentos de dados de campo, foram descritas sete litofácies, sendo seis referentes às rochas ígneas (Bmdv, Bmdh, Dmfq, Dmdv, Dm) e uma referente à rocha sedimentar (Am). Todas essas fácies foram organizadas em uma tabela de litofácies (Tabela 1), cujos

códigos definidos indicam a litologia e a textura e/ ou estrutura. Na tabela também foi acrescentada uma coluna para a interpretação do processo responsável

pela formação de cada litofácies. Os perfis estratigráficos e as respectivas fotografias mesoscópicas das litofácies são mostradas nas Figuras 3 a 8.

Tabela 1. Tabela de litofácies definidas na área de estudo. Fonte: Autores.

Código da litofácies	Litofácies	Interpretação
Bmdv	Basalto maciço com disjunção colunar vertical	Resfriamento rápido e homogêneo de corpo ígneo com fraturamento regularmente espaçado em um padrão prismático que se orienta perpendicularmente às frentes de resfriamento.
Bmdh	Basalto maciço com disjunção colunar horizontal	Resfriamento rápido e homogêneo de corpo ígneo com fraturamento regularmente espaçado em um padrão prismático que se orienta perpendicularmente às frentes de resfriamento.
Dmfq	Diabásio maciço com fraturas de resfriamento <i>quenching</i>	Resfriamento rápido e homogêneo de corpo ígneo com bordas sistematicamente fraturadas nas direções horizontais e verticais produzindo grandes blocos de rocha.
Dmdv	Diabásio maciço com disjunção colunar vertical	Resfriamento relativamente mais lento e homogêneo de corpos mais espessos e/ou confinados com fraturamento regularmente espaçado em um padrão prismático que se orienta perpendicularmente às frentes de resfriamento.
Dm	Diabásio maciço	Resfriamento relativamente mais lento e homogêneo de corpos mais espessos e/ou confinados.
Am	Arenito maciço	Rocha sem estrutura de deposição.

4.1.1. Aspectos de campo

O afloramento PI-02 localizado na região de Wall Ferraz, sudoeste de Picos, na vila Carnaúba da Forquilha é um extenso lajedo associado a uma soleira (Figura 3B) que se estende em direção a cidade de Santa Cruz do Piauí, com dimensões de 4 m (Figura 3C) alcançando 10 m de altura (Figura 3A). Observam-se estruturas de disjunções colunares

verticais (Dmdv) de diâmetros métricos e fraturas horizontais *quenching* (Dmfq) (Figura 3C). Macroscopicamente trata-se de um diabásio subfanerítico de coloração cinza escura, cuja rocha possui granulação fina a média e mineralogia consistindo em cristais de plagioclásio e piroxênio, imersos em uma matriz afanítica. Além disso, as rochas estão bastante alteradas, com presença de esfoliação esferoidal (Figura 3D).

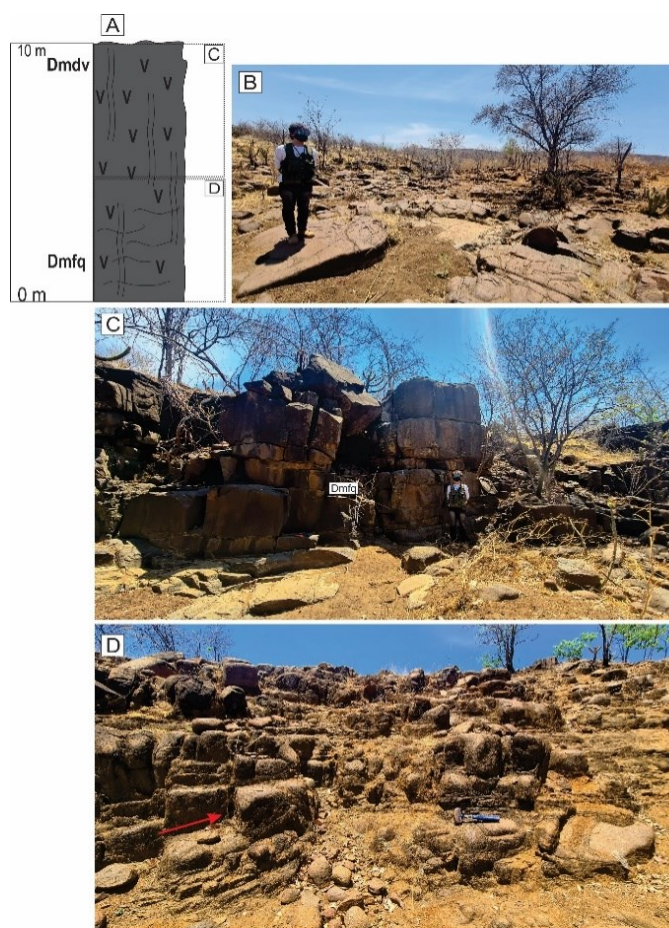


Figura 3. A) Perfil estratigráfico PI-02 apresentando diabásio maciço com disjunção colunar vertical (Dmdv) e fraturas horizontais de resfriamento (Dmfq). B) Visão geral do afloramento, cujas rochas ocorrem na forma de lajedo. C) Afloramento de diabásio apresentando estrutura interna maciça e as disjunções colunares verticais (Dmdv), além das fraturas de resfriamento quenching (Dmfq). D) Feição de esfoliação esferoidal (evidenciada pela seta vermelha) devido ao intenso intemperismo físico. Fonte: Autores.

O afloramento PI-05 está localizado na mineradora a oeste de Picos, e se trata de um corpo na forma de soleira (Figura 4B), com altura ultrapassando 20 metros em alguns locais (Figura 4A) e lateralmente se estende por quase 60-70 m. A base da soleira é caracterizada por apresentar rochas de coloração cinza claro com estrutura maciça (Dm), textura subfanerítica com granulação fina a média (Figura 4C) e mineralogia composta por plagioclásio com hábitos tabuliformes a ripiformes, bem como piroxênio de hábito colunar.

O núcleo e topo dos afloramentos são caracterizados por conter diabásios de coloração cinza claro, e estrutura

maciça, apresentando disjunções colunares (Dmdv), cujos diâmetros variam de centimétricas a decimétricas (Figura 4D). A textura destas rochas é subfanerítica com granulação fina a média, sendo compostas principalmente de plagioclásio e piroxênio. Localmente, em algumas porções do núcleo foi observada uma discreta variação na granulação de média para grossa (Figura 4E), onde se destacam fenocristais de plagioclásio e piroxênio. No topo do afloramento, é observado um contato brusco, ressaltado pelo forte intemperismo, entre a soleira de diabásio e uma camada de arenito maciço, de granulação média a grossa da Formação Cabeças (Figura 4B).

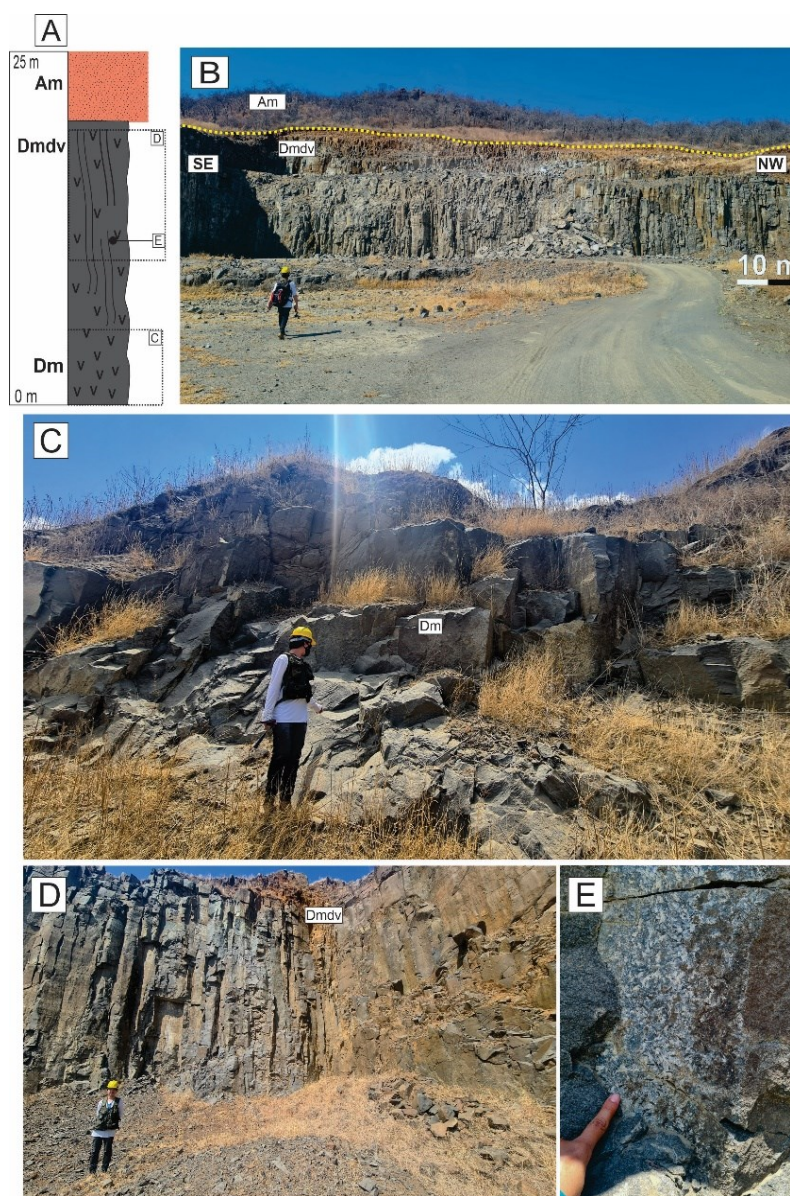


Figura 4. A) Perfil estratigráfico PI-05 apresentando diabásio maciço com disjunção colunar vertical (Dmdv) em contato abrupto com arenito da Formação Cabeças (Am). B) Visão geral do afloramento mostrando uma morfologia de soleira de grande porte, em contato (evidenciado pela linha tracejada amarela) com uma camada de arenito maciço. C) Base do afloramento, onde predomina diabásio maciço (Dm). D) Feição típica do núcleo e topo do afloramento, expondo disjunções colunares verticais (Dmdv) com diâmetros centimétricos a decimétricos e internamente maciço. E) Detalhe de uma porção do núcleo, destacando um diabásio porfirítico com cristais milimétricos a centimétricos de plagioclásio ripiformes dispostos aleatoriamente. Fonte: Autores.

O ponto PI-06 (Figura 5), situa-se às margens da BR-316, após a entrada de acesso a vila Fátima do Piauí. Neste ponto foi observado um afloramento com espessuras que variaram entre 7 m e 10 m (Figura 5A), cuja morfologia em alguns pontos se assemelhou a de uma intrusão de pequeno porte (Figura 5B).

A rocha aflorante foi classificada como um diabásio (Dm) de coloração cinza claro, com estrutura maciça, textura subfanerítica de granulação fina a média, cuja mineralogia é composta por pequenos cristais de plagioclásio ripiformes e alguns cristais de piroxênio por vezes aciculares, imersos em uma matriz muito fina (Figura 5D). O afloramento possui boa qualidade de

apresentação, com estruturas de intemperismo físico apenas na base, demonstrando esfoliação esferoidal (Figura 5C), e localmente alteração para

óxidos de ferro, evidenciada por cristais arredondados e milimétricos distribuídos aleatoriamente (Figura 5D).

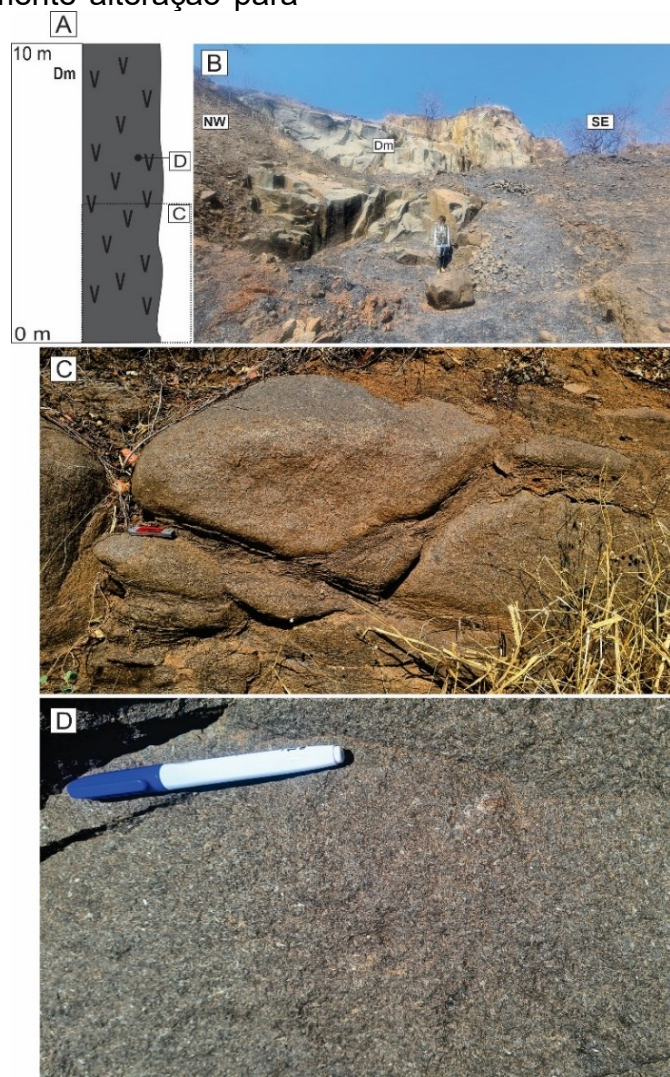


Figura 5. A) Perfil estratigráfico PI-06 apresentando diabásio maciço (Dm). B) Visão geral do afloramento mostrando uma morfologia intrusiva de médio porte. C) Base do afloramento, mostrando rochas com leve intemperismo físico na forma de esfoliação esferoidal. D) Detalhe da Rocha subfanerítica com pequenos cristais de plagioclásio em matriz muito fina, contendo óxidos de ferro distribuídos aleatoriamente. Fonte: Autores.

O ponto PI-07 (Figura 6), fica às margens da BR-230, próximo ao Município de Oeiras. Neste local observa-se um afloramento com espessuras que variaram entre 20 m e 25 m (Figura 6A), a morfologia é de uma intrusão de médio porte que se estende lateralmente por aproximadamente 30 m, associada a um morro, cujo topo é constituído pela Formação Cabeças (Figura 6B).

Devido ao difícil acesso e a baixa qualidade do afloramento o contato foi inferido na altura da primeira ocorrência litológica do arenito da formação mencionada. Trata-se de um diabásio maciço (Dm) de coloração cinza escuro (Figura 6C), com textura subfanerítica de granulação fina a média, cuja mineralogia é composta por cristais de plagioclásio ripiformes e cristais de piroxênio, por vezes aciculares, ambos imersos em uma matriz muito fina. A base do afloramento

tem pouca ou nenhuma alteração, devido a abertura recente do corte de estrada, dessa forma, as poucas evidências

intempéricas na base demonstram blocos subarredondados caracterizando a esfoliação esferoidal (Figura 6D).



Figura 6. A) Perfil estratigráfico PI-07 apresentando diabásio maciço (Dm). B) Visão geral do afloramento mostrando uma morfologia intrusiva de médio porte e considerável extensão lateral. C) Base do afloramento, mostrando rochas maciças e com baixo intemperismo. D) Detalhe da disposição das rochas em lajedos com ocorrência de esfoliação esferoidal. Fonte: Autores.

O afloramento correspondente ao ponto PI-34 (Figura 7) está localizado na mineradora, situada na vila Fátima do Piauí, à oeste de Picos. Trata-se de um corpo de diabásio em formato de soleira de grande porte, com altura de até 30 metros aflorantes em alguns pontos (Figura 7A). O afloramento é lateralmente extenso, alcançando até 50-60 m (Figura 7B) e possui disjunções colunares verticais dispostas desde a base até o

topo (Dmdc), cujos diâmetros das colunas são centimétricos (Figura 7C). Texturalmente, esses diabásios são faneríticos com granulação média e mineralogicamente compostos por cristais de plagioclásio e piroxênio. O topo do corpo de diabásio é marcado por um forte intemperismo, o que ressalta o seu contato abrupto com os arenitos da Formação Cabeças (Figura 7D).

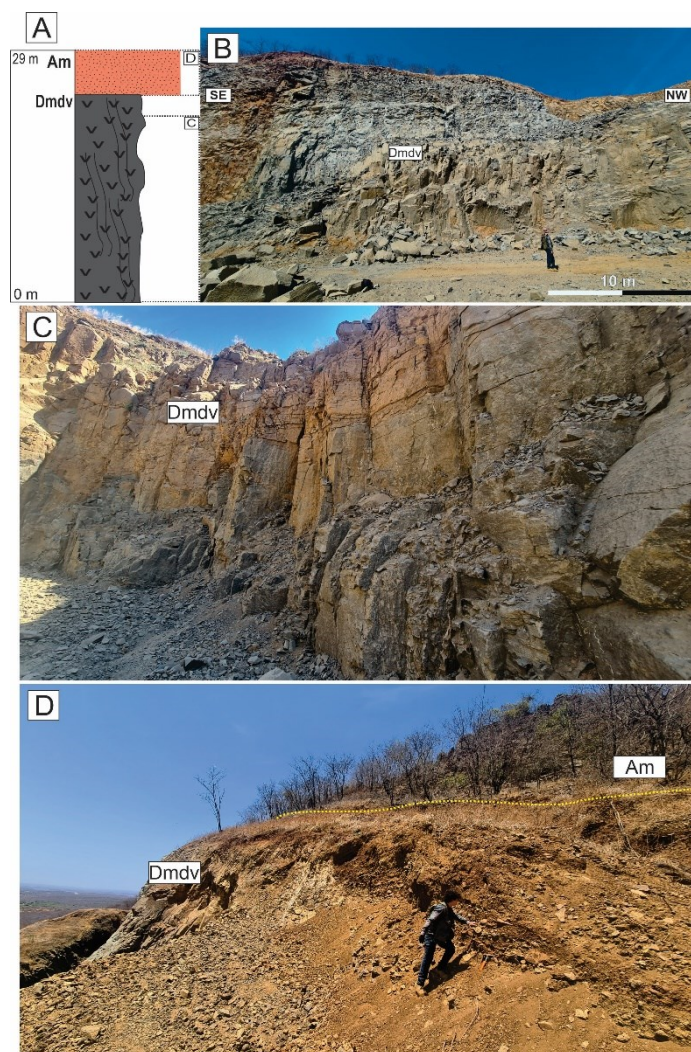


Figura 7. A) Perfil estratigráfico PI-34 apresentando um corpo de diabásio (Dmdv). B) Visão geral do afloramento mostrando uma morfologia de soleira de grande porte, alcançando mais de 25 metros de espessura. C) Base e núcleo do afloramento, apresentando um diabásio maciço com disjunções colunares verticais (Dmdv) de diâmetros centimétricos. D) Topo do afloramento de diabásio, em contato abrupto com o arenito maciço da Formação Cabeças (Am), cujo contato é ressaltado pelo forte intemperismo da região (evidenciado pela linha tracejada amarela). Fonte: Autores.

À nordeste de Picos, entre a vila de Coroatá e o município de Santana do Piauí, afloram rochas bastante intemperizadas, com formatos arredondados de intensa esfoliação esferoidal. Dentre esta região, foi selecionado o ponto PI-40 (Figura 8) por estar com intemperismo menos avançado.

O perfil estratigráfico (Figura 8A) foi construído, levando em consideração uma parte mais acessível do afloramento, cuja exposição possui uma espessura de aproximadamente 20 metros, embora a espessura total ultrapasse os 30 metros.

Trata-se de um corpo basáltico com estrutura maciça, que apresenta disjunções colunares verticais (Bmdv) com diâmetros centimétricos e faces sextavadas (Figura 8B), além de apresentar disjunções colunares horizontais (Bmdh) ocorrendo no topo do afloramento (Figura 8C). São basaltos com textura subfanerítica e granulação variando de fina a média, cuja mineralogia é composta de plagioclásio e piroxênio, bem como cristais anédricos de óxidos de ferro disseminados em uma matriz afanítica (Figura 8D).

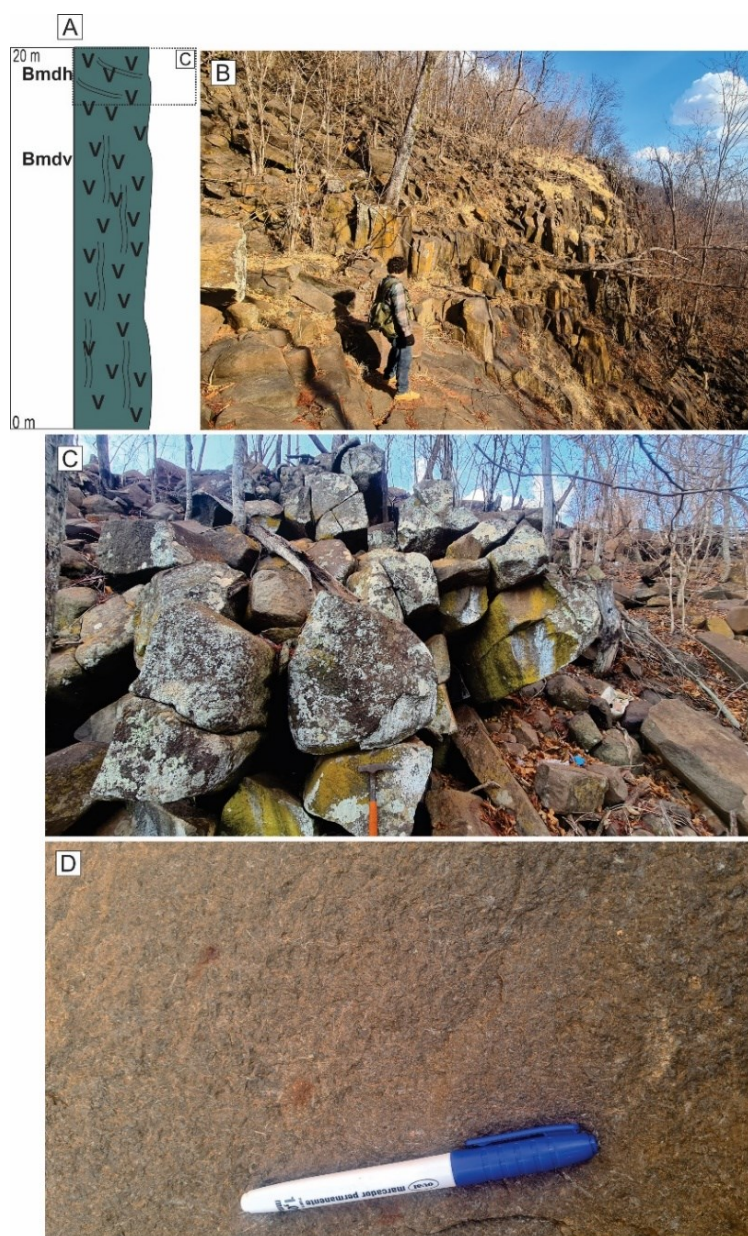


Figura 8. A) Perfil estratigráfico PI-40. B) Visão geral do afloramento, apresentando uma intrusão de grande porte, com rochas basálticas maciças com disjunção colunar vertical (Bmdc) bem demarcadas e pouco espaçadas entre si. C) Topo do afloramento, apresentando um basalto maciço com disjunção colunar horizontal (Bmdh) de diâmetros centimétricos a métricos, cujas faces são geralmente hexagonais. D) Granulação subfanerítica a fanerítica e de granulação fina a média, composta por plagioclásio ripiforme e cristais anédricos de óxidos de ferro imersos em uma matriz fanerítica fina. Fonte: Autores.

4.2. Petrografia Microscópica

Na análise petrográfica, as rochas ígneas estudadas são predominantemente holocristalinas, com uma ocorrência de hipovítrea (perfil PI-40), e apresentam granulação variando de média a grossa, com exceção das rochas do perfil PI-40 que apresentaram granulação fina. A maioria das rochas são equigranulares, cujos tamanhos dos

cristais variam desde 1mm a 4mm, no entanto o perfil PI-40 exhibe rochas inequigranulares com fenocristais de 4 mm imersos em matriz com tamanho menor que 1 mm.

Todas as rochas são mineralogicamente compostas por plagioclásio, piroxênio e minerais opacos (magnetita e ilmenita), e possuem como acessórios, apatitas prismáticas,

geralmente inclusas nos cristais de plagioclásio (Figura 9). Levando em consideração, a mineralogia e a diferença de granulação observada, as rochas foram classificadas em diabásios e basaltos.

Nos diabásios predomina a textura intergranular com intercrescimento de piroxênio entre os cristais de plagioclásio (Figura 9A), além de subofítica, com inclusão parcial de cristais de piroxênio em cristais de plagioclásio (Figura 9B). Nos basaltos, as texturas principais são

porfírica e glomeroporfírica, as quais são caracterizadas por fenocristais individuais de plagioclásio ou na forma de aglomerados. Uma textura importante observada nos basaltos é a intrafascicular, caracterizada por fenocristais de plagioclásio hospedeiro que estão sendo consumidos por cristais de piroxênio (Figura 9C). Estes fenocristais estão imersos em mais de 50% de matriz com textura microcristalina, composta por cristais ripiformes de plagioclásio e anédricos de piroxênio (Figura 9D).

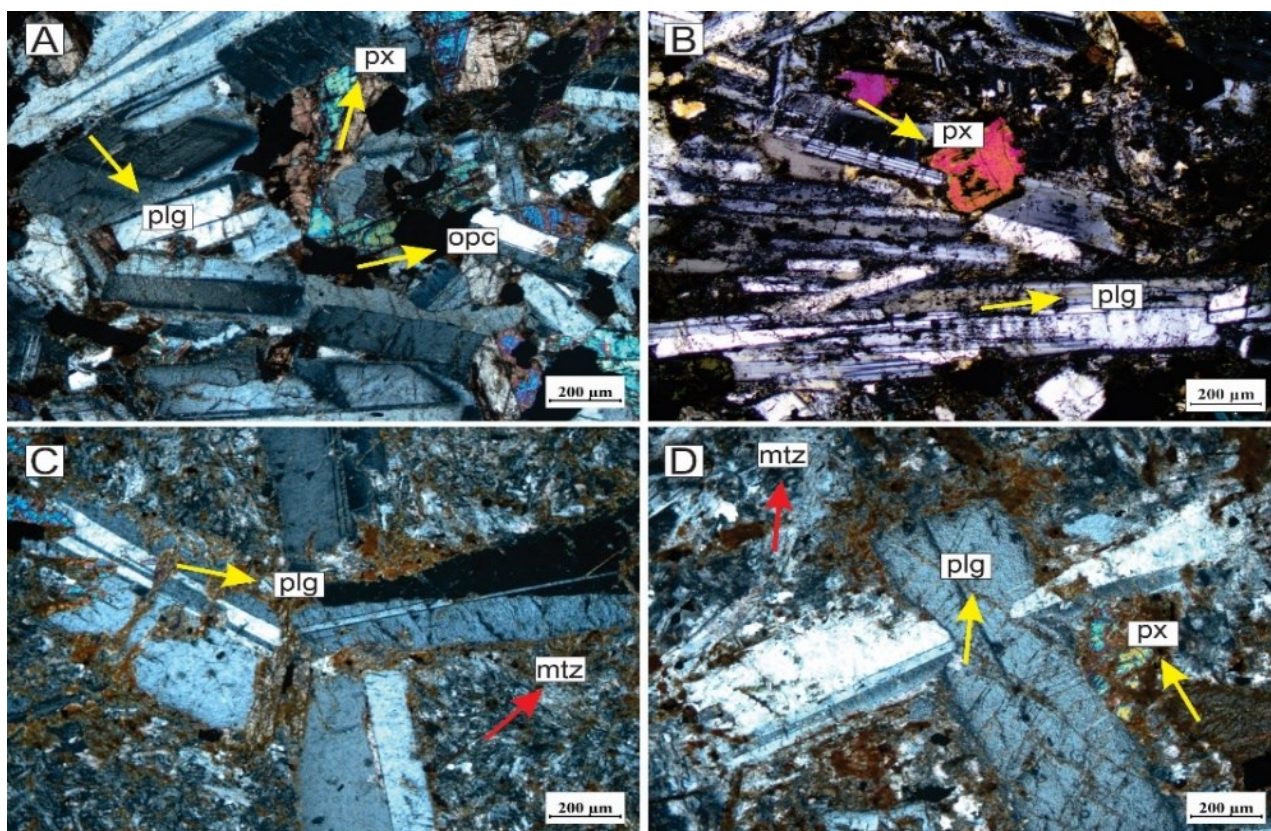


Figura 9. Fotomicrografias das rochas intrusivas a nicóis cruzados. A) Textura intergranular no diabásio. B) Textura subofítica em diabásio. C) Basalto exibindo aglomerado de fenocristais de plagioclásio, que define a textura glomeroporfírica, com textura intrafascicular nos cristais de plagioclásio (hospedeiro), sendo todos imersos em matriz microcristalina. D) Detalhe da disposição da matriz microcristalina nas rochas basálticas, caracterizada por cristais ripiformes plagioclásio. Abreviações: plg (plagioclásio); px (piroxênio) e opc (mineral opaco). Estes minerais estão detalhados pela seta amarela, assim como a matriz, detalhada pela seta vermelha. Fonte: Autores.

5. DISCUSSÕES

Um mesmo evento magmático pode gerar rochas ígneas intrusivas em diferentes contextos sedimentares, como por exemplo, o evento Penatecaua, que

afetou as Bacias do Amazonas e Solimões, e gerou soleiras com mineralogia, textura, geoquímica e idades extremamente próximas, sendo as diferenças exclusivamente estratigráficas.

No caso da Bacia Amazonas, as intrusivas estão em rochas evaporíticas e clásticas, enquanto as soleiras de diabásio da Bacia do Solimões estão estritamente alocadas em rochas evaporíticas (Wanderley Filho et al., 2007).

Comparativamente, dois eventos magmáticos em uma mesma bacia, também podem afetar diferentes níveis estratigráficos, como pode ser observado na Bacia Parnaíba. As rochas intrusivas da Formação Mosquito são mais comuns de aflorarem na porção oeste da Bacia Parnaíba, e, portanto, estão em contato com as Formações Pimenteiras e Longá, do Grupo Canindé, enquanto a Formação Sardinha se estabelece exclusivamente no lado leste da bacia, e comumente ocorre intrusiva nas Formações Pimenteiras e Cabeças (Grupo Canindé) e em camadas subjacentes a Formação Longá (Caputo et al. 2005).

Apesar de duas unidades litoestratigráficas de natureza magmática estarem representadas na mesma bacia, o tipo de emplacement do magma foi diferente para a Formação Mosquito e Sardinha, e dessa forma, as descrições das geometrias realizadas em campo são de grande importância para a distinção das duas formações ígneas (Francis, 1982). Além disso, embora exista datação radiométrica para as rochas ígneas da bacia, o foco dos estudos tem sido regional, o que leva a necessidade de ferramentas adicionais para distinção de eventos magmáticos, como por exemplo, análise de fácies.

As evidências observadas nos corpos ígneos estudados da região de Picos, tais como, dimensões métricas, forte presença de disjunção colunar e estrutura maciça, apontam para um *emplacement* dos diabásios e basaltos com geometria de soleiras de médio a grande porte. Com relação às fácies descritas nos seis perfis gerados, observou-se uma similaridade nas estruturas, mesmo entre basaltos e

diabásios, sendo caracterizadas por apresentar aspecto interno maciço (Tabela 1), o que é concordante com as feições observadas em soleiras de grande porte.

Levando em consideração a análise petrográfica, as rochas estudadas apresentam texturas que variam desde aquelas relacionadas a um resfriamento em sistema fechado, como intergranular e subofítica, até aquelas que caracterizam resfriamento contínuo em níveis crustais diferentes, como glomeroporfiritica, porfiritica, intrafascicular e microcristalina. Portanto, quando se comparam as características descritas neste estudo com as informações existentes na literatura, tanto do ponto de vista faciológico como petrográfico, se torna clara a compatibilidade das rochas intrusivas básicas de Picos com a Formação Sardinha (Wanderley Filho et al., 2007; Vaz et al., 2007; Oliveira et al., 2018; Hollanda et al., 2019; Macedo Filho et al., 2023). Enquanto isso, é comum as ocorrências de fluxos de lavas basálticas vesiculares e amígdalas, além de serem texturalmente mais afaníticas, comuns para a Formação Mosquito (Aguiar, 1971; Oliveira et al., 2018) e não observadas nas amostras do presente trabalho.

Além da discussão sobre os aspectos faciológicos e petrográficos existentes na região, outro aspecto importante nestas rochas está relacionado ao intenso fraturamento observado nos afloramentos, o que pode estar relacionado a dois potenciais mecanismos, incluindo contração gerada por resfriamento primário (disjunção colunar) e fraturamento secundário pós-resfriamento.

Disjunções colunares são feições geradas durante o resfriamento de magma de qualquer composição, que são comumente observadas no núcleo de corpos máficos relativamente espessos, cuja largura da coluna é associada a taxa de resfriamento (Goehring & Morris,

2008). Outras evidências observadas incluem fraturas em placas e fraturas sub-horizontais que sugerem incrementos de propagação de fraturas nas superfícies das colunas após resfriamento (Fornero et al., 2023). Na região de Picos, foram descritas predominantemente fraturas colunares verticais, cuja largura das colunas varia de 30 cm até 1 m, e apresentam formas hexagonais em planta, típicas de disjunções geradas pela contração de corpos relativamente espessos durante o resfriamento (Budkewitsch & Robin, 1994; Goehring & Morris, 2008).

O segundo mecanismo responsável por gerar fraturamento está associado a tensões tectônicas pós-solidificação. No entanto, foram observadas algumas evidências na região estudada, tais como, consistência das colunas com espaçamento regular, e ausência de veios e de minerais fraturados em escala microscópica, que sugerem que as soleiras não sofreram fraturamento induzido por tensão tardia. No entanto, considerando o pioneirismo desta investigação com foco nas feições estruturais e texturais dos corpos ígneos, essa hipótese não pode ser excluída, e para isso são necessárias mais investigações nesta região utilizando métodos de análise estrutural clássica somada a topologia das redes de fraturas.

A granulação das rochas magmáticas associadas a determinadas texturas pode contribuir de forma mais detalhada para a interpretação do grau de resfriamento de corpos ígneos (Cox et al., 1979; Le Bas & Streckeisen, 1991). A ausência de fácies gabróicas na parte medial dos perfis estratigráficos, comum em soleiras e diques, associada a pequena variação na granulação das soleiras caracterizadas como diabásios (Shirley, 1987; Block et al., 2015; Fornero et al., 2023), pode sugerir que soleiras são mais espessas em subsuperfície. Na literatura, as principais texturas

associadas a estas intrusões ígneas são intergranular e subofítica, que são típicas de rochas hipabissais geradas pelo resfriamento relativamente lento do magma (Fornero et al., 2023). Entretanto, observa-se outras texturas associadas a diferentes fases de resfriamento (Barreto et al., 2014), como porfirítica e microcristalina, além de texturas associadas a resfriamentos com perturbações no sistema, como as texturas glomeroporfíricas e intrafascicular.

A partir desta nova abordagem de estudo, as intrusões da região de Picos-Pi podem ser consideradas como tendo desempenhado um papel fundamental nos sistemas ígneo-sedimentares, pois não é descartada a possibilidade de elas terem atuado como um dos três principais componentes em sistemas não convencionais (Magoon & Dow, 1994; Cioccarri & Mizusaki, 2019). No primeiro caso, elas poderiam ser rochas fornecedoras de calor necessário para maturação da matéria orgânica. O segundo componente apontaria para estas rochas se comportarem como reservatórios, seja pela permeabilidade necessária ter sido alcançada através das disjunções colunares ou pelas fraturas de resfriamento tardio. O terceiro papel desempenhado pelas intrusões poderia estar relacionado a elas se comportarem como excelentes selantes de hidrocarbonetos, devido às características maciças da maioria das soleiras de diabásio e basalto.

Rodrigues (1995), estudando auréolas de contato induzidas pelas rochas intrusivas nas rochas encaixantes da Bacia Parnaíba, demonstra que este efeito térmico atinge até 170% da espessura da soleira, entretanto, não apresenta os dados dos locais destas ocorrências. Ainda na Bacia Parnaíba, foi observado que na Formação Pimenteiras, a auréola de contato equivalente a 240% da espessura total da soleira (Cioccarri &

Mizusaki, 2019), além disso, Miranda (2014), destaca que o efeito até 110% da espessura da soleira, garante calor necessário na janela de produção de gás, enquanto a partir de 110% a 240%, a janela de calor é propícia para óleo.

Baseado nas observações de campo, seria necessário mais estudo com foco na petrofísica destas rochas, principalmente na porosidade/permeabilidade primária e secundária destas soleiras de diabásios e basaltos. Até então, alguns estudos associavam estas rochas na Bacia Parnaíba a reservatórios ou selos menos recorrentes, porém Cioccarri & Mizusaki (2019), têm demonstrado que seriam necessárias evidências geológicas e geofísicas mais abrangentes para confirmar. Os resultados apresentados neste estudo, incluindo a caracterização faciológica suportada pela análise petrográfica, apontam para estas interpretações, demonstrada principalmente pela grande quantidade de disjunções colunares que podem ter auxiliado no aumento da permeabilidade, e consequentemente na formação de reservatórios não convencionais (Ye et al., 2021; Wang et al., 2024).

6. CONCLUSÕES

Os dados obtidos neste estudo sugerem que as ocorrências de intrusões básicas na região de Picos e arredores possuem uma forte concordância com o que já foi descrito na literatura para a Formação Sardinha. Essa hipótese é concordante quanto a sua posição geográfica, e a geometria em forma de soleiras, comuns para esta formação. Além disso, a aplicação pioneira do método de análise faciológica se mostrou uma ferramenta bastante útil para se estudar com detalhe os corpos ígneos, embora se enfatize a necessidade de aplicação da mesma metodologia em diferentes regiões da Bacia Parnaíba.

A classificação de diabásios e basaltos como agentes reservatórios

dependem de uma alta porosidade e permeabilidade, perceptível nas rochas fraturadas (PI-02; PI-05; PI-34 e PI-40). No entanto, as ocorrências de diabásios maciços (PI-06; PI-07) aparentemente possuem uma permeabilidade muito baixa, características principais para rochas selantes.

Entretanto, para uma definição mais precisa do papel dos diabásios e basaltos da porção leste da Bacia Parnaíba são necessárias mais análises quantitativas, como petrofísica e análise de rede de fraturas para as rochas com disjunções colunares, além de caracterização geoquímica para melhor classificação destas ocorrências entre as duas formações existentes na Bacia Parnaíba.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Formação de Recursos Humanos UFPE/ANP/FINEP 47.1 pela bolsa concedida, a qual foi de grande importância na realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abrantes Júnior, F. R., Nogueira, A. C. R. 2013. Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 13(3), 65-82.
- Aguiar, F. G., 1971. Revisão geológica da bacia paleozóica do Parnaíba. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo. Sociedade Brasileira de Geologia, Anais: 113-122.
- Almeida F.F.M., Carneiro, C.D.R., 2004. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: Mantesso-Neto V., Bartonelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de*

- Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca Editora, São Paulo, Brasil, p.43-58.
- Angelim, L. A. A., Vasconcelos, A. M., Gomes, J. R. C., Wanderley, A. A., Forgiarini, L. L., Medeiros, M. F. 2004. Folha SB-24-Jaguaribe. In: C. Schobbenhaus, J. H. Gonçalves, J. O. Santos, M. B. Abram, R. Leão Neto, G. M. M. Matos, R. M. M. Vidotti, A. B. Ramos (Eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, SIG. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM.
- Baksi, A. K., Archibald, D. A., 1997. Mesozoic igneous activity in the Maranhão province, northern Brazil: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for separate episodes of basaltic magmatism. *Earth and planetary science letters*. 151(3-4), 139-153.
- Barreto, C. J. S., de Lima, E. F., Scherer, C. M., Rossetti, L. D. M. M. 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 285, 81-99.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L. S., Melfi, A. J., Piccirillo, E. M., Stofa, D. 1984. Die Entwicklung von Basalt-Gängen aus dem Paraná-Becken, Brasilien: Ergebnisse der Untersuchung von Bohrkernen. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*. 33, 25-47.
- Bellieni, G., Piccirillo, E. M., Cavazzini, G., Petrini, R., Comin Chiaramonti, P., Nardy, A. J. R., Zantedeschi, P. 1990. Low-TiO₂ and high-TiO₂ Mesozoic tholeiitic magmatism of the Maranhao basin (NE-Brazil): K/Ar age, geochemistry, petrology, isotope characteristics and relationships with Mesozoic low-TiO₂ and high-TiO₂ flood basalts of the Paraná basin (SE Brazil). *Neues jahrbuch fur Mineralogie-Abhandlungen*. 162, 1-33.
- Block, K. A., Steiner, J. C., Puffer, J. H., Jones, K. M., Goldstein, S. L. 2015. Evolution of late stage differentiates in the Palisades Sill, New York and New Jersey. *Lithos*. 230, 121-132.
- Budkewitsch, P., Robin, P. Y. 1994. Modelling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 59(3), 219-239.
- Caputo, M. V., Lima, E. C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande-Bacia do Parnaíba. In Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 33, No. 1984, pp. 740-753).
- Cioccarri, G. M., Mizusaki, A. M. P. 2019. Sistemas petrolíferos atípicos nas bacias paleozoicas brasileiras—uma revisão. *Geosciences = Geociências*, 38(2), 367-390. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i2.13173>.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. G. Allen & Unwin, first ed. London, England. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>.
- Piccirillo, A. D. M. E., Marzoli, A., Bellieni, G., Renne, P. R., Ernesto, M., Marques, L. S. 2003. The Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in Brazil: petrology, geochemistry, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages, paleomagnetism and geodynamic implications. *The Central Atlantic Magmatic Province: Insights from Fragments of Pangea*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series. 91-128.
- Ernesto, M., Bellieni, G., Piccirillo, E. M., Marques, L. S., de Min, A., Pacca, I. G., Macedo, J. W. P. 2003. Paleomagnetic and geochemical constraints on the timing and duration of the CAMP activity in northeastern Brazil. *The Central Atlantic Magmatic Province: Insights from Fragments of Pangea*. 136, 129-149.

- Ewart, A., Marsh, J. S., Milner, S. C., Duncan, A. R., Kamber, B. S., Armstrong, R. A. 2004. Petrology and geochemistry of Early Cretaceous bimodal continental flood volcanism of the NW Etendeka, Namibia. Part 1: Introduction, mafic lavas and re-evaluation of mantle source components. *Journal of Petrology*. 45(1), 59-105.
- Fornero, S. A., Millett, J. M., de Lima, E. F., de Jesus, C. M., Bevilaqua, L. A., Marins, G. M. 2023. Emplacement dynamics of a complex thick mafic intrusion revealed by borehole image log facies analyses: Implications for fluid migration in the Parnaíba Basin petroleum system, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*. 155, 106378.
- Francis, E. H. 1982. Magma and sediment-I Emplacement mechanism of late Carboniferous tholeiite sills in northern Britain: President's anniversary address 1981. *Journal of the Geological Society*. 139(1), 1-20.
- Goehring, L., Morris, S. W. 2008. Scaling of columnar joints in basalt. *Journal of geophysical research: Solid Earth*. 113(B10).
- Góes, A. M. O., Feijó, F. J. 1994. Bacia do Parnaíba: Boletim de Geociências da Petrobrás, n. 8, p. 57-67.
- Gomes, A. S., Vasconcelos, P. M. 2021. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth-Science Reviews*. 220, 103716.
- Hollanda, M. H. B. M., Archanjo, C. J., Macedo Filho, A. A., Fossen, H., Ernst, R. E., de Castro, D. L., Oliveira, A. L. 2019. The Mesozoic Equatorial Atlantic Magmatic Province (EQUAMP) A New Large Igneous Province in South America. *Dyke swarms of the world: A modern perspective*. 87-110.
- Jerram, D. A. 2002. Volcanology and facies architecture of flood basalts, in: Menzies, M. A., Baker, J., Ebinger, C. J., Klemperer, S. L. (Eds.). *Volcanic Rifted Margins*. Geological Society of America Special Paper. 362, 121-135.
- Kingston, J., Matzko, J. R. 1995. Undiscovered petroleum of the Brazilian interior rift basins. *International Geology Review*. 37(5), 421-436.
- Le Bas, M. J., Streckeisen, A. L. 1991. The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*. 148(5), 825-833.
- Macêdo Filho, A. A., Hollanda, M. H. B., Fraser, S., Oliveira, A. L., Melo, A. C., Dantas, A. R. 2023. Correlations among large igneous provinces related to the West Gondwana breakup: A geochemical database reappraisal of Early Cretaceous plumbing systems. *Geoscience Frontiers*, 14(1), 101479.
- Marins, G. M., Parizek-Silva, Y., Millett, J. M., Jerram, D. A., Rossetti, L. M., e Sousa, A. D. J., Carmo, I. D. O. 2022. Characterization of volcanic reservoirs; insights from the Badejo and Linguado oil field, Campos Basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 146, 105950.
- Martins, L. T., Madeira, J., Youbi, N., Munhá, J., Mata, J., Kerrich, R. 2008. Rift-related magmatism of the Central Atlantic magmatic province in Algarve, Southern Portugal. *Lithos*. 1(1-2), 102-124.
- Marzoli, A., Bertrand, H., Youbi, N., Callegaro, S., Merle, R., Reisberg, L., Tegner, C. 2019. The central atlantic magmatic province (CAMP) in Morocco. *Journal of Petrology*. 60(5), 945-996.
- Marzoli, A., Renne, P. R., Piccirillo, E. M., Ernesto, M., Bellieni, G., Min, A. D. 1999. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 284(5414), 616-618.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. 1993. *Volcanic textures: a guide to the*

- interpretation of textures in volcanic rocks, Tasmania, 191 pp.
- Miall, A. D. 1982. Recent developments in facies models for siliciclastic sediments. *Journal of Geological Education*, 30(4), 222-240.
- Miall, A. D., Miall, A. D. (2000). The Stratigraphic-Sedimentologic Database. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*, 22-78.
- Millett, J. M., Rossetti, L., Bischoff, A., Rossetti, M., Rosenqvist, M. P., Avseth, P., Planke, S. 2024. Lava flow-hosted reservoirs: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 547(1), SP547-2023.
- Miranda, F. D. (2014). Pimenteiras Shale: Characterization of an atypical unconventional petroleum system, Parnaíba Basin, Brazil. In *AAPG International Conference & Exhibition* (p. 22).
- Mizusaki, A. M. P., Thomaz-Filho, A., Milani, E. J., De Césero, P. 2002. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 183-198.
- Moore, B. South Central Maranhão 1960. Field Project. Belém, Petrobrás, Relatório Técnico, s/n, 1961.
- Ngonge, E. D., de Hollanda, M. H. B. M., Archanjo, C. J., de Oliveira, D. C., Vasconcelos, P. M. P., Muñoz, P. R. M. 2016. Petrology of continental tholeiitic magmas forming a 350-km-long Mesozoic dyke swarm in NE Brazil: Constraints of geochemical and isotopic data. *Lithos*. 258, 228-252.
- Oliveira, A. L., Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Oliveira, D. C. 2018. Petrology of Jurassic and Cretaceous basaltic formations from the Parnaíba Basin, NE Brazil: correlations and associations with large igneous provinces. *Geological Society, London, Special Publications*. 472(1), 279-308.
- Peate, D. W. 1997. The parana-etendeka province. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*. 100, 217-246.
- Rodrigues, R. 1995. A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 25, p. 145-146.
- Rossetti, L. M., Lima, E. F., Waichel, B. L., Scherer, C. M., Barreto, C. J. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 409-421.
- SHIRLEY, D. N. 1987. Differentiation and compaction in the Palisades sill, New Jersey. *Journal of Petrology*. v. 28, n. 5, p. 835-865.
- Sial, A. N. 1976. The post-Paleozoic volcanism of north-east Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48(supl), 299-311.
- Thomaz Filho, A., Mizusaki, A. M. P., MILANI, E. J., De Cesero, P. 2000. Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1), 017-019.
- Thomaz Filho, A., Mizusaki, A. M. P., Antonioli, L. 2008. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. *Brazilian Journal of Geology*, 38(2), 128-137.
- Vaz, P. T., Wanderley Filho, J. R., Travassos, W. A. S. 2007. Bacia do parnaíba. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 253-263.
- Wanderley Filho, J. R., Eiras, J. F., Vaz, P. T. 2007. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 217-225.

Wang, X. R., Pan, B. Z., Guo, Y. H., Wang, Q. H., Guan, Y. 2024. Multi-scale data joint inversion of minerals and porosity in altered igneous reservoirs—A case study in the South China Sea. *Petroleum Science*, 21(1), 206-220.

Ye, T., Chen, A., Niu, C., Bing Wang, Q. 2021. Structural, petrophysical and lithological characterization of crystalline bedrock buried-hill reservoirs: A case study of the southern jinzhou oilfield in offshore Bohai Bay Basin, north China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107950.