

Caracterização da deformação rúptil em afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro

Characterization of brittle deformation on a Resende Formation outcrop, Volta Redonda Basin, Rio de Janeiro State

Ingrid Barreto Maciel¹, Claudio Limeira Mello¹, Aline Theophilo Silva²

¹Programa de Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G, Secretaria do PPGL, sala G1-041 - Campus Ilha do Fundão (Cidade Universitária), CEP 21941-916 Rio de Janeiro, RJ, BR (ingridbmaciel@gmail.com; limeira@geologia.ufrj.br)

²Centro de Pesquisas da PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, BR (aline.theos@gmail.com)

Recebido em 25 de fevereiro de 2016; aceito em 26 de maio de 2017

Resumo

Este trabalho apresenta a caracterização estrutural e a análise de paleotensões em um afloramento da Formação Resende (Eoceno), na Bacia de Volta Redonda, Rio de Janeiro, com a finalidade de subsidiar discussões a respeito do comportamento hidráulico de falhas em arenitos pouco consolidados. A Formação Resende é composta predominantemente por arenitos feldspáticos pouco consolidados e estratificados, intercalados a lamitos esverdeados, apresentando expressiva deformação tectônica, relacionada ao contexto evolutivo do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Essa unidade litoestratigráfica constitui um geomaterial análogo a importantes reservatórios siliciclásticos pouco consolidados e fraturados que ocorrem nas bacias da margem sudeste do Brasil. O afloramento estudado localiza-se próximo à borda sul do Gráben de Casa de Pedra, principal depocentro da Bacia de Volta Redonda. Sua arquitetura estrutural-estratigráfica foi definida a partir da elaboração de uma seção geológica (escala 1:100), de três perfis sedimentológicos (escala 1:20) e da análise de paleotensões de pares falha/estria. Destacam-se duas expressivas falhas normais — F1 e F2 — com orientação ENE-WSW e mergulhos opostos, dividindo o afloramento em três blocos principais, em padrão de gráben e horstes. Apesar do padrão distensivo dominante, elementos estruturais e estratigráficos (i.e. fraturas de Riedel; sobreposição de estrias normais às direcionais; variações abruptas da espessura de camadas) indicam a reativação de F1 e F2 segundo três eventos tectônicos sucessivos, relacionados à deformação do RCSB: Transcorrência Sinistral E-W, Transcorrência Dextral E-W e Distensão NW-SE. Esses eventos deram origem a elementos estruturais (i.e. *clay smear*; justaposição de camadas; zonas de dano e núcleo de falhas; bandas de deformação/compactação) condicionantes da capacidade hidráulica de falhas, como indicado pelas variações observadas no padrão de cimentação por óxidos de ferro entre os blocos alto e baixo das falhas principais.

Palavras-chave: Formação Resende; Arenitos Pouco Consolidados; Deformação Rúptil; Comportamento Hidráulico de Falhas.

Abstract

This work presents the structural characterization and paleostresses analysis on an outcrop of the Resende Formation (Eocene), at the Volta Redonda Basin, Rio de Janeiro, in order to support major discussions regarding the hydraulic behavior of faults on unconsolidated sandstones. The Resende Formation consists of predominantly feldspathic poorly lithified and stratified sandstones, interlayered with greenish mudstones, presenting significant tectonic deformation related to the context of the Continental Rift of Southeastern Brazil. This lithostratigraphic unit represents an analog to similar rock hydrocarbon reservoirs on offshore basins in Southeastern Brazil. The outcrop is located close to the southern border of the Casa de Pedra Graben, the main depocenter at Volta Redonda Basin. Its structural-stratigraphic architecture was build based on a geological section (scale 1: 100), three sedimentological profiles (scale 1:20) and paleostresses analysis of fault/striae pairs. The two major normal faults — F1 and F2 — oriented ENE-WSW, with opposite dipping, split the outcrop in three main blocks, in a graben and horsts pattern. Despite the dominant extensional tectonic regime, structural and stratigraphic elements (i.e. Riedel fractures; normal striaes overlapping directional striaes; abrupt variations on the layers thickness) indicate the reactivation upon the F1 and F2 plains due to three consecutive tectonic events related to the RCSB deformation: E-W left-lateral strike slip, E-W right-lateral strike slip and NW-SE extension. The superposition of these tectonic events formed structural elements (i.e. clay smear; juxtaposition; damage zones and core holes; deformation/compaction bands) commonly recognized as key factors affecting the hydraulic behavior of faults, as indicated by the variations observed in the iron oxides cementation pattern between the hanging walls and the footwalls of the major faults.

Keywords: Resende Formation; Poorly Lithified Sandstones; Brittle Deformation; Fault Sealing.

INTRODUÇÃO

Feições tectônicas rúpteis (falhas e juntas) são potenciais elementos de controle para o fluxo de fluidos (Ellevset et al., 1998; Fisher e Knipe, 1998; Gibson, 1998; Pei et al., 2015), sendo essenciais a detecção e a caracterização dessas estruturas em estudos e modelagens de reservatórios de hidrocarbonetos.

A presença de falhas e juntas em reservatórios areníticos pouco consolidados é um tópico específico de atenção dentro do tema, devido à tendência de a deformação nesse tipo de material não ser localizada (i.e. cisalhamento não nucleado em um único plano). Nesses materiais, as estruturas frequentemente apresentam aspecto difuso, com rejeitos pequenos (Manzocchi et al., 1998), não sendo facilmente detectáveis dentro dos limites de resolução dos dados sísmicos ou de poços, o que dificulta a caracterização de zonas deformadas nesses reservatórios.

A utilização de estudos em afloramentos análogos é uma abordagem comumente adotada para mitigar problemas de entendimento geológico por dificuldades de amostragem em subsuperfície (Howell et al., 2014). Nesse contexto, o presente trabalho objetivou apresentar a caracterização estrutural e a análise de paleotensões em afloramento da Formação Resende (Eoceno), na Bacia de Volta Redonda, *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB — Riccomini et al., 2004; Negrão et al., 2015). Essa unidade litoestratigráfica é constituída predominantemente por arenitos feldspáticos estratificados, pouco consolidados, intercalados a lamitos esverdeados, depositados em canais fluviais entrelaçados e leques aluviais (Ramos et al., 2006). Considerando a característica pouco consolidada dos arenitos da Formação Resende, sua expressiva deformação tectônica e sua importância para a evolução do RCSB, essa unidade foi selecionada no presente estudo como um geomaterial análogo a reservatórios siliciclásticos pouco consolidados e fraturados presentes nas bacias da margem continental do Sudeste do Brasil. A finalidade deste trabalho foi produzir uma base de dados estruturais para subsidiar estudos a respeito da influência de estruturas tectônicas rúpteis sobre o fluxo de fluidos nesse tipo de rocha.

A caracterização dos campos de tensão e regimes tectônicos atuantes no afloramento foi feita a partir dos elementos estruturais identificados, buscando-se reconstruir a história de deformação associada ao desenvolvimento de feições como justaposição de fácies, *clay smear*, catáclase e bandas de compactação, reconhecidas na literatura como elementos de retardo ou barreiras para o fluxo de fluidos em reservatórios.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia de Volta Redonda está situada no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro e encontra-se inserida no Segmento Central do RCSB.

O embasamento da região, inserido no contexto da Faixa Ribeira, é composto predominantemente de rochas metamórficas paraderivadas neoproterozoicas do Complexo Paraíba do Sul e suítes intrusivas neoproterozoicas/eopaleozoicas, com arcabouço estrutural predominantemente orientado segundo a direção NE-SW (Silva e Cunha, 2001; Heilbron et al., 2004; Tupinambá et al., 2007) (Figura 1).

O registro sedimentar paleogênico ocorre, predominantemente, ao longo do *trend* estrutural de direção NE-SW, em várias ocorrências descontínuas (Negrão et al., 2015) (Figura 1). A principal área de ocorrência corresponde ao Gráben de Casa de Pedra (Melo et al., 1983), que abriga o registro sedimentar mais completo e expressivo da bacia — com até 120 m de espessura, de acordo com levantamento audiomagnetotélúrico apresentado por Padilha e Vitorello, 1992 — e inclui as únicas manifestações vulcânicas eocênicas conhecidas no Segmento Central do RCSB (Basanito Casa de Pedra) (Figura 2). O afloramento estudado está localizado próximo à borda sul do Gráben de Casa de Pedra, nas coordenadas UTM (WGS84) 0597428E/7507066S.

A Formação Resende representa o principal preenchimento sedimentar da Bacia de Volta Redonda (Sanson et al., 2006; Negrão et al., 2015) (Figura 2). Encontra-se em inconformidade com o embasamento e caracteriza-se por intercalações de arenitos feldspáticos estratificados, localmente conglomeráticos, e lamitos esverdeados, além de brechas e vaques. Esses depósitos são associados a sistemas de leques aluviais e fluviais entrelaçados. Corresponde ao principal aquífero regional, e as melhores vazões dos poços de captação de água subterrânea podem ser relacionadas às zonas de intenso fraturamento neotectônico (Albuquerque et al., 2003).

A unidade litoestratigráfica mais antiga — Formação Ribeirão dos Quatis — é constituída por conglomerados quartzosos médios a grossos, com intercalações de arenitos feldspáticos e, de forma subordinada, pelitos. Esses depósitos foram interpretados como sistemas fluviais entrelaçados de alta energia (Ramos et al., 2006; Sanson et al., 2006; Negrão et al., 2015). São encontrados sempre dispostos sobre o embasamento, ao longo de altos estruturais externos aos principais depocentros paleogênicos.

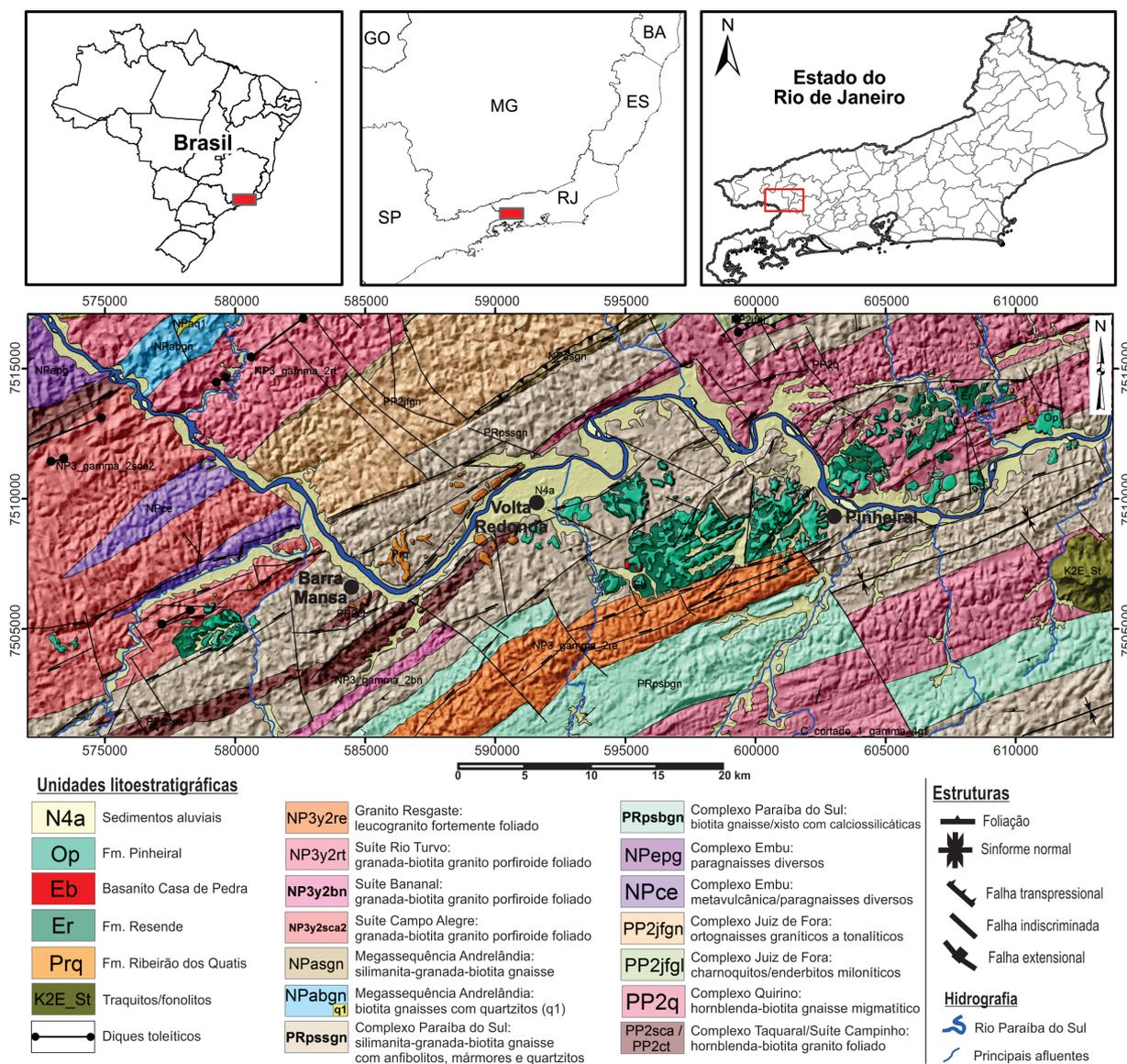
Em discordância sobre a Formação Resende está a Formação Pinheiral, composta por conglomerados e arenitos estratificados, relacionados a canais fluviais entrelaçados, com a presença de espessos intervalos pelíticos (Sanson et al., 2006; Negrão et al., 2015). Esses depósitos ocorrem sobrepostos, em discordância, às rochas vulcânicas — Basanito Casa de Pedra — presentes no registro estratigráfico da Bacia de Volta Redonda.

Sobre o registro paleogênico da Bacia de Volta Redonda ocorrem sucessões sedimentares de idades neogênica e quaternária, compostas por depósitos aluviais e colúviais.

Sanson (2006) e Negrão et al. (2015) identificaram quatro fases tectônicas rúpteis na evolução da Bacia de Volta Redonda (Figura 2):

- a primeira fase (E1) corresponde a uma distensão NW-SE, responsável pelos esforços de abertura da bacia, pela principal fase de sedimentação (Formação Resende) e por manifestações vulcânicas (Basanita Casa de Pedra). O principal padrão estrutural associado a essa fase corresponde a falhas normais de direção NE-SW;

- a primeira fase deformadora (TS) relaciona-se a uma transcorrência sinistral E-W, de idade Oligoceno final a Mioceno. O principal padrão estrutural associado a essa fase corresponde a falhas sinistras e normais de direção ENE-WSW a NE-SW e falhas dextrais NNE-SSW, que afetam somente depósitos paleogênicos, não atingindo as coberturas neogênicas e quaternárias;
- a segunda fase deformadora (TD) é relacionada a uma transcorrência dextral E-W, de idade pleistocênica. O principal padrão estrutural associado a essa fase corresponde



Fm: Formação.

Figura 1. Mapa geológico da região onde está localizada a Bacia de Volta Redonda (modificado de Negrão, 2014). As unidades do embasamento foram compiladas por Negrão (2014) a partir de Heilbron et al. (2004). Os depósitos paleogênicos apresentam-se de forma descontínua e segundo o *trend* do embasamento, sendo o Gráben de Casa de Pedra — entre as cidades de Volta Redonda e Pinheiral — a área onde a ocorrência desses depósitos é mais contínua.

a falhas dextrais e normais de direção WNW-ESE a NW-SE e falhas sinistrais NNW-SSE, que afetam depósitos paleogênicos, neogênicos e pleistocênicos; a terceira fase deformadora (E2) relaciona-se a uma distensão NW-SE de idade holocênica. O principal padrão estrutural associado a essa fase corresponde a falhas normais de direção NE-SW e NNE-SSW, que afetam os depósitos paleogênicos, neogênicos e quaternários.

Essas fases tectônicas são correlacionáveis aos eventos propostos por Riccomini et al. (2004) para a evolução do RCSB, tendo esses autores reconhecido, ainda, uma última fase tectônica, associada a uma compressão E-W atual.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo incluiu as seguintes etapas: elaboração de seção geológico-estrutural; caracterização sedimentológica; e análise estrutural e de paleotensões.

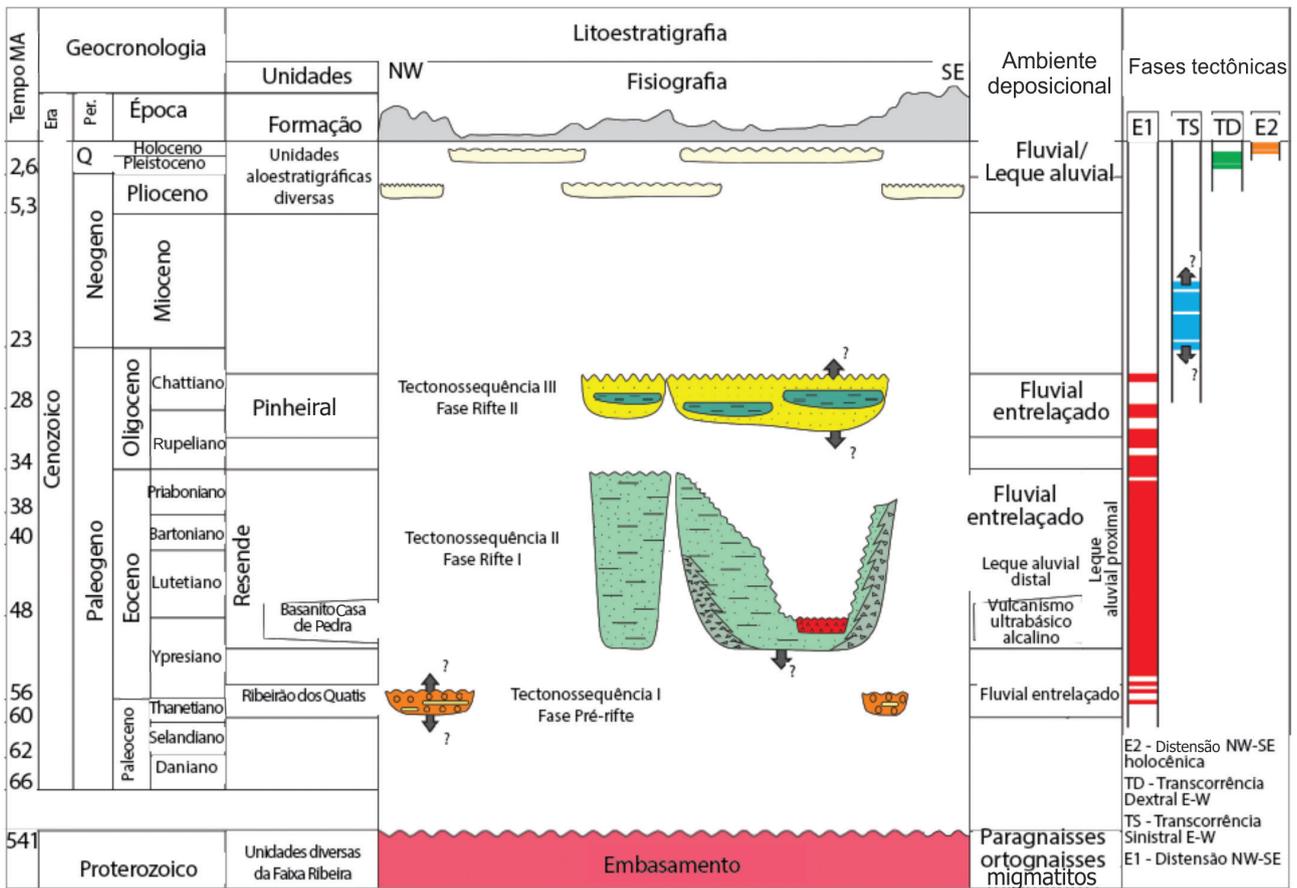
Inicialmente, foi efetuado o levantamento detalhado do afloramento com nível topográfico, na escala 1:100, para

a representação da geometria dos estratos e das principais estruturas tectônicas presentes. Foram elaborados perfis sedimentológicos, na escala 1:20, descrevendo detalhadamente os depósitos da Formação Resende em seus aspectos texturais, composicionais e de estruturas sedimentares.

As falhas foram medidas e plotadas em rede estereográfica Schmidt-Lambert (hemisfério inferior), sendo classificadas e agrupadas a partir do estilo tectônico e da orientação. A caracterização das paleotensões foi realizada com a aplicação do método dos diedros retos (Angelier e Mechler, 1977) para os conjuntos de falhas identificados, utilizando o programa *Win Tensor* (Delvaux e Sperner, 2003), versão 5.0.7.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O afloramento estudado consiste em um corte de estrada de orientação S-N com aproximadamente 18 m de altura e 54 m de extensão lateral. Encontra-se localizado em um terreno particular às margens da Rodovia do Contorno — em construção —, próximo ao bairro Vila Rica, no município de Volta Redonda, Rio de Janeiro. É caracterizado estratigraficamente



Fonte: modificado de Negrão et al. (2015).

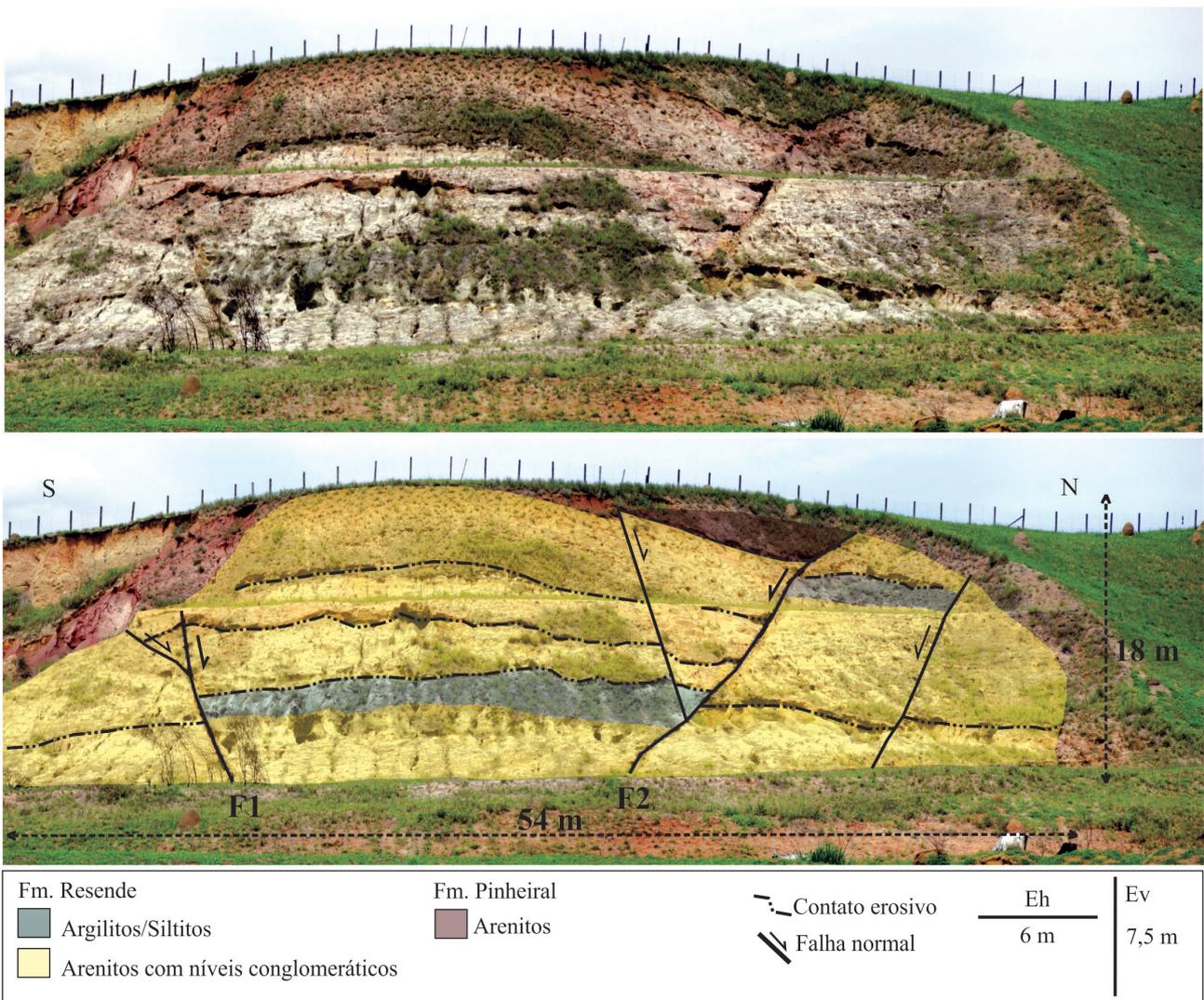
Figura 2. Coluna litoestratigráfica, tectonossequências e fases tectônicas relacionadas à evolução da Bacia de Volta Redonda.

por intervalos lenticulares extensos a tabulares de arenitos (litologia predominante), conglomerados e lamitos, típicos da Formação Resende. Na parte superior do afloramento são identificados arenitos da Formação Pinheiral, muito intemperizados (Figura 3).

O padrão estratigráfico é seccionado por duas expressivas falhas normais — F1 e F2 — com orientação ENE-WSW e mergulhos opostos, dividindo o afloramento em três blocos principais, compondo uma arquitetura de gráben e horstes (Figuras 3 e 4). No bloco ao sul, há o predomínio de camadas de arenitos e conglomerados, diferente do bloco central, em que predominam arenitos e lamitos, e do bloco norte, caracterizado por camadas conglomeráticas — mais abundantes — e camadas areníticas e lamíticas (Figura 4).

Por meio da análise dos perfis sedimentológicos (Figura 4), foram identificados seis ciclos sedimentares granodécrescentes, compostos pelo empilhamento de camadas decimétricas de conglomerados quartzosos estratificados, com níveis de brechas intraformacionais, arenitos feldspáticos estratificados e lamitos esverdeados, caracterizando as sucessões sedimentares fluviais típicas da Formação Resende. Contatos erosivos na base das camadas conglomeráticas e areníticas são muito frequentes, resultando na presença de ciclos sedimentares incompletos. A identificação dos diferentes ciclos sedimentares permitiu uma primeira aproximação quanto aos rejeitos verticais das falhas F1 e F2 — estimados, respectivamente, em 5 e 7 m.

A falha F1 é caracterizada por apresentar um plano de deslocamento principal bastante expressivo (Figura 5A), de orientação



Fm: Formação.

Figura 3. Aspectos gerais do afloramento estudado. São destacados os contatos litológicos e as estruturas tectônicas mais evidentes.

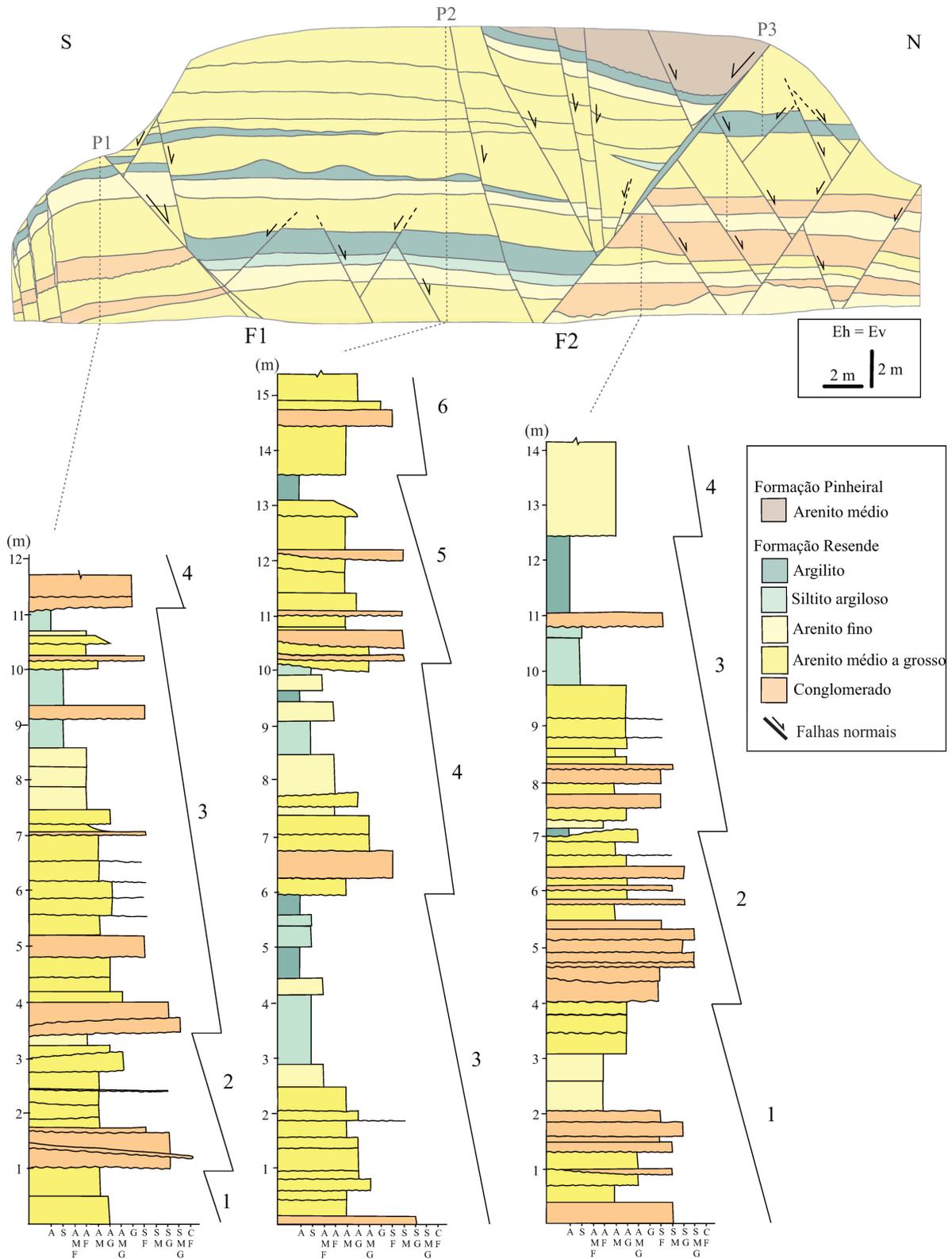


Figura 4. Seção geológica do afloramento estudado e perfis sedimentológicos (P1, P2 e P3) referentes aos seus três blocos principais (sul, central e norte) limitados pelas falhas F1 e F2. Foram descritos seis ciclos sedimentares. As falhas F1 e F2 definem um padrão geral de gráben e horstes para o afloramento.

ENE-WSW (atitude 332/50), com estrias indicativas de movimentação vertical (atitude 332/50) (Figura 5B). As relações estratigráficas observadas na seção geológica e a correlação entre os perfis sedimentológicos permitiram identificar a movimentação normal, também evidenciada com base nos ressaltos (*steps*) presentes no plano de deslocamento principal. É possível perceber a influência da falha no padrão de cimentação das rochas por óxidos de ferro (Fe) (Figuras 5A, 5B e 5C). O plano de falha está completamente ferruginizado, verificando-se ainda que a oxidação é maior no bloco alto, que apresenta cores mais avermelhadas, do que no bloco baixo. Esse padrão indica que a falha atua como um elemento de retardo para a passagem de água de um bloco para o outro, sendo o fluxo de água proveniente do sul, em que o relevo é mais alto, com afloramento de rochas do embasamento (borda de falha).

Na base do afloramento foi verificada uma boa exposição da anatomia da falha F1, referente ao seu núcleo, constituído de uma matriz cataclástica fina de pequeno rejeito (Figura 5C). Esse conjunto apresenta espessura média de 50 cm.

Ocorrem também feições do tipo *clay smear* (Figura 5D), marcadas por faixas argilosas ao longo do plano da falha, causadas pelo comportamento predominantemente plástico das camadas argilosas, arrastadas em resposta ao deslocamento dos blocos.

Dadas as características do afloramento, não pôde ser observada a relação da falha F1 com os depósitos da Formação Pinheiral.

A falha F2 (Figura 6A e 6B) também é caracterizada por um plano de deslocamento principal bem marcado, de

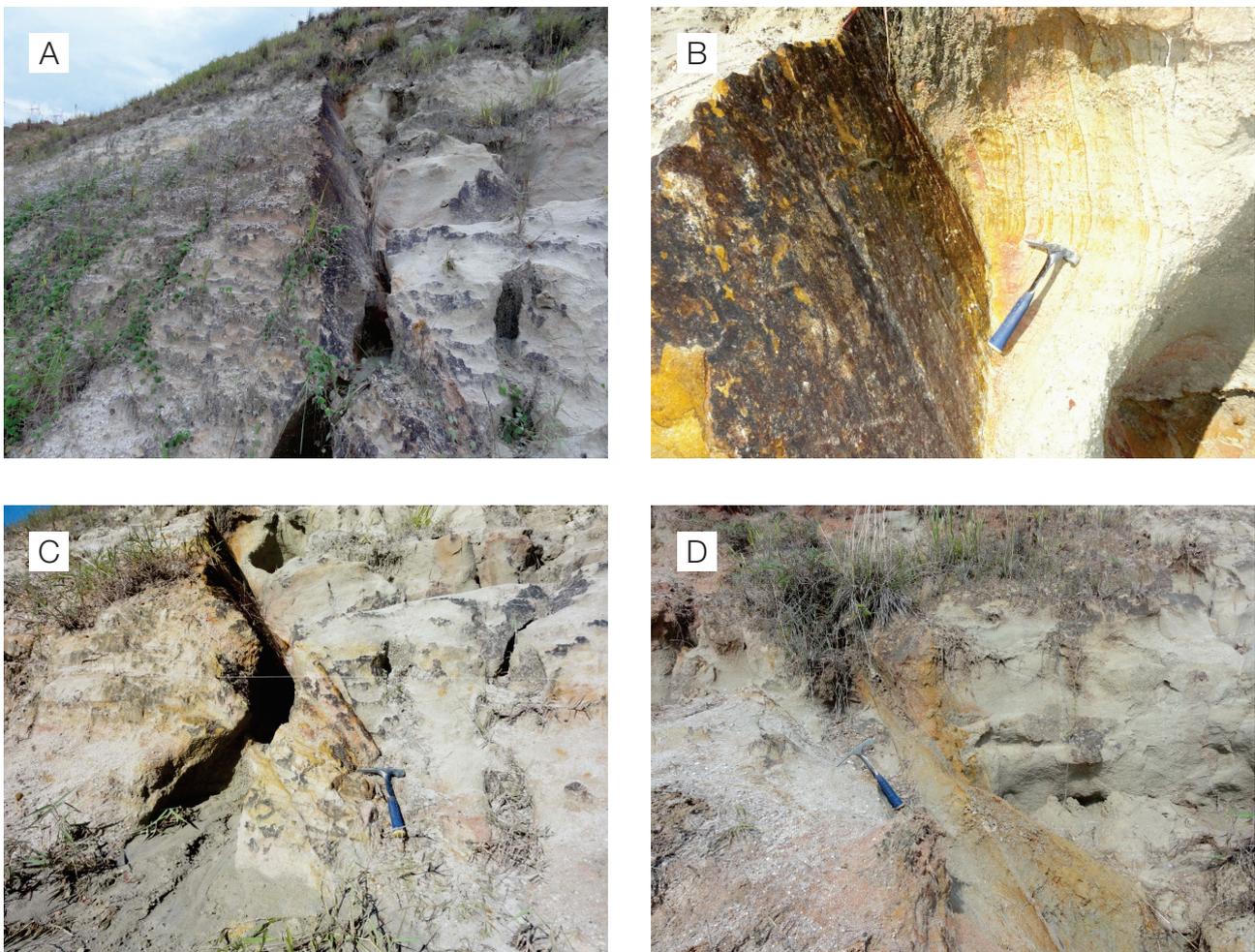


Figura 5. Aspectos estruturais relacionados à falha F1. (A) plano de falha ferruginizado limitando conjuntos litológicos distintos (arenitos e conglomerados do bloco sul, à esquerda; e arenitos do bloco central, à direita). Observar a variação no grau de oxidação das rochas entre os blocos sul (cores avermelhadas) e central (cores esbranquiçadas). (B) plano de falha ferruginizado, com presença de estrias indicativas de movimentação vertical. Observar também planos de falha conjugados, com aumento no grau de oxidação em direção ao plano principal. (C) núcleo e zona de dano, com a presença de planos secundários ressaltada pela variação na oxidação. (D) feição de *clay smear*.

orientação ENE-WSW (atitude 164/65), com estrias indicativas de movimentação vertical (atitude 164/65). Essa falha afeta tanto os depósitos da Formação Resende quanto os da Formação Pinheiral (Figuras 3 e 4). Com base nas relações estratigráficas observadas na seção geológica e na correlação entre os perfis sedimentológicos, foi possível identificar a movimentação normal, ainda evidenciada por uma expressiva feição de *clay smear* (Figura 6B). Assim como na falha F1, é possível perceber a influência da falha F2 no padrão de cimentação das rochas por óxidos de Fe (Figura 6A). O plano da falha F2 está também completamente ferruginizado e a maior oxidação, nesse caso, ocorre no bloco baixo, que apresenta cores mais avermelhadas em relação ao bloco alto. Essa variação confirma a hipótese do influxo de água a partir da região ao sul do afloramento, atuando a falha F2 no retardo para a passagem da água entre os blocos.

Ao longo da falha F2 observou-se a variação na espessura da zona de dano (de 50 cm até 2 m), aparentemente influenciada pelas variações litológicas, sendo mais estreita nos intervalos mais argilosos.

Além das falhas principais F1 e F2, falhas de menor expressão estão dispostas por todo o afloramento (Figura 4),

com orientações predominantemente NE-SW a ENE-WSW. No bloco central, essas falhas aparentam se relacionar, como falhas antitéticas, à F1 ou à F2.

Outras feições estruturais presentes no afloramento possuem aspectos semelhantes a zonas de bandas de deformação (Aydin e Johnson, 1978; Fossen, 2010) ou zonas de bandas de compactação (Mollema e Antonellini, 1996). Tais feições foram verificadas nos intervalos areníticos da Formação Resende, no bloco sul, formando um padrão anastomosado composto por diversas faixas delgadas (menos que 1 cm) subverticais, com orientação NE-SW, que compõem zonas com espessuras de 30 a 60 cm (Figura 7). Cada faixa que compõe essas feições apresenta aspecto granular mais fino que a rocha no entorno, também condicionando o padrão de oxidação (Figura 7). Uma vez que no presente estudo não foram feitas análises petrográficas, não é possível determinar se essas feições estruturais se tratam de zonas de bandas de deformação — caracterizadas por redução granulométrica — ou de bandas de compactação — caracterizadas pelo maior empacotamento mecânico dos grãos.

Em conjunto, todas as falhas descritas mostram um padrão geral de movimentação normal, perceptível com base nas

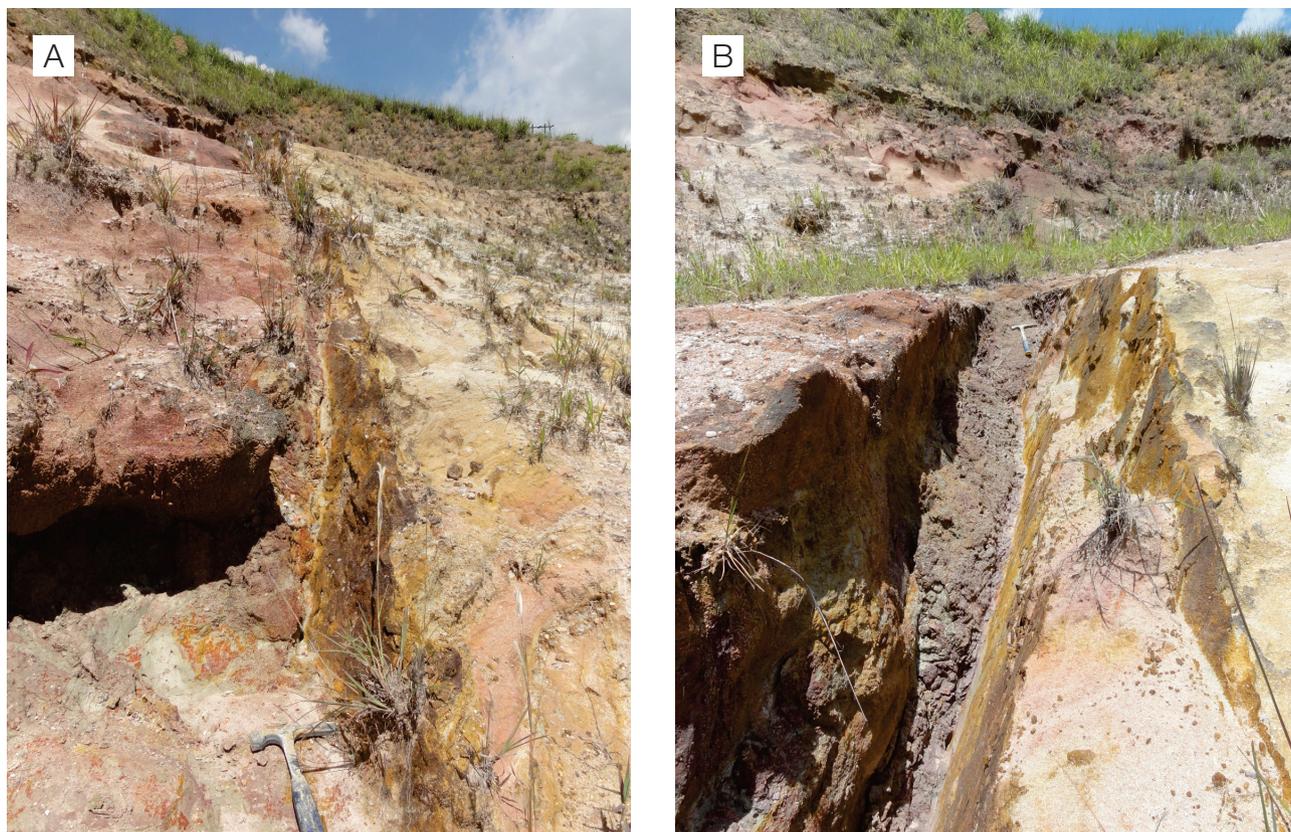


Figura 6. Aspectos estruturais relacionados à falha F2. (A) plano de falha ferruginizado limitando conjuntos litológicos distintos (arenitos e conglomerados do bloco norte, à direita; e arenitos e lamitos do bloco central, à esquerda). Observar a variação no grau de oxidação das rochas entre os blocos central (cores avermelhadas) e norte (cores esbranquiçadas a amareladas). (B) expressiva feição de *clay smear*.

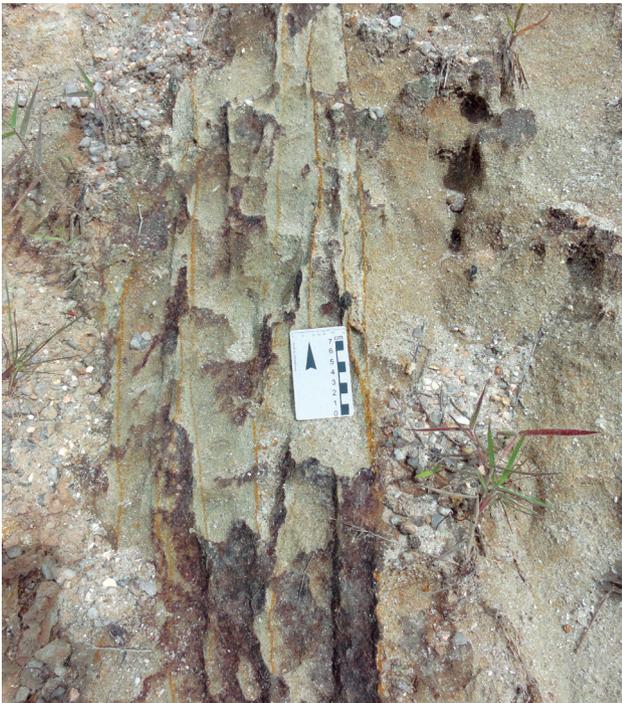


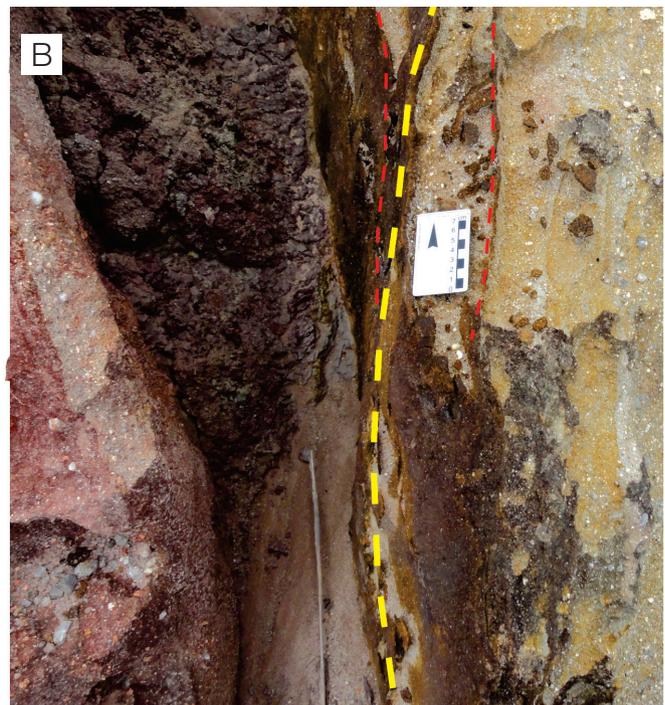
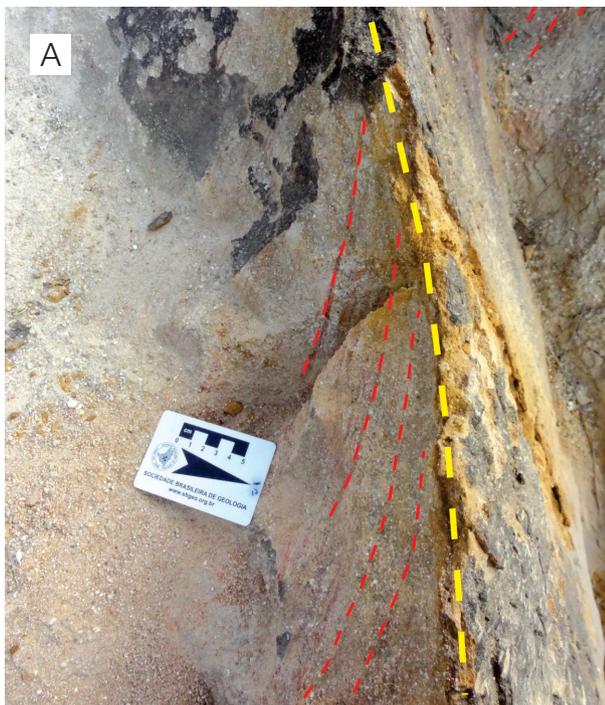
Figura 7. Visão em planta de possível zona de bandas de deformação ou de compactação, identificada em intervalo arenítico do afloramento estudado (a seta indica o topo do afloramento).

relações estratigráficas e no arranjo geométrico observado na seção geológica (Figura 4). Entretanto, há elementos que indicam que essa não foi a única movimentação sofrida pelas falhas F1 e F2, o que é evidenciado pela variação de espessura dos pacotes sedimentares quando interrompidos por essas falhas — em especial do intervalo pelítico localizado próximo à base do bloco central e do topo dos blocos sul e norte (Figura 4) —, aparentemente não relacionada a uma geometria lenticular dos estratos pelíticos, mas sugerindo movimentação transcorrente.

Alguns elementos estruturais confirmam a atuação de movimentação transcorrente no afloramento: apesar de muito pouco frequentes, foram identificados planos de falha com estrias superpostas, uma vertical (mais evidente) e outra sub-horizontal; outra evidência importante para movimentação transcorrente é a relação geométrica entre planos de fratura secundários e as falhas F1 e F2, em modelo de fraturas de Riedel (Figura 8).

As medidas de pares falha/estria obtidas no afloramento — total de 32 pares falha/estria analisados — foram classificadas em 3 grupos (Figura 9):

- o primeiro grupo reúne 24 falhas com direção ENE-WSW a NE-SW e movimentação normal, sendo o mais representativo do padrão estrutural do afloramento, indicando campo de esforços distensivo com orientação NW-SE. Essas falhas foram observadas tanto nos depósitos da Formação Resende como da Formação Pinheiral;



Fratura secundária

Falha principal

Figura 8. Relações geométricas observadas entre planos de fratura secundários e as falhas F1 (A) e F2 (B), sugestivas de movimentação transcorrente dextral.

- o segundo grupo reúne quatro falhas com direção ENE-WSW e movimentação transcorrente sinistral, indicando campo de esforços de compressão NE-SW e distensão NW-SE. Essas falhas foram medidas nos depósitos da Formação Resende, não tendo sido observadas evidências de afetarem a Formação Pinheiral;
- o terceiro grupo reúne quatro falhas, sendo duas com direção ESE-WNW e movimentação oblíqua normal/dextral, uma com direção NE-SW e movimentação transcorrente dextral, e uma com direção aproximadamente N-S e movimentação transcorrente sinistral. Analisadas em conjunto, essas falhas indicam campo

de esforços de distensão NE-SW e leve compressão NW-SE. Essas falhas foram observadas nos depósitos da Formação Resende, não sendo possível verificar se também afetam a Formação Pinheiral.

Considerando o contexto da tectônica regional, é possível correlacionar os regimes de paleotensões identificados aos eventos neotectônicos do RCSB (Riccomini et al., 2004; Sanson, 2006; Negrão et al., 2015):

- o segundo grupo de estruturas pode ser relacionado ao evento de transcorrência sinistral E-W (TS), de idade miocênica;

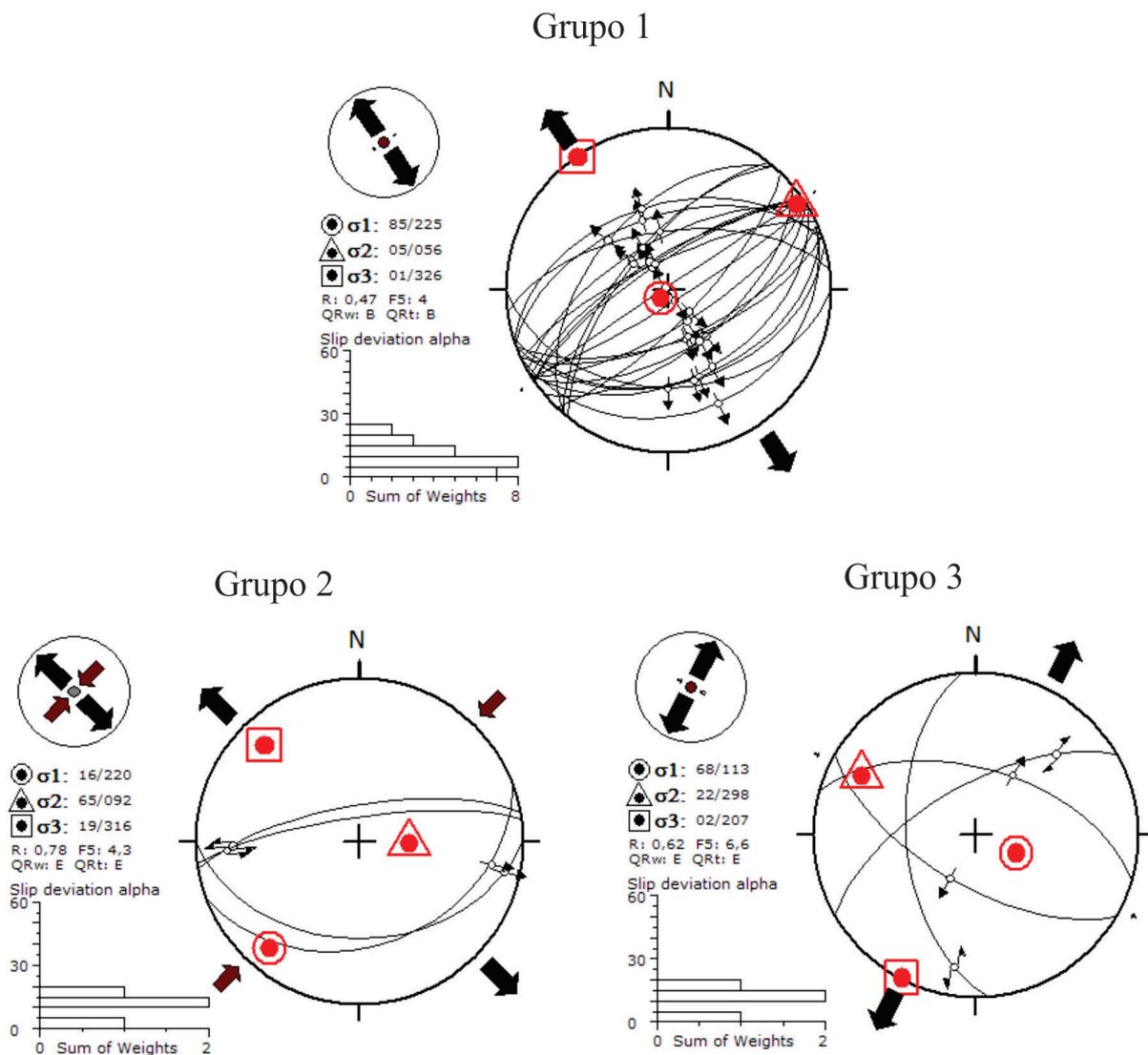


Figura 9. Representação em estereograma dos três conjuntos de falhas encontrados no afloramento, apontando regimes de paleotensões distintos.

- o terceiro grupo é correlacionável ao evento de transcorrência dextral E-W (TD), de idade pleistocênica a holocênica;
- o primeiro grupo, que possui registro mais abundante no afloramento, afetando as rochas das formações Resende e Pinheiral, pode ser correlacionado ao evento distensivo holocênico (E2).

Relações de superposição de estrias em planos de orientação NE-SW a ENE-WSW indicam que a movimentação normal — estrias bem marcadas — se sobrepõe à movimentação oblíqua normal/dextral — estrias menos evidentes —, corroborando a indicação cronológica adotada com base na correlação com dados de estudos anteriores. Esse resultado é condizente com a arquitetura predominante no afloramento — padrão gráben e horstes —, indicativa de regime distensivo, apontando o padrão estrutural relacionado ao campo de esforços mais recente.

CONCLUSÕES

A análise de paleotensões indicou a atuação de três eventos tectônicos no afloramento estudado, corroborando os modelos apresentados por Riccomini et al. (2004), Sanson (2006) e Negrão et al. (2015) para a evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda.

Embora a arquitetura estrutural do afloramento seja dominada por um padrão típico de regime distensivo — associado à atuação do regime tectônico mais recente identificado na bacia (distensão NW-SE holocênica) —, com predomínio de falhas normais e geometria de gráben e horstes, pode-se afirmar que as movimentações transcorrentes anteriores à deformação normal foram responsáveis por alguns importantes elementos estruturais descritos, tais como: variações abruptas na espessura das camadas; fraturas secundárias em modelo de Riedel; e desenvolvimento de zonas de dano espessas, mais frequentemente observadas nos blocos altos do padrão de deformação normal.

As sucessivas reativações tectônicas ao longo das falhas principais, de acordo com estilos estruturais diferenciados, favoreceram o desenvolvimento de vários elementos estruturais (i.e. *clay smear*; justaposição de camadas; zonas de dano e núcleo de falhas; bandas de deformação/compactação) reconhecidos na literatura como feições condicionantes da capacidade hidráulica de falhas, com impacto no fluxo de fluidos em reservatórios. A variação na cimentação por óxidos de Fe observada no afloramento mostra fortes indicações de estar relacionada à presença das falhas atuando como agente condicionante ao fluxo de água. Dessa forma, confirma tratar-se a Formação Resende de um bom geomaterial análogo a reservatórios siliciclásticos pouco consolidados e fraturados.

Recomenda-se investigar detalhadamente as possíveis zonas de bandas de deformação/bandas de compactação reconhecidas no presente estudo, não descritas em trabalhos anteriores realizados no RCSB, tendo em vista que essas feições constituem importantes elementos estruturais que impactam o fluxo de fluidos em reservatórios (Rotevatn et al., 2013).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGL/UFRJ) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte em infraestrutura e financiamento. Ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), por disponibilizar os veículos para trabalhos de campo. Ao Sr. José Luiz de Paiva Leijoto, pelo apoio aos estudos realizados, através da autorização de acesso ao terreno onde se localiza o afloramento investigado. Aos colegas Renato Ramos, Anderson Moraes, Mariléa Santos, André Negrão, Thaís Brêda, Suelen Vogel, Cheyenne Campos, Verônica Batista e Juliana Rodrigues, pelo apoio e pelas valiosas discussões em campo.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A. P. B., Mello, C. L., Pizani, T. C., Silva Jr., G. C. (2003). Análise do fraturamento neotectônico aplicada à avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar de Resende (RJ). *I Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste*, 1, 165-173. Rio de Janeiro.
- Angelier, J., Mechler, P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: la méthode des diédres droites. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 19, 1309-1318.
- Aydin, A., Johnson, A. M. (1978). Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 931-942.
- Delvaux, D., Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: D. A. Nieuwland (Ed.). *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* (212, 75-100). London: Geological Society, Special Publications.
- Ellevset, S. O., Knipe, R. J., Olsen, T. S., Fisher, Q. J., Jones, G. (1998). Fault controlled communication in the Sleipner Vest Field, Norwegian Continental Shelf: detailed, quantitative input for reservoir simulation and well planning. *Geological Society, Special Publications*, 147, 283-297.

- Fisher, Q. J., Knipe, R. J. (1998). Fault sealing processes in siliciclastic sediments. *Geological Society, Special Publications*, 147, 117-134.
- Fossen, H. (2010). Deformation bands formed during soft sediment deformation: observations from SE Utah. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 215-222.
- Gibson, R. G. (1998). Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. In: M. P. Coward, T. S. Daltaban, H. Johnson. *Structural Geology in Reservoir Characterisation*, 127, 83-97. London: Geological Society, Special Publications.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos Neto, M. C., Silva, L. C.; Trouw, R. A. J., Janasi, V. A. (2004). A Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (203-234). São Paulo: Beca.
- Howell, J. A., Martinius, A. W., Good, T. R. (2014). The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. In: A. W. Martinius, J. A. Howell, T. R. Good (Eds.). *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface* (387, 1-25). London: The Geological Society.
- Manzocchi, T., Ringrose, P. S., Underhill, J. R. (1998). Flow through fault systems in high-porosity sandstones. In: M. P. Coward, T. S. Daltaban, H. Johnson (Eds.). *Structural Geology in Reservoir Characterization* (127, 65-82). London: Geological Society, Special Publications.
- Melo, M. S., Riccomini, C., Campanha, G. A. C., Miotto, J. A., Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Ponçano, W. L., Gimenez, A. F. (1983). *Estudos geológico-tectônicos na Bacia de Resende (RJ) e sedimentos terciários de Volta Redonda (RJ) e Bacia de Taubaté (área de Cruzeiro-SP)*. Relatório 17.737. São Paulo: IPT. 124 p.
- Mollema, P. N., Antonellini, M. A. (1996). Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. *Tectonophysics*, 267, 209-228.
- Negrão, A. P. (2014). *Evolução tectonossedimentar e deformação rúptil cenozoica da região da Bacia de Volta Redonda (Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil, RJ)*. DR. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ. 249 p.
- Negrão, A. P., Ramos, R. R. C., Mello, C. L., Sanson, M. S. R. (2015). Mapa geológico do Cenozoico da região da bacia de Volta Redonda (RJ, Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil): identificação de novos grábens e ocorrências descontínuas, e caracterização de estágios tectonossedimentares. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 273-291.
- Padilha, A. L., Vitorello, I. (1992). Investigações geoeletricas nas bacias de Volta Redonda e Resende. *XXXVLL Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 403-404. São Paulo.
- Pei, Y., Paton, D. A., Knipe, R. J., Wu, K. (2015). A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks. *Earth-Science Reviews*, 150, 121-138.
- Ramos, R. R. C., Mello, C. L., Sanson, M. S. R. (2006). Revisão estratigráfica da Bacia de Resende, *Rift Continental do Sudeste do Brasil*, Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, 25(1), 59-70.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do *Rift Continental do Sudeste do Brasil*. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 383-405. São Paulo: Beca.
- Rotevatn, A., Sandve, T. H., Keilegavlen, E., Kolyukhin, D., Fossen, H. (2013). Deformation bands and their impact on fluid flow in sandstone reservoirs: the role of natural thickness variations. *Geofluids*, 13, 359-371.
- Sanson, M. S. R. (2006). *Sistemas deposicionais aluviais e tectônica cenozóica na região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil*. MS. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ. 151 p.
- Sanson, M. S. R., Ramos, R. R. C., Mello, C. L. (2006). Bacias Sedimentares Brasileiras - Bacia de Volta Redonda. *Phoenix*, 88, 1-6.
- Silva, L. C., Cunha, H. C. S. (2001). *Geologia do Estado do Rio de Janeiro*: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: CPRM, 2001.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Duarte, B. P., Nogueira, J. R., Valladares, C. S., Almeida, J. C. H., Silva, L. G. E., Medeiros, S. R., Almeida, C. G., Miranda, A. W. A., Ragatky, C. D., Mendes, J., Ludka, I. (2007). Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos*, 15, 67-79.