

Modelagem numérica das tensões tectônicas cenozoicas e padrões estruturais associados na porção noroeste da Bacia Potiguar

Numerical modeling of the cenozoic tectonic stress fields and associated structural patterns in the northwestern portion of the Potiguar Basin

Leandro Neves Araujo¹ , Claudio Limeira Mello¹ , Anderson Moraes^{2,3} , Aline Theophilo Silva² 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, bloco G, sala G1-041, Cidade Universitária, CEP: 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, BR
(leandroneves97@gmail.com; limeira@geologia.ufrj.br)

²Petrobras/Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, Rio de Janeiro, RJ, BR
(geologo_amoraes@uol.com.br; aline.theos@gmail.com)

³Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, BR.

Recebido em 30 de janeiro de 2023; aceito em 27 de julho de 2023.

Resumo

A correlação entre tensão e deformação é um desafio em estudos geológicos, principalmente em regiões onde ocorre superposição de eventos com diferentes arranjos de esforços. Uma região propícia para esse tipo de estudo é a Bacia Potiguar, no Nordeste do Brasil, que registra abundantes evidências de deformações tectônicas cenozoicas, e tem dois eventos admitidos na literatura para este período: do Albiano ao Mioceno médio, com tensão horizontal máxima (SH) N-S; e do Mioceno médio ao Recente, com SH variando de E-W a NW-SE. O presente estudo modelou numericamente esses dois eventos tectônicos em uma região no noroeste da Bacia Potiguar, correlacionando as tensões modeladas com a trama estrutural registrada em análise de fotolinhamentos. Os cenários numéricos foram produzidos com base no método dos elementos finitos. Foram aplicadas tensões compressivas relacionadas aos dois eventos tectônicos, de modo a simular como se comportam os padrões de ruptura e as tensões horizontais máximas em uma trama estrutural pretérita. Como resultados, foi observado que as feições estruturais predominantes na região apresentam orientação E-W, WNW-ESE e NE-SW a NNE-SSW, sendo interpretadas principalmente como reativações da trama preexistente, já que são subparalelas à estruturação da Bacia Potiguar ou da Margem Equatorial. Os modelos numéricos sugerem que estruturas formadas com orientação próxima a N-S, como os lineamentos NE-SW/NNE-SSW, estariam relacionados ao campo de esforços atuante do Albiano ao Mioceno médio. Já as estruturas próximas a E-W e WNW-ESE seriam formadas principalmente pelo campo de esforços atuante do Mioceno médio ao Recente. Os resultados numéricos mostram ainda que ocorre reorientação das tensões nas adjacências de descontinuidades estruturais, favorecendo, nos dois eventos, a formação de novas estruturas paralelas à trama pretérita.

Palavras-chave: Tectônica cenozoica; Modelagem numérica; Bacia Potiguar.

Abstract

The correlation between strain and stress is challenging in geological studies, especially in areas with superposition of events with distinct stress fields. A favorable region for this kind of study is the Potiguar Basin, in Northeastern Brazil, which records several evidence of Cenozoic deformations and has two tectonic events proposed in the literature in this period: between Albian and middle Miocene, with maximum horizontal stress (SH) N-S; and since the middle Miocene, with SH ranging from E-W to NW-SE. This study performed the numerical modeling of these two tectonic events in the northwestern portion of the Potiguar Basin, correlating the modeled stresses with the structural framework derived from a lineament analysis. Numerical scenarios were produced based on the finite element method. Compressive stress, related to the two tectonic events, were applied, aiming to model the behavior of rupture patterns and the maximum horizontal stress in a preexisting structural framework. As a result, it was verified that the predominant features in the lineament map have E-W, WNW-ESE and NE-SW/NNE-SSW orientations and were interpreted mainly as reactivation of preexisting structural framework, since they are sub-parallel to the main structures of Potiguar Basin and Equatorial Margin. The numerical models suggest that structures formed with an orientation close to N-S, such as the NE-SW/NNE-SSW lineaments, would be related to the active stress field from the Albian to the middle Miocene. The structures close to E-W and WNW-ESE would be formed mainly by the active stress field from the Middle Miocene to the Recent. The numerical results also show that stress reorientation occurs in the surroundings of structural discontinuities, promoting the generation of new structures parallel to the preexisting framework.

Keywords: Cenozoic tectonics; Numerical modeling; Potiguar Basin.

INTRODUÇÃO

As deformações intraplaca podem ser causadas por uma série de fatores, sendo geralmente um bom indicador da ação de tensões que se propagaram desde as bordas da placa tectônica até porções interiores (Wdowinski, 1998; Stephenson et al., 2020), caracterizando um evento tectônico. Entre os fatores regionais e locais que podem alterar o estado de tensões em uma área, podem ser citados erosão no continente ou sedimentação em bacias, soerguimentos epirogenéticos, arqueamento de camadas geológicas e interferência de falhas ou estruturas antigas. Dessa forma, mudanças na cinemática das placas ou a variação das tensões nas suas margens ao longo do tempo podem gerar superimposição de eventos tectônicos no interior do continente, como discutido, por exemplo, nos casos do Rifte do Quênia (Atmaoui e Hollnack, 2003) e do Rifte Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini et al., 2004), e inversões de bacias, como situações descritas no Norte da China (Shi et al., 2020), no Atlântico Norte e na Europa (Stephenson et al., 2020), e na Bacia Potiguar, localizada na região Nordeste do Brasil (Maia e Bezerra, 2014; Bezerra et al., 2020).

A superimposição de eventos e a inversão de esforços tectônicos podem ser aferidas quando são interpretados mais de um campo de tensões a partir de dados estruturais de falha/estria (Riccomini, 1989; Bezerra et al., 2020; Shi et al., 2020), ou se há evidências geofísicas de reativação e inversão de falhas (Williams et al., 1989; Maia e Bezerra, 2014; Stephenson et al., 2020). Quando a análise *in situ* é dificultada, seja por questões de acesso, falta de afloramentos ou pela escala de trabalho, a análise estrutural por sensoriamento remoto é uma técnica bastante utilizada (Rahiman e Pettinga, 2008; Bezerra et al., 2014; Cianfarra e Salvini, 2014; Smets et al., 2016; Brêda et al., 2018; Pinheiro et al., 2019). Esse método, associado com ferramentas de modelagem numérica, permite interpretar e associar os principais *trends* de lineamentos de uma área com a tectônica regional ou de áreas adjacentes.

A utilização da modelagem numérica em trabalhos relacionados à Geologia Estrutural vem sendo cada vez mais adotada, especialmente com a aplicação do método dos elementos finitos (Liu e Bird, 2002; Reynolds et al., 2002; Smart et al., 2012; Muller et al., 2015; Rabelo et al., 2015; Nabavi et al., 2018; Tavares et al., 2021; Brêda et al., 2021). Por meio da modelagem, podem ser simulados eventos tectônicos e ser analisados parâmetros mecânicos e geológicos variados, por exemplo, diferentes arranjos de tensões e configurações estruturais iniciais. A modelagem numérica é realizada de maneira rápida, prática e com um rigor físico-matemático importante para as interpretações geológicas (Moraes, 2016). A correlação de padrões estruturais com as suas tensões formadoras nem sempre é uma tarefa simples, principalmente em regiões onde mais de um campo de

esforços foi atuante. A modelagem numérica pelo método dos elementos finitos pode ser utilizada para compreender como se comporta o campo de tensões ao longo de uma região em determinado evento tectônico (Reynolds et al., 2002; Muller et al., 2015; Brêda et al., 2021), permitindo assim associá-lo com as estruturas observadas na área ou regiões próximas. Pode-se inclusive modelar como essas tensões variam frente a descontinuidades geológicas, como falhas, zonas de cisalhamento, contatos litológicos, entre outras. Com o avanço da capacidade de processamento computacional, programas atuais conseguem modelar áreas com grande número de elementos de interface (Brêda et al., 2021), permitindo introduzir maior complexidade estrutural à área que será analisada, para entender o comportamento das tensões nesse ambiente.

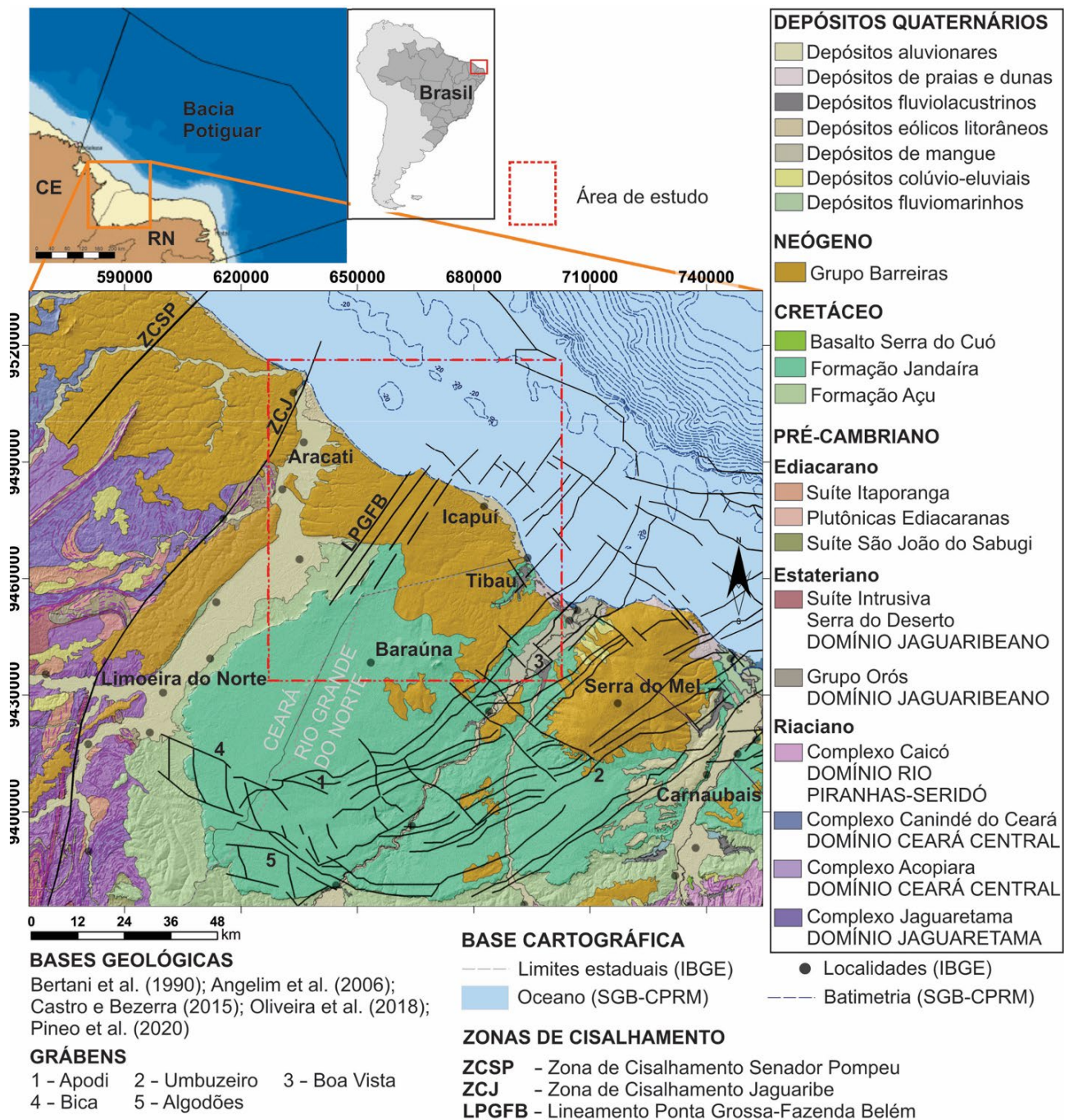
O presente estudo propôs-se a realizar a modelagem mecânica numérica das tensões associadas a eventos tectônicos cenozoicos na Bacia Potiguar, região intraplaca com reconhecida superposição de eventos tectônicos e inversão de bacia. Os campos de tensões tectônicas cenozoicas foram modelados e, a partir disso, relacionados aos principais *trends* estruturais identificados na área investigada, avaliando-se a neoformação e a reativação da trama estrutural preexistente.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está localizada na porção noroeste da Bacia Potiguar, em uma região entre os estados do Ceará e do Rio Grande do Norte e próxima ao litoral (Figura 1), no Nordeste do Brasil. Geologicamente, a área está inserida na Plataforma de Aracati, uma região de embasamento soerguido, recoberta por rochas sedimentares cretácicas e cenozoicas (Bertani et al., 1990; Morelato e Fabianovicz, 2015; Oliveira et al., 2018).

O embasamento da região faz parte da porção setentrional da Província Borborema, que constitui um mosaico de terrenos pré-cambrianos, amalgamados entre os crátons São Francisco e São Luís, em um sistema orogênico do Ciclo Panafricano/Brasílico, ocorrido no final do Neoproterozoico e início do Paleozoico (Souza et al., 2016). Um importante aspecto da Província Borborema é a presença expressiva de zonas de cisalhamento transcorrentes (Vauchez et al., 1995; Castro et al., 2012; Souza et al., 2016).

A Plataforma de Aracati está inserida no Domínio Jaguaribeano, composto predominantemente de filitos e xistos, além de rochas calcissilicáticas, quartzitos, mármores e anfíbolitos (Pineo et al., 2020), que constituem as faixas Orós e Jaguaribe (Cavalcanti e Cavalcante, 2014). Nessa porção, as zonas de cisalhamento pré-cambrianas apresentam um *trend* NE-SW a NNE-SSW e um caráter dextral, tendo sido reativadas em eventos posteriores com cinemáticas distintas.



Na área de estudo, destacam-se as zonas de cisalhamento Jaguaribe e Ponta Grossa-Fazenda Belém.

A Bacia Potiguar foi formada no início do Período Cretáceo, aproveitando a estruturação do embasamento e as suas zonas de cisalhamento, a partir de esforços distensivos NW-SE que culminaram na abertura do Oceano Atlântico

(Matos, 1992; Castro et al., 2012). Em sua porção emersa, essa bacia apresenta estruturação principal marcadamente NE-SW, porém também estão presentes estruturas NW-SE e E-W, interpretadas como zonas de transferência (Matos, 1992; Pessoa Neto et al., 2007). Por seu posicionamento na Margem Continental Brasileira, a Bacia Potiguar também

mostra influência das tensões da Margem Equatorial, com uma tectônica *strike-slip* de direção predominante E-W a partir do Barremiano, que afeta predominantemente sua porção submersa (Matos, 1992, 2000; Pessoa Neto et al., 2007).

Grande parte das unidades estratigráficas da Bacia Potiguar não está aflorante, seja por estar na porção submersa, seja por ser recoberta por sedimentos mais recentes. As unidades aflorantes na bacia, inclusive na Plataforma de Aracati, são: os arenitos da Formação Açú (Albiano ao Cenomaniano); os calcários da Formação Jandaíra (Turoniano ao Campaniano); os arenitos, lutitos e conglomerados da Formação Barreiras (Mioceno), também denominada por alguns autores como Grupo Barreiras; e os depósitos quaternários de planícies fluviais e costeiras (Figura 1) – Bertani et al. (1990); Morelato e Fabianovicz (2015).

Um aspecto sobre a Bacia Potiguar que é relevante para o presente trabalho é o grande número de evidências de eventos deformacionais cenozoicos (Bezerra e Vita-Finzi, 2000; Nogueira et al., 2006; Moura-Lima et al., 2010; Bezerra et al., 2011, 2020; Reis et al., 2013; Maia e Bezerra, 2014; Sousa et al., 2014; entre outros). Bezerra et al. (2020) reconheceram dois campos de esforços transcorrentes cenozoicos atuantes na Bacia Potiguar. O primeiro evento (SF1) atuou do Albiano ao Mioceno médio e apresenta tensão horizontal máxima (SH) N-S e tensão horizontal mínima (Sh) E-W, com origem provavelmente em pulsos de transpressão ao longo de falhas transformantes atlânticas. Esse evento afetou depósitos das formações Açú e Jandaíra, e da Formação Barreiras. O segundo campo de esforços (SF2), com atuação desde o Mioceno médio, apresenta tensão horizontal máxima (SH) E-W (podendo se reorientar até NW-SE) e tensão horizontal mínima (Sh) N-S (podendo se reorientar até NE-SW). A reorientação dos esforços no evento SF2 ocorre de modo que a tensão horizontal máxima apresenta a tendência de se reorientar paralelamente à orientação da linha de costa em pontos próximos ao litoral (Ferreira et al., 1998; Bezerra et al., 2020). O campo de esforços SF2 é consistente com as tensões relacionadas às bordas da placa, em conjunto com distensões locais causadas por esforços flexurais por conta de contrastes entre a crosta continental e a oceânica. Tanto o evento SF1 quanto o evento SF2 foram responsáveis pela reativação de antigas estruturas e pela geração de novas, inclusive com influência na migração de petróleo (Bezerra et al., 2020; Ibanez et al., 2022) e no relevo local, com a formação de domeamentos e vales fluviais orientados (Maia e Bezerra, 2014).

METODOLOGIA

Para atingir o objetivo da modelagem numérica das tensões associadas aos eventos tectônicos cenozoicos na região noroeste da Bacia Potiguar, foram realizadas duas etapas

principais. A primeira consiste na caracterização dos *trends* estruturais da área, a partir da confecção de um mapa de lineamentos. Essa etapa foi seguida pela construção de modelos numéricos, com base no método dos elementos finitos, utilizando as tensões tectônicas associadas aos eventos SF1 e SF2 propostos por Bezerra et al. (2020).

Interpretação de fotolineamentos

Considerando que os mapas geológicos disponíveis para a região de estudo (Fortes, 1987; Pineo et al., 2020) representam apenas as estruturas principais do embasamento e da Bacia Potiguar, a etapa de interpretação de fotolineamentos teve como objetivo adensar a trama estrutural na área de interesse. Os lineamentos foram interpretados sobre imagens de relevo sombreado em quatro diferentes azimutes de iluminação, a partir de modelo digital de elevação (MDE) da fonte ALOS PALSAR (ASF DAAC/NASA, 2023), com pixel de 12,5 m, sendo produzido um mapa de lineamentos na escala 1:250.000.

Para a extração de fotolineamentos foram consideradas “feições lineares manifestadas por alinhamentos visuais” (Scheiber et al., 2015), reconhecidas pelo padrão de textura ou de coloração nas imagens de relevo sombreado, assumindo-se que representam zonas de fratura ou descontinuidades (Mabee et al., 1994; Rahiman e Pettinga, 2008). A fim de diminuir imprecisões e subjetividades, como advertido por Wise (1982), foi adotada a seguinte rotina de interpretação:

- i) extração dos lineamentos sobre imagens de relevo sombreado com azimutes de iluminação 000°, 045°, 090° e 315°, sendo o ângulo de iluminação com a horizontal definido em 30°, devido à suavidade do terreno;
- ii) reinterpretação das quatro imagens de relevo sombreado, resultando, após as duas etapas iniciais, em oito mapas preliminares de lineamentos;
- iii) execução de teste de reprodutibilidade, com a sobreposição dos mapas preliminares elaborados com as mesmas direções de iluminação, para identificar lineamentos coincidentes (foram considerados coincidentes quando apresentaram ângulo de até 5° entre eles e separação de até 2 mm na escala de observação — Wise et al., 1985; Mabee et al., 1994; Rahiman, 2006). Os lineamentos não coincidentes foram descartados. Dessa etapa, resultaram quatro mapas, um para cada direção de iluminação;
- iv) integração dos quatro mapas confeccionados na etapa anterior, resultando no mapa de lineamentos final. Nessa etapa, lineamentos coincidentes em mais de uma direção de iluminação foram considerados como apenas um no mapa final.

Modelagem numérica

A base geológica-estrutural necessária para a modelagem mecânica numérica dos eventos tectônicos cenozoicos

SF1 e SF2 foi elaborada considerando-se os calcários da Formação Jandaíra como o substrato litológico da região analisada, pois estão presentes em grande parte da área de estudo, sotopostos à Formação Barreiras. Assumiu-se também que a trama estrutural no momento da implantação desses eventos seria constituída das estruturas representadas nos mapas de Fortes (1987) e Pineo et al. (2020), em conjunto com feições selecionadas do mapa de lineamentos confeccionado no presente estudo (Figura 2). Neste caso, foram incorporados à trama estrutural regional lineamentos de orientação próxima às direções NE-SW/NNE-SSW e WNW-ESE-NW-SE, que têm elevado comprimento em relação à média do mapa, de modo que foi considerado que eles faziam parte da estruturação original da Bacia Potiguar, tendo em vista que são subparalelos às estruturas do Rifte Potiguar e suas zonas de transferência, e às zonas de cisalhamento pré-cambrianas.

A modelagem foi realizada em duas dimensões, utilizando o Sistema TECTOS (programa de propriedade da Petrobras desenvolvido em parceria entre com o Instituto Tecgraf da PUC-Rio), que tem como base a mecânica dos meios contínuos e utiliza o método dos elementos finitos

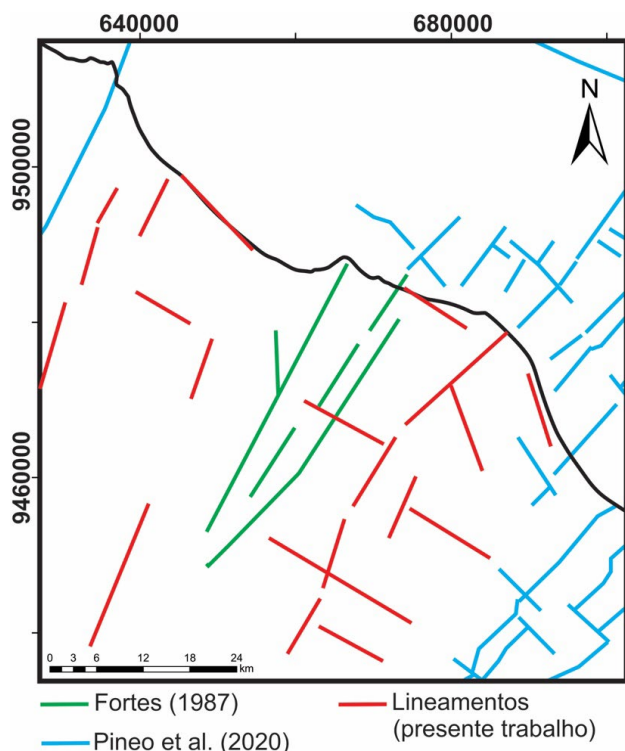


Figura 2. Trama estrutural adotada para a modelagem mecânica numérica realizada no presente estudo. Estão representadas as estruturas do embasamento e da Bacia Potiguar (segundo Fortes, 1987; Pineo et al., 2020), em conjunto com lineamentos selecionados de orientação NE-SW e NW-SE.

(MEF). O TECTOS demonstrou precisão e confiabilidade dos resultados, como visto em outros trabalhos de modelagem numérica (Rabelo et al., 2015; Moraes, 2016; Brêda et al., 2021; Tavares et al., 2021).

Para a confecção dos modelos, foi construída uma malha não estruturada com elementos lineares triangulares (no MEF, elementos finitos são a menor unidade do meio contínuo). A malha utilizada nos modelos foi construída com um total aproximado de 1500 elementos finitos. Em regiões com maior complexidade estrutural, a malha foi adensada, em relação a regiões com menos estruturas.

Nos modelos, foi considerado um comportamento elástico não associado para o meio e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. As propriedades mecânicas do substrato geológico (carbonatos da Formação Jandaíra) e dos seus elementos de interface (falhas, zonas de cisalhamento e lineamentos selecionados) foram atribuídas conforme Rabelo et al. (2015) (Tabela 1). As tensões compressivas foram aplicadas perpendicularmente às bordas (arestas) de cada modelo. Por fim, foi aplicada uma restrição de movimento nos quatro vértices dos modelos, deixando as arestas e o seu interior livres para movimentação. A modelagem foi realizada em uma área significativamente maior do que a área analisada, para diminuir os efeitos de borda ocasionados pelas condições de contorno utilizadas.

Foram construídos três modelos para o evento SF1 (SH N-S e Sh E-W), cada um com dez passos de incremento de carga:

- Modelo SF1-1 – tensão N-S 30 MPa e tensão E-W 10 MPa;
- Modelo SF1-2 – tensão N-S 30 MPa e tensão E-W 20 MPa;
- Modelo SF1-3 – tensão N-S 30 MPa e tensão E-W 10 MPa; apenas neste caso, sendo consideradas como elementos de interface somente as estruturas representadas em Fortes (1987) e Pineo et al. (2020), excluindo-se os lineamentos selecionados.

Tabela 1. Propriedades mecânicas atribuídas nos modelos para o substrato geológico e os elementos de interface.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SUBSTRATO LITOLÓGICO	
Densidade	2.700 kg/m ³
Módulo de Young	25 GPa
Coefficiente de Poisson	0,15
Coefficiente de Biot	1
Coesão – Resistência Interna	5 MPa
Ângulo de Atrito Interno	30°
Ângulo de Dilatância	12°
PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DE INTERFACE	
Resistência à Compressão (Kn)	1.000.000 Pa/m
Resistência ao Cisalhamento (Ks)	10.000 Pa/m

Fonte: conforme Rabelo et al. (2015).

Os modelos construídos buscaram simular condições de tensão próximas à superfície, de modo que a tensão horizontal máxima é significativamente maior que a tensão horizontal mínima (3 vezes maior). Apenas no modelo SF1-2 foi simulado um arranjo de tensões em que a tensão máxima é uma vez e meia maior que a tensão mínima, de modo a testar os efeitos de um maior confinamento nos padrões de ruptura ao longo do incremento de tensões. Já o modelo SF1-3 busca avaliar quais são os efeitos de uma trama estrutural menos densa no padrão de ruptura dos modelos ao longo do incremento de tensões. Nesse último caso também foi considerada a tensão horizontal máxima 3 vezes maior que a tensão horizontal mínima (que foi o arranjo de tensões padrão utilizado nos modelos, inclusive para o evento SF2).

Para o evento SF2 (SH E-W/NW-SE e Sh N-S/NE-SW) também foram construídos três modelos, cada um igualmente com dez passos de incremento:

- Modelo SF2-1 – tensão E-W 30 MPa e tensão N-S 10 MPa;
- Modelo SF2-2 – tensão NW-SE (N45W) ~42,43 MPa e tensão NE-SW (N45E) ~14,14 MPa;
- Modelo SF2-3 – tensão WNW-ESE (~N63W) ~44,72 MPa e tensão NNE-SSW (~N27E) ~14,98 MPa.

Os modelos simulados para o evento SF2 buscaram testar diferentes arranjos de orientação das tensões compatíveis com o evento, tendo em vista que a tensão horizontal máxima pode variar de E-W até NW-SE ao longo da Bacia Potiguar (Bezerra et al., 2020). Os valores das tensões nos modelos SF2-2 e SF2-3 são apresentados em decimais aproximados porque correspondem a tensões oblíquas aos eixos N-S e E-W (eixos de aplicação das tensões no TECTOS). Dessa forma, no momento da prescrição das tensões, ocorre a soma dos vetores N-S e E-W para que a tensão seja aplicada na direção designada (NW-SE, NE-SW, WNW-ESE ou NNE-SSW).

Os resultados dos modelos foram analisados em termos da orientação da tensão horizontal máxima (SH) e da Razão de Falhamento por *Stress* (RFS), que indica a proximidade de ruptura de um material. O RFS é definido pela relação entre o Círculo de Mohr e o Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 1):

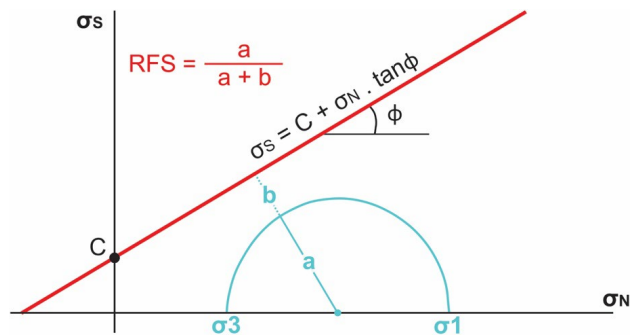
$$RFS = \frac{a}{a + b} \quad (1)$$

Em que:

a: raio do Círculo de Mohr;

b: distância do Círculo de Mohr para a linha do Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 3).

Valores de RFS próximos a 0 indicam que o material está distante da ruptura, enquanto valores próximos a 1 indicam que o material está próximo de romper. Os parâmetros



RFS: Razão de Falhamento por *Stress*.

Fonte: adaptada de Moraes (1995).

Figura 3. Representação gráfica e escrita do Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb e da Razão de Falhamento por *Stress*.

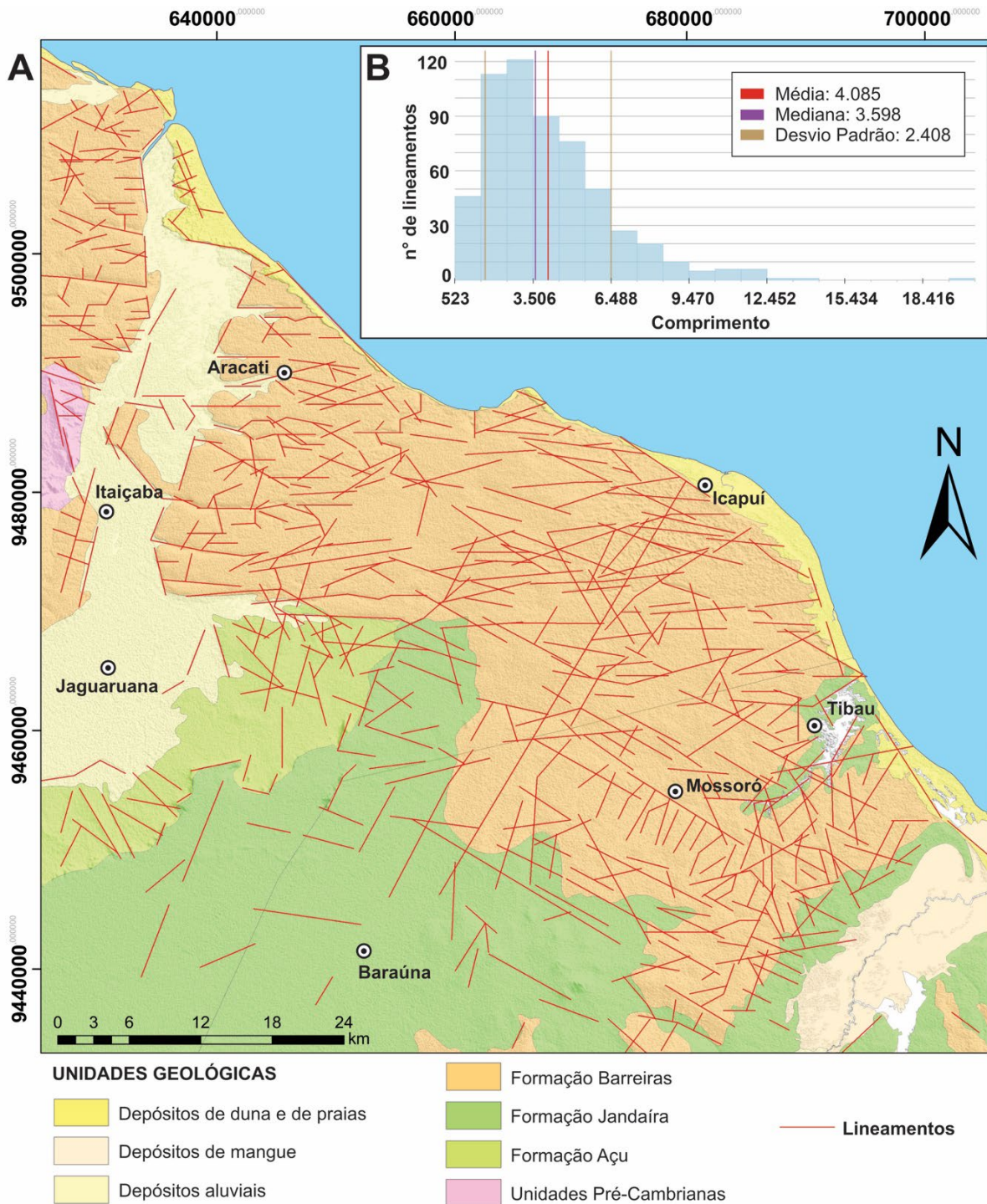
orientação de SH e RFS possibilitam fazer uma análise qualitativa do comportamento das tensões na região, permitindo-se interpretar áreas mais propensas à ativação estrutural e a orientação provável de feições formadas ou reativadas em cada evento.

RESULTADOS

Análise dos lineamentos

O mapa de lineamentos produzido pela fotointerpretação (Figura 4) contém 573 lineamentos estruturais, com comprimentos que variam de aproximadamente 500 m até cerca de 20.000 m, sendo aproximadamente a metade deles concentrados entre os comprimentos de 1.500 e 4.000 m. Os lineamentos, de forma geral, ocorrem bem distribuídos ao longo da área de estudo. As exceções são os vales dos rios Jaguaribe (no extremo oeste da área) e Mossoró/Apodi (no extremo sudeste da área), o que pode ser atribuído à cobertura por sedimentos fluviais recentes. Na porção sul/sudoeste, que corresponde a uma região de baixo platô onde aflora a Formação Jandaíra, a densidade de lineamentos também é inferior à média encontrada para a área.

A maior concentração de lineamentos ocorre na porção norte da área de estudo e nas proximidades do litoral, coincidindo com a área de ocorrência da Formação Barreiras. A quantidade de lineamentos observada sobre essa unidade é um forte indicativo da atuação de processos neotectônicos na região. Outra provável evidência da tectônica recente é a coincidência entre os limites da Formação Barreiras na área analisada e direções preferenciais de lineamentos (E-W, NNE-SSW e NW-SE), especialmente o feixe de lineamentos E-W, ao sul de Icapuí, que se estende do litoral ao vale do rio Jaguaribe e se



ajusta ao contato da Formação Barreiras com unidades litoestratigráficas mais antigas.

Os lineamentos na área de estudo estão predominantemente orientados na direção E-W (N75-90E/N75-90W),

tanto analisando-se o número de lineamentos quanto o comprimento acumulado (Figura 5). Os lineamentos com essa orientação estão presentes por toda a área, mostrando uma expressiva concentração na parte norte.

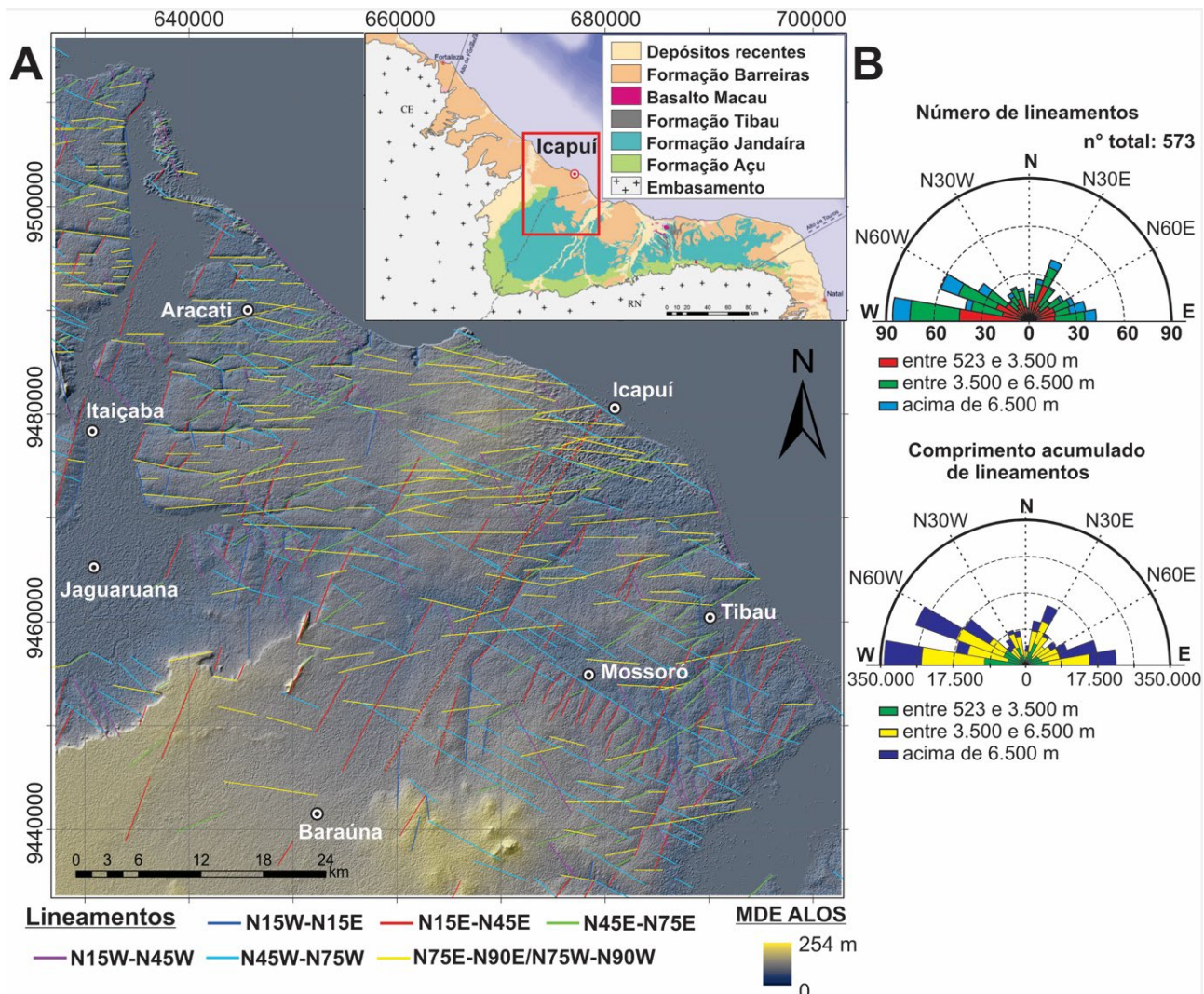


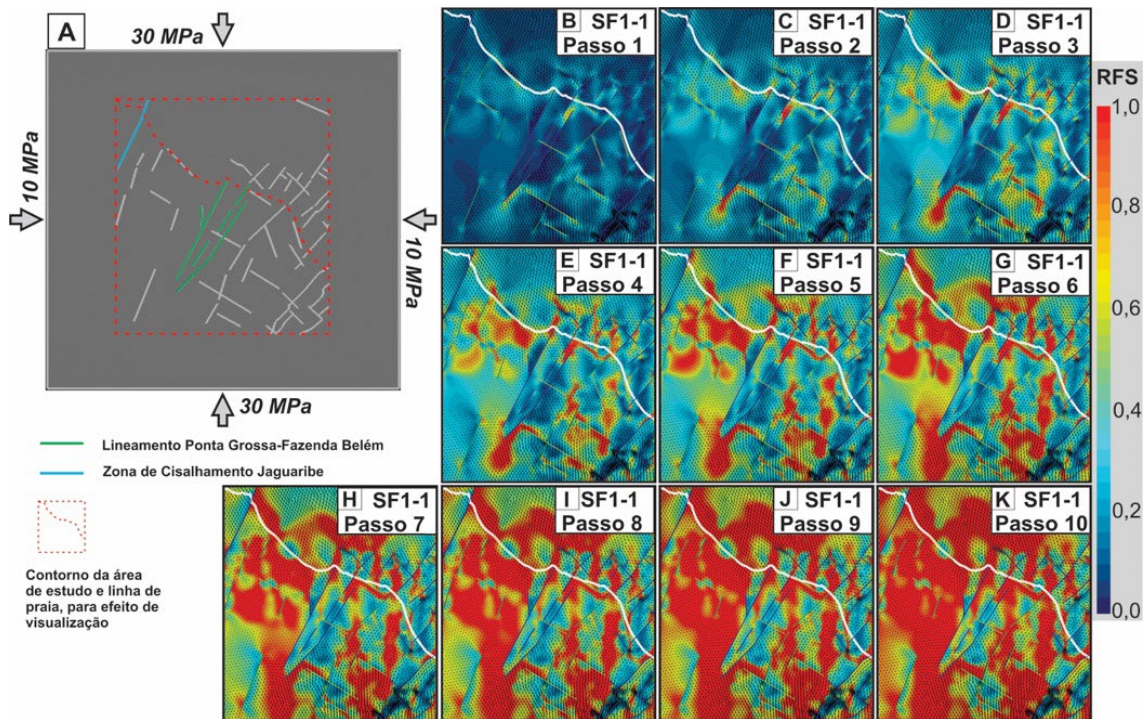
Figura 5. (A) Lineamentos estruturais extraídos na escala 1:250.000 sobre mapa hipsométrico e divididos por classes de orientação; (B) diagramas de rosetas referentes à quantidade e ao comprimento acumulado dos lineamentos estruturais identificados na escala 1:250.000. Os diagramas estão divididos por classes de comprimento, tendo como base o histograma de comprimentos (Figura 4B).

Outros *trends* importantes correspondem aos lineamentos NW-SE/WNW-ESE (N45-75W) e NNE-SSW/NE-SW (N15-45E). Os lineamentos N45-75W são bastante presentes ao longo de toda a área de estudo, apresentando feixes destacados, especialmente na porção sudeste da área. Os lineamentos N15-45E também ocorrem ao longo de toda a área investigada, formando agrupamentos (como na região de Mossoró) ou expressivos alinhamentos que conjugam diversos lineamentos de mesma direção. Os lineamentos N45-75E estão distribuídos ao longo de toda a área analisada, com baixa densidade. Os lineamentos N15-45W ocorrem com menor frequência e, por fim, as estruturas N-S (N15W-N15E) são incipientes na região analisada.

Modelagem numérica dos eventos tectônicos cenozoicos

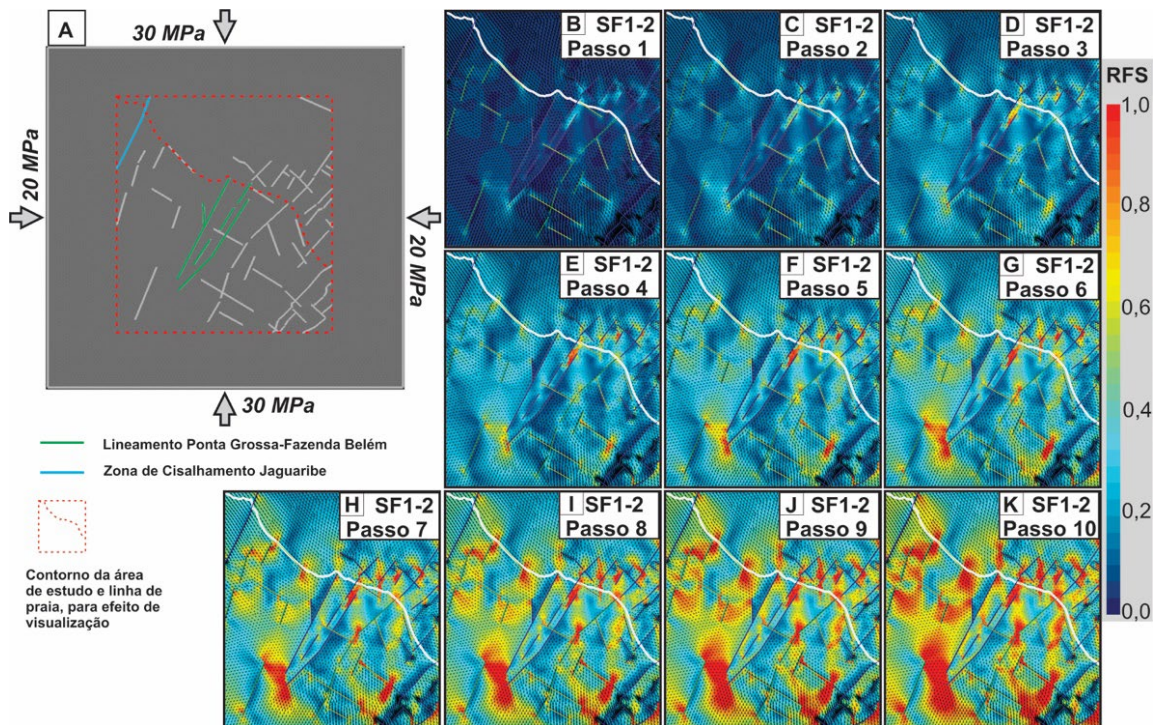
Evento SF1 (SH N-S e Sh E-W)

Para o evento SF1 observa-se em todos os cenários que a progressão de RFS inicia-se sempre nas extremidades dos elementos de interface. Com o aumento da carga aplicada, as áreas com alto RFS propagam-se para regiões cada vez mais extensas (Figuras 6 a 8). Nos passos de carga iniciais, as regiões que primeiro apresentam aumento de RFS são associadas a um longo elemento de interface NE-SW relacionado ao Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém



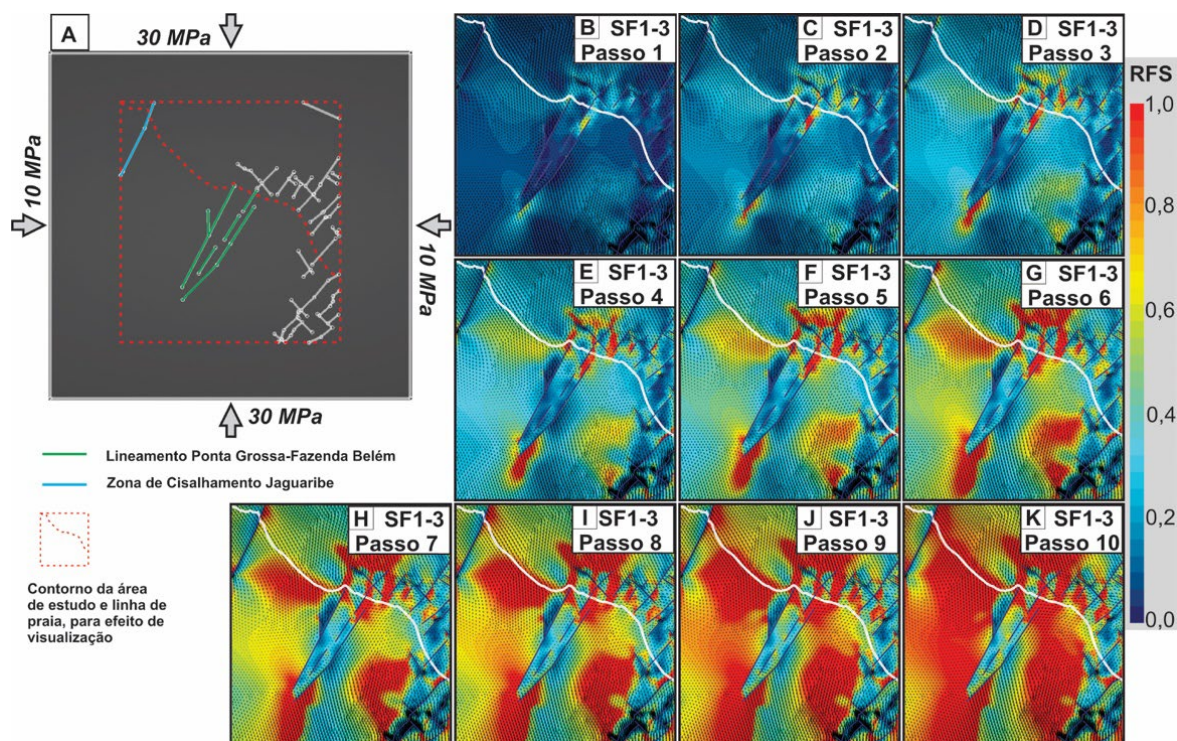
RFS: razão de falhamento por Stress.

Figura 6. Modelo numérico SF1-1. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B–K) resultados de RFS para os dez passos de carga.



RFS: razão de falhamento por stress.

Figura 7. Modelo numérico SF1-2. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B–K) resultados de RFS para os dez passos de carga.



RFS: razão de falhamento por stress.

Figura 8. Modelo numérico SF1-3. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B–K) resultados de RFS para os dez passos de carga.

(LPGFB). Ocorre também em todos os três modelos o aumento inicial de RFS associado a lineamentos na porção submersa da área. Nos modelos SF1-1 e SF1-2, ocorre aumento inicial de RFS também próximo a lineamentos de orientação WNW-ESE posicionados a sudeste do LPGFB, o que não ocorre no modelo SF1-3 pelo fato de esses elementos de interface não estarem presentes nesse modelo. Nota-se que o modelo SF1-2 apresenta menor aumento de RFS ao longo dos passos de carga, em comparação com os demais modelos, o que é associado ao efeito do maior confinamento, sendo necessário maior incremento nas tensões para se ter uma ativação estrutural correspondente a uma região menos confinada.

Nos modelos SF1-1 e SF1-2, que apresentam a mesma trama estrutural, ocorrem diversas regiões de alto RFS, normalmente associadas aos elementos de interface, e grande parte delas não apresenta grande abrangência espacial. Por sua vez, no modelo SF1-3, que apresenta menos elementos de interface, as áreas de alto RFS são mais abrangentes, ocupando regiões mais extensas. Mesmo com essas particularidades, as principais regiões identificadas nos três modelos com alto RFS são: terminação norte do LPGFB e estruturas submersas adjacentes; terminação sul do LPGFB; porção localizada a noroeste do LPGFB, próxima ao litoral; e porção a sudeste do LPGFB. A correspondência entre as

regiões de alto RFS nos três modelos ocorre pela coincidência na orientação dos esforços aplicados (tensão máxima N-S e tensão mínima E-W) e pelo fato de a trama estrutural ser semelhante. Tanto lineamentos com orientação próxima a NE-SW quanto com orientação próxima a NW-SE apresentam regiões de alto RFS associadas às suas terminações. Nos últimos passos de carga, os modelos SF1-1 e SF1-3 já se encontram com excessivas regiões de rompimento, o que dificulta a análise da heterogeneidade no acúmulo de tensões ao longo da área. A exceção é o modelo SF1-2, que, por conta de seu maior confinamento, ainda mostra boa heterogeneidade no padrão de RFS no passo de carga 10. Mesmo assim, com o incremento das tensões, pode-se observar com maior clareza a heterogeneidade no padrão de preferência de rompimento ao longo das áreas, especialmente quando são destacadas apenas as regiões com valores de RFS acima de 0,8, em passos de carga específicos (Figura 9).

Sobre o padrão das orientações de SH (também observado na Figura 9), percebe-se que nos três modelos a sua orientação predominante é próxima a N-S, variando de NNE-SSW a NNW-SSE, ou seja, a direção de aplicação do esforço máximo na construção dos modelos. No entanto, nas proximidades de alguns lineamentos, principalmente com orientação NE-SW, ocorre reorientação, fazendo com que o SH tenda a adquirir direção subparalela à descontinuidade.

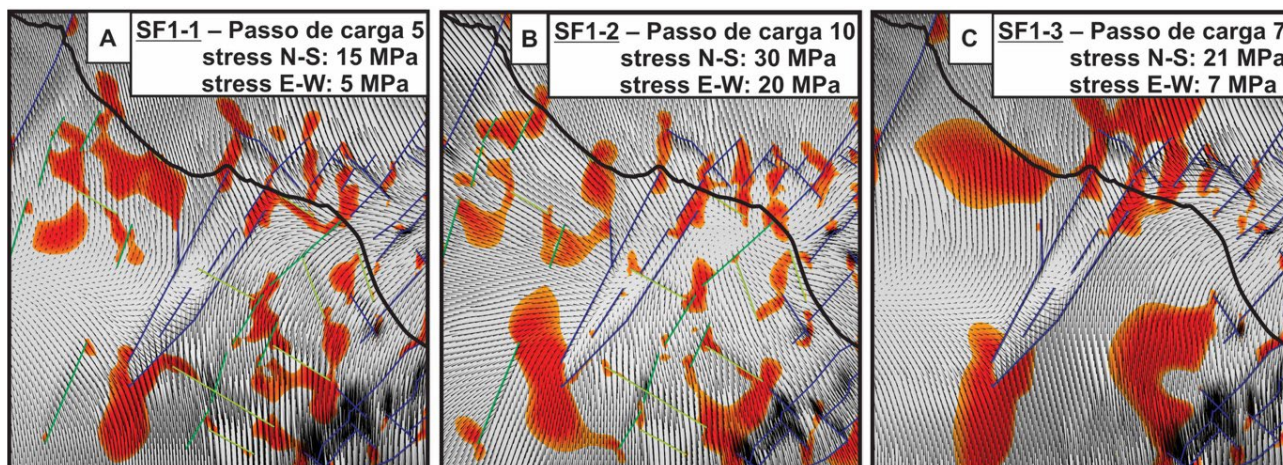


Figura 9. Comparação entre as áreas de rompimento preferencial (RFS acima de 0,80 para o passo de carga indicado, em vermelho) e os padrões de SH (tensão horizontal máxima) nos três modelos produzidos para o evento SF1. (A) Resultado para o modelo SF1-1, com tensão N-S 15 MPa e tensão E-W 5 MPa; (B) resultado para o modelo SF1-2, com tensão N-S 30 MPa e tensão E-W 20 MPa; (C) resultado para o modelo SF1-3, com tensão N-S 21 MPa e tensão E-W 7 MPa. Traços em preto indicam a orientação e a magnitude relativa de SH.

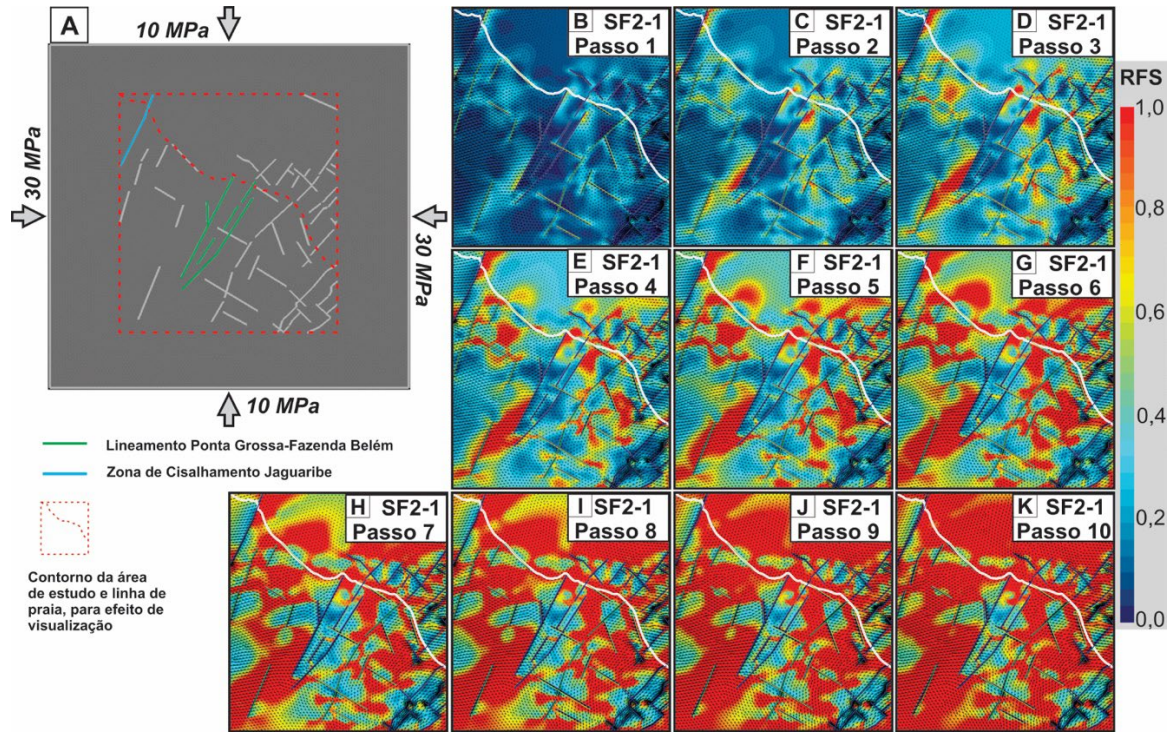
Em outras porções, os vetores de SH adquirem direção menos previsível, por exemplo, E-W, o que pode ser associado à interação de elementos de interface com diferentes direções. No modelo SF1-2 (Figura 9B), a orientação de SH nas regiões de rompimento preferencial da porção oeste adquire a orientação E-W e WNW-ESE, o que, neste caso, é atribuído ao fato de o esforço aplicado na direção E-W ser maior nesse modelo. O SH com orientação E-W e WNW-ESE na porção oeste do SF1-2 não tende a ser reorientado pelos lineamentos NE-SW; esse efeito é interpretado como sendo devido ao fato de o SH ter orientação quase perpendicular aos lineamentos, o que dificulta a sua reorientação. O menor comprimento dos lineamentos NE-SW nessa porção e o maior confinamento do modelo também parecem influenciar para que o SH tenda a não se reorientar nessa região.

Evento SF2 (SH E-W/NW-SE e Sh N-S/NE-SW)

Os três modelos produzidos para o evento SF2 são apresentados nas Figuras 10 a 12, ao longo de seus dez passos de incremento de carga. Esses resultados mostram, mais uma vez, que o aumento do RFS começa sempre associado às terminações dos elementos de interface, propagando-se para outras áreas à medida que aumentam os esforços aplicados. Nos passos de carga iniciais, os primeiros locais em que se identifica maior progressão de RFS, nos três modelos, são associados ao LPGFB, à porção submersa da área analisada e a um lineamento NE-SW localizado no extremo sudoeste da área. No modelo SF2-1 também é identificado aumento inicial de RFS no extremo noroeste da área e em lineamentos NE-SW e NW-SE na porção sudeste.

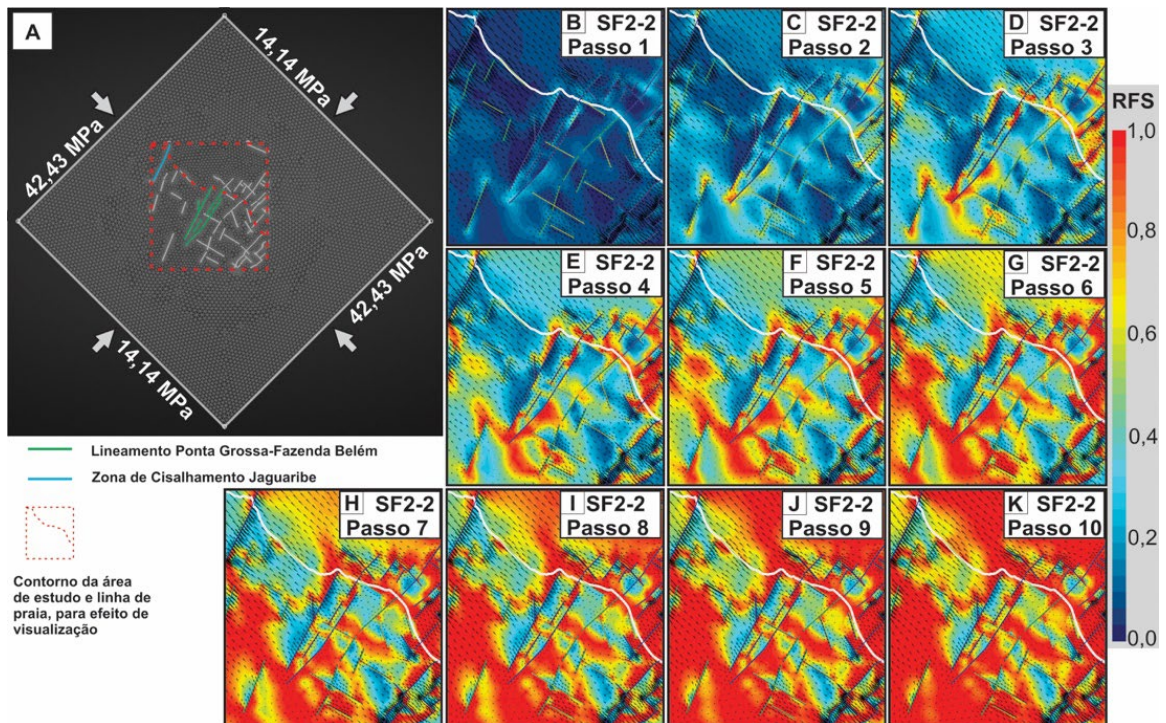
Nos passos de carga intermediários, o padrão de RFS segue, em linhas gerais, o que é observado nos passos iniciais, acrescentando uma maior progressão de RFS em outros lineamentos de orientação NE-SW e NW-SE (estes com as áreas de rompimento mais restritas). Ocorre também maior progressão de RFS próximo à linha do litoral, a leste do LPGFB. Nos modelos SF2-2 e SF2-3, a propagação do aumento de RFS parece seguir *trends* com orientações próximas a NW-SE e WNW-ESE, portanto seguindo a direção do esforço máximo aplicado. Esse padrão não é observado no modelo SF2-1, em que a propagação do aumento de RFS parece seguir mais a direção dos elementos de interface, sugerindo que a orientação dos esforços aplicados, em relação às descontinuidades estruturais, influencia no estilo de propagação dos maiores valores do RFS (Figura 13).

Em relação às direções de SH ao longo da área (registradas também na Figura 13), percebe-se que seguem predominantemente a direção de aplicação do esforço principal máximo, sendo este E-W, WNW-ESE ou NW-SE, dependendo do modelo. Observa-se, ainda, em diversos pontos, a influência dos elementos de interface na reorientação de SH, tendendo a adquirir orientações próximas a de algumas descontinuidades estruturais nas suas adjacências. No modelo SF2-1 (Figura 13A), a orientação de SH nas áreas de alto RFS é predominantemente E-W, e ocorrem também deflexões locais para NE-SW e N-S próximo a elementos de interface com orientação NE-SW. No modelo SF2-2 (Figura 13B), a orientação de SH ao longo das áreas com alto RFS é NW-SE, sendo reorientados nas proximidades do LPGFB, tendendo a ficarem paralelos a essa descontinuidade. Ocorrem ainda áreas onde as magnitudes de SH são muito baixas e não se



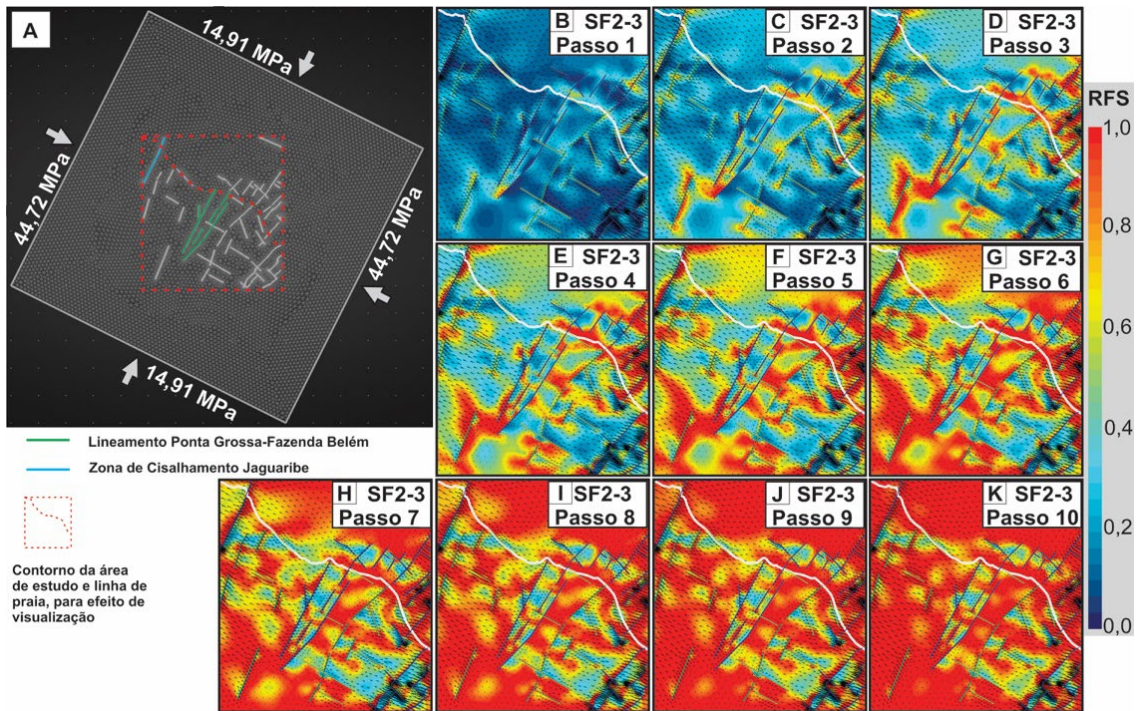
RFS: razão de falhamento por stress.

Figura 10. Modelo numérico SF2-1. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B-K) resultados de RFS para os dez passos de carga.



RFS: razão de falhamento por stress.

Figura 11. Modelo numérico SF2-2. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B-K) resultados de RFS para os dez passos de carga.



RFS: razão de falhamento por stress.

Figura 12. Modelo numérico SF2-3. (A) Construção no TECTOS, indicando as tensões e a trama estrutural utilizada; (B–K) resultados de RFS para os dez passos de carga.

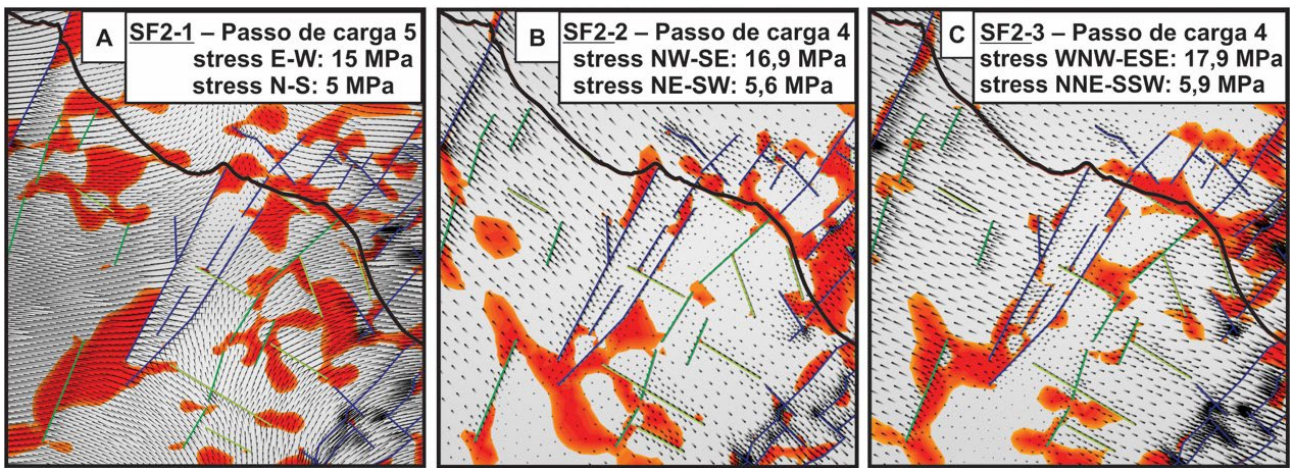


Figura 13. Comparação entre as áreas de rompimento preferencial (RFS acima de 0,80 para o passo de carga indicado, em vermelho) e os padrões de SH (tensão horizontal máxima) nos três modelos produzidos para o evento SF2. (A) Resultado para o modelo SF2-1, com tensão E-W 15 MPa e tensão N-S 5 MPa; (B) resultado para o modelo SF2-2, com tensão NW-SE 16,9 MPa e tensão NE-SW 5,6 MPa; (C) resultado para o modelo SF2-3, com tensão WNW-ESE 17,9 MPa e tensão NNE-SSW 5,9 MPa. Traços em preto indicam a orientação e a magnitude relativa de SH.

pode aferir sua orientação com precisão. No modelo SF2-3 (Figura 13C), a orientação de SH que predomina nas áreas de alto RFS é a WNW-ESE, não sendo observadas reorientações significativas. Nesse modelo, também ocorrem áreas em que a magnitude de SH é muito baixa.

DISCUSSÃO

As rochas aflorantes na área de estudo apresentam idades que vão desde o Cretáceo Final até o Quaternário. Dessa forma, os lineamentos estruturais identificados na região podem ser

considerados como indicadores da atuação de eventos tectônicos neocretácicos e cenozoicos, especialmente eventos neotectônicos, tendo em vista que a maior parte dos lineamentos foram registrados sobre os terrenos da Formação Barreiras, de idade miocênica.

Os lineamentos extraídos podem ser relacionados a feições tectônicas neoformadas ou fruto de reativações de estruturas antigas. A correlação reconhecida por Silva Neto et al. (2022) entre lineamentos de superfície e alinhamentos magnéticos, indicando a penetrabilidade das estruturas pré-cambrianas em unidades mais recentes ao longo da Bacia Potiguar, reforça a hipótese da reativação.

Os lineamentos mais abundantes na região analisada são os de orientação E-W, *trend* que não é o predominante nos mapas geológicos disponíveis para a porção emersa da Bacia Potiguar, apesar de já ter sido registrado em trabalhos anteriores na região de Icapuí (CE), tais como Fortes (1987), Sousa (2002) e Ibanez et al. (2022). Em contrapartida, a porção submersa da bacia tem sua evolução marcada por movimentos transcorrentes de direção E-W, relacionados à abertura da Margem Equatorial (Matos, 1992, 2000), também responsáveis pela geração de grábens na região sul da porção emersa da bacia (Castro e Bezerra, 2015). Os lineamentos de orientação E-W presentes no mapa podem, portanto, ser associados a reativações de estruturas geradas nesse contexto da abertura da Margem Equatorial. Outra hipótese para a formação dos lineamentos E-W é a influência da movimentação cenozoica de falhas transformantes atlânticas. Sousa (2002) interpreta que falhas transformantes poderiam influenciar na deformação da Formação Barreiras, e Bezerra et al. (2020) discutem que pulsos de transpressão nas falhas transformantes atlânticas podem estar relacionados com o primeiro evento de deformação pós-rifte da Bacia Potiguar (evento SF1). Por essa segunda hipótese, os lineamentos E-W seriam então predominantemente estruturas neoformadas.

Os lineamentos de orientação NE-SW, também muito presentes na área analisada, foram destacados em estudo de mais detalhe realizado por Ibanez et al. (2022) na Plataforma de Aracati. Grábens da Bacia Potiguar com essa orientação também foram interpretados por Oliveira et al. (2018) na região de Icapuí (CE), capeados por sedimentos mais recentes. No presente estudo, esses lineamentos são interpretados como reativações cenozoicas de antigas estruturas do embasamento (como o LPGFB e a Zona de Cisalhamento Jaguaribe) e da própria Bacia Potiguar. A reativação de estruturas NE-SW em eventos neotectônicos tem sido evidenciada em outras porções da Bacia Potiguar, como é o caso, por exemplo, das falhas de Carnaubais e Jundiá (Bezerra e Vita-Finzi, 2000), da região do Domo do Mel (Maia e Bezerra, 2014) e do Alto de Macau (Silva Neto et al., 2022), reforçando a interpretação de reativação dos lineamentos NE-SW na área aqui analisada.

Os lineamentos de orientação NW-SE também podem ser reativações de estruturas da Bacia Potiguar que foram formadas tanto na fase de abertura do rifte, como zonas de transferência, quanto na fase de transcorrência E-W associada à abertura da Margem Equatorial (Matos, 1992; Castro e Bezerra, 2015). Também há evidências de zonas de cisalhamento pré-cambrianas de orientação NW-SE que foram reativadas em vários estágios da evolução da Bacia Potiguar. Esse é o caso do Sistema de Falhas Afonso Bezerra, na porção leste do Rifte Potiguar, que sofreu influência dos dois eventos cenozoicos identificados na região — SF1 e SF2 (Moura-Lima et al., 2010; Moura-Lima, 2011). Dessa forma, é reforçada a interpretação de que os lineamentos de orientação NW-SE podem ter sido gerados por reativação de estruturas pretéritas também na área analisada no presente estudo.

A grande concentração de lineamentos na porção norte da área de estudo, nos terrenos da Formação Barreiras, e a incipiente concentração de lineamentos na porção sul/sudoeste, onde aflora a Formação Jandaíra, podem ser atribuídas, a princípio, a uma concentração da deformação em porções próximas ao litoral, perdendo intensidade em direção ao interior. No entanto, como diversos trabalhos ressaltam a deformação tectônica impressa nos carbonatos da Formação Jandaíra (Maia et al., 2012; Carneiro et al., 2015; Rabelo et al., 2015, 2020; Gomes et al., 2019; Bezerra et al., 2020), a baixa densidade de lineamentos na porção sul da área também pode ser atribuída à escala utilizada na investigação, combinada a características reológicas das rochas carbonáticas (com repercussão na densidade de fraturamento) e ainda possivelmente às condições climáticas mais áridas nessa porção da área de estudo (inibindo o aprofundamento e o alargamento das fraturas, que se dá por meio da ação da água e da vegetação). Deve-se ressaltar que nos modelos numéricos produzidos, tanto para o evento SF1 quanto para o evento SF2, identificou-se grande acúmulo de tensões e altos valores de RFS em porções da região sul/sudoeste da área de estudo, não justificando a pequena concentração de lineamentos nessa região apenas com base em uma hipótese de concentração da deformação na região litorânea.

Os resultados da modelagem numérica realizada também permitem uma discussão sobre o significado tectônico dos padrões de lineamentos, a partir da relação entre a orientação de SH e as direções do fraturamento resultante da aplicação de determinado campo de esforços. Tal correlação decorre do fato de as estruturas tectônicas tenderem a se formar paralelas à orientação da tensão máxima (σ_1), caso sejam estruturas distensionais, ou com ângulo em torno de 30° com a tensão máxima, caso tenham um caráter cisalhante (Reches e Lockner, 1994). Com base nisso, pode-se interpretar em quais eventos teriam se formado os três principais *trends* estruturais reconhecidos no mapa de lineamentos (E-W, NE-SW e WNW-ESE).

Considerando-se os modelos numéricos referentes ao evento SF1, predominam ao longo da área os vetores de tensão horizontal máxima com direção próxima a N-S. Dessa forma, pode-se interpretar que a maior parte das estruturas formadas ou reativadas no evento SF1 foram também as próximas a N-S, especialmente os lineamentos de orientação NE-SW e NNE-SSW, pois apresentam ângulo de até 30° com a tensão horizontal máxima predominante. Os lineamentos de orientação E-W e WNW-ESE tenderiam a se formar nesse evento em locais em que ocorre reorientação das tensões por conta da influência da proximidade de estruturas pretéritas (por exemplo, nos modelos SF1-1 e SF1-3, na região próxima ao litoral a leste do LPGFB) ou quando o diferencial de esforços é menor, combinado com a trama estrutural preexistente (como no caso do modelo SF1-2). O fraturamento associado à reorientação de tensões pela presença de descontinuidades estruturais pretéritas foi reconhecido por Brêda et al. (2021) em estudo na margem sudeste do Brasil.

Analisando-se agora os resultados dos modelos referentes ao evento SF2, percebe-se que a orientação dos vetores de tensão horizontal máxima varia predominantemente entre as orientações E-W e NW-SE, dependendo dos esforços aplicados. Dessa forma, considerando que as estruturas se formariam com um ângulo de até 30° com a direção da tensão máxima, pode-se interpretar que, entre os *trends* principais observados no mapa, os lineamentos de orientação E-W e WNW-ESE foram predominantemente gerados ou reativados no evento SF2. Por essa interpretação, falhas com orientação NE-SW não seriam, a princípio, esperadas nesse evento. No entanto, trabalhos na região da Bacia Potiguar demonstram que estruturas NE-SW também foram geradas a partir do Mioceno médio (portanto no evento SF2) — Bezerra et al. (2001), Nogueira et al. (2006), Bezerra et al. (2011), Maia e Bezerra (2014). Segundo os modelos, a geração dessas estruturas no evento SF2 seria favorecida nas adjacências dos elementos de interface de orientação próxima a NE-SW, em que há reorientação das tensões para essa direção, como ocorre nas proximidades do LPGFB, também demonstrado por Ibanez et al. (2022). Dessa maneira, as estruturas NE-SW do evento SF2 seriam basicamente fruto da reativação de estruturas mais antigas da Bacia Potiguar ou de zonas de cisalhamento pré-cambrianas.

CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou a modelagem numérica dos eventos tectônicos cenozoicos em uma área na porção noroeste da Bacia Potiguar, como uma contribuição para as discussões sobre a deformação tectônica dessa época na região. A análise de lineamentos resultou na identificação dos principais *trends* estruturais, sendo os seus condicionantes

tectônicos interpretados com base na modelagem numérica, a partir da correlação da orientação da tensão horizontal máxima relacionada a cada evento tectônico com os padrões de fraturamento resultantes.

As feições observadas são consideradas, em grande parte, comoneotectônicas, pois ocorrem predominantemente sobre os tabuleiros da Formação Barreiras, de idade miocênica. Os lineamentos identificados representam estruturas rúpteis que podem ser neoformadas, porém são interpretadas como sendo principalmente produto de reativações da trama estrutural preexistente.

Os principais *trends* estruturais da região são E-W, NE-SW/NNE-SSW e WNW-ESE. A reativação da estruturação pretérita da Bacia Potiguar e das zonas de cisalhamento do embasamento é considerada o principal condicionante para o desenvolvimento dos lineamentos com orientação NE-SW e NW-SE. Os lineamentos E-W, que são predominantes na região, são atribuídos tanto a reativações de estruturas pretéritas associadas à evolução da Margem Equatorial quanto a estruturas neoformadas devido à influência de falhas transformantes atlânticas.

A modelagem numérica forneceu dados qualitativos em relação à distribuição das tensões na área em cada evento tectônico cenozoico analisado, assim como sobre as regiões mais propícias para rompimento. Os modelos produzidos demonstraram que a orientação predominante de SH ao longo da área está principalmente relacionada à direção do sigma 1 do evento analisado, e que as regiões de rompimento preferencial são nucleadas a partir das descontinuidades preexistentes. Com base nesses resultados, a geração das estruturas NE-SW foi preferencialmente associada ao evento SF1 (do Albiano ao Mioceno), enquanto as estruturas E-W e WNW-ESE são atribuídas preferencialmente ao evento SF2 (do Mioceno ao Recente).

Além dos *trends* principais gerados em cada evento tectônico cenozoico analisado, feições estruturais com outras direções são geradas devido a reorientações locais da tensão horizontal máxima por influência de estruturas antigas, como falhas e zonas de cisalhamento, destacando-se, na área investigada, o LPGFB.

A modelagem numérica, associada a ferramentas de sensoriamento remoto, auxilia significativamente a interpretação geológico-estrutural de uma área, permitindo correlações com o conhecimento prévio sobre a bacia e regiões adjacentes. No presente estudo, foi especialmente avaliado o papel das descontinuidades pretéritas de maior comprimento na configuração dos padrões estruturais associados aos eventos tectônicos cenozoicos na região noroeste da Bacia Potiguar, analisados em uma escala regional. A incorporação, em trabalhos futuros de outros aspectos relevantes, como lineamentos de menor comprimento e a heterogeneidade litológica, deve contribuir, por exemplo, para a melhor delimitação das regiões mais propícias a rompimento, assim como

permitir a visualização de reorientações locais das tensões. Tais informações trarão contribuições importantes para a compreensão do intenso padrão de fraturamento observado em afloramentos e falésias da região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGL) e ao Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) a infraestrutura concedida para a realização do estudo. Ao projeto “Relações Estratigráficas e Análise Estrutural Multiescalar da Deformação Tectônica em Análogos de Reservatórios Areníticos Pouco Consolidados Aflorantes na Região de Icapuí (CE), Área Emersa da Bacia Potiguar” (Termo de Cooperação 5900.0117920.21.9 – UFRJ/Coppetec/Petrobras/ANP), o suporte em infraestrutura e financiamento. À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Coppetec o auxílio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa, sob a forma de bolsa de Mestrado. À Petrobras a disponibilidade de acesso ao Sistema Tectos, e ao Instituto Tecgraf, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), o suporte com o uso do programa.

REFERÊNCIAS

- Angelim, L. M. A., Nesi, J. R., Torres, H. H. F., Medeiros, V. C., Santos, C. A., Veiga Junior, J. P., Mendes, V. A. (2006). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte*. Programa Geologia do Brasil. Recife: SGB-CPRM, 119 p.
- ASF DAAC/NASA (2023). ALOS PALSAR. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 13 set. 2023.
- Atmaoui, N., Hollnack, D. (2003). Neotectonics and extension Direction of the Southern Kenya Rift, Lake Magadi area. *Tectonophysics*, 364(1-2), 71-83. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00051-9)
- Bertani, R. T., Costa, I. G., Matos, R. M. D. (1990). Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e o habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Raja Gabaglia, G. P., Milani, E. J. (Eds.). *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobras, p. 291-310.
- Bezerra, F. H. R., Amaro, V. E., Vita-Finzi, C. Saadi, A. (2001). Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(1), 61-75. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00009-8)
- Bezerra, F. H. R., Castro, D. L., Maia, R. P., Sousa, M. O. L., Moura-Lima, E. N., Rossetti, D. F., Bertotti, G., Souza, Z. S., Nogueira, F. C. C. (2020). Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001>
- Bezerra, F. H. R., Nascimento, A. F., Ferreira, J. M., Nogueira, F. C., Fuck, R. A., Brito Neves, B. B., Sousa, M. O. L. (2011). Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America – Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510(3-4), 269-290. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.005>
- Bezerra, F. H. R., Rossetti, D. F., Oliveira, R. G., Medeiros, W. E., Brito Neves, B. B., Balsamo, F., Nogueira, F. C. C., Dantas, E. L., Andrades Filho, C., Góes, A. M. (2014). Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics*, 614, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.021>
- Bezerra, F. H. R., Vita-Finzi, C. (2000). How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. *Geology*, 28(7), 591-594. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<591:HAIAPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<591:HAIAPM>2.0.CO;2)
- Brêda, T. C., Mello, C. L., Moraes, A. (2018). Significado Tectônico de Padrões de Lineamentos na Porção Emersa das Bacias Marginais do Sudeste do Brasil e Áreas de Embasamento Adjacentes. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3), 305-318. https://doi.org/10.11137/2018_3_305_318
- Brêda, T. C., Mello, C. L., Moraes, A. (2021). Influence of Preexisting Structures on the Variation of Neotectonic Paleostress Orientation in an Area of the Southeastern Brazilian Margin. *Brazilian Journal of Geology*, 51(2). <https://doi.org/10.1590/2317-488920210190132>
- Carneiro, M. A., Bezerra, F. H. R., Silva, C. C. N., Maia, R. P., Cazarin, C. L. (2015). Controle Estrutural do Sistema Cárstico Epigenético na Formação Jandaira, Bacia Potiguar. *Geociências*, 34(2), 199-209. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/34/volume34_2_files/34-2-artigo-04.pdf. Acesso em: 10 dez. 2022.
- Castro, D. L., Bezerra, F. H. R. (2015). Fault Evolution in the Potiguar Rift Termination, Equatorial Margin of Brazil. *Solid Earth*, 6(1), 185-196. <https://doi.org/10.5194/se-6-185-2015>

- Castro, D. L., Bezerra, F. H. R., Sousa, M. O. L., Fuck, R. A. (2012). Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*, 54, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.09.002>
- Cavalcanti, J. A. D., Cavalcante, J. C. (2014). Evolução Geológica. In: Brandão, R. L., Freitas, L. C. B. (Eds.). *Geodiversidade do Estado do Ceará*. Fortaleza: SGB-CPRM - Programa Geologia do Brasil, p. 19-34. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16726>. Acesso em: 1º dez. 2022.
- Cianfarra, P., Salvini, F. (2014). Ice sheet surface lineaments as nonconventional indicators of East Antarctica bedrock tectonics. *Geosphere*, 10(6), 1411-1418. <https://doi.org/10.1130/GES01074.1>
- Ferreira, J. M., Oliveira, R. T., Assumpção, M. (1998). Superposition of local and regional stresses in Northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophysical Journal International*, 134(2), 341-355. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00563.x>
- Fortes, F. P. (1987). *Mapa geológico da Bacia Potiguar (escala 1:100.000) – a origem da bacia mesozoica de Apodi em decorrência do ciclo orogênico brasileiro*. Natal: Petrobras/Debar/Dinter. (Relatório interno).
- Gomes, I. P., Veríssimo, C. U. V., Bezerra, F. H. R., Santos, J. L., Câmara, J. R. F. (2019). Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. *Geologia USP. Série Científica*, 19(1), 43-67. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-149311>
- Ibanez, D. M., Pestilho, A. L. S., Miranda, F. P., Penteado, H. L. B., Dias Filho, D. C. (2022). An Integrated remote sensing and biomarker maturity parameter-based approach to trace petroleum migration in a complex fault zone lineament of the Brazilian Equatorial Margin. *Marine and Petroleum Geology*, 144, 105844. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105844>
- Liu, Z., Bird, P. (2002). Finite element modeling of Neotectonics in New Zealand. *Journal of Geophysics Research*, 107(B12), 2328. <https://doi.org/10.1029/2001JB001075>
- Mabee, S. B., Hardcastle, K. C., Wise, D. U. (1994). A Method of Collecting and Analyzing Lineaments for Regional-Scale Fracture-Bedrock Aquifer Studies. *Ground Water*, 32(6), 884-894. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00928.x>
- Maia, R. M., Sousa, M. O. L., Bezerra, F. H. R., Neto, P. X., Moura Lima, E. N., Santos, R. D. (2012). A Importância do Controle Tectônico para a Formação da Paisagem Cárstica na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(4), 451-463. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i4.304>
- Maia, R. P., Bezerra F. H. R. (2014). Inversão Tectônica do Relevo na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(1), 61-74. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.419>
- Matos, R. M. D. (1992). The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Matos, R. M. D. (2000). Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. *Atlantic Rifts and Continental Margins. Geophysical Monograph*, 115, 331-354. <https://doi.org/10.1029/GM115p0331>
- Moraes, A. (1995). *Estudo da distribuição dos campos de tensões locais e da geração de falhas em regime extensional pelo método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303680707_Estudo_da_Distribuicao_dos_Campos_de_Tensoes_Locais_e_da_Geracao_de_Falhas_em_Regime_Extensional_pelo_Metodo_dos_Elementos_Finitos. Acesso em: 27 jul. 2023.
- Moraes, A. (2016). *Mecânica do Contínuo para Geologia Estrutural* (2ª ed.) São Paulo: PerSe. Disponível em: <https://www.perse.com.br/Mecanica+do+Contínuo+para+a+Geologia+Estrutural-2856.htm>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- Morelato, R., Fabianovicz, R. (2015). *Bacia Potiguar: Sumário Geológico e Setores em Oferta*. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/13-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas-oferecidas/sumario_geologico_bacia_potiguar_r13.pdf. Acesso em: 2 fev. 2021.
- Moura-Lima, E. N. (2011). *Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar*. Tese (Doutorado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/18359/1/ElissandraML_TESE.pdf. Acesso em: 18 jul. 2023.
- Moura-Lima, E. N., Sousa, M. O. L., Bezerra, F. H. R., Aquino, M. R., Vieira, M. M., Lima-Filho, F. P., Fonseca, V. P., Amaral, R. F. (2010). Sedimentação e Deformação Tectônicas na Porção Central da Bacia Potiguar. *Geologia USP. Série Científica*, 10(1), 15-28. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2010000100002>

- Muller, R. D., Yatheesh, V., Shuhail, M. (2015). The tectonic stress field evolution of India since the Oligocene. *Gondwana Research*, 28(2), 612-624. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.008>
- Nabavi, S. T., Alavi, S. A., Mohammadi, S., Ghassemi, M. R. (2018). Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: insights from 3D elasto-plastic finite element models. *Journal of Structural Geology*, 106, 19-40. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.003>
- Nogueira, F. C. C., Bezerra, A. H. R., Castro, D. L. (2006). Deformação Rúptil em Depósitos da Formação Barreiras na Porção Leste da Bacia Potiguar. *Geologia USP. Série Científica*, 6(2), 51-59. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300007>
- Oliveira, K. M. L., Castro, D. L., Castelo Branco, R. M. G., Oliveira, D. C., Alvite, E. N. C., Jucá, C. C. A., Castelo Branco, J. L. (2018). Architectural framework of the NW border of the onshore Potiguar Basin (NE Brazil): An aeromagnetic and gravity-based approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 700-714. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.002>
- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E. H., Florencio, C. P., Souza, C. A. V. (2007). Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 357-369.
- Pineo, T. R. G., Palheta, E. S. M., Costa, F. G., Vasconcelos, A. M., Gomes, I. P., Gomes, F. E. M., Bessa, M. D. M. R., Lima, A. F., Holanda, J. L. R., Freire, D. P. C. (2020). *Mapa Geológico do Estado do Ceará*. Escala 1:500.000. Fortaleza: SGB-CPRM - Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20418>. Acesso em: 15 jul. 2021.
- Pinheiro, M. R., Cianfarra, P., Villela, F. N. J., Salvini F. (2019). Tectonics of the Northeastern border of the Parana Basin (Southeastern Brazil) revealed by lineament domain analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 94, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102231>
- Rabelo, J. G., Maia, R. P., Bezerra, F. H. R., Silva, C. C. N. (2020). Karstification and fluid flow in carbonate units controlled by propagation and linkage of mesoscale fractures, Jandaíra Formation, Brazil. *Geomorfology*, 357, 107090. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107090>
- Rabelo, J. G., Silva, T. S., Bezerra, F. H. R., Moraes, A. (2015). Modelagem numérica da deformação em carbonatos e implicações na formação de carste. *Geologia USP. Série Científica*, 15(2), 99-110. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v15i2p99-110>
- Rahiman, T. I. H. (2006). *Neotectonics, Seismic and Tsunami Hazards, Viti Levu, Fiji*. Tese (Doutorado). Christchurch: University of Canterbury. <https://doi.org/10.26021/3322>
- Rahiman, T. I. H., Pettinga, J. R. (2008). Analysis of lineaments and their relationship to Neogene fracturing, SE Viti Levu, Fiji. *Geological Society of America*, 120(11-12), 1544-1555. <https://doi.org/10.1130/B26264.1>
- Reches, Z., Lockner, D. A. (1994). Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*, 99(B9), 18159-18172. <https://doi.org/10.1029/94JB00115>
- Reis, A. F. C., Bezerra, F. H. R., Ferreira, J. M., Nascimento, A. F., Lima, C. C. (2013). Stress magnitude and orientation in the Potiguar Basin, Brazil: Implications on faulting style and reactivation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10), 5550-5563. <https://doi.org/10.1002/2012JB009953>
- Reynolds, D. S., Coblenz, D. D., Hillis, R. R. (2002). Tectonic forces controlling the regional intraplate stress field in continental Australia: Results from new finite element modeling. *Journal of Geophysical Research*, 107(B7), 2131. <https://doi.org/10.1029/2001JB000408>
- Riccomini, C. (1989). *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507>
- Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. R., Brito Neves, B. B. (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 383-405. São Paulo: Beca.
- Scheiber, T., Fredin, O., Viola, G., Jarna, A., Gasser, D., Lapinska-Viola, R. (2015). Manual extraction of bedrock lineaments from high-resolution LiDAR data: methodological bias and human perception. *Journal of the Geological Society of Sweden*, 137(4), 362-372. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1085434>
- Shi, W., Dong, S., Hu, J. (2020). Neotectonics around the Ordos Block, North China: A review and new insights. *Earth-Science Reviews*, 200, 102969. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102969>
- Silva Neto, C. A., Nascimento Junior, D. R., Duarte, C. R., Freires, E. V., Oliveira, K. M. L. (2022). A new method for evaluating the spatial correspondence between surface and Subsurface Geological lineaments: A case from the Potiguar Basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 104026. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104026>

- Smart, K. J., Ferril, D. A., Morris, A. P., McGinnis, R. N. (2012). Geomechanical modeling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding. *Tectonophysics*, 576-577, 171-196. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.024>
- Smets, B., Delvaux, D., Ross, K. A., Poppe, S., Kervyn, M., d'Oreye, N., Kervyn, F. (2016). The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments: Insights from Kivu basin, western branch of the East African Rift. *Tectonophysics*, 683, 62-76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.022>
- Sousa, D. C. (2002). *Litoestratigrafia e deformação cenozoica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)*. Tese (Doutorado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18357>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- Sousa, D. C., Jardim de Sá, E. F., Vital, H., Nascimento, M. A. L. (2014). Falésias na Praia de Ponta Grossa, Icapuí, CE – Importantes deformações tectônicas cenozoicas em rochas sedimentares da Formação Barreiras. *SIGEP 120 - Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 120, 501-512. Disponível em: <https://sigep.eco.br/sitio120/sitio120.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2023.
- Souza, S. F., Castro, D. L., Bezerra, F. H. R., Barbosa, J. A. (2016). Relações do arcabouço tectônico do Rifte Potiguar com as estruturas do embasamento adjacente: análise de dados gravimétricos e magnéticos. *Geologia USP. Série Científica*, 16(1), 43-60. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i1p43-60>
- Stephenson, R., Schiffer, C., Peace, A., Nielsen, S. B., Jess, S. (2020). Late Cretaceous-Cenozoic basin inversion and paleostress fields in the North Atlantic-western Alpine-Tethys realm: Implications for intraplate tectonics. *Earth-Science Reviews*, 210, 103252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103252>
- Tavares, M. V. F. S., Barroso, E. V., Moraes, A., Silva, A. T. (2021). Numerical modeling of brittle tectonic Deformation in poorly consolidated sandstones. *Journal of South American Earth Sciences*, 112(Part 1), 103556. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103556>
- Vauchez, A., Neves, S., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, Arthaud, M., Amaro, V. (1995). The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 247-266. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5)
- Wdowinski, S. (1998). A theory of intraplate tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 103(B3), 5037-5059. <https://doi.org/10.1029/97JB03390>
- Williams, G. D., Powell, C. M., Cooper, M. A. (1989). Geometry and kinematics of inversion tectonics. *Geological Society Special Publication*, 44, 3-15. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.044.01.02>
- Wise, D. U. (1982). Linesmanship and practice of Linear Geo-art. *Geological Society of America Bulletin*, 93(9), 886-888. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<886:LATPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<886:LATPOL>2.0.CO;2)
- Wise, D. U., Funicello, R., Parotto, M., Salvini, F. (1985). Topographic lineament swarms: Clues to their origin from domain analysis of Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 96(7), 952-967. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<952:TLSCTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<952:TLSCTT>2.0.CO;2)