Geologia Série Científica

Revista do Instituto de Geociências - USP

Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 15, n. 2, p. 99-110, Junho 2015

# Modelagem numérica da deformação em carbonatos e implicações na formação de carste

Numerical modeling of deformation in carbonates and implications for the formation of karst

Juliana Gomes Rabelo<sup>1</sup>, Aline Theophilo Silva<sup>2</sup>, Francisco Hilário Rego Bezerra<sup>3</sup>, Anderson Moraes<sup>2</sup> <sup>1</sup>Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Universitário, CEP 59072-970, Natal, RN, BR (jhurabelo@hotmail.com) <sup>2</sup>Petrobras/CENPES, Rio de Janeiro, RJ, BR (alinet@petrobras.com.br; andersonmoraes@petrobras.com.br) <sup>3</sup>Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN, BR (bezerrafh@geologia.ufrn.br)

Recebido em 25 de julho de 2014; aceito em 12 de maio de 2015

#### Resumo

O efeito da presença de fraturas sobre o fluxo de fluidos em reservatório é hoje tema de interesse fundamental para a indústria do petróleo. Tratando-se de rochas carbonáticas, o estudo da contribuição das fraturas sobre a eficiência dos reservatórios se complexifica em função da natureza reativa dessas rochas aos fluidos circulantes e a alta tendência à formação de carste. As fraturas atuam como agentes focalizadores da percolação de fluidos e exercem controle estrutural sobre a formação do carste. Para a indústria do petróleo, esse cenário pode ser favorável pelo aumento da porosidade e permeabilidade secundárias das fraturas, mas também oferece riscos à operação. O presente estudo investiga, sob o ponto de vista geomecânico, como a presenca de fraturas influencia o desenvolvimento do carste observado em rochas carbonáticas. A Formação Jandaíra foi selecionada como geomaterial análogo a reservatórios carbonáticos fraturados em bacias marginais do Brasil. A metodologia adotada para esse estudo incluiu: (i) a utilização de imagens de satélite e de VANT; (ii) modelagem numérica do efeito das tensões atuais sobre as estruturas do lajedo. Comparados os resultados dos modelos numéricos ao mapeamento realizado nas imagens, verificou-se que as regiões dos modelos numéricos onde ocorrem os maiores valores de dilatância coincidiram com regiões locais no terreno (terminações de falhas e cruzamento de fraturas), onde ocorrem concentração de dissolução e formação de carste. Assim, este trabalho estabeleceu que existe uma relação possível entre a concentração de tensão e a dissolução ao longo da trama estrutural observada nos lajedos fraturados e carstificados e evidenciou que o processo de dilatância provavelmente é responsável pela ocorrência de dissolução preferencial controlada por fraturas em rochas carbonáticas.

Palavras-chave: Fraturas; Carste; Modelagem numérica; Formação Jandaíra.

#### Abstract

The effect of the presence of fractures on fluid flow in reservoir is nowadays a fundamental theme of interest to the oil industry. In the case of carbonate rocks, the study of the contribution of fractures on reservoir efficiency becomes more complex due to the reactive nature of these rocks to circulating fluid and the high tendency to form karst. The fractures act as agents that focus fluid percolation and exert structural control on the formation of karst. For the oil industry, this scenario can be favorable became of the increasing of porosity and permeability of secondary fractures, but also poses risks to the operation. This article investigates, under the geomechanical point of view, how the presence of fractures influence the development of karst observed in carbonate rocks. The Jandaíra Formation was selected as an analogue geomaterial to fractured carbonate reservoirs in marginal basins of Brazil. The methodology adopted for this study included: (i) the use of satellite images, an UAV; (ii) Numeral modeling of the effect of the current tensions on the flagstone structures. Comparing the results of numerical modeling to the mapping performed on the images, it was found that the regions of the numerical models where the highest values of dilatancy occur coincided with local areas in the field (fault terminations and cross fractures), which represent the concentration of dissolution and karst formation. This work has established that there is a possible relationship between the stress concentration and the dissolution along the structural fabric observed in fractured

field flagstones and showed that the dilatancy process is probably responsible for the occurrence of preferential dissolution by fractures in carbonate rocks.

Keywords: Fractures; Karst; Numerical modeling; Jandaíra Formation.

# INTRODUÇÃO

A predição da variação da porosidade e da permeabilidade em carbonatos é uma das tarefas mais difíceis para a aplicação em modelos de reservatório nesse tipo de rocha. A alta suscetibilidade química dos carbonatos é o principal fator de dificuldade, uma vez que causa uma dinâmica de dissolução, reprecipitação e neomineralização ao longo das diferentes fácies que compõem o reservatório. Esse processo diagenético altera facilmente a distribuição da qualidade permoporosa das rochas e torna-se ainda mais complexo quando os reservatórios são fraturados (Nadeau e Ehrenberg, 2006; Gale e Gomes, 2007; Silva, 2011; Jeanne et al., 2012).

O processo cárstico pode ocorrer tanto pela ação de água meteórica que penetra na formação (carste epigênico) quanto pela ação de fluidos subterrâneos ascendentes (carste hipogênico). O fenômeno ocorre em escalas variadas, desde o poro (i.e. alargamento de poros, criação de vugs, obstrução de poros por reprecipitação) até a formação de cavernas (Drew, 1985). Segundo Palmer (2003), a porosidade primária, relacionada à porosidade intergranular, geralmente tem menos importância para o carste, uma vez que a maioria das rochas carstificáveis se apresenta de forma maciça, não permitindo uma circulação hídrica entre seus grãos. Por outro lado, a porosidade secundária representada por planos de acamamento, juntas e falhas, entre outras estruturas (descontinuidades), tem grande importância no processo de carstificação (Martini, 1979; Klimchouk, 2009).

Vários incidentes podem ocorrer durante a perfuração e a produção em reservatórios carbonáticos por conta da presença de carste, tais como: (1) a queda da coluna de perfuração por causa de espaços vazios em subsuperficie; (2) perdas severas de circulação, devido à presença de zonas de permeabilidade aumentada; (3) prisão da ferramenta e desabamento de intervalos do poço, em razão de zonas densamente fraturadas, causando um aumento na fragilidade da rocha; (4) comunicação entre poços e chegada prematura da frente de água, por meio de zonas de fraturas altamente transmissoras. Esses problemas ocorrem não apenas por conta do fraturamento, mas também pelo aumento da dissolução (carste) ao longo da rede de fraturas.

Com o crescente aumento das atividades de exploração e produção em reservatórios carbonáticos, é cada vez maior a preocupação em compreender a ocorrência de processos de carstificação e o controle estrutural sobre a formação do carste. Com a intensão de contribuir para melhorar essa compreensão, nesse trabalho investigamos como a trama estrutural presente no Lajedo Soledade exerce controle sobre o processo de carstificação epigênico observado. O Lajedo Soledade é uma grande exposição de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra (porção emersa da Bacia Potiguar) que, assim como outros lajedos dessa mesma formação, se apresenta fortemente fraturado e carstificado. Essa investigação teve como base resultados de modelagens numéricas, a partir da abordagem geomecânica, para identificar quais os efeitos das tensões atuantes sobre as fraturas nos carbonatos da Formação Jandaíra e se esses efeitos poderiam afetar a permeabilidade dessas fraturas, favorecendo ou prejudicando a dissolução das rochas e a formação de carste.

#### CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL REGIONAL

A Bacia Potiguar se localiza no extremo nordeste brasileiro, abrangendo os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. A bacia ocupa uma área de aproximadamente 60.000 km<sup>2</sup>, sendo cerca de 20.000 km<sup>2</sup> emersa (Araripe e Feijó, 1994). Ela representa um rifte intracontinental em sua porção emersa e uma bacia do tipo *pull-apart* em sua porção submersa. Esta bacia faz parte do Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro, junto com as bacias do Recôncavo, Tucano, Jatobá, Araripe, Rio do Peixe e Sergipe-Alagoas (Matos, 1992).

O preenchimento sedimentar da bacia está relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica, das quais são reconhecidos, no mínimo, três importantes estágios em resposta à fragmentação do Pangea: rifte, fase transicional e fase de deriva continental (Bertani et al., 1990).

A Formação Jandaíra, alvo de presente estudo, é uma plataforma que faz parte da fase rifte, formada no Senoniano/Turoniano e composta por calcarenitos com bioclastos e calcilutitos, aflorando em quase toda a porção emersa da bacia. O limite do pacote carbonático da Formação Jandaíra é concordante com as formações Açu ou Quebradas e representa a superfície de inundação máxima do Cretáceo Superior na bacia. A Formação Jandaíra apresenta contato superior com os sedimentos do Grupo Agulha (discordância regional lateralmente) e se interdigita com a Formação Ubarana (Araripe e Feijó, 1994). Essa unidade é composta por rochas calcárias de alta e baixa energia, de calcarenitos bioclásticos a foraminíferos bentônicos, por vezes associados a algas verdes, ocorrendo também calcilutito com marcas de raízes, dismicrito e gretas de contração, possuindo estruturas sedimentares como estratificação cruzada, gretas de dissecação, septárias e *bird eyes* (Sampaio e Schaller, 1968). Esse conjunto de fácies aponta para um ambiente de planície de maré (Monteiro e Faria, 1988). A Formação Jandaíra é datada como Tutoriana a Mesocampaniana, a partir de seu conteúdo fossílifero (Araripe e Feijó, 1994).

A Formação Jandaíra apresenta mergulhos suaves em direção ao Oceano Atlântico e clinoformais sigmoidais típicas de bacias de margem de rampa. A espessura varia desde algumas dezenas de metros na porção oeste da bacia até aproximadamente 600 m na porção da plataforma interna atual, passando a zero em direção a águas profundas por efeito de erosão ou condesamento (Pessoa Neto et al., 2007). Os sistemas deposicionais correspondentes à Formação Jandaíra são sistemas de barras, sistemas de planície de maré e sistema de bancos (Apoluceno et al., 1995). As rochas carbonáticas dessa formação afloram em quase toda a porção emersa da Bacia Potiguar, a qual se encontra intensamente erodida e carstificada (Pessoa Neto et al., 2007).

Pouco se sabe sobre as tensões pretéritas que atuaram na Bacia Potiguar. Entretanto, o campo de tensões atuais é bem conhecido. Estudos de mecanismos focais (Ferreira et al., 1998) e *breakouts* (Lima et al., 1997) indicam que a tensão máxima horizontal é paralela à costa da Bacia Potiguar. Estudos mais recentes sobre o campo de tensões, usando perfis de imagem microrresistiva, confirmam a orientação e compressão máxima segundo a direção na porção central e oeste da bacia para a direção EW na porção leste da bacia (Figura 3) (Reis et al., 2013). Um regime de falha normal ocorre a profundidades inferiores a 2.000 m na supersequência pós-rifte (Formações Açu e Alagamar), passando para um regime normal-transcorrente em profundidades superiores a 2.500 m, correspondente a supersequência rifte (Formação Pendência).

### METODOLOGIA

Para a execução dos modelos numéricos apresentados nesse trabalho foi utilizado o TECTOS 2D, desenvolvido em uma colaboração entre a PUC-RJ e a Petrobras, um *software* para modelagem numérica mecânica em geologia estrutural pelo método dos elementos finitos.

O Lajedo Soledade possui aproximadamente 1 km de comprimento por 1,3 km de largura. Os modelos foram criados no formato de mapa e possuem uma área aproximadamente 22% maior que a área real do lajedo, de forma a evitar que efeitos de borda do modelo afetassem os resultados obtidos. Foi utilizada uma malha triangular não estruturada, na qual inserimos o arcabouço estrutural do lajedo que foi criado a partir das informações de comprimento e azimute de lineamentos estruturais, equivalentes no terreno a falhas e juntas, mapeados a partir de imagens do Google Earth (Figura 1). Posteriormente, utilizamos imagems adquiridas com o equipamento VANT (veículo aéreo não tripulado) da Universidade Técnica de Delft, que forneceu cobertura em uma área de aproximadamente 800 m × 400 m para detalhamento do fraturamento e sua relação com o sistema cárstico na porção sul do Lajedo.

Consideramos, para o arcabouço estrutural dos modelos, apenas os lineamentos maiores que 15 m (Figura 2). Apesar de existir no lajedo um número razoável de estruturas menores que 15 m, entendemos que a exclusão dessas linhas nos modelos não acarretaria prejuízo para os resultados, uma vez que a ocorrência de zonas plastificadas nos modelos estaria já indicando a presença de fraturas menores associadas às estruturas maiores (falhas). Essa seleção também teve o efeito de tornar o modelo mais leve, reduzindo o tempo de processamento, e facilitou a acuidade visual dos resultados gráficos.

As modelagens numéricas realizadas nesse trabalho tiveram como objetivo compreender como a variação da distribuição das tensões ao longo das fraturas pré-existentes no Lajedo Soledade influenciaram a criação de zonas favoráveis ao aumento da porosidade e permeabilidade secundárias por meio da trama estrutural do lajedo. A partir da análise comparativa dos resultados dos modelos numéricos com dados de campo, buscamos determinar como se deu o controle estrutural para o desenvolvimento do carste observado no Lajedo Soledade.

#### MODELAGEM DA DEFORMAÇÃO NO LAJEDO DE SOLEDADE

Os modelos numéricos realizados nesse trabalho tiveram como dados de entrada, além do arcabouço estrutural, propriedades mecânicas da rocha carbonática não deformada, valores de resistência do material de preenchimento das fraturas, um modelo constitutivo eleito, um critério de ruptura e um campo de tensões prescrito.

Toda a área dos modelos, fora os lineamentos estruturais, é considerada rocha da Formação Jandaíra. Como não fizemos a caracterização faciológica do Lajedo Soledade, consideramos que apenas uma litologia carbonática preenche o modelo. Também não existem ensaios de mecânica de rocha para as unidades da Formação Jandaíra de um modo geral, por isso atribuirmos propriedades mecânicas à rocha não deformada (Tabela 1) a partir de pesquisa bibliográfica (Fjaer et al., 2008) para rochas similares.



Figura 1. Mapa de localização do Lajedo Soledade, Formação Jandaíra, porção *onshore* da Bacia Potiguar com os lineamentos extraídos da imagem do Google Earth.

Tabela 1.	Propriedades	mecânicas	das	rochas	usadas	na
modelage	m.					

Propriedades mecânicas da rocha					
Profundidade	Até -300 m	Até -500 m			
Módulo de Young	25 Gpa	25 Gpa			
Poisson	0,15	0,15			
Coesão	5 MPa	8 MPa			
Ângulo de atrito interno	30°	30°			
Dilatância	0,12	0,12			
Coeficiente de Biot	1	1			

Do ponto de vista mecânico, os lineamentos são representados nos modelos como descontinuidades, definidas por elementos de contato (Figura 2). Isso quer dizer que eles definem os planos de fraqueza no modelo, que acomodam a distribuição e o acúmulo das tensões aplicadas e ocasionam as maiores deformações (plastificação) da malha (Figura 2B). Consideramos que esses planos estão preenchidos por um material qualquer para conferir-lhes resistência à deformação. Foi atribuído a esse material propriedades (Tabela 2) como densidade (Rho =  $2.700 \text{ kg/m}^3$ ), resistência à compressão (Kn = 1e06 MPa) e resistência ao cisalhamento (Ks = 1e04 MPa).

Tabela 2. Propriedades mecânicas	das fraturas usadas na
modelagem.	

Propriedades mecânicas das fraturas				
Kn	1 e06			
Ks	1 e04			
Densidade	2700			



**Figura 2.** A: Malha triangular base para o modelo numérico, com tensão efetiva aplicada nas bordas do modelo de 14 Mpa e com direção NW-SE; B: Detalhe da malha triangular base para o modelo numérico.



Fonte: Moraes (1995).

**Figura 3.** Representação do limite de ruptura do material - *Ratio of Failure by Stress* (RFS).

Optamos pelo modelo constitutivo elastoplástico, por considerarmos que satisfaz a necessidade desse estudo em demostrar, de forma simples, as relações entre tensões e deformação que possibilitam o prognóstico do aparecimento de zonas deformadas similares às zonas de falhas e juntas observadas no lajedo. Segundo Moraes (2000), a reologia elastoplática é plenamente satisfátoria para modelos que buscam contemplar a resposta de rochas rúpteis diante das altas taxas de deformação. Usamos o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Quanto à predição das tensões aplicadas ao modelo, consideramos duas condições, ambas baseadas no trabalho de Reis et al. (2013), que apresentaram estudos mais recentes e completos sobre o estado de tenções atuais na Bacia Potiguar. Segundo esses autores, hoje, na Bacia Potiguar, entre as profundidades de 0,5 e 2 km, predomina um regime normal de tensões onde a máxima tensão horizontal (Shmax) está orientada segundo uma direção NW-SE e apresenta um gradiente de 20 MPa/ km. A partir desses dados, elaboramos dois cenários de tensões ou modelos:

- Tensões prescritas iguais ao estado de tensões atuais, considerando o lajedo em superfície. Esse modelo serviu para verificar se as condições atuais de tensão são suficientes para afetar mecânicamente as fraturas pré-existentes no lajedo;
- Estado de tensões prescritas iguais ao atual, considerando o lajedo a uma profundidade de aproximadamente -500 m. Consideramos essa uma condição próxima das que a Formação Jandaíra estaria submentida quando a permeabilidade das fraturas foi alterada pelas tensões atuantes naquele momento.

Uma vez que os modelos foram construídos em perspectiva de mapa, não consideramos a atuação da tensão vertical. Para simularmos a diferença de profundidades, trabalhamos com a variação do valor atribuido à rocha intacta em superfície (Co = 5 MPa) e à profundidade de -500 m (Co = 8 MPa).

Para atingirmos o valor médio de 20 MPa na região interna dos modelos, fizemos uma decomposição de tensões aplicadas às quatro bordas, aplicando uma tensão efetiva de 14 MPa. Para obtermos uma orientação resultante NW-SE para a Shmax, aplicamos a tensão de forma oblíqua (Figura 2).

#### **RESULTADOS DA MODELAGEM**

Das várias possibilidades de saída oferecidas pelo TECTOS que permitem a visualização dos resultados de cada modelo, optamos pelo RFS (*Ratio of Failure by Stress*). Esse parâmetro fornece a informação da proximidade da tensão acumulada no material ou nas descontinuidades mecânicas em relação ao limite de ruptura, dada pela envoltória de Mohr-Coulomb (Figura 3). Os valores de RFS iguais ou próximos a 1 indicam que a rocha está próxima de atingir a envoltória de Mohr, ou seja, ou a rocha está próximas de serem reativadas. Valores mais próximos de zero ou iguais a zero indicam que não existe risco de ruptura ou reativação.

As Figuras 4 a 7 apresentam os resultados de RFS para os modelos nas condições de superfície (Figuras 4 e 5) e de profundidade de -500 m (Figuras 6 e 7). As figuras apresentam os resultados para os *steps* 1 a 4, sendo que o *step* 4 equivale a uma tensão efetiva aplicada na borda dos modelos de aproximadamente 5,6 MPa. Não exibimos aqui os resultados para os demais *steps* (5 a 10), porque verificamos, qualitativamente, que os valores de RFS até o *step* 4 são suficientes para explicar a deformação observada no lajedo. A partir do *step* 5, a deformação resultante nos modelos seria maior do que aquela observada em campo e nas imagens de satélite e do VANT. As Figuras 4 e 6 apresentam os resultados em mapa. As cores quentes, tendendo para o vermelho, indicam valores de RFS próximos a 1 (iminência de ruptura ou reativação). As cores frias, tendendo para o azul, indicam valores de RFS próximos a 0 (maior estabilidade e baixíssima possibilidade de ruptura ou reativação).

As Figuras 5 e 7 apresentam a distribuição de RFS ao longo de um perfil X-X', para o *step* 4 de cada modelo.

A análise dos resultados obtidos aponta que existe um processo de dilatância operando ao longo das fraturas observadas no Lajedo Soledade, como consequência do carregamento de tensões acumulado na rede estrutural do lajedo. Essa conclusão é baseada no fato de que os maiores valores de RFS se concentram nas proximidades das fraturas (Figuras 4 e 6), sendo que os valores médios estão em torno de 0,6 e 0,8 (Figuras 5 e 7) e mais raramente chegam a 1 (ruptura efetiva do material). Ou seja, as fraturas estão criticamente estressadas e localmente na iminência da ruptura.

Na eminência da ruptura ocorre o processo de dilatância, que causa o aumento do volume das fraturas e propicia um aumento relativo da permeabilidade que favorece a migração dos fluidos por meio desse espaço poroso secundário. A duração desse acúmulo de tensões depende do tempo necessário para a formação de uma nova fratura, de uma fratura pré-existente concluir seu movimento de reativação e se deslocar ou de parte do fluido acumulado na região migrar, e a pressão de poros diminuir. Desse modo, a percolação de fluidos tende a se concentrar ao longo das fraturas dilatadas, tornando-as condutos preferenciais para a circulação de fluidos e, por conseguinte, concentrando ali a dissolução da rocha.

Observamos que o aumento dos valores de RFS ocorre preferencialmente em zonas do modelo nas quais existe terminação de fraturas, cruzamento de fratura e fraturas *en echelon*. Também observamos que esse aumento de valores de RFS ocorre associado preferencialmente às fraturas de direção ENE/SWS e em menor proporção associado às fraturas de direção NE/SE. Isso está relacionado à direção das tensões aplicadas nas bordas dos modelos, que resultam em uma orientação NW-SE, a qual é compatível à direção da maior tensão horizontal atuante hoje na Bacia Potiguar. Assim, é natural que as fraturas com orientação mais favorável ao campo de tensões aplicado sejam mais sensíveis ao carregamento.

### IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DO CARSTE

Como foi discutido anteriormente, a predição de produtividade em reservatórios carbonáticos é difícil de ser representada em modelos de reservatório, sendo ainda mais complexa em reservatórios carbonáticos fraturados. Na busca por



Figura 4. Resultados de RFS para o modelo em condições de superfície - steps 1 a 4.







Figura 6. Resultados de RFS para o modelos em condições de profundidade igual a -500 m - steps 1 a 4.

compreender como a tensão influencia na criação de zonas favoráveis ao aumento da porosidade e da permeabilidade, como consequência do fraturamento de carbonatos, comparamos as informações de lineamentos estruturais, obtidos das imagens de satélite e do VANT na porção SE do Lajedo Soledade, com os resultados das modelagens com o TECTOS.

A Figura 8 compara a imagem do VANT (à direita) com a mesma região no modelo numérico (à esquerda). Os polígonos indicam os locais onde encontramos correlação entre os resultados da modelagem com ocorrência de fraturamento e dissolução no lajedo.

Nesses polígonos verificamos coincidências entre o aumento dos valores de RFS com os locais de interseção e terminações de fraturas. As zonas delimitadas pelo tracejado amarelo e vermelho são equivalentes às zonas no modelo numérico nas quais ocorre aumento nos valores de RFS, sendo preferenciais à ocorrência de dissolução do carbonato associada às fraturas.

No Polígono 1 (Figura 9), o acúmulo de RFS se encontra na interseção entre as falhas de direção 80° Az e 340° Az. É possível observar a intensidade da dissolução ao longo dessas fraturas. Na porção NE, ocorre um aumento significativo dos valores de RFS, que coincide com a região de intensa dissolução dessas falhas.

No Polígono 2 (Figura 10), a concentração da dissolução e os maiores valores de RFS ocorrem na interseção das fraturas de direção 80° Az e 240° Az, na qual também ocorre um aumento de dissolução.

O Polígono 3 (Figura 11) mostra que a concentração dos valores de RFS ocorre na terminação da fratura. A fratura de direção 80° Az apresenta alargamento em função da dissolução. A dissolução também ocorre ao longo da fratura de direção 40° Az e na forma de padrão dentrítico em toda a porção leste dessa figura.

# DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa dos resultados das modelagens numéricas executadas nesse trabalho com as imagens do Google Earth e do VANT disponíveis para o Lajedo Soledade e informações de estudo de terreno, observamos que:

- O desenvolvimento do carste epigênico no Lajedo Soledade é mais intenso ao longo das fraturas do que na rocha intacta, indicando que o processo de dissolução é estruturalmente controlado;
- O processo mecânico que provavelmente favoreceu a percolação de água meteórica através da rede de fraturas no Lajedo Soledade é o de dilatância. Esse processo promove o aumento do volume das fraturas pré -existentes quando estão na iminência da ruptura, dado o campo de tensões atuante;
- Nos modelos numéricos, a ocorrência de dilatância é identificada pelo fator RFS;
- A variação dos valores de RFS tende a um aumento significativo em locais do lajedo onde se localiza a terminação de fraturas, ocorrendo o cruzamento de fraturas, ou as fraturas apresentam padrão *en echelon*. Nesses locais,

além do aumento dos valores de RFS nos modelos numéricos, observamos nas imagens e no terreno que ocorre a intensificação do processo de dissolução do carbonato;

5. As grandes fraturas (falhas) que atravessam o Lajedo Soledade são suficientemente potentes para cortar várias sucessões de camadas da sequência carbonática, que, por sua vez, apresentam diferentes competências mecânicas e de suscetibilidade à dissolução. As diferentes competências mecânicas das camadas controlam a variação do desenvolvimento da zona de dano dessas falhas (zona fraturada subordinada à falha principal). Essa rede tridimensional de fraturas favorece a entrada de água meteórica por vários metros de profundidade na sequência carbonática, permitindo o controle estrutural do carste além da superfície. As diferentes suscetibilidades à dissolução das várias camadas cortadas verticalmente pelas fraturas permitem a variação do desenvolvimento lateral do carste - camadas mais sensíveis são mais dissolvidas, e o carste se desenvolve lateralmente, além da fratura; camadas mais resistentes permitem que o carste se desenvolva pouco lateralmente, não se estendendo muito além da fratura.

Em síntese, modelamos fraturas (falhas e juntas não discriminadas) e observamos a concentração de dilatância (RFS) em superfície e em profundidade (até -500 m). Os resultados mostraram que os maiores valores de RFS se concentram na região de encontro das fraturas e nas terminações delas. As estruturas tectônicas são, em várias situações, locais de maior carstificação e dissolução da rocha pelo aumento do número de fraturas. Os altos valores de RFS apresentam relação direta com a concentração da dissolução e a carstificação de rochas carbonáticas no Lajedo do Rosário. Portanto, a modelagem numérica é uma ferramenta importante para a predição de carste em reservatório carbonático.



Figura 7. Variação dos valores de RFS em função da distância para modelo em condições de profundidade igual a -500 m, step 3.



Figura 8. Comparação entre modelo numérico em superfície e imagem do VANT. A: Modelo numérico; B: Imagem do VANT.



Figura 9. Encontro de um set de fraturas de direção 340º Az e um set de fraturas com direção 80º Az.

Assim, concluímos que o estudo do controle estrutural sobre o processo de carstificação é de importância fundamental para a modelagem e planejamento da produção em reservatórios carbonáticos, principalmente quando são fraturados. Esse controle é capaz de criar zonas de forte incremento do espaço permoporoso nesses reservatórios de forma concentrada e ao longo da rede fraturas. Em outras palavras, a modelagem numérica do comportamento mecânico das fraturas pré-existentes pode contribuir para a compreensão do desenvolvimento do carste estruturalmente controlado, podendo dar importantes subsídios para a predição da ocorrência de carste.



Figura 10. Picos com aumento de RFS marcam encontro de fraturas dos sets 80° e 340° Az.



**Figura 11.** Terminação de uma fratura com direção 80° Az. Observa-se aumento da dissolução no cruzamento desta fratura com o set 340° Az. Entretanto, os valores de RFS ocorrem na terminação da fratura 80° Az.

# AGRADECIMENTOS

O presente trabalho faz parte do projeto "Falhas, fraturas, fácies e fluxo de fluidos em sistemas cársticos: implicações na arquitetura e na predição da permoporosidade secundária em rochas carbonáticas (porocarste)", executado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte e financiado pela Petrobras. Os autores agradecem aos três revisores anônimos e ao editor da *Revista Geologia USP*, série científica, pelas cuidadosas revisões que melhoraram substancialmente o manuscrito inicial. A primeira autora agradece à CAPES por sua bolsa de mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica pelas condições de trabalho.

## REFERÊNCIAS

Apoluceno, D. M., Córdoba, V. C., Farias, P. R. C. (1995). Faciologia e sistemas deposicionais da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar, em uma área a norte de Apodi, RN. *XXVI Simpósio de Geologia do Nordeste*. Natal: CCET.

Araripe, P. T., Feijó, F. J. (1994). Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8(1), 127-141.

Bertani, R. T., Costa, I. G., Matos, R. M. D. (1990). Evolução tectono-sedimentar estilo estrutural e habitat do petróleo da Bacia Potiguar. *Origem e evolução de bacias sedimentares* (291-301). Rio de Janeiro: Petrobrás.

Drew, D. (1985). *Karst Processes and Landforms*. Londres: Macmillan Education.

Ferreira, J. M., Oliveira, R. T., Takeya, M. K., Assumpção, M. (1998). Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar basin. *Geophysical Journal International*, 134, 341-355.

Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., Risnes, R. (2008). Petroleum related rock mechanincs. *Developments in Petroleum Science*, 53.

Gale, J. F. W., Gomez, L. A. (2007). Late openingmode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: Recognition, characterization, and implications for fluid flow. *American Association of Petrpleum Geologist*, 91(7), 1005-1023.

Jeanne, P., Guglielmi, Y., Lamarche, J., Cappa, F., Marié, L. (2012). Architectural characteristics and petrophysical properties evolution of a strike-slip fault zone in a fractured porous carbonate reservoir. *Journal of Structural Geology*, 44, 93-109.

Klimchouk, A. (2009). Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106, 100-117.

Lima, C. C., Nascimento, E., Assumpção, M. (1997). Stress orientation in Brazilian sedimentary basins from breakout

analysis: implications for force models in the South American Plate. *Geophysical Journal International*, 130, 112-124.

Martini, J. (1979). Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop. *Annals of the Geological Survey of South Africa*, 13, 115-128.

Matos, R. M. D. (1992). The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4), 766-791.

Monteiro, M. C. e Farias, R. T. (1988). Planície de Maré no poço 9-MO-13-RN, Formação Jandaíra: um exemplo do passado. Rio de Janeiro: Petrobras. Relatório interno.

Moraes, A. (1995). Estudo dos campos de tensões locais e da geração de falhas em regime extensional pelo método dos elementos finitos. Departamento de Geologia, Escola de Minas. Ouro Preto: UFOP.

Moraes, A. (2000). Mecânica do Contínuo para Geologia Estrutural. *Petróleo Brasileiro S. A. (CENPES)*, 83.

Nadeau, P. H., Ehrenberg, S. N. (2006). Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships: Reply. *AAPG Bulletin*, 90(5), 811-813.

Palmer, A. N. (2003). Patterns of dissolution porosity in carbonate rocks. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1, 71-78.

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 Geociência da Petrobrás*, 15(2), 357-369.

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, 1-14, DOI: 10.1002/2012JB009953.

Sampaio, A. V., Schaller, H. (1968). Introdução à estratigrafia Cretácea da Bacia Potiguar. *Boletim Técnico Petrobrás*, 11(1), 14-44.

Silva, A. T. (2011). *The contribution of brittle deformation processes on improving hydrocarbon carbonate reservoirs: the Jandaíra Formation (Turonian – Campanian) as analoque.* Tese (Doutorado). Roma: Dipartimento di Scienze Geologiche – Roma Tre.