

Aplicação da técnica de *scanline* à modelagem geológica/geomecânica de sistemas de fraturamento nos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE do Brasil

Applying scanline technique to geological/geomechanical modeling of fracturing systems in carbonate and evaporite deposits from Araripe Basin, NE Brazil

Tiago Siqueira de Miranda | José Antônio Barbosa | Igor Fernandes Gomes | Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann | Rafael Fernandes Vieira Correia Santos | Gabriel Corrêa de Matos | Leonardo José do Nascimento Guimarães | Robson Queiroz Florêncio | Márcio de Lima Alencar

resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para caracterização geológica de reservatórios naturalmente fraturados. Esta metodologia se baseia nas seguintes atividades: aplicação da técnica de *scanlines*; levantamentos de dados de campo (medidas estruturais, painéis fotográficos, coleta de amostras); obtenção de propriedades petrofísicas; construção de seções vetoriais; e construção de modelos numérico-computacionais, com base em malha de elementos finitos. O estudo de caracterização foi realizado nas formações Crato (calcário laminado) e Ipubi (gipsita/anidrita) da Bacia do Araripe, NE do Brasil. A partir da técnica de *scanline* foram obtidos os atributos dos sistemas de fraturamento em escala mesoscópica (afloramentos) e microscópica (seções delgadas). As principais estruturas identificadas na Formação Crato foram fraturas de extensão (juntas e veios) e fraturas cisalhantes sinsedimentares. Na Formação Ipubi este estudo se limitou às estruturas rúpteis principais, classificadas como veios (gipsita/argilominerais), verticais a subverticais. A construção dos modelos bidimensionais foi realizada com base em desenhos vetoriais em Computer-Aided Design (CAD) sobre os painéis fotográficos dos afloramentos,

através dos quais foram obtidas as malhas de elementos finitos. Esta etapa foi realizada a partir de rotinas criadas nas linguagens Matrix Laboratory (Matlab) e Locator/Identifier Separation Protocol (LISP) que permitiram a automatização do processo de geração das mesmas. A partir do modelo computacional foi feita a atribuição das propriedades físicas dos materiais, obtidas através de ensaios em laboratório, dos parâmetros de leis constitutivas, hidroquímico-mecânicas, e das condições iniciais de contorno. Nos modelos gerados, as grandes estruturas foram tratadas como um meio contínuo discreto, e a estas foram atribuídas propriedades mecânicas dos seus materiais de preenchimento. Em seguida foram obtidos arquivos de entrada prontos para serem processados pelo programa de simulações numéricas Code_Bright. A metodologia proposta neste trabalho permitiu construir modelos simples, porém robustos, para formações geológicas naturalmente fraturadas com baixa complexidade de geometria (deposicional e estrutural) e faciologia. O aperfeiçoamento da metodologia permitirá a criação de modelos confiáveis, de rápida construção, para a realização de simulações numéricas acopladas (hidromecânicas).

Palavras-chave: análogos de reservatório | sistemas fraturados | modelagem geológica | técnica de *scanline*

abstract

This paper presents the development of a new methodology for the geological characterization of naturally fractured reservoirs. Such methodology is based on the following activities: application of scanlines technique, field data surveys (structural measurements, photographic panels, collection of samples), petrophysical analysis, construction of vectorial sections, and construction of computational models based on finite elements meshes. The study for characterization was conducted on two geological formations: Crato (limestone) and Ipubi (evaporites), from the Araripe Basin, NE Brazil. Using the scanline technique, the attributes of the fracturing systems were obtained in mesoscopic (outcrops) and in microscopic (thin sections) scale. The main structures identified in the Crato Formation were extensional fractures (joints and veins) and synsedimentary shear fractures. In the Ipubi Formation we limited our scope to main brittle fractures, classified as vertical to subvertical veins. The construction of the bidimensional geomechanical models was based on vectorial drawings (CAD) on the photographic panels of the outcrops, which were translated to finite element mesh by using routines created in Matlab and LISP languages. This permitted the automatization of the mesh creation process. The computational model then was finished with the incorporation of physical properties – obtained from lab tests – of hydro-chemical-mechanic constitutive law parameters, and of the initial boundary conditions. In the computational model, the major structures were treated as a discretized continuum medium and the physical properties of their filling materials were assigned to such structures. The final products are files which could be directly processed in the software Code_Bright, to perform numerical simulations. The proposed methodology allowed the construction of simple, but robust, models for naturally fractured geological formations with low complexity in terms of geometry and faciology. The improvement of the methodology will make it possible to create models which are reliable and can be constructed quickly to perform coupled simulations (hydro-mechanical).

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *reservoir analogues | fractured systems | geological modeling | scanline technique*

introdução

A modelagem geológica/geomecânica de depósitos sedimentares pode ser feita a partir da aplicação de uma variada gama de técnicas que objetivam a aquisição de informações como: geometria dos corpos, aspectos faciológicos e sedimentológicos, arquitetura deposicional, ocorrência de ciclicidade, aspectos de- formacionais, natureza química, parâmetros petrofísicos e mecânicos (Gluyas e Swarbrick, 2006). Estas informações podem ser transferidas para modelos numéricos, que permitam a realização de simulações de reservatórios de hidrocarbonetos. Os dados essenciais para a modelagem geológica/geomecânica podem ser obtidos a partir das rochas em subsuperfície, através da perfilagem de poços, de dados sísmicos ou outros métodos geofísicos, além dos dados provenientes de testemunhos (Gluyas e Swarbrick, 2006; Robinson *et al.*, 2008). No entanto, a modelagem com base em dados de subsuperfície apresenta limitações quanto à representação das heterogeneidades geológicas, causadas pela quantidade e espaçamento de poços disponíveis e pela resolução do método sísmico. Uma alternativa para reduzir essas limitações se dá pela utilização de modelos análogos. Estes se caracterizam como formações rochosas que podem ser acessadas em superfície e que apresentam semelhanças com alvos exploratórios em subsuperfície. Os análogos podem fornecer parâmetros importantes para a concepção de modelos utilizados em simulações computacionais, que servem para aumentar o poder de predição do comportamento dos reservatórios. O uso de análogos na simulação de reservatórios tem seu principal foco na avaliação de risco e em previsões de produção (simulação de fluxo, comportamento geomecânico, integridade) (Gluyas e Swarbrick, 2006; Bjorlykke, 2010). Os análogos podem, por exemplo, fornecer parâmetros que servem como base para técnicas de integração multiescala, como no caso da descrição de sistemas de fraturamento, ou para a extrapolação de propriedades/heterogeneidades geológicas (*up scaling*) (Bourbiaux, 2010). Dentro deste contexto, a simulação de reservatórios naturalmente fraturados é uma tarefa desafiadora, desde a caracterização do meio fraturado na modelagem geológica até a complexidade imposta à simulação numérica (Thomas *et al.*, 1983; Bourbiaux, 2010).

O presente estudo objetivou testar a aplicação da técnica de *scanline*, juntamente com a obtenção de dados estruturais, visando à caracterização de

sistemas de estruturas rúpteis que ocorrem nas formações Crato (carbonatos) e Ipubi (evaporitos) presentes na Tectonossequência Pós-Rifte da Bacia do Araripe, NE do Brasil (fig. 1). Também foram realizados ensaios petrofísicos (porosidade, densidade de grãos, densidade total e velocidades das ondas elásticas) em amostras coletadas nos afloramentos. A definição dessas propriedades e sua inclusão no modelo computacional são fundamentais para a realização de simulações do comportamento geomecânico das rochas e das estruturas rúpteis. Apenas as fraturas de maior abertura foram discretizadas, devido a sua importância local nos modelos. O fraturamento de pequena escala, abundante em ambas as formações, mas que não é passível de discretização nos modelos foi tratado a partir dos dados das *scanlines*. Isto permitiu que fosse feita uma tentativa de distribuir os valores de permeabilidade e porosidade, relacionados ao sistema de fraturamento, como um fator equivalente na matriz. Isto permitiu tratar a rocha fraturada, cuja permeabilidade e porosidade são dependentes do fraturamento de pequena escala, em uma matriz rochosa equivalente com porosidade e permeabilidade isotrópica. Nesta etapa do estudo foi possível testar os limites da técnica de caracterização do sistema de fraturamento, a partir do emprego de uma modelagem multiescala, utilizando uma técnica de homogeneização de estruturas periódicas que permite derivar na escala macroscópica o modelo hidrodinâmico postulado na escala microscópica. O objetivo foi obter uma extrapolação matemática dos parâmetros de porosidade e permeabilidade, também relacionados ao fraturamento, da micro para a macroescala. A integração de dados da modelagem geológica com a modelagem numérico-geomecânica descrita neste trabalho consistiu apenas no pré-processamento dos dados para a realização das simulações numéricas. Os resultados da modelagem numérica e das simulações serão objeto de outra publicação, e não são apresentados nem discutidos aqui.

Para ambas as formações, Crato e Ipubi, foi possível analisar os sistemas de fraturamento em escala de afloramento (mesoscópica) e em lâminas delgadas (microscópica), no caso dos calcários. O tratamento das medidas obtidas permitiu a determinação de padrões de densidade das estruturas e de sua correlação com os valores de abertura das mesmas a partir de gráficos log-log. Foi constatado, por exemplo, que a orientação de microfaturas pode fornecer estimativas de orientação das macrofraturas (Laubach, 1997; Marrett *et al.*, 1999; Ortega e Marrett, 2000). Outro fator importante

do estudo foi a aplicação, de forma inédita, da técnica de *scanline* em depósitos evaporíticos.

O produto final deste trabalho consistiu na aplicação de uma metodologia para a aquisição e integração simplificada de dados de campo e de laboratório para a construção rápida de modelos geológicos, objetivando o desenvolvimento de simulações numéricas de fluxo em rochas naturalmente fraturadas, considerando o acoplamento geomecânico e químico. Com esta metodologia foi possível construir modelos de baixo custo, porém robustos e confiáveis o bastante para permitir simulações computacionais para rochas, cujo fluxo é dependente do padrão de fraturamento. Entretanto, é importante que, além dos resultados aqui mostrados, a metodologia sugerida seja testada em um variado número de casos.

contexto geológico

A Bacia do Araripe está inserida no Domínio da Zona Transversal, ou Central, da Província da Borborema (PB), ou seja, esta bacia está localizada entre duas importantes zonas de cisalhamento, denominadas Patos (limite norte) e Pernambuco (limite sul) (Brito Neves *et al.*, 2000). Estas zonas de fraqueza crustal possuem direção E-W e cinemática dextral.

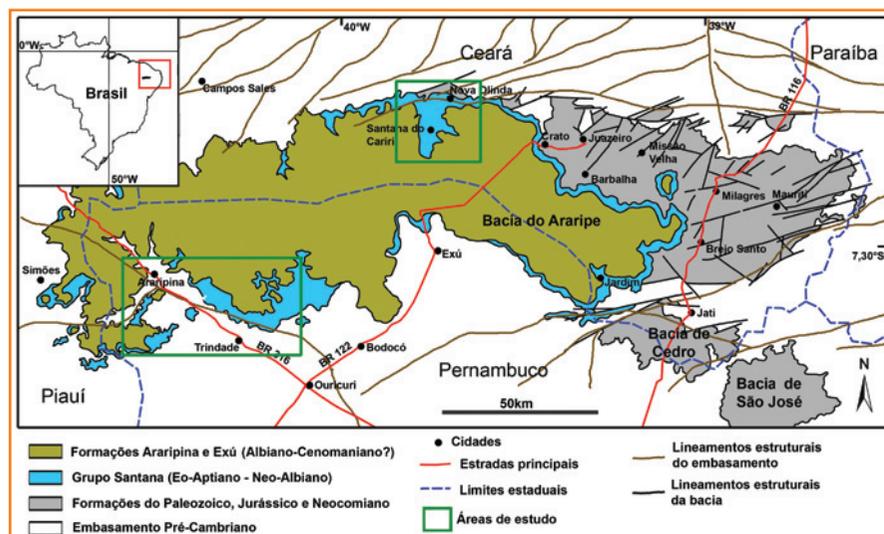
A Bacia do Araripe tem sua origem relacionada ao evento de rifteamento Eocretáceo (Neocomiano), que afetou também a margem atlântica (Matos, 1999). Esta bacia é constituída por duas sub-bacias, denominadas Cariri (a leste) e Feira Nova, ou Feitoria (a oeste), que são separadas pelo *horst* estrutural de Dom Leme (Neumann, 1999).

Figura 1

Localização da Bacia do Araripe e mapa geológico simplificado. Os polígonos em verde destacam as áreas de estudo, onde ocorrem exposições das formações estudadas (Arapipina-PE e Nova Olinda-CE).

Figure 1

Location of the Araripe Basin and simplified geological map. Green polygons indicate study areas, where outcrops of the formations studied occur (Arapipina-PE and Nova Olinda-CE).



Três modelos principais são propostos para a evolução da bacia: um modelo com distensão inicial na direção NW (Matos, 1992, 1999); o segundo, um pouco mais complexo, que envolve uma reativação transcorrente dos lineamentos dextrais com direção E-W e dos lineamentos sinistrais de direção NE (Françolin *et al.*, 1994); e um terceiro modelo, o mais recente, propõe uma nova concepção para a formação da bacia, com base na análise de dados gravimétricos, associando sua evolução a um sistema do tipo *pull-apart* (Miranda *et al.*, 2012).

metodologia

modelagem geológica (aquisição de dados de campo)

Para compor os modelos geológicos foram executados painéis fotográficos dos afloramentos que ocorrem em exposições de minas, em duas regiões específicas da Bacia do Araripe (fig. 1). Foram coletadas as atitudes das estruturas, o que permitiu a elaboração de diagramas para o modelo geológico-estrutural (estereogramas, diagramas de rosetas e histogramas). A partir deste conjunto de informações foi realizada a correlação da frequência das estruturas e a interpretação do seu comportamento espacial em multiescala. Nas áreas de estudo ocorrem minerações de calcário (Formação Crato) e de gipsita (Formação Ipubi), onde o estudo se concentrou devido à existência de excelentes exposições de ambas as unidades. No entanto, em praticamente nenhuma mina ocorre exposição de sucessão com as duas unidades, por motivos geológicos e práticos em relação ao objetivo das mineradoras. Por causa disso os modelos sintéticos e finais foram montados a partir de seções compostas, considerando os painéis feitos para ambas as unidades. As espessuras de ambas as formações, além do que foi observado nas exposições, foram determinadas através de dados de poços.

A coleta dos atributos das fraturas naturais foi realizada ao longo de linhas de varredura, posicionadas aleatoriamente, denominadas *scanlines*, que representam uma técnica simples e de baixo custo para obter parâmetros de fraturamento. A técnica consiste na obtenção de atributos de fraturas: espaçamento entre as paredes das fraturas, diâmetro de abertura, orientação, morfologia, relação de interseção e composição do preenchimento (Ortega *et al.*, 2006; Rohrbaugh *et*

al., 2002; Guerriero *et al.*, 2010). Neste trabalho são mostrados dados de *scanlines* feitos em afloramentos e em uma lâmina petrográfica. Para a coleta das medidas de abertura das estruturas, que podem ser vistas a olho nu ou com o auxílio de lupa de bolso, foi utilizado um comparador (fig. 2). O comparador consiste em uma régua que possui valores padronizados de abertura em escala logarítmica, entre 0,05mm e 5mm. O uso desta ferramenta facilita o agrupamento das medidas obtidas (Ortega *et al.*, 2006).

Os dados obtidos com as *scanlines* de meso e micro-escala foram organizados em planilhas padronizadas e em seguida foram processados de acordo com os procedimentos sugeridos por Ortega *et al.* (2006):

1. listar todas as aberturas das fraturas em ordem decrescente;
2. numerar as aberturas das fraturas a partir de 1, começando pela maior abertura até a menor (gerar uma lista cumulativa);
3. simplificar a lista com a eliminação de todas as fraturas que tiverem a mesma abertura, porém manter a abertura com o maior número cumulativo;
4. normalizar os números cumulativos pelo tamanho total da *scanline*. Este parâmetro representa a estimativa da frequência cumulativa de fraturas por metro;
5. plotar em gráfico log-log a frequência cumulativa *versus* a abertura da fratura. Os gráficos obtidos conforme este procedimento mostram que o resultado de correlação dos valores de frequência e abertura são mais bem expressos conforme uma lei de potência (Ortega *et al.*, 2006);
6. obter os parâmetros do melhor modelo para a distribuição observada, por exemplo, o coeficiente e o expoente da lei de potência.

O processamento envolveu o tratamento das medidas, a obtenção dos fatores de correlação entre a frequência acumulada das estruturas por metro *versus* os valores de abertura (deslocamento extensional) das fraturas em milímetro e sua representação em gráficos log-log (Marrett, 1996; Marrett *et al.*, 1999; Ortega e Marrett, 2000; Ortega *et al.*, 2006; Marrett *et al.*, 2007).

A análise das lâminas delgadas foi feita em microscópio petrográfico e em equipamento de catodoluminescência com o objetivo de analisar os aspectos texturais e diagenéticos das rochas, bem como a caracterização mineralógica do preenchimento das microfaturas. Feições como a ocorrência de cimentos tardios e o efeito de aumento ou redução da porosidade das



Figura 2 - a) Exemplo da aplicação da técnica de *scanline* linear em planta no calcário laminado da Formação Crato; b) detalhe do uso da régua comparadora com medidas normalizadas e lupa de bolso para executar medição da abertura das fraturas.

Figure 2 - a) Example of application of the linear *scanline* technique in the laminated limestones of the Crato Formation; b) detail of use of crack comparator with normalized measures and pocket magnifier to measure the aperture of fractures.

fraturas devido a processos de dissolução ou precipitação de minerais são externamente importantes para a integração na modelagem multiescala.

modelagem das malhas

A rotina utilizada para o pré-processamento do problema físico baseado nos modelos digitais dos afloramentos seguiu dois procedimentos básicos. Inicialmente, foram gerados manualmente desenhos dos afloramentos, a partir dos painéis fotográficos, com foco nas geometrias e no delineamento das grandes fraturas (acima de 3,5cm de abertura). Este processo foi feito em *software* CAD e resultou na criação de arquivos vetoriais. Em seguida foi utilizado um processo de geração de malha bidimensional de elementos finitos, com auxílio do programa *Mesh2D*, em linguagem Matlab (MathWorks, 2010), que permite a construção de modelos parametrizados e a criação dos arquivos de entrada para o programa de simulação numérica *Code_Bright*. Estes arquivos contêm informações, parâmetros, sobre a geometria do modelo, dados geométricos da malha de elementos finitos, propriedades permoporosas e físicas dos materiais, associadas aos elementos da malha, parâmetros referentes a aspectos numéricos (controle de convergência, tempo de simulação etc.), e condições iniciais

e de contorno. Para tornar mais prática a geração das malhas com base nos arquivos vetoriais, foi desenvolvida uma rotina em linguagem LISP que gera arquivos de dados, em forma matricial, de coordenadas de nós geométricos, incidências e superfícies para que estes sejam importados pelo programa *Mesh2D* adaptado. Este procedimento reduziu de forma considerável o tempo de interação manual no processo de geração do modelo e da malha de elementos finitos (automação da geração de malha).

obtenção de propriedades físicas

Amostras das rochas estudadas foram coletadas durante os trabalhos de campo e foram posteriormente processadas no Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande (UFPG). Procedeu-se à extração de plugues (\varnothing 1 1/2") que passaram por processo de secagem a 80°C durante 24h. Em seguida foram pesados e suas medidas tomadas em paquímetro digital. As medidas de volume de poros e de densidade foram realizadas com o equipamento *Ultraporoperm* 500, a partir da injeção de gás nitrogênio. Os ensaios das propriedades mecânicas foram realizados com pressão de confinamento de 40MPa à temperatura ambiente. Os resultados consistem no registro de propagação das ondas *P* e *S* na direção longitudinal dos plugues. No caso das ondas *S*, é realizado o registro de duas ondas com polarização mutuamente perpendiculares: ondas S_1 e S_2 . A função da leitura dessas duas ondas *S* é investigar a possível ocorrência de anisotropia elástica no plano perpendicular ao eixo do plugue. Através da aplicação de expressões da teoria geral da elasticidade, os módulos elásticos foram determinados: o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

Além de amostras dos calcários laminados, foram analisadas amostras de calcita recristalizada, que preenche as fraturas presentes nestes calcários. As rochas gipsíferas apresentam maior variedade de texturas (microcristalina, laminada, gipsita com nódulos de anidrita), além de gipsita fibrosa, que preenche fraturas e veios.

litoestratigrafia

Assine (2007), propôs a divisão da coluna estratigráfica da Bacia do Araripe em cinco sequências:

- a) Sequência Paleozoica, Ordoviciano-Devoniano, composta unicamente pela Formação Cariri;
- b) Supersequência Pré-Rifte, Thitoneano, composta pelas formações Brejo Santo e Missão Velha;
- c) Supersequência Rifte, Neocominiano, composta pela Formação Abaiara;
- d) Supersequência Pós-Rifte I, Aptiano-Albiano, constituído pelas formações Barbalha e Santana;
- e) Supersequência Pós-Rifte II, Albiano-Cenomaniano, composta pelas formações Araripina e Exu.

Contudo, Neumann (1999) e Neumann e Cabrera (1999) propuseram uma divisão das unidades estratigráficas da Bacia do Araripe em cinco sequências tectonossedimentares, com base no que fora anteriormente proposto por Ponte e Appi (1990) e Ponte e Ponte Filho (1996), denominadas:

- a) Beta (Siluro-Devoniana?);
- b) Pré-Rifte (Oxfordiano-Titoniano);
- c) Sin-Rifte (Berriasiano-Valanginiano);
- d) Pós-Rifte (Aptiano-Albiano);
- e) Zeta (Cenozoica).

O presente trabalho adota a divisão das unidades conforme proposta por Neumann e Cabrera (1999), que também propuseram que a Formação Santana deveria ser considerada como um Grupo, Grupo Santana, composto pelas formações Crato, Ipubi e Romualdo (fig. 3).

A Formação Crato representa a fase lacustre aptiana da Bacia do Araripe e é constituída principalmente por seis níveis de calcários laminados, denominados informalmente C1 a C6 (fig. 3). Essas camadas de calcário laminado encontram-se intercaladas com camadas de margas, arenitos, siltitos e folhelhos (Neumann, 1999; Silva *et al.*, 2002; Silva e Neumann, 2002). Silva (2003) descreveu três padrões principais de estruturas deformacionais observadas nos calcários laminados da Formação Crato: microfalhas rúpteis distensionais, microfalhas dúcteis-rúpteis compressionais e fraturas.

A Formação Ipubi representa o registro da fase evaporítica do sistema lacustre Aptiano-Albiano, sendo composta essencialmente por corpos descontínuos de gipsita, contendo secundariamente anidrita, na forma de nódulos e de lentes delgadas (Silva, 1983). Além das fácies evaporíticas, a Formação Ipubi apresenta folhelhos negros que ocorrem sobrepostos aos evaporitos e também se interdigitam com estes. Os corpos de gipsita apresentam espessura máxima em torno de 30m (fig. 3).

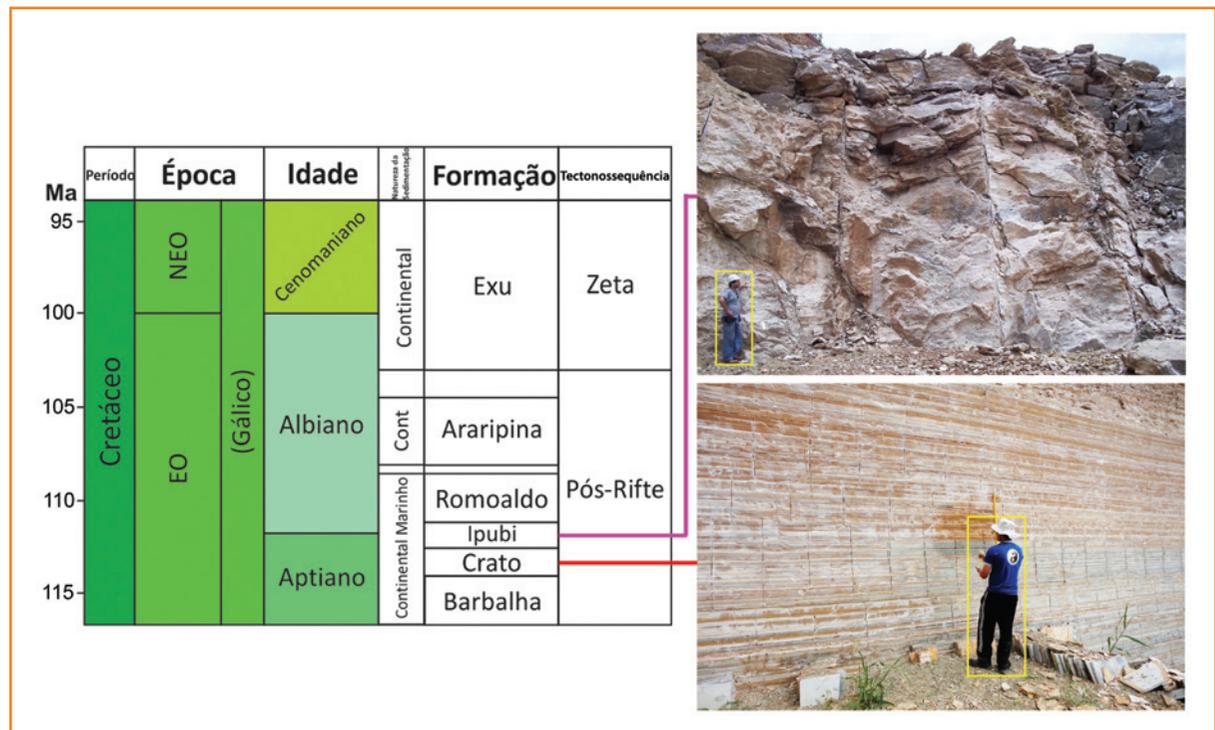
Almeida (2010) estudou os aspectos deformacionais que afetam a Sequência Pós-Rifte da Bacia do Araripe, especialmente a Formação Ipubi, com ênfase nas fraturas preenchidas por gipsita fibrosa. Essa autora propôs que a gipsita fibrosa que compõe o preenchimento das estruturas apresentasse dois padrões de crescimento em relação às paredes dos veios/fraturas:

Figura 3

Coluna estratigráfica esquemática da Bacia do Araripe para a Tectonossequência Pós-Rifte, adaptada de Neumann e Cabrera (1999) e Assine (2007). À direita exemplos de exposições das formações Crato e Ipubi em minerações.

Figure 3

Schematic stratigraphic chart of the Araripe Basin focusing on the Post-Rift Sequence. Adapted from Assine (2007) and Neumann and Cabrera (1999). On the right: Examples of quarry outcrops from the Crato and Ipubi formations.



- a) preenchimento perpendicular, classificado como consequência de juntas distensionais;
- b) veios contendo fibras dispostas obliquamente às paredes dos veios ou com geometria sigmoidal, caracterizando juntas de cisalhamento.

resultados

análise do fraturamento - Formação Crato

A coleta de informações na Formação Crato foi realizada essencialmente em minerações na Região de Nova Olinda, CE (fig. 1). As principais estruturas rúpteis identificadas nesta formação foram: fraturas cisalhantes, juntas e veios. De forma menos frequente foram encontradas estruturas de dissolução por pressão (estilólitos). As fraturas extensionais ocorrem com maior frequência e em duas direções principais: NNW e NE (fig. 4). Estas estruturas foram classificadas como juntas (parcialmente cimentadas) e veios, com preenchimento de calcita recristalizada. Os estilólitos foram identificados em planos verticais, posicionados de forma perpendicular ao acamamento das camadas de calcários e ocorrem com direção preferencial N70E (fig. 4). As fraturas cisalhantes foram classificadas neste trabalho como sinsedimentares, com mergulho moderado e agrupadas em sets de rejeito vertical

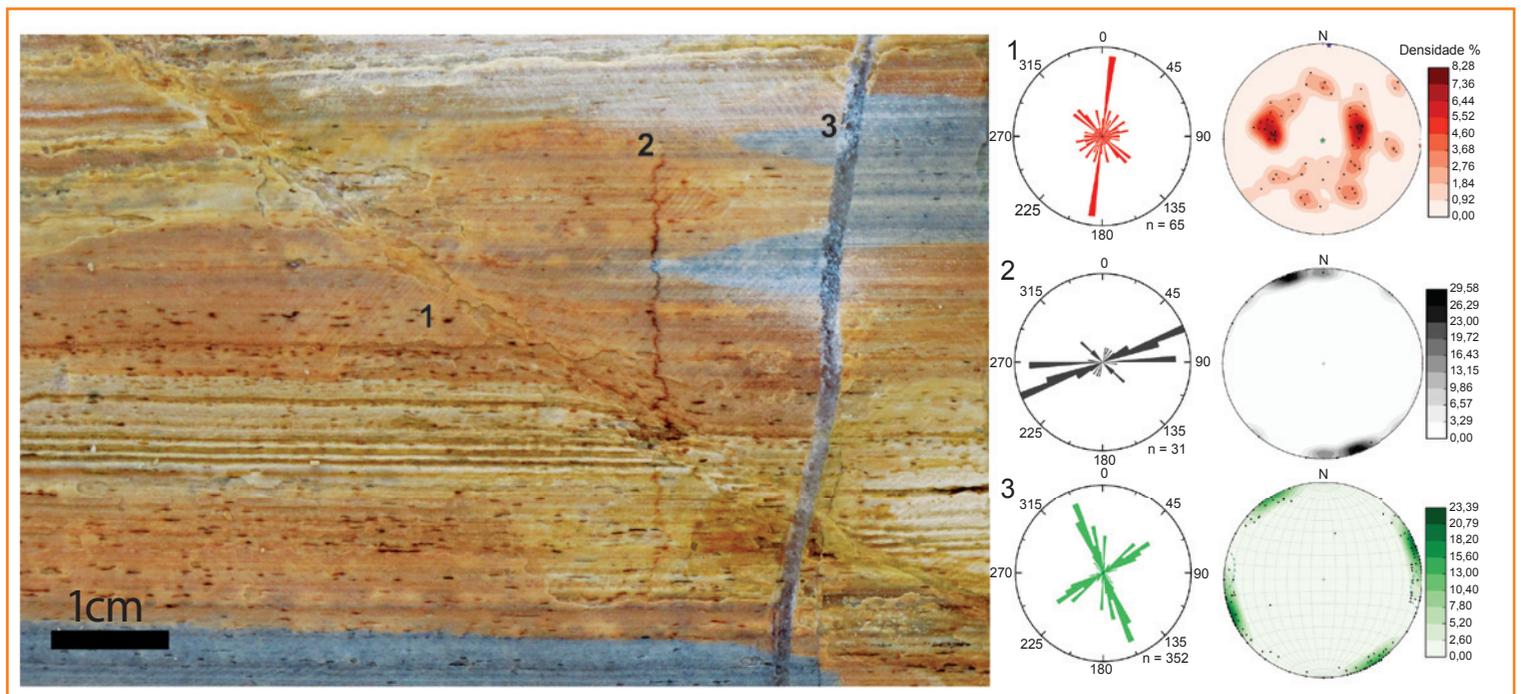
milimétrico a centimétrico (fig. 4). Os sistemas de falhas normais (fraturas cisalhantes), identificados nos calcários laminados, não foram incluídos na modelagem numérica, pois neste trabalho não foram realizadas análises quantitativas dos rejeitos verticais. Nos afloramentos visitados a identificação do rejeito foi dificultada devido à orientação das linhas de leitura e aos pequenos valores de deslocamento. A origem dos estilólitos ainda não está bem definida, porém, segundo Silva (2003), as estruturas compressoriais presentes na Formação Crato teriam sido geradas por pequenos pulsos de sismicidade, contemporâneos à deposição dos calcários. No entanto, evidências sugerem que os estilólitos seriam posteriores à deformação sinsedimentar.

O conjunto de informações levantadas na Formação Crato inclui uma *scanline* levantada em afloramento e uma *scanline* realizada em lâmina petrográfica (*microscanline*), medidas do comportamento das estruturas e painéis fotográficos, executados na Minação Três Irmãos, Nova Olinda, CE.

A *scanline* realizada tem aproximadamente 26m de extensão e azimute 080 (fig. 5a). O posicionamento da linha de leitura foi feito de forma perpendicular à orientação dominante do set de fraturas, que é representado por veios calcíticos com azimute 345 (fig. 5b). Foram medidas 137 fraturas (veios e juntas) ao longo da *scanline*, com aberturas que variaram de 0,05mm a 3,3mm. A partir do processamento dos dados foram obtidos os gráficos de correlação entre

Figura 4
Estilos deformaçõis observados na Formação Crato. 1) falha normal, 55°/350; 2) estilólito (azimute 05), estrutura de dissolução por compressão; 3) veio calcítico (azimute 010), fratura extensional preenchida secundariamente por calcita recristalizada.

Figure 4
Deformation styles found in the Crato Formation. 1) normal fault, 55°/350; 2) stylolite (azimuth 05), pressure-dissolution structure; 3) calcite filled fracture with joints filled by recrystallized calcite (azimuth 010).



a densidade das fraturas (frequência acumulada, F), versus os valores de abertura (b).

A distribuição de fraturas normalmente mostra desvios a partir de uma lei de potência ideal devido às limitações nas escalas de amostragem (subamostragem) das aberturas das fraturas. Estes desvios são artefatos provocados pelas restrições de dimensões e geometria da amostragem, e são denominados truncamento (fraturas de pequena escala) e *censoring* (fraturas de grande escala). Artefatos de truncamento ocorrem devido à dificuldade em observar as pequenas fraturas (0,05mm), mesmo com o auxílio de lupa de bolso. Efeitos de *censoring* são comuns, pois as grandes

estruturas são subamostradas devido ao comprimento limitado das *scanlines*. Visando minimizar o efeito desses artefatos, é preciso realizar uma interpretação do comportamento da curva de correlação obtida (Ortega *et al.*, 2006).

No gráfico produzido em mesoescala, observou-se uma série de abertura de fraturas denominada efetiva, que corresponde ao intervalo $0,175 < b < 2,15$ mm. O índice de correlação desta série apresenta o melhor resultado com aproximadamente 100% de confiabilidade (fig. 5c). Este seria o intervalo da reta de correlação que apresenta maior confiabilidade.

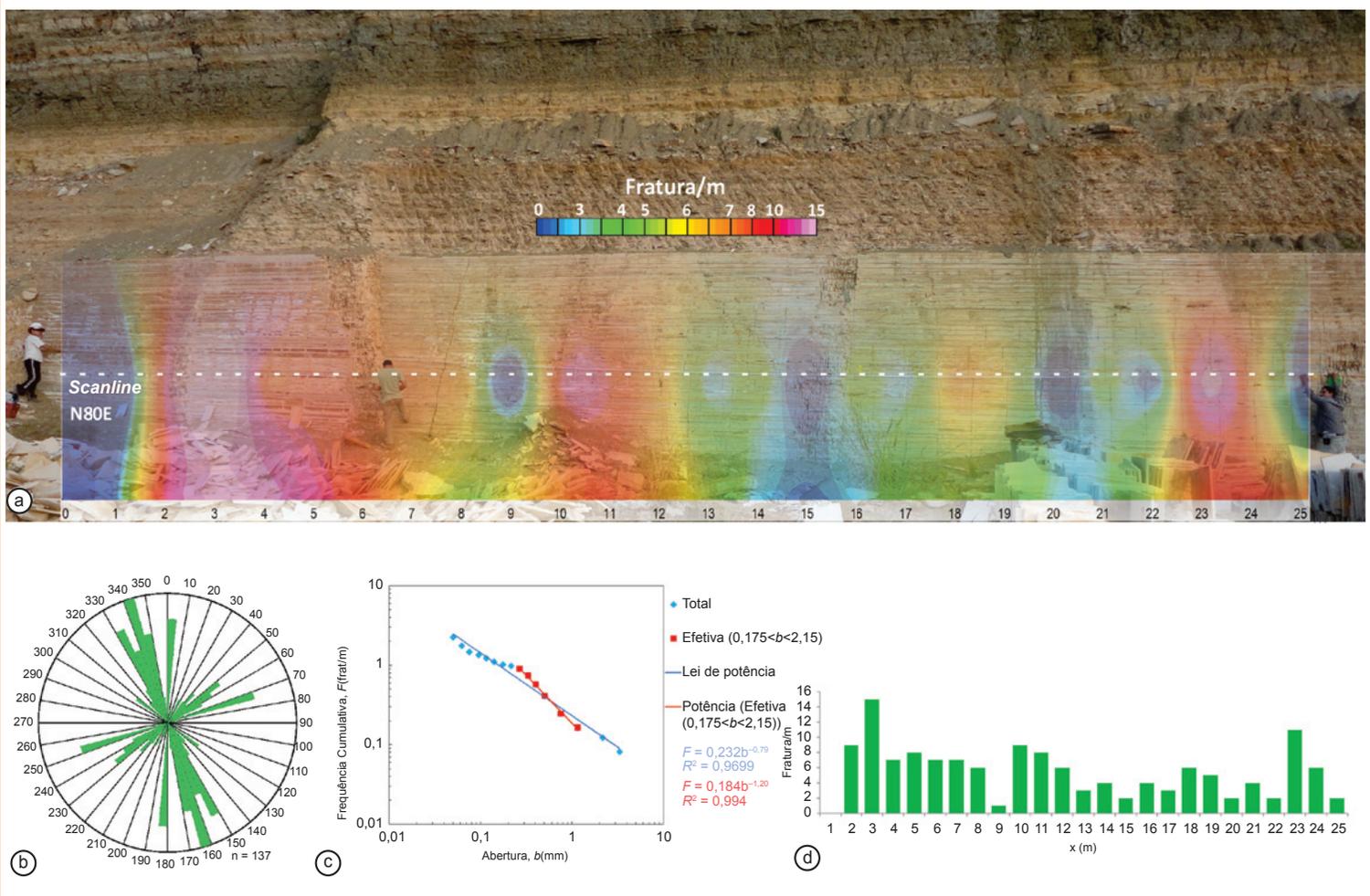


Figura 5 - Scanline realizada nos calcários laminados da Formação Crato (N80E). a) painel com a densidade do fraturamento por metro exibido na forma de zonas interpoladas; b) diagrama de rosetas das fraturas medidas na scanline. A direção principal NNW (N15W); c) gráfico da frequência cumulativa de fraturas (F , fract/m) versus os valores de abertura (b , mm), que apresentam duas séries de abertura: total e efetiva; d) histograma calculado a partir da quantidade de fraturas por metro da scanline.

Figure 5 - Scanline executed in the laminated limestones of the Crato formation (N80E). a) Photographic panel showing the fracture densities per meter along the scanline as interpolated zones; b) rose diagram of the fractures measured on the scanline. The main direction is NNW (N15W); c) graph showing cumulative frequency of fractures (F , fract/m) versus aperture values (b , mm), with two series of fractures: total and effective; d) histogram based on the number of fractures per meter along the scanline.

A análise do gráfico da figura 5c permite as seguintes considerações:

- a abertura máxima das fraturas observada no intervalo de 0,01mm a 10mm foi de 3,3mm;
- a densidade média da abertura das fraturas neste mesmo intervalo foi de 0,08 fraturas/m;
- foi de 2,25 fraturas/m a frequência acumulada das fraturas com as menores aberturas observadas (0,05mm);
- na série efetiva o intervalo $175 < b < 2,15$ possui uma média de 0,5 fraturas/m.

A *microscanline* elaborada em uma seção delgada de amostra de calcário laminado apresenta 67mm de extensão e azimute 080. Foram observadas 23 microfraturas com distribuição acumulada $F(\geq b) = 8,436b^{-0,69}$ e índice de correlação $R^2 = 0,942$ (fig. 6). No painel, composto por várias microfotografias (fig. 6b), é possível observar a matriz, predominantemente micrítica, do calcário laminado e a presença de microfraturas preenchidas por calcita. O aspecto paralelo das camadas sugere deposição em um ambiente de baixa energia. Também são comuns restos de algas e de conchostreços como componentes bioclásticos. A coloração das lâminas varia devido ao teor de matéria orgânica. Algumas lâminas apresentam deformação sinsedimentar e ondulações que sugerem a formação de filmes algálicos. Na imagem obtida por catodoluminescência, a coloração avermelhada possivelmente indica uma matriz calcítica mais rica em Fe. As fraturas verticais mostradas na figura 6b com abertura $>0,1$ mm apresentam a mesma orientação (azimute 345) e estão preenchidas por calcita recristalizada. No entanto, existem zonas com cimento mais recente ao longo do preenchimento, com coloração alaranjada. Na figura 6b ocorre uma fratura horizontal que corta as outras três verticais, e esta se encontra aberta. É possível que este fraturamento horizontalizado seja resultado da descompressão provocada pela exumação dos depósitos, o que gerou juntas de alívio. Esta seria então uma estrutura tardia, não relacionada com os processos diagenéticos mais antigos do soterramento.

A análise das lâminas sugere que algumas fraturas maiores apresentam a formação de preenchimento mais antigo, seguido de um novo pulso de abertura com a formação de novo preenchimento nestas mesmas fraturas (*crack-seal*). Também ocorrem fraturas que mostram o preenchimento dissolvido, possivelmente por processos de meteorização, devido à exposição dos depósitos. Estas informações sugerem que as fraturas

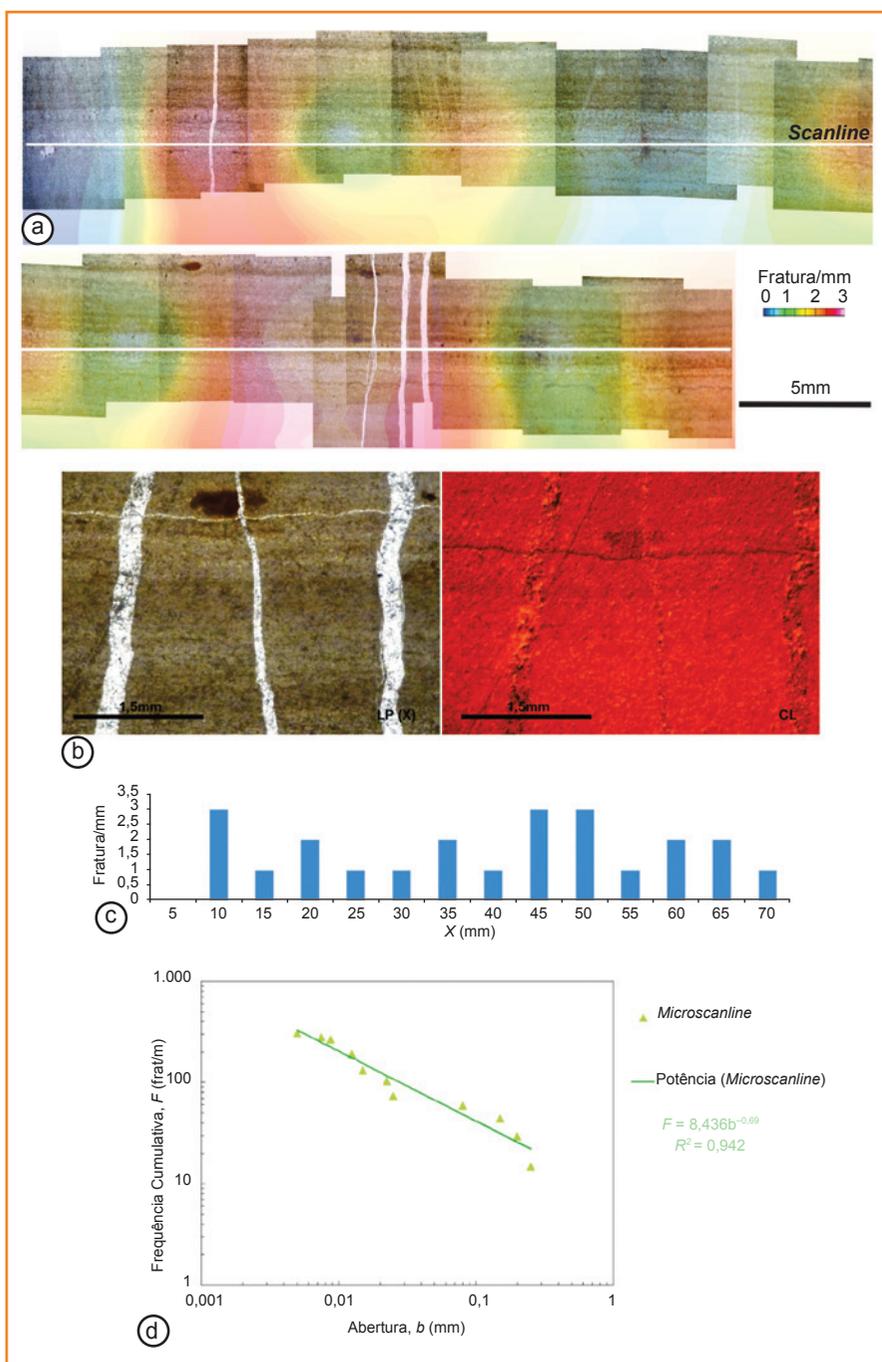


Figura 6 - *Microscanline* realizada em lâmina petrográfica (N80E). a) painel com fotomicrografias (aumento de 4x) utilizado para a execução da *microscanline*. O histograma de densidade de fraturas está sobreposto à figura na forma de zonas interpoladas; b) fotomicrografia em luz polarizada com nicóis cruzados (LP(X)), mostrando as fraturas com abertura maior que 0,1mm e fotomicrografia com catodoluminescência (CL) mostrando o preenchimento das microfraturas; c) gráfico log-log das medidas da *microscanline*; d) histograma da distribuição das microfraturas.

Figure 6 - *Microscanline* performed on a thin section from the laminated (N80E). a) photomicrography mosaic (4x) of the linear microscanline with fracture density through the scanline; b) photomicrography with crossed nicols polarized light (LP(X)) showing the fractures with aperture > 0.1 mm and photomicrography obtained with cathodoluminescence showing the calcitic filling of the microfractures; c) log-log graph of the microscanline data; d) histogram of the distribution of microfractures along the microscanline.

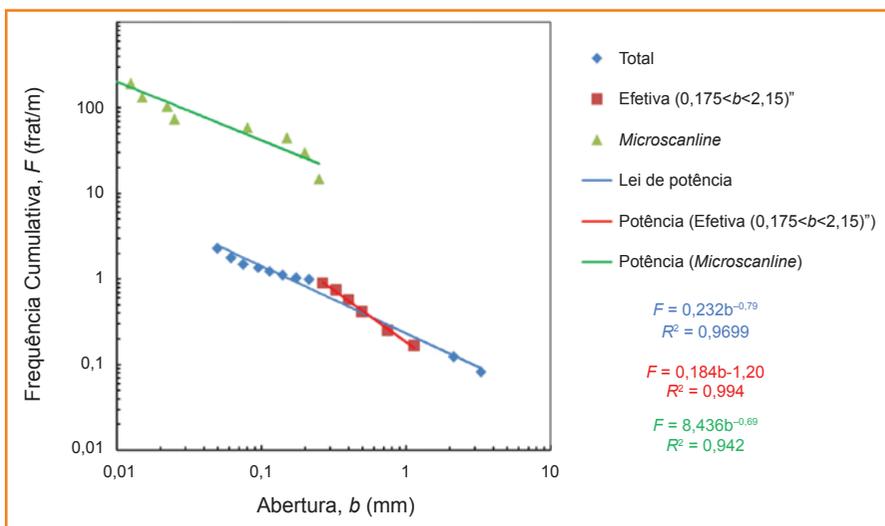


Figura 7
 Comparação das curvas de correlação (frequência-abertura) para os dados de micro e mesoescala.

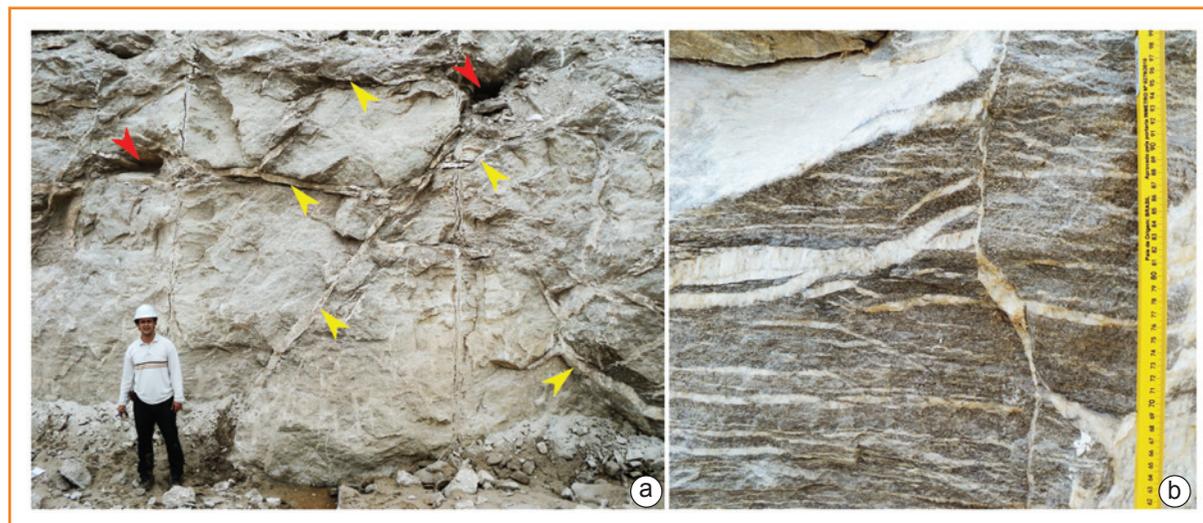
Figure 7
 Comparison of the frequency-aperture correlation curves for the micro and meso scale data.

Figura 8
 Detalhes das estruturas rúpteis presentes na Formação Ipubi: a) vista de afloramento com fraturas de grande abertura (setas amarelas), preenchidas por gipsita fibrosa. As setas vermelhas indicam cavidades produzidas por karstificação, normalmente preenchidas por argila e gipsita fibrosa; b) detalhes da trama de veios, preenchidos por gipsita fibrosa.

Figure 8
 Details of brittle structures present in the Ipubi Formation: a) outcrop view with large fractures (yellow arrows) filled with fibrous gypsum. The red arrows indicates cavities produced by karstification, which are filled with clay minerals and fibrous gypsum; b) details of veins' network filled with fibrous gypsum.

apresentam pelo menos três eventos de evolução, com a formação de cimento mais antigo, possíveis etapas de reabertura e nova precipitação de cimento (*resealing veins*), e dissolução tardia de preenchimento. Estes aspectos da Formação Crato foram abordados por Neumann *et al.* (2008).

A partir da correlação dos dados de *scanline* e *microscanline*, foi possível observar que, ao final da série efetiva ($0,175 < b < 2,15$ mm) identificada na curva de correlação dos valores obtidos com a *scanline*, ocorre o início da distribuição dos pontos de correlação que formam a curva da *microscanline* (fig. 7). Este fato sugere que o efeito de truncamento afetou parte dos dados coletados em afloramento, devido à dificuldade de leitura a olho nu das fraturas de menor abertura. A *microscanline* permitiu verificar o ponto a partir do qual o erro nas leituras de campo é mais expressivo. Outro ponto notável entre as *scanlines* em meso e microescala é o aumento da frequência cumulativa



das fraturas da *microscanline*, provocado pela maior facilidade de identificação das microfraturas com auxílio do microscópio.

análise do fraturamento - Formação Ipubi

O estudo da deformação rúptil da Formação Ipubi foi desenvolvido nas regiões SSW e N da Bacia do Araripe (fig. 1). Na porção SSW, foram visitadas as minas do entorno da cidade de Araripina, PE (minerações Campevi, São Jorge, Rocha Nobre, Serra Suposta e Sombra da Serra). Na região N, foi visitada a Mineração Chaves, que fica localizada na cidade de Nova Olinda, CE. Foram realizadas aproximadamente 25 *scanlines*, sendo dez horizontais, 13 verticais e duas em planta, no plano de acamamento.

As principais estruturas observadas nos evaporitos foram as fraturas extensionais, classificadas como juntas e veios. No entanto, ocorre um grande número de estruturas cujo comportamento é caótico (dobras, falhas reversas), geradas possivelmente por processos atectônicos e diagenéticos, como a hidratação de anidrita (CaSO_4) para gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que produz um efeito de expansão no volume das rochas. Neste trabalho foram analisadas somente as fraturas extensionais, classificadas como veios, que ocorrem preenchidas por gipsita fibrosa associada com argilominerais esverdeados. Nos depósitos evaporíticos foram identificados dois tipos principais de grupos de veios: trama sistemática planar e trama *en echelon* (fig. 8). Foi possível observar também dois *sets* de veios, o primeiro representado por fraturas verticais a subverticais, e o segundo por estruturas sub-horizontais a horizontais. Os veios

sub-horizontais a horizontais ocorrem conectados ortogonalmente com as fraturas extensionais verticais abertas ou parcialmente fechadas (fig. 8). Este padrão condicionou localmente a formação de pequenas cavernas com até 1m de abertura. Localmente, algumas dessas cavidades de maior porte se apresentam total ou parcialmente preenchidas por sedimentos argilosos e gipsita fibrosa (fig. 8).

Uma *scanline* realizada na Mina Sombra da Serra foi escolhida para compor o presente trabalho (fig. 9).

O posicionamento da *scanline* objetivou a varredura do set dominante de fraturas verticais a subverticais, as quais apresentam conexão com a Formação Crato (subjacente), em alguns locais da bacia. A aquisição dos atributos das fraturas na *scanline* apresentada foi limitada a estruturas de abertura maior que 3,5mm, ou seja, macrofraturas (fig. 9).

Nesta região as fraturas verticais a inclinadas, presentes nos afloramentos de gipsita, apresentam direção principal N75W e mergulho variando de

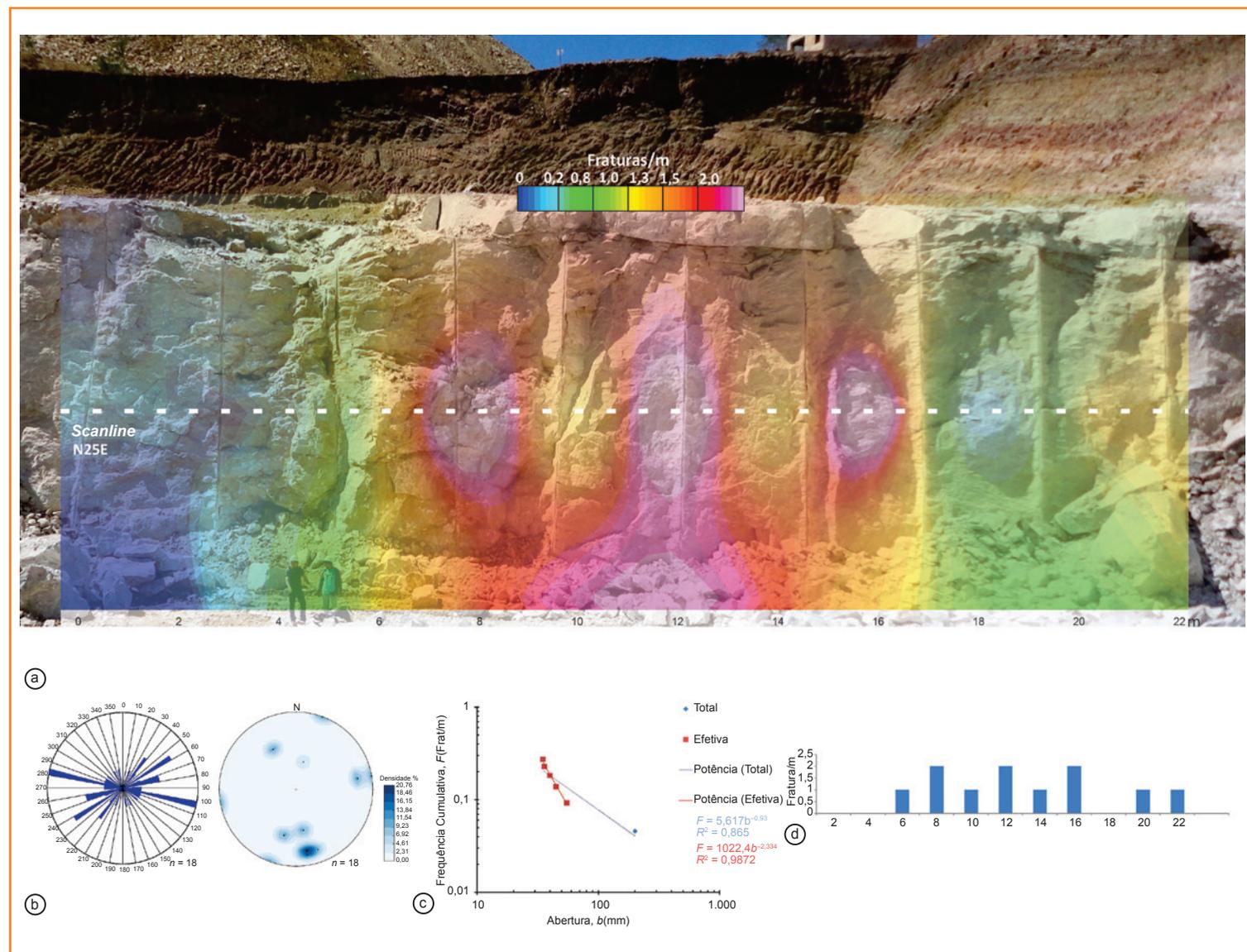


Figura 9 - *Scanline* com direção N25E, realizada em afloramento da Formação Ipupi, Mineração Sombra da Serra. a) painel fotográfico com histograma sobreposto na forma de zonas interpoladas; b) diagrama de rosetas ilustrando a direção principal WNW-ESE do set de fraturas verticais a inclinadas; c) gráfico da frequência x abertura, no qual a série efetiva apresenta correlação de 98%; d) histograma da quantidade de fraturas/m.

Figure 9 - with N25E direction, conducted in outcrops of the Ipupi Formation, Mineração Sombra da Serra. a) Photographic panel with histogram overlaid as interpolated zones; b) rose diagram illustrating the principal WNW-ESE direction of the vertical to inclined fracture set; c) graph frequency x aperture, in which the effective series has a correlation of 98%; d) histogram of quantity of fractures/m.

moderado a alto (45°- 85°) com predominância para nordeste (fig. 9b). Estas estruturas ocorrem como veios preenchidos por gipsita fibrosa, neoformada, associada com argilas de coloração esverdeada ou escura. A *scanline* selecionada para este estudo possui azimute 025 e aproximadamente 22m de extensão. Ao longo da linha de leitura foram medidas 11 fraturas. A partir do processamento dos dados entre a abertura e a frequência das estruturas, foi possível obter uma curva com um índice de correlação de 98%. As seguintes considerações podem ser feitas sobre os resultados obtidos:

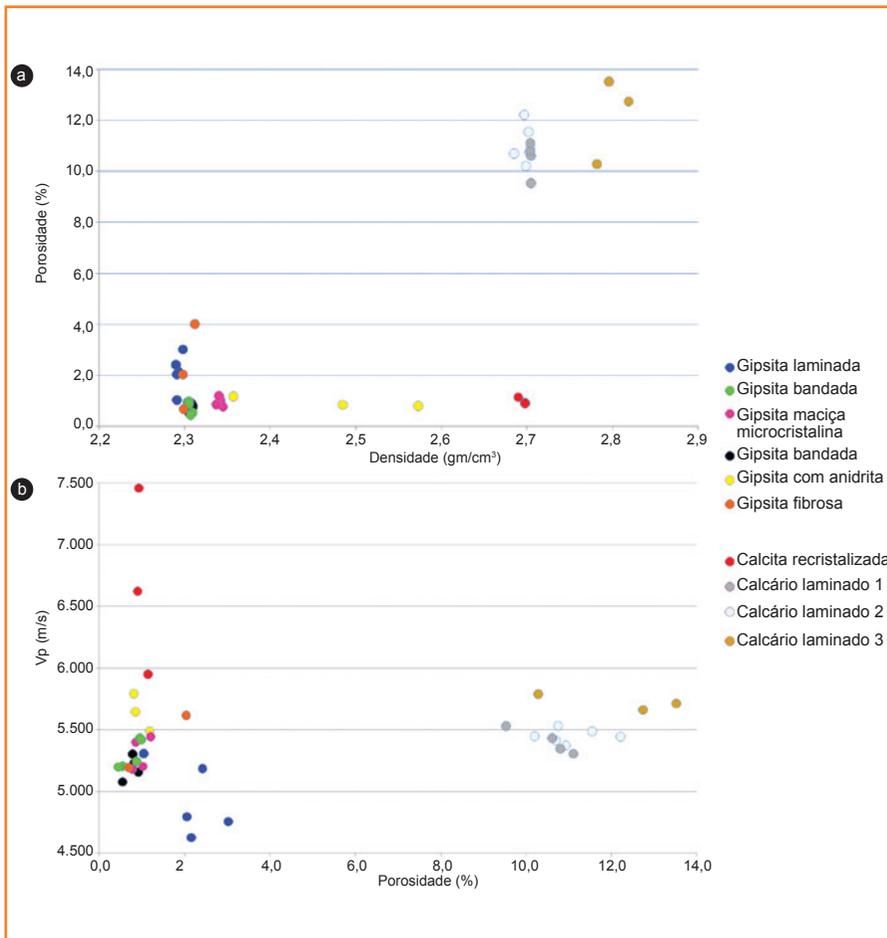
- a) a espessura máxima dos veios observados foi de 200mm;
- b) a densidade de fraturamento neste intervalo foi de 0,045 fratura/m;
- c) 0,159 fratura/m foi a densidade média de fraturas no intervalo total estudado;
- d) 0,273 fratura/m foi a densidade de fraturamento dos veios que apresentaram o menor valor de abertura utilizado como limite (3,5mm) (figs. 9 e 9d).

Figura 10

Gráficos de correlação de algumas propriedades físicas analisadas das rochas estudadas (porosidade, densidade e velocidade de ondas P).

Figure 10

Graph showing correlations among some petrophysical properties of studied rocks (porosity, grain density, P wave velocity).



petrofísica das formações estudadas

Os resultados da análise das propriedades petrofísicas indicam que existe uma relativa uniformidade das propriedades das rochas de ambas as formações estudadas. Os valores de porosidade para as amostras de gipsita ficaram entre menos de 1% a 4%. Os valores de porosidade das amostras de calcário ficaram entre 10% e 14%. As amostras de gipsita apresentaram valores de densidade que variam entre 2,2gm/cm³ e 2,4gm/cm³. As amostras de calcários laminados apresentaram valores de densidade entre 2,7gm/cm³ e 2,9gm/cm³. A gipsita fibrosa, que preenche as fraturas, apresentou densidade em torno de 2,3gm/cm³ e porosidade entre 1% e 4% (fig. 10a). A calcita recristalizada que preenche as fraturas apresentou densidade similar à dos calcários laminados, mas com porosidade em torno de 1% (fig. 10a). Os valores de densidade encontrados nas amostras de gipsita contendo nódulos de anidrita (2,3gm/cm³ a 2,6gm/cm³) revelam a influência deste último mineral no aumento do valor de densidades nestas amostras. A densidade da anidrita pura é de aproximadamente 2,8gm/cm³ (fig. 10a).

A análise das ondas P (*V_p*) mostra que a maioria das amostras de gipsita apresenta velocidades entre 5.000m/s e 5.500m/s. As amostras de gipsita com anidrita e de gipsita fibrosa apresentam velocidades maiores que 5.500m/s (fig. 10b). As amostras de gipsita laminada possuem velocidades mais baixas, entre 4.600m/s e 5.200m/s, e anisotropia mais expressiva, o que é esperado devido ao efeito de orientação das camadas (fig. 10b).

Os calcários laminados apresentaram valores de velocidade entre 5.200m/s e 5.800m/s e baixa anisotropia, com pouca dispersão, mesmo com a variação da porosidade (fig. 10b). As amostras de calcita recristalizada (de preenchimento) apresentaram valores de velocidade entre 6.000m/s e 7.500m/s e anisotropia um pouco mais expressiva do que os calcários (fig. 10b). A tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos, incluindo os módulos elásticos, que formam o conjunto de propriedades físicas que foram inseridos no modelo criado.

discussão

A identificação das séries efetivas de valores de correlação dos parâmetros de fraturamento permitiu

Nº Am	Código Am	Litologia	Densidade grãos (gm/cm³)	Porosidade (%)	Vp (m/s)	Young GPa	Razão Poisson
1	PT_1E_V	Gipsita com Anidrita	2,5730	0,8100	5.793	59,13	0,324
2	PT_1E_H1	Gipsita com Anidrita	2,3570	1,1840	5.489	50,54	0,311
3	PT_1E_H2	Gipsita com Anidrita	2,4850	0,8540	5.646	53,13	0,329
4	CP_02_V1	Gipsita bandada	2,3050	0,5440	5.077	38,91	0,337
5	CP_02_V2	Gipsita bandada	2,3080	0,9160	5.156	39,3	0,342
6	CP_02_H1	Gipsita bandada	2,3100	0,7860	5.303	41,5	0,342
7	CP_02_H2	Gipsita bandada	2,3090	0,8100	5.230	40,51	0,341
8	PT_9F_V1	Calcário laminado	2,6970	12,2110	5.443	52,52	0,297
9	PT_9F_V2	Calcário laminado	2,7020	11,5440	5.487	53,8	0,298
10	PT_9F_H1	Calcário laminado	2,6990	10,2000	5.447	55,81	0,283
11	PT_9F_H2	Calcário laminado	2,7030	10,7510	5.532	55,66	0,295
12	PT_9F_H3	Calcário laminado	2,7040	10,9330	5.373	53,63	0,286
13	PT_9F_H4	Calcário laminado	2,6850	10,6960	5.413	53,91	0,288
14	PT_9A_V1	Calcário laminado	2,7050	10,6090	5.431	54,36	0,29
15	PT_9A_V2	Calcário laminado	2,7040	10,8070	5.345	53,36	0,284
16	PT_9A_H1	Calcário laminado	2,7050	9,5340	5.529	56,22	0,296
17	PT_9A_H2	Calcário laminado	2,7040	11,1100	5.304	51,7	0,289
18	PT_10B_V1	Gipsita maciça microcrist	2,3420	1,0240	5.202	40,85	0,399
19	PT_10B_V2	Gipsita maciça microcrist	2,3450	0,7760	5.180	40,26	0,342
20	PT_10B_H1	Gipsita maciça microcrist	2,3370	0,8580	5.398	45,87	0,328
21	PT_10B_H2	Gipsita maciça microcrist	2,3400	1,2060	5.444	48,83	0,314
22	PT_6B_V1	Gipsita bandada	2,3030	0,9520	5.432	45,42	0,33
23	PT_6B_V2	Gipsita bandada	2,3050	0,9830	5.419	44,39	0,335
24	PT_6B_H1	Gipsita bandada	2,3090	0,5490	5.204	41,28	0,334
25	PT_6B_H2	Gipsita bandada	2,3070	0,4470	5.198	41,43	0,333
26	PT_6B_H3	Gipsita bandada	2,3050	0,8760	5.243	43,24	0,324
27	PT_6D_V1	Gipsita laminada	2,2930	2,1550	4.626	34,28	0,313
28	PT_6D_V2	Gipsita laminada	2,2910	2,0530	4.795	35,09	0,328
29	PT_6D_H1	Gipsita laminada	2,2900	2,4200	5.186	43,25	0,311
30	PT_6D_H2	Gipsita laminada	2,2980	3,0220	4.755	36,64	0,307
31	PT_6D_H3	Gipsita laminada	2,2910	1,0450	5.306	40,88	0,344
32	PT_1B_H	Gipsita fibrosa (preench)	2,2990	0,6870	5.195	37,06	0,358
33	PT_1B_V1	Gipsita fibrosa (preench)	2,2980	2,0380	5.617	43,43	0,354
34	PT_1B_V2	Gipsita fibrosa (preench)	2,3120	4,0190			
35	PT11_V	Calcário laminado	2,7820	10,2830	5.789	65,58	0,279
36	PT11_H1	Calcário laminado	2,8190	12,7410	5.661	62,74	0,272
37	PT11_H2	Calcário laminado	2,7960	13,5190	5.713	62,33	0,276
38	N02_H	Calcita recristalizada (preench)	2,6980	0,9270	7.458	94,71	0,345
39	N02_V1	Calcita recristalizada (preench)	2,6900	1,1470	5.949	73,33	0,282
40	N02_V2	Calcita recristalizada (preench)	2,6980	0,9030	6.622	79,14	0,33

Tabela 1

Valores das propriedades físicas medidas nas amostras. A orientação das leituras das propriedades varia para a observação do efeito de anisotropia v = leitura vertical: h = leitura horizontal.

Table 1

Values of physical properties measured in the samples. The orientation of properties measuring varies according to the observed anisotropic effect v= vertical: h=horizontal.

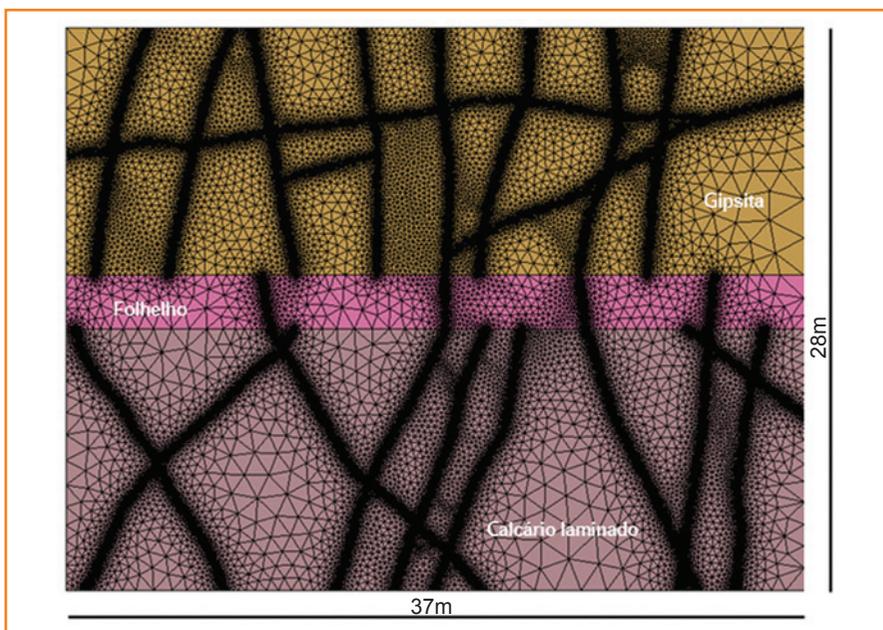


Figura 11 - Modelo em malha de elementos finitos elaborado com base em painéis fotográficos dos afloramentos estudados. As estruturas maiores foram discretizadas devido a sua importância. Os dados de meso e microfraturas foram incorporados ao sistema de equações que resolve o problema acoplado hidromecânico, na forma de um fator de porosidade (obtido a partir do tratamento estatístico dos dados de *scanline*) na matriz rochosa.

Figure 11 - Finite element model created with the information provided by photographic panels of studied outcrops. The large structures were discretized by virtue of their importance. The meso and microfractures data were incorporated into the equations system that solves the coupled hydro-mechanical problem as a factor of porosity (obtained from the statistical treatment of scanline data) in the rock matrix.

a obtenção de um conjunto de valores que foi utilizado para a determinação de um fator equivalente de porosidade e permeabilidade que é aplicado na matriz do modelo computacional. Estes dados foram aplicados ao meio poroso, considerando este como um único material, cujas propriedades de porosidade e permeabilidade são definidas por uma combinação dos dados de porosidade da matriz e dos parâmetros do fraturamento de micro e mesoescala (porosidade equivalente). Estas propriedades agora são definidas em termos do seu valor medido em laboratório, penalizado pelo fator fornecido pelos dados de *scanlines*. Este processo permite incorporar ao modelo uma grande quantidade de fraturas que não podem ser discretizadas no modelo de malha (meso e micro), assimilando essas fraturas como uma matriz permoporosa contínua equivalente. De forma geral, apenas as estruturas de maior porte costumam ser discretizadas ou embebidas no modelo de malha. Estas estruturas precisam ser delineadas porque o seu comportamento não obedece ao padrão de lei de potência, como no caso do fraturamento menor

(Hardacre e Cowie, 2003), sendo mais bem definido através de uma distribuição exponencial. Além disso, as estruturas maiores podem atuar como corredores de fluxo ou barreiras. Estas, também representam heterogeneidades mecânicas importantes, por isto sua geometria, natureza de preenchimento e abertura precisam ser discretizadas. No entanto, com a metodologia descrita será possível verificar a resposta de fluxo de fluidos para o mesmo problema físico, empregando algumas variações do mesmo modelo: modelos de dupla porosidade; modelos com meio contínuo equivalente com propriedades obtidas via modelagem multiescala; e simulações considerando técnicas de fragmentação de malha com elementos de interface representando as meso e macrofraturas.

É importante ressaltar que, no caso estudado, ambas as formações não apresentam variações faciológicas, sedimentológicas, nem petrofísicas importantes. Possivelmente, a metodologia apresentada não poderia ser aplicada a formações geológicas que apresentassem variações expressivas destes aspectos, como no caso de formações siliciclásticas.

A integração dos dados se mostrou razoavelmente satisfatória para a criação de modelos 2D bidimensionais para a realização de simulações de eventos hipotéticos como a perfuração de poços e simulação de fluxo, com acoplamento geomecânico e geoquímico (fig. 11).

O modelo computacional finalizado (fig. 11) construído a partir da criação automatizada da malha de elementos finitos contém parâmetros diferentes de porosidade e permeabilidade para a matriz rochosa e para as grandes fraturas que foram discretizadas. O modelo também incorpora as propriedades mecânicas do preenchimento dessas fraturas discretizadas. Isto é importante para que se possa estabelecer de forma mais segura o comportamento mecânico dessas estruturas quando a formação sofre alterações do seu estado de tensões em função de variações nos campos de pressão e de saturação (eventos de reativação, por exemplo).

conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para a construção de modelos geológicos/geomecânicos baseados em corpos de rocha, tratados como

análogos naturalmente fraturados. A classificação da heterogeneidade geológico-estrutural foi executada com o auxílio da técnica de *scanline*, nas formações estudadas: Crato e Ipubi. A aplicação da técnica forneceu atributos dos *sets* de fraturas, desde a escala micrométrica à escala de afloramentos. As fraturas extensionais nos calcários laminados foram classificadas como veios e juntas em dois *sets* principais: NNW e NE. Na Formação Ipubi as principais estruturas rúpteis foram classificadas como veios verticais a subverticais com direção principal WNW. O processamento dos dados de *scanline* permitiu identificar o comportamento dos parâmetros de distribuição do fraturamento e permitiu também a determinação de séries de correlação de frequência e abertura das fraturas dentro de limites confiáveis, para sua utilização na criação de um fator equivalente que foi aplicado na simulação dessa matriz fraturada. A partir de painéis fotográficos, foi desenvolvido um sistema de criação de modelos vetoriais em CAD, e, através de rotinas em *Matlab* e em linguagem LISP, foi possível automatizar a geração dos modelos em malhas de elementos finitos. Os atributos estruturais das formações estudadas (direções principais, frequência das estruturas em diversas escalas, padrão de preenchimento) foram obtidos e incorporados aos modelos finais representados por seções 2D. As propriedades petrofísicas (porosidade, densidade de grãos, densidade total e velocidades das ondas elásticas) da matriz rochosa e dos materiais de preenchimento das estruturas foram obtidas em laboratório e também incorporadas ao modelo geomecânico. A partir da integração dos dados foi possível considerar a matriz fraturada (meso e microfraturas) como um meio contínuo com um fator de porosidade e permeabilidade isotrópico. O modelo final representa um arquivo que pode ser diretamente utilizado para a execução de simulações numéricas no *software in house* Code_Bright.

A metodologia apresentou resultado satisfatório porque permitiu a execução de modelos geológicos/geomecânicos de baixo custo, e em menor tempo, a partir dos dados de campo e de laboratório. No entanto, esta metodologia possivelmente só é aplicável a formações rochosas cuja variação de aspectos como a faciologia e a geometria das heterogeneidades não seja expressiva. Ainda é necessário o aprofundamento dos testes com os modelos gerados, em especial a execução de testes de comparação dos resultados com modelos determinísticos. Além disso, ainda é necessário concluir a implementação da modelagem

numérica, que deverá utilizar também a análise de incerteza dos parâmetros do fraturamento, obtidos com a técnica de *scanlines*, empregados na criação da matriz do modelo.

agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Petrobras, que financiou esta pesquisa através da sua Rede Temática de pesquisa para Caracterização e Modelagem de Reservatórios (Carmod), a partir do convênio nº 0050.0071789.11.9 entre a Petrobras e a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco (Petrobras/FADE/UFPE). Ao Laboratório de Geologia Sedimentar do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (Lagese/DGEO/UFPE) e ao Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (LMCG/Deciv/UFPE), pelo estímulo e apoio no desenvolvimento da pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEOC/UFPE) e ao Centro de Tecnologia e Geociências do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (DGEO/CTG/UFPE). Ao professor Agnelo Soares, coordenador do Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pelo apoio na realização das análises e discussões pertinentes. Aos alunos bolsistas do Projeto Turing, pelas valiosas contribuições no campo e no laboratório. Ao geólogo Bruno Melo de Carvalho, do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes), da Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento em Geociências e da Gerência de Geologia Estrutural e Geotectônica (Cenpes/PDGEO/Geotec), pelas discussões durante as etapas de campo. À comissão editorial deste periódico, pelos comentários e sugestões que enriqueceram o texto final.

referências bibliográficas

ALMEIDA, C. **Análise da deformação pós-rifte na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil.** 2010. 108 f.

- Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 371-389, maio/nov. 2007.
- BJORLYKKE, K. **Petroleum Geoscience**: from sedimentary environments to rock physics. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2010. 508 p.
- BOURBIAUX, B. Fractured reservoir simulation: a challenging and rewarding issue. **Oil & Gas Science and Technology**: revue de l'Institut Français du Pétrole, France, v. 65, n. 2, p. 227-238, Mar./Apr. 2010.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.). **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2000. p. 151-182. Trabalho apresentado no 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, 2000.
- FRANÇOLIN, J. B. L.; COBBOLD, P. R.; SZATMARI, P. Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe Basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. **Journal of Structural Geology**, United Kingdom, v. 16, n. 5, p. 647-661, May 1994.
- GLUYAS, J.; SWARBRICK, R. **Petroleum Geoscience**. 3th ed. Oxford: Blackwell, 2006. 349 p.
- GUERRIERO, V.; IANNACE, A.; MAZZOLI, S.; PARENTE M.; VITALE, S.; GIORGIONI, M. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues: implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks. **Journal of Structural Geology**, United Kingdom, v. 32, n. 9, p. 1271-1278, Sept. 2010.
- HARDACRE, K. M.; COWIE, P. A. Variability in fault size scaling due to rock strength heterogeneity: a finite element investigation. **Journal of Structural Geology**, United Kingdom, v. 25, n. 10, p. 1735-1750, Oct. 2003.
- LAUBACH, S. E. A method to detect natural fracture strike in sandstones. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 81, n. 4, p. 604-623, Apr. 1997.
- MARRETT, R. Aggregate properties of fracture populations. **Journal of Structural Geology**, United Kingdom, v. 18, n. 2, p. 169-178, Feb. 1996.
- MARRETT, R.; ORTEGA, O.; KELSEY, C. Extent of power law scaling for natural fractures in rock. **Geology**, Boulder, v. 27, n. 9, p. 799-802, Sept. 1999.
- MARRETT, R.; LAUBACH, S. E.; OLSON, J. E. Anisotropy and beyond: geologic perspectives on geophysical prospecting for natural fractures. **The Leading Edge**, Tulsa, v. 26, n. 9, p. 1106-1111, Sept. 2007.
- MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, Washington, v. 11, n. 4, p. 776-791, Aug. 1992.
- MATOS, R. M. D. History of the Northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: CAMERON, N. R.; BATE, R. H.; CLURE, V. S. **The oil and gas habitats of the South Atlantic**. London: The Geological Society, 1999. p. 55-73. (Geological Society. Special Publication, 153).
- MIRANDA, T. S.; MAGALHÃES, J. R.; BARBOSA, J. A. Bacia do Araripe: possível Sistema Pull-Apart? In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2012.
- NEUMANN, V. H. M. L.; CABRERA, L. Una nueva propuesta estratigráfica para la tectonosecuencia post-rifte de la cuenca de Araripe, Noreste de Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5., 1999, Serra Negra. **Anais...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 279-285.
- NEUMANN, V. H. M. L. **Estratigrafía, sedimentología, geoquímica y diagénesis de los sistemas lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)**. 1999. 244 f. Tesis (Doctorado) – Universidad de Barcelona, Barcelona, 1999.
- NEUMANN, V. H. M. L.; GALE, J.; REED, R. M.; BARBOSA, J. A. Padrão de fraturamento nos calcários laminados aptianos da região de Nova Olinda-Santana do Cariri, Bacia do Araripe: uma aplicação da técnica de escalas. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 18, n. 2, p. 101-115, 2008.

ORTEGA, O.; MARRETT, R. Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v. 22, n. 5, p. 571-588, May 2000.

ORTEGA, O. J.; MARRETT, R. A.; LAUBACH, S. E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 90, n. 2, p. 193-208, Feb. 2006.

PONTE, F. C.; APPI, C. J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG, 1990. p. 211-226.

PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. **Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe**. Recife: DNPM, 1996. 68 p.

ROBINSON, A.; GRIFFITHS, P.; PRICE, S.; HEGRE, J.; MUGGERIDGE, A. **The future of geological modelling in hydrocarbon developments**. London: The Geological Society, 2008. 226 p. (Geological Society. Special publication, 309).

ROHRBAUGH, J. R.; M. B.; DUNNE, W. M., MAULDON, M. Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 86, n. 12, p. 2089-2104, Dec. 2002.

SILVA, M. A. **The Araripe Basin, Northeastern Brazil**: regional geology and facies analysis of a Lower Cretaceous evaporitic depositional complex. 1983. 290 f. Thesis (PhD) – Columbia University, New York, 1983.

SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H. M. L. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe. In: WORKSHOP PRH-ANP/MCT DOS PROGRAMAS DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS PARA O SETOR DE PETRÓLEO E GÁS DA UFPE, 2., 2002, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2002. p. 15-18.

SILVA, A. L. **Estratigrafia física e deformação do sistema lacustre carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe em afloramento selecionados**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVA, A. L.; NEUMANN, V. H. M. L.; CABRERA, L. Fácies carbonáticas laminadas da Formação Crato (Aptiano), Bacia do Araripe: Litofácies, Microfácies e Microestruturas. In: CASTRO, J. C. (Ed.). **Boletim do 6º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil**: 2º Simpósio sobre el Cretácico de América del Sur. Rio Claro: UNESP, 2002. p. 31-36.

THOMAS, L. K.; DIXON, T. N.; PIERSON, R. G. Fractured reservoir simulation. **Society of Petroleum Engineers Journal**, Richardson, p. 42-54, Feb. 1983.

bibliografia

ANGELIER, J.; MECHLER, P. Sur une methode graphique de recherché dès contraintes principales egalment utilisable en tectonique et sen seismologie: la methode des diedres droits. **Bulletin de La Société Géologique de France**, France, v. 19, n. 7, p. 1309-1318, 1977.

BEUTNER, E. C.; DIEGEL, F. A. Determination of fold kinematics from syntectonic fibers in pressure shadows, Martinsburg slate, New Jersey. **American Journal of Science**, New Haven, v. 285, n. 1, p. 16-50, Jan. 1985.

CLADOUHOS, T. E.; MARRETT, R. Are fault growth linkage models consistent with power law distribution of fault lengths? **Journal of Structural Geology**, Oxford, v. 18, n. 2-3, p. 281-293, Feb./Mar. 1996.

ELLIS, M. A. The determination of progressive deformation histories from antitaxial syntectonic crystal fibers. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v. 8, n. 6, p. 701-709, 1986.

OLIVELLA, S.; CARRERA, J.; GENS, A.; ALONSO, E. E. Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. **Transport in Porous Media**, Boston, v. 15, n. 3, p. 271-293, June 1994.

webgrafia

MATHWORKS. MATLAB and Simulink for Technical Computing. **MATLAB Central**. Disponível em: <www.mathworks.com>. Acesso em: 10 jan. 2010.

expanded abstract

This article presents a methodology to build simplified geological-geomechanical models of naturally fractured rocks in systems where the complexity in terms of depositional and structural geometry and faciology are not expressive. The methodology is based on automatic creation of numeric-computational models in finite element meshes.

As field analogues, two geological formations from the Late Aptian-Albian, post-rift sedimentary succession of the Araripe Basin were used. They represented laminated limestones from Crato Formation, and evaporites, gypsum and anhydrite, from the Ipubi Formation. These sedimentary deposits were chosen due their low complexity in terms of geometry, lithology and faciology.

The motivation for this research was caused by the fact that the rocks which have their permo-porous network dependent on a natural fracturing system normally presents structures which could be discretized in computational models, as well as large fault zones and fractures with large apertures. However, the abundant number of fractures in meso and micro-scale, which often shows a very regular pattern, cannot be discretized in the models due the continuum medium approach adopted for the large structures. The discretization of such small fractures would create meshes with great concentration of elements within such structures, leading to prohibitive computational costs, especially in the case of simulation of coupled problems - hydro-thermal-chemical-mechanical. The main objective of this methodology was to use multiscale and homogenization techniques to transform the permo-porous medium related to the meso and microscale fractures into an isotropic equivalent matrix factor, using the obtained scanline data. The process of the bidimensional geological-geomechanical model construction was established through the follow stages: study of structures in the field (faults, fractures and veins); obtaining of fracturing systems parameters through the execution of scanlines in outcrops and thin sections; construction of vectorial models in CAD environment; importing of vectorial model and automatic generation of the finite element mesh model using a routine in LISP code, and an algorithm of data integration and mesh generation developed in Matlab code.

The scanline technique constitutes a fracture system characterization approach based on the statistical

processing of data obtained through the scanning/measuring of structures along randomly positioned survey lines (scanlines). In addition to the scanline surveys, photo-panels of outcrops were produced to delineate the geometries of sedimentary bodies and the pattern of the large fractures. The sedimentary facies were studied including the analysis of thin sections through polarized light and cathodoluminescence. Some diagenetic aspects were considered in order to take into account the nature of the materials, which fill the microfractures. Furthermore, laboratory analyses of rock samples were performed to determine some elastodynamic properties (porosity, grain density, P wave velocity, young's module, Poisson's ratio).

The results of scanlines provided a set of graphics with the ratio of fractures frequency to aperture values. Also, histograms of the fractures' density per meter, for both formations, were obtained, but in the case of the evaporites a more chaotic distribution was observed, by virtue of the fact that deformation structures were caused by tectonic and atectonic phenomena. The application of the scanline method to analyse fracturing in evaporites is original, and this is important because fractures represent a common aspect of such rocks that act like mechanical-chemical weaknesses, and mechanical heterogeneities.

The investigation found that at least three sets of brittle structures affected the laminated carbonate. The main structures observed in the Crato Formation were extension fractures (joints and veins) and synsedimentary shear fractures. Some vertical stylolites were also observed in the limestone, and they are probably associated with the shear fractures. The main material filling the fractures in the limestones was characterized as recrystallized calcite. The fractures in the gypsum rocks were mainly caused by atectonic deformation, and some were partly affected by the karstification process, which started during the deposition of overlying Romualdo Formation, and continued by the late circulation of fluids through fractures. In the Ipubi Formation this study was limited on [to?] main brittle fractures, which were classified as vertical to subvertical veins. Such fractures are filled by fibrous gypsum and clay minerals. It is believed that part of the gypsum was primary anhydrite, which was converted into gypsum, causing some deformation of the strata due to the resulting expansion.

One scanline was performed in a thin section of laminated limestone, which provided interesting data for integration with the outcrops results. It was

clearly observed that some artifacts generated by the measuring of very small fractures could be avoided by the integration of the results of the scanline made in the thin section.

The CAD drawings were created with the help of the photographic panels, and bidimensional sections were provided in vectorial format. In such models, the large fractures were treated as a discretized continuum medium, and the physical properties of their filling material as considered. The finite element models were generated, and all the data were incorporated in this model, including: petrophysical properties, obtained from lab tests; hydro-chemical-mechanic constitutive law parameters; and the initial boundary conditions. The data obtained from the scanlines for the fracturing systems were used to create an equivalent isotropic factor for the rock matrix in the model. This process involved the utilization of homogenization techniques and a multi-scale approach to convert the set of meso and microscale from the data obtained through the

scanlines into an equivalent porosity factor. The final product are files which contain all the physical and geometrical parameters, and which can be directly used as the data set input to the software Code_Bright (COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport), to perform coupled numerical simulations (hydro-mechanical and hydro-chemical) for hypothetical cases.

The applied methodology has yielded good results, and helped to build some models using the proposed multi-scale technique to create an equivalent porosity factor for the non-discretized small fracturing system, which composed the model together with the main geometries and the large fractures. The benefits of applying such methodology are: low cost, reduced amount of data processing, and reduced model rendering time. We expect to proceed with comparisons between the results obtained with our models against results from deterministic models, which will assist in the further refinement of the methodology.

autores



Tiago Siqueira de Miranda
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências

tiagomiranda@oi.com.br

Tiago Siqueira de Miranda possui graduação em Geologia (2008) e mestrado em Geociências (Geofísica), em 2011, ambos pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Está cursando doutorado em Geologia Sedimentar pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFPE, com pesquisa na Caracterização de Sistemas de Fraturas Naturais aplicada à Modelagem Geológica de Reservatórios Análogos de Hidrocarbonetos, na Bacia do Araripe. Integra o Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagese) e tem experiência na área de Geologia Estrutural, com ênfase em Reservatórios Naturalmente Fraturados, atuando principalmente nos seguintes temas: Análise Tectônica de Bacias Sedimentares e Geofísica (métodos potenciais).



José Antônio Barbosa
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Geologia

jose.antonio@ufpe.br

José Antônio Barbosa possui bacharelado em Geografia (2001), mestrado (2004) e doutorado (2007) em Geociências (Geologia Sedimentar), todos pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Ambas as bolsas de pós-graduação foram financiadas pelo Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH), da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Foi pesquisador visitante do PRH-26/ANP/UFPE entre 2007 e 2010. É professor adjunto do Departamento de Geologia da UFPE. Integra o Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagese) e desenvolve pesquisas nas áreas de Estratigrafia, Sismoestratigrafia e Análise de bacias sedimentares e Petrografia de Carbonatos.



Igor Fernandes Gomes
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Civil

gomes@ufpe.br

Igor Fernandes Gomes possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em 2003, mestrado (2006) e doutorado (2009) em Engenharia Civil, (Geotecnia), pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Foi professor adjunto do curso de Engenharia Civil da UFPE no período de 2010 a 2012. É professor do Departamento de Engenharia Civil da UFPE. Integra o Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG) e tem experiência na área de Engenharia Geotécnica e de Petróleo, com ênfase em Modelagem Computacional considerando acoplamento termo-hidromecânico e químico, empregando o método dos elementos finitos. Entre os principais tipos de estudo em que trabalha destacam-se: geomecânica de reservatórios, considerando problemas de reativação de falhas geológicas, meios naturalmente fraturados, compactação e subsidência, *creep* em rochas salinas etc.; fluxo multifásico em meios porosos para problemas de reservatórios de petróleo e de armazenamento de CO₂; integração de dados de modelagem geológica com a modelagem numérica; estudos de problemas geotécnicos, como pavimentos, barragens, escavação de túneis em solos e rochas, contaminação de aquíferos, geração e transporte de biogás em aterros de RSU etc. Coordena um projeto de pesquisa da Rede Temática de Caracterização e Modelagem de Reservatórios, da Petrobras, que consiste no estudo integrado Geologia-Engenharia da Modelagem Geológica e Numérica de Afloramentos das formações Crato (CE) e Ipubi (PE).



**Virgínio Henrique de Miranda
Lopes Neumann**
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Geologia

neumann@ufpe.br

Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann é bacharel em Geologia e Mestre pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), obteve o título de Doutor em Análise de Bacias Sedimentares pela Universidade de Barcelona e pós-doutorado em estudos de Diagênese Estrutural em Fraturas no Bureau de Geologia Econômica da Universidade do Texas, em Austin, EUA. Desde 1992 é docente no Departamento de Geologia da UFPE. É membro atuante das seguintes associações: American Association of Petroleum Geologists (AAPG), International Association of Sedimentologists (IAS), Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (Abequa), Associação Brasileira de Petróleo e Gás (ABPG), Associação Brasileira de Geólogos de Petróleo (ABGP) e Sociedade Brasileira de Geologia (SBG). Desenvolve projetos relacionados a Sequências Carbonáticas das bacias do Araripe e Jatobá, aplicados na caracterização de reservatórios análogos de hidrocarbonetos e sistemas de fraturas na Bacia do Araripe e nos carbonatos da Bacia da Paraíba. Principais áreas de atuação: Sedimentologia de Carbonatos e Geomorfologia.



Rafael Fernandes Vieira Correia Santos
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Civil

rafaelfvcs@hotmail.com

Rafael Fernandes Vieira Correia Santos obteve graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2009 e concluiu o mestrado em Engenharia Civil, também na UFPE, na área de Engenharia de Petróleo (2012). É estudante do programa de doutorado em Engenharia Civil da UFPE e integra o Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG). Tem experiência na área de Engenharia de Petróleo com ênfase em Modelagem Computacional empregando o método dos elementos finitos aplicados à caracterização e simulação de reservatórios análogos.



Gabriel Corrêa de Matos
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências
Gerência de Geologia Estrutural e Geotectônica

gabriel.matos@petrobras.com.br

Gabriel Corrêa de Matos graduou-se em Geologia em 2006 e concluiu mestrado em Geologia Estrutural e Microtectônica em 2008, ambos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Em 2007 ingressou na Petrobras, e adquiriu especialização em Análise de Bacias Sedimentares pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), em 2008. Integra o grupo de Diagênese Estrutural e Análise de Deformação em Rocha. Tem realizado pesquisa aplicada à análise estrutural e modelagem de reservatórios naturalmente fraturados e se dedicado à estratigrafia mecânica como método para elaboração de modelos preditivos de intensidade de fraturamento.



**Leonardo José do Nascimento
Guimarães**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Civil

leonardo@ufpe.br

Leonardo José do Nascimento Guimarães possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1994, mestrado em Engenharia Civil pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ) em 1996 e doutorado em Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos pela Univeritat Politecnica de Catalunya (2002). É professor adjunto da UFPE. Tem experiência nas áreas de Engenharia Geotécnica e de Petróleo. Coordena o Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG), que desde 2003 desenvolve projetos de pesquisa no âmbito de: Geomecânica de Reservatórios de Petróleo: Subsidência e Reativação de Falhas Geológicas; Armazenamento de CO₂ em Formações Geológicas: Fluxo Multifásico, Transporte Reativo e Interações Rocha-Fluido; Gerenciamento Otimizado de Reservatórios; Modelagem de Geração e Transporte de Gás e Calor em Aterros de Resíduos Sólidos. Em 2010 recebeu da Foundation Computer Modelling Group (CMG), uma cátedra (*chair*) Industrial em Simulação de Reservatórios cujo título é: *Multiphysics Analysis, Optimization, and Uncertainty Propagation Applied to Reservoir Engineering*.



Robson Queiroz Florêncio

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro Acadêmico do Agreste
Departamento de Engenharia Civil

robsonqfs@hotmail.com

Robson Queiroz Florêncio é estudante do curso de Engenharia Civil, desde 2009, cursa o oitavo período no Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Trabalha como pesquisador de iniciação científica em projetos de pesquisa na área de modelagem numérica de problemas de reativação de falhas geológicas em reservatórios de petróleo, financiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (CNPq/Facepe) e Petrobras. Desenvolve atividades voltadas à elaboração de algoritmos numéricos aplicados à integração de dados de imagem em Computer-Aided Design (CAD) provenientes da modelagem geológica de afloramentos para construção de modelos para simulação numérica em elementos finitos.



Márcio de Lima Alencar

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Geologia

marcioanjo@hotmail.com

Márcio de Lima Alencar é estudante de graduação em Geologia na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Integra o Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagese) e é bolsista no Projeto Turing - Modelagem Geológica/Geomecânica de Afloramentos dos Sistemas Carbonático e Evaporítico da Bacia do Araripe - Abordagem Integrada para a Construção de Modelos Visando à Simulação de Reservatórios Análogos. Colaborou com resumos publicados em anais de congressos de geologia e fez cursos voltados à geologia do petróleo, tendo interesse em análise tectônica de bacias sedimentares.