

Modelagem sísmica-geométrica de fácies dos carbonatos lacustres da Formação Morro do Chaves, Bacia de Sergipe-Alagoas

Seismic-geometric facies model of lacustrine carbonates of Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin

Eliseu Massaaki Kinoshita

resumo

Recentes descobertas de hidrocarbonetos em reservatórios carbonáticos lacustres na Bacia de Campos têm motivado geofísicos e geólogos a pesquisar detalhadamente a relação das variações geométricas e faciológicas de rochas análogas aflorantes com a sísmica convencional. O modelo sísmico-geométrico de fácies da Pedreira Atol relaciona as associações de fácies das coquinas aflorantes da Formação Morro do Chaves, Bacia de Sergipe-Alagoas, às sismofácies presentes em uma seção sísmica de alta resolução (bancada-1) adquirida no próprio afloramento.

Esse modelo foi resultado da inter-relação dos modelos de integração de fácies, estratigráfico-estrutural e de velocidade de fácies do afloramento. O primeiro contém informações de raios-gama, velocidade sônica, porosidade e geometria dos tipos de associações de fácies. O segundo resultou da integração do primeiro modelo com o imageamento topográfico 3-D Laser-scanner e das observações geométrico-estruturais. O último foi gerado pela substituição das associações de fácies do segundo modelo pelas

respectivas velocidades sônicas. Este, por sua vez, foi parâmetro de entrada no programa de modelagem acústica 2-D, que produziu uma seção sísmica sintética do afloramento com padrão similar à seção sísmica de alta resolução da bancada-1.

A interpretação de um trecho desta seção sísmica de alta resolução baseada no modelo sísmico-geométrico de fácies demonstrou que as associações de fácies presentes no perfil da sondagem S-217 e as do poço FU-107, ambas posicionadas a cerca de 50m da linha sísmica, correlacionaram-se sismoestratigraficamente. Mais importante, observou-se que as fácies sísmicas estavam em posições estratigráfico-estruturais, coerentes com as observadas na análise geológico-estrutural do afloramento. Essas constatações demonstraram que esse modelo das coquinas da Formação Morro do Chaves pode ser utilizado como análogo na atividade da exploração e produção de hidrocarbonetos, particularmente nas fácies reservatórios das coquinas da Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos.

Palavras-chave: Formação Morro do Chaves | carbonatos lacustrinos | sísmica de alta resolução | associação de fácies

abstract

Recent hydrocarbon discoveries in lacustrine carbonate reservoirs of the Campos Basin pre-salt section have motivated geophysicists and geologists to make more detailed studies of the relationship of geometric and faciological variations of similar outcrop rocks with conventional seismic data. The Seismic-Geometric Facies Model of the Pedreira Atol relates the facies association of the coquinas outcrops of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin, to the seismic facies of a high-resolution seismic section (outthrust-1) from the same outcrop

This model was based on the interaction of three models: the Integration Facies Model; Stratigraphic-Structural Facies Model and Velocity Facies Model. The first relates the gamma-rays, sonic velocity, porosity and geometry information with the kinds of facies associations. The second is the result of the integration of the first model with the outcrop 3-D Laser-scanner topographic image and the structural-geometric observations. The last is the representation of the substitution of the facies associations of the second model for their respective sonic velocities. This last model was the input parameter to the 2-D acoustic model, which produced a synthetic seismic section of the outcrop of a similar standard to the high-resolution section of outthrust-1.

The outthrust-1 high-resolution seismic section interpretation, based on the Seismic-Geometric Facies Model, demonstrated that the facies associations found in the shallow drill hole S-217 and well FU-107, both 50m from the seismic line, correlate in the same seismic-stratigraphic level. More importantly, the geometries of the seismic facies found in the stratigraphic and structural positions were consistent with those observed in the outcrop geological structural analysis. This evidence indicates that the seismic model of the coquinas outcrop, Morro do Chaves Formation, may be used as an analogue model in hydrocarbon exploration and production activities, particularly in the coquinas facies reservoirs of the Lagoa feia Formation, Campos Basin.

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

Keywords: *Morro do Chaves Formation | lacustrine carbonates | high-resolution seismic | facies associations*

introdução

A importância dos estudos envolvendo as rochas carbonáticas reside no fato de que expressivos volumes de hidrocarbonetos no mundo encontram-se contidos em reservatórios dessa natureza. Apesar disso, a interpretação sísmica enfocando as variações geométricas e faciológicas dos reservatórios de rochas carbonáticas lacustres está limitada principalmente pela sua resolução vertical, prejudicando a interação direta rocha-sísmica.

A linha de pesquisa deste trabalho pretende atuar nessa questão, com o objetivo de disponibilizar métodos que permitam relacionar a geometria das fácies reservatórios de rochas carbonáticas lacustres à geometria sísmica, através da utilização da sísmica de alta resolução levantada em afloramentos. A partir dessa inter-relação, é definido um modelo sísmico-geométrico de fácies a ser utilizado como análogo na interpretação sísmica e na identificação de fácies reservatórios para a prospecção de hidrocarbonetos.

A área de estudo localiza-se a 5km a oeste da cidade de São Miguel dos Campos, Alagoas, nordeste do Brasil, localidade conhecida como Pedreira Atol. A área consiste em um alto estrutural onde aflora uma sequência carbonática representada por carbonatos lacustres, principalmente de coquinas intercaladas com folhelhos e calcilutitos da Formação Morro do Chaves (Campos Neto *et al.* 2007). As mesmas são correlacionáveis litoestratigraficamente às coquinas da Fm. Lagoa Feia (Bacia de Campos) e Fm. Toca (África), importantes reservatórios de hidrocarbonetos. Atualmente, extraem-se concomitantemente gás (Campo de Furado) de reservatórios arenosos mais antigos pela Petrobras e coquinas aflorantes para a fabricação de cimento pela Cimpor.

análise geológica do afloramento

A base de todo este trabalho está fundamentada na análise geológica, onde foram identificadas nas bancadas do afloramento a presença de seis fácies e cinco associações de fácies sedimentares, além das suas características geométricas. Com base nessas informações, foram efetuadas as descrições geológicas das rochas aflorantes das bancadas (perfil geológico do afloramento) e dos testemunhos contínuos da

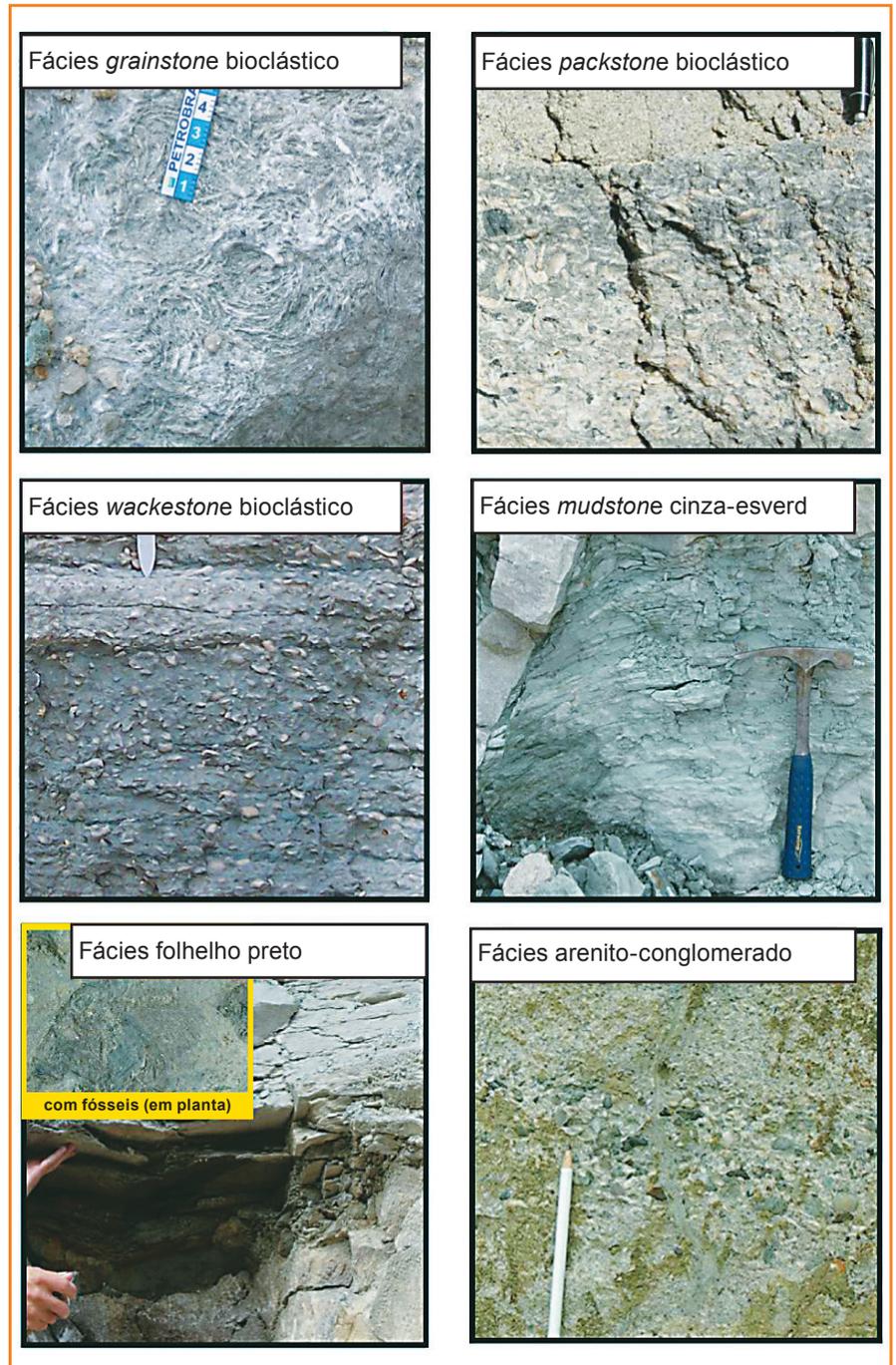
S-217 (perfil da S-217). Este último é uma das várias sondagens realizadas pela mina e que amostrou a sequência completa da Formação Morro do Chaves, possibilitando descrever continuamente as unidades litológicas e enfatizando a porosidade das fácies reservatórios (*grainstones*). Outra análise foi realizada nos elementos estruturais observados no afloramento, enfocando seus controles na deposição e deformação subsequente das associações de fácies e que raramente são citados em publicações na escala de afloramento.

fácies sedimentares e associação de fácies (AF)

Para classificar os tipos de coquinas presentes no afloramento, utilizou-se a de Dunhan (1962), que se baseia na presença ou ausência de lama carbonática e o conceito de matriz/grãos suportados (*mud-supported* e *grain-supported*). Portanto, as quatro fácies sedimentares encontradas - *mudstone*, *wackestone*, *packstone* e *grainstone* - representam, respectivamente, aumento contínuo da energia de deposição das coquinas. Duas fácies siliciclásticas, folhelho preto e areno-conglomerado, apesar de mais raras, foram observadas no afloramento (fig. 1).

Essas fácies encontram-se normalmente inter-relacionadas, dispostas em ciclos de *shoaling-upward*. Repetições desses ciclos são comuns em formações carbonáticas, demonstrando inundações periódicas das plataformas por eventos transgressivos (Tucker e Wright, 1990; Azambuja Filho, et al., 1998).

A figura 2 representa uma camada de coquinas com fácies sedimentares dispostas em *shoaling-upward*: na base da foto encontra-se a fácies *wackestone* bioclástico, que grada verticalmente para a fácies *packstone* bioclástico e no topo do ciclo, a fácies *grainstone* bioclástico. Observa-se também um aumento do tamanho granulométrico para o topo (*coarsening-upward*) e da base para o topo ocorre um gradual aumento das espessuras da fácies, isto é: espessuras menores para *wackestones*; espessuras medianas para *packstones* e espessuras maiores para *grainstones*, caracterizando um ciclo de *thickening-upward*. Portanto, essa camada representa um aumento contínuo da energia de deposição (*shoaling-upward* e *coarsening-upward*) e também do espaço disponível de deposição (*thickening-upward*).



Essas fácies podem encontrar-se inter-relacionadas em associação de fácies sedimentares (AF). A figura 3 mostra várias camadas de *packstone/grainstone* bioclásticos apresentando um aumento gradativo das espessuras das barras para o topo, definindo-se uma AF de coquinas em *shoaling-upward*. Esta definição é essencial nesse trabalho, já que traduz o padrão de associação de fácies mais comum encontrado no afloramento dos carbonatos lacustres da Formação Morro do Chaves.

Figura 1
Fácies sedimentares presentes no afloramento.

Figure 1
Sedimentary facies of the outcrop.

Figura 2

Fácies sedimentares de coquinas gradando para o topo na escala de camada, formando uma barra com associação de fácies em "shoaling-upward", "coarsening-upward" e "thickening-upward".

Figure 2

The coquinas sedimentary facies grading to the top in a bed scale forming a bar with "shoaling-upward", "coarsening-upward" and "thickening-upward" facies associations.

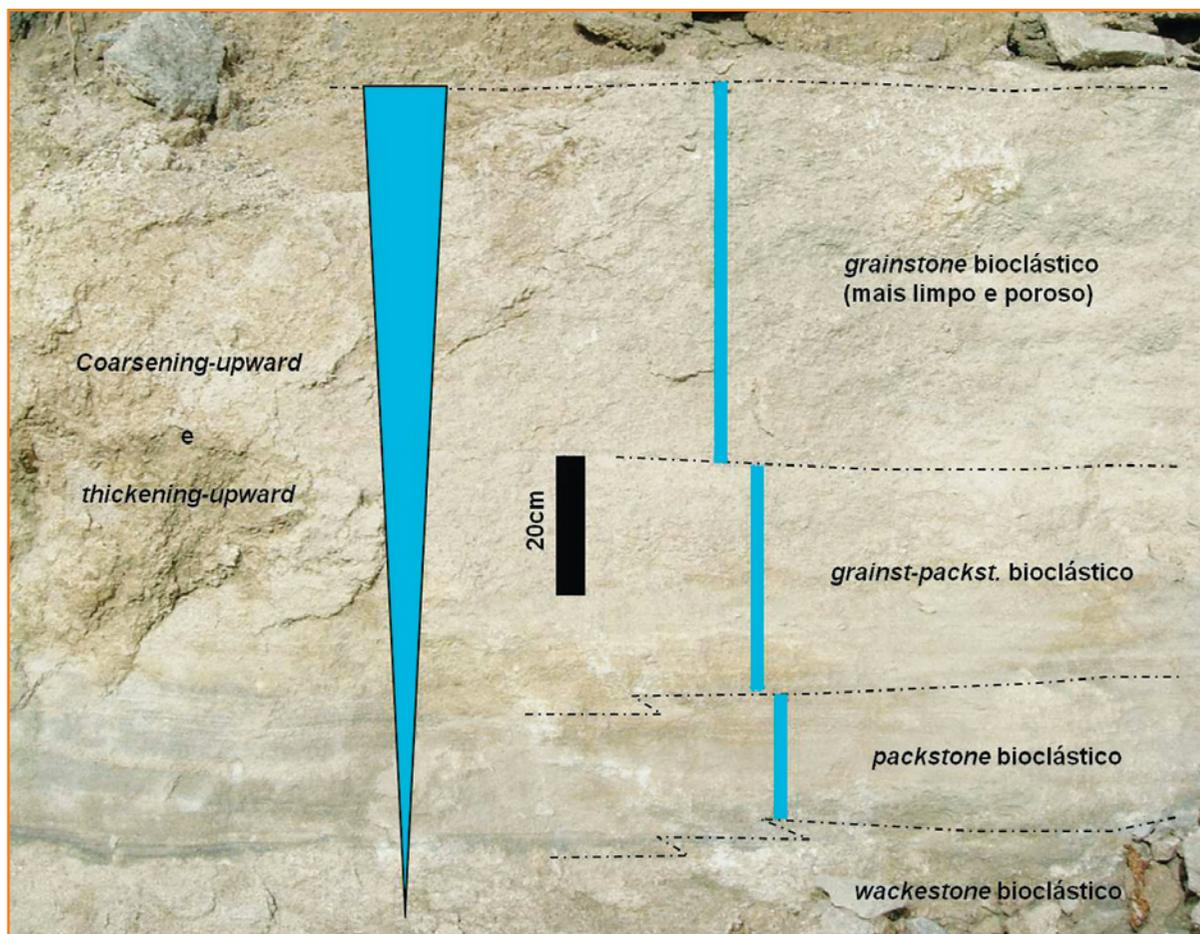
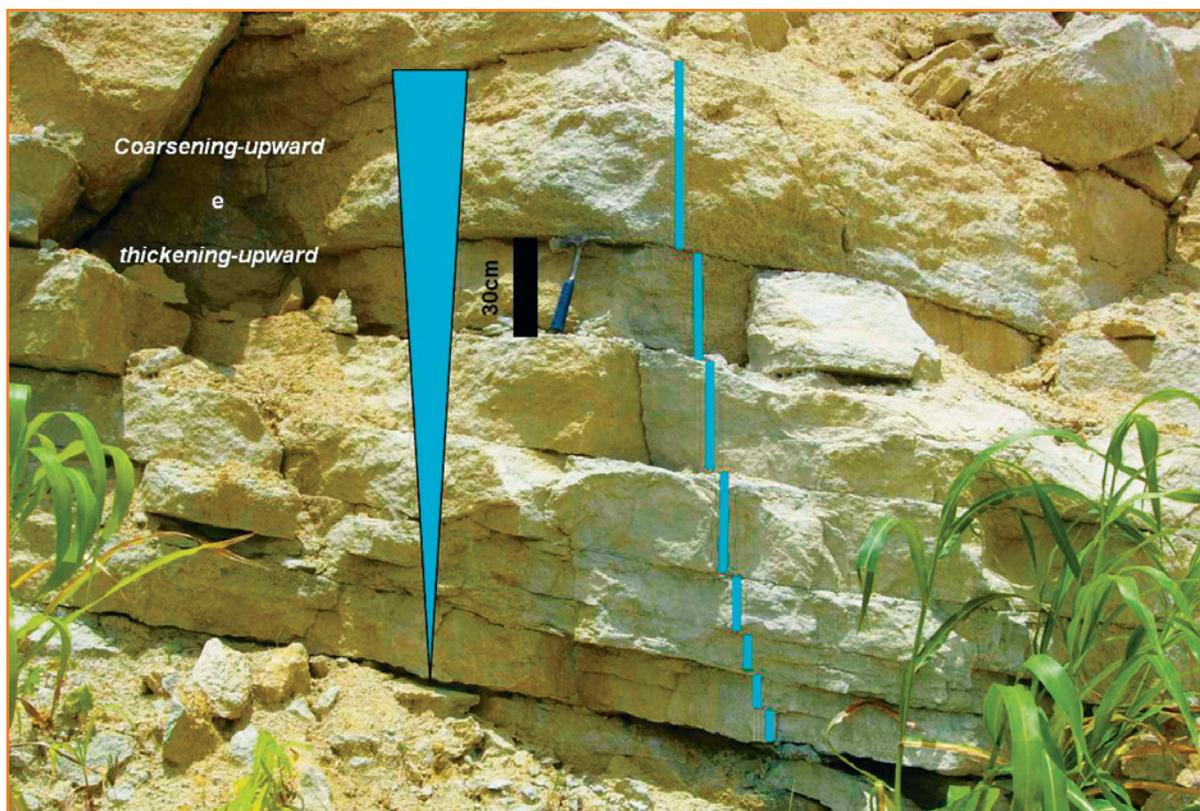


Figura 3

Corte nordeste de uma associação de fácies em "shoaling-upward", barras de grainstones bioclástico em "thickening e coarsening-upward". Observa-se também a tendência das barras inferiores apresentarem geometria sigmóide.

Figure 3

Northeastern profile showing a "shoaling-upward", facies associations of bioclastic packstone/grainstone bars "coarsening and thickening-upward". Observe that the lower bars show a sigmoidal geometry tendency.



Outra associação de fácies freqüentemente encontrada na porção superior da Formação Morro do Chaves é a AF de coquinas amalgamadas (fig. 3) e representa um conjunto de barras de *grainstones* e/ou *packstones* bioclásticos de espessuras variáveis, indicativos de geometria tabular (camadas plano-paralelas) e/ou de corte-preenchimento (camadas lenticulares).

A AF *mudstone*-folhelho preto ocorre como camadas pouco espessas (média de 40cm), separando os pacotes de coquinas. Apresentam-se com grande continuidade lateral, corroboradas tanto pelas sondagens da mina como pelos poços de desenvolvimento do Campo de Furado.

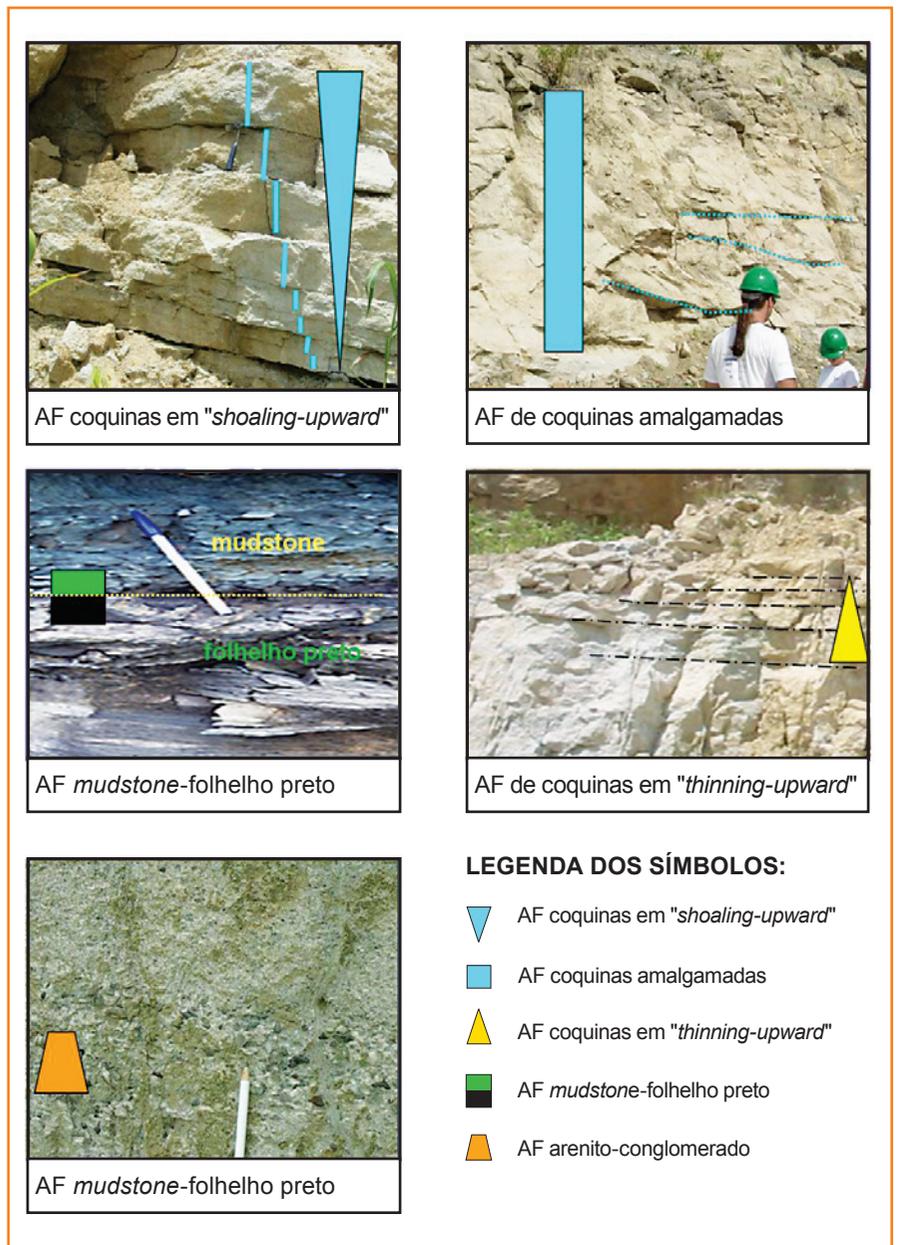
Outras associações de fácies menos comuns, porém presentes são a AF areno-conglomerado de geometria corte-preenchimento e a AF de coquinas em "*thinning-upward*" que se caracterizam pela diminuição da espessura das barras para o topo (*grainstone* a *packstone*).

Todas as associações de fácies (AF) descritas acima são apresentadas na figura 4 e, para cada uma, adotou-se uma simbologia e coloração para permitir caracterizá-las em figuras posteriores. Ademais, essas AFs também podem ser litoestratigraficamente correlacionáveis com a Fm. Lagoa Feia, Bacia de Campos. (Carvalho *et al.*, 2000)

perfis geológico e da sondagem contínua S-217

Com objetivo de compreender o empilhamento vertical das fácies e associação de fácies da Formação Morro do Chaves na Pedreira Atol, foram efetuadas descrições geológicas ao longo das bancadas expostas e também dos testemunhos da sondagem S-217, que amostrou continuamente a sequência completa da Formação Morro do Chaves antes do início de sua exploração mineral. Tanto o caminhamento das descrições para a confecção do perfil geológico como a posição da sondagem contínua podem ser visualizados na figura 5.

Na mesma figura, encontram-se posicionadas três das quatro linhas sísmicas de alta resolução levantadas, com destaque para a linha da bancada-1, e o poço FU-107, pertencente ao Campo de Furado.



A comparação do perfil geológico com o terço superior do perfil completo da S-217, correspondentes aos mesmos níveis estratigráficos, mostra uma boa correlação das associações de fácies *mudstone*-folhelho preto, AF em *shoaling-upward* e AFs amalgamadas (fig. 6).

Portanto, conclui-se que o afloramento estudado é caracterizado por pacotes de coquinas (*grainstones* e *packstones* bioclásticos) predominantemente em *shoaling-upward* e amalgamados, apresentando porosidades normalmente boas e com espessuras médias de 6m, intercalados a níveis centimétricos de *mudstones*-folhelhos pretos, localmente com níveis arenito-conglomeráticos.

Figura 4
Associações de fácies observadas no afloramento. Adotaram-se específicos símbolos para cada associação de fácies (vide canto inferior direito), com objetivo de caracterizá-las nas figuras seguintes.

Figure 4
Facies associations observed in the outcrop. Each facies association has a particular symbol to identify them (see lower RH corner) in the following figures.

Figura 5

Imagem da mina contendo as posições do perfil geológico (linha verde), a sondagem contínua S-217 (vermelho), linhas sísmicas de alta resolução (linha azul escura, com destaque para a bancada-1) e o poço FU-107 (amarelo) pertencente ao Campo de Furado, perfurado pela Petrobras.

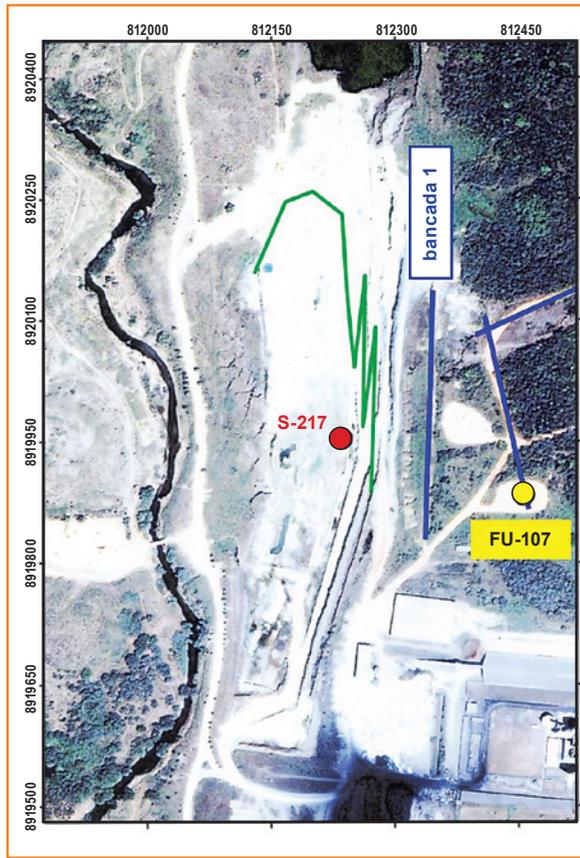


Figure 5

Image of the mine showing the geologic profile (green line), the drill hole S-217 (red), high-resolution seismic lines (dark blue line, outthrust-1 highlighted) and the well FU-107 (yellow), Furado Field, drilled by Petrobras.

geometria das fácies e associação de fácies

Como já observado em figuras anteriores, nota-se que as fácies e a AF de coquinas em *shoaling-upward* apresentam geometria sigmoidal e a AF de coquinas amalgamadas possui geometria tabular e/ou de corte-preenchimento (figs. 3 e 7). Essas duas associações de fácies são as mais comuns presentes no afloramento; por conseguinte, também o predomínio de suas respectivas geometrias.

Outra geometria tabular observada em escala de afloramento é a da AF *mudstone*-folhelho, separando os pacotes de coquinas. Correlações tanto de sondagens contínuas da mina como de poços de desenvolvimento do Campo de Furado indicam que a continuidade desta AF é maior, extrapolando a área do Campo de Furado.

porosidade das fácies e AF de coquinas

A figura 8 é um exemplo didático das condições permo-porosas das fácies e associações de fácies, especialmente relacionadas às AFs de coquinas em ciclo de *shoaling-upward*. Constata-se, visivelmente, um aumento da porosidade desse ciclo em direção ao topo, que pode ser definido como o padrão normal de porosidade para o afloramento. Outras observações envolvendo a posição estratigráfica dos níveis mais porosos dentro das associações de fácies mostram que as melhores porosidades encontram-se normalmente no terço superior das AFs de barras de coquinas em *shoaling-upward*. Isso pode ser explicado pela provável ocorrência da AF em *thinning-upward* logo acima da de *shoaling-up*, em geral parcialmente erodidas e que são englobadas dentro da AF em *shoaling-up*, como visto no canto esquerdo da figura 8. Foi também observado que a AF de *grainstones* amalgamados apresenta de boas a altas porosidades.

padrão estrutural do afloramento

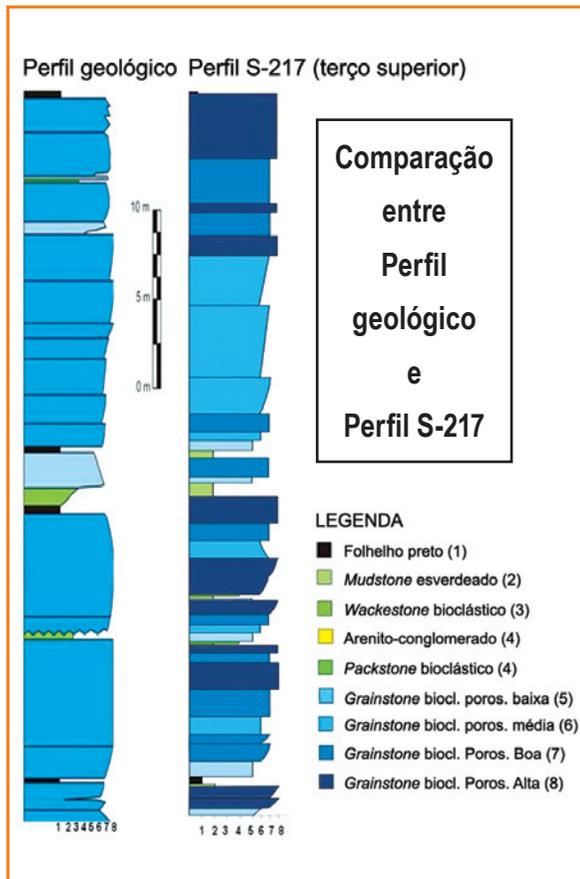
Os falhamentos observados na cava em atividade mostram tendência da direção nordeste, concentrados entre N-S e N47E, todos apresentando mergulhos

Figura 6

Correlação das fácies presentes no afloramento com as descritas no terço superior da S-217.

Figure 6

Facies association correlation between the outcrop and the upper third portion of well S-217.



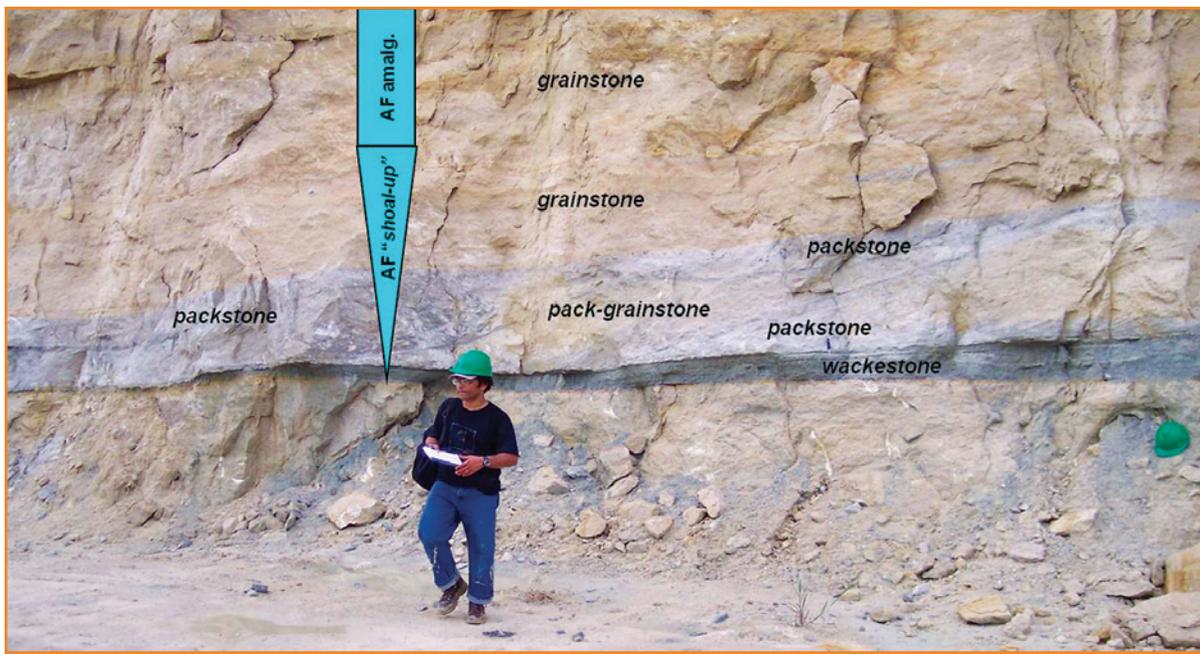
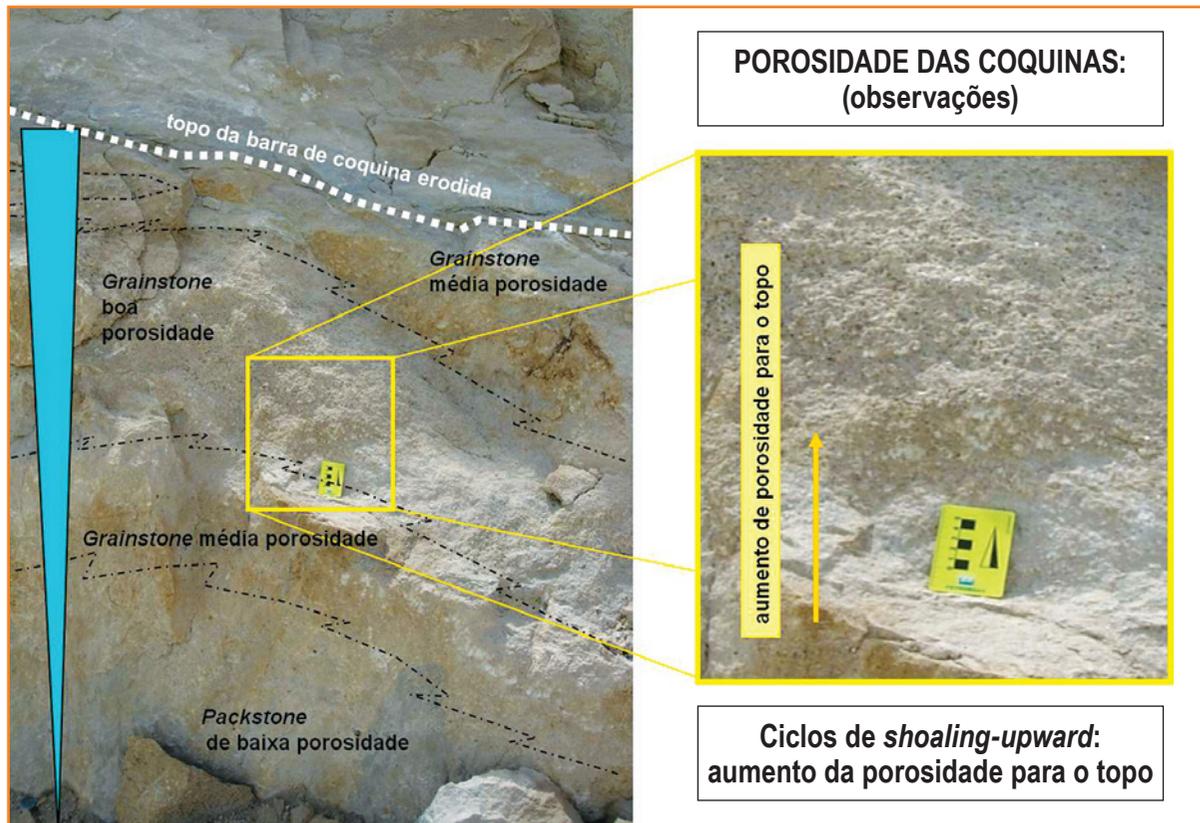


Figura 7
 Presença da Associação de Fácies (AF) de coquinas (wackestone, packstone e grainstone) em shoaling-upward com geometria sigmóide e, no topo da AF, de grainstones amalgamado com geometria tabular e de corte-preenchimento.

Figure 7
 "Shoaling-upward" coquinas facies association (wackestone, packstone and grainstone) with sigmoidal geometry and on the sequence top, the facies associations showing amalgamated tabular short-fill geometry grainstones.



**POROSIDADE DAS COQUINAS:
 (observações)**

Figura 8
 Aumento da porosidade para o topo da AF de barras de coquinas em ciclo de shoaling-upward. Provavelmente o topo da AF em thinning-upward está parcialmente erodido (vide canto esquerdo), incluído dentro da AF em shoaling-upward.

Figure 8
 Porosity increase toward the top of the facies association (FA) in shoaling-upward coquinas bars. It's probable that the top of in thinning-upward was partially eroded (see LH corner), including in the "shoaling-upward" FA.

**Ciclos de shoaling-upward:
 aumento da porosidade para o topo**

altos, com média em torno de 75 graus. Existem indicações de falhas exibindo movimentação lateral dextral (N28E) e transcorrentes (N47E), deformando a sequência carbonática (pós-deposicionais). Porém, as falhas de maior interesse para este trabalho referem-se às que são contemporâneas à deposição, tais

como as que apresentam direções aproximadas N-S e N30E (par conjugado).

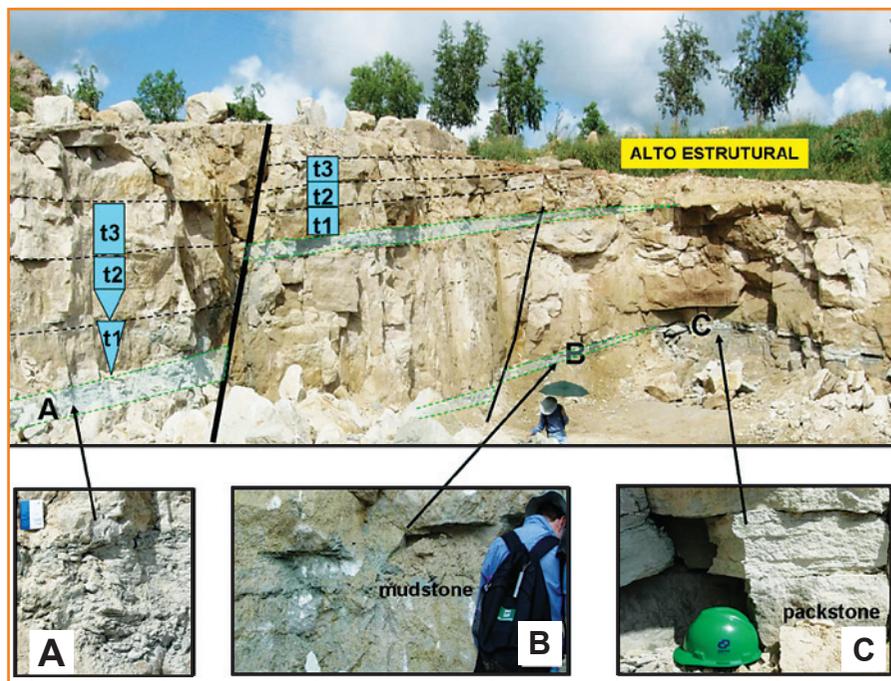
A figura 9 mostra uma boa exposição de dois falhamentos de direção aproximada N-S de rejeitos normais e sin-deposicionais, posicionados no flanco de um alto estrutural. Evidências dessa sedimentação

Figura 9

Corte E-O de dois falhamentos de direção N-S, sindeposicionais, laterais a um alto estrutural contemporâneo.

Figure 9

E-W profile showing two N-S sin-depositional lateral faults in the high contemporary structure.



contemporânea às atividades dessas falhas podem ser constatadas visualmente pelas diferenças de espessuras das barras de coquinas e camadas de *mudstones* (A), mais espessas nos blocos baixos. Também se observam acunhamentos das camadas de *mudstones* em direção ao alto estrutural, no qual a camada inferior possui uma interessante variação lateral de fácies, passando de *mudstones* (posição B) para *packstones* (posição C).

Uma das constatações importantes sobre a contemporaneidade dessas falhas refere-se às fácies e AFs presentes no bloco baixo e alto do falhamento de maior rejeito, visualizadas na lateral esquerda da figura 8. No bloco baixo, observa-se a presença de barras mais espessas das fácies *grainstones* e *packstones*, imediatamente acima da camada mais espessa de *mudstone*, enquanto no bloco alto nota-se a presença de camadas mais delgadas e somente da fácies *grainstone*. Portanto, no bloco baixo, a AF presente é a de coquinas em *shoaling-up* nos tempos t1 e t2, passando verticalmente para a AF de coquinas amalgamadas no tempo t3, e no bloco alto, apenas a AF de coquinas amalgamadas mais delgadas nos tempos t1, t2 e t3.

Outra boa exposição é visualizada na figura 10a, onde a superfície de um banco de coquinas mostra o predomínio de fraturas N30E e secundariamente pelas fraturas em T (N5E), configurando um par conjugado. Na figura 10b, é apresentado o resumo das 23 medidas de fraturamentos e falhamentos medidos no afloramento e que corroboram as direções visualizadas na figura 10a.

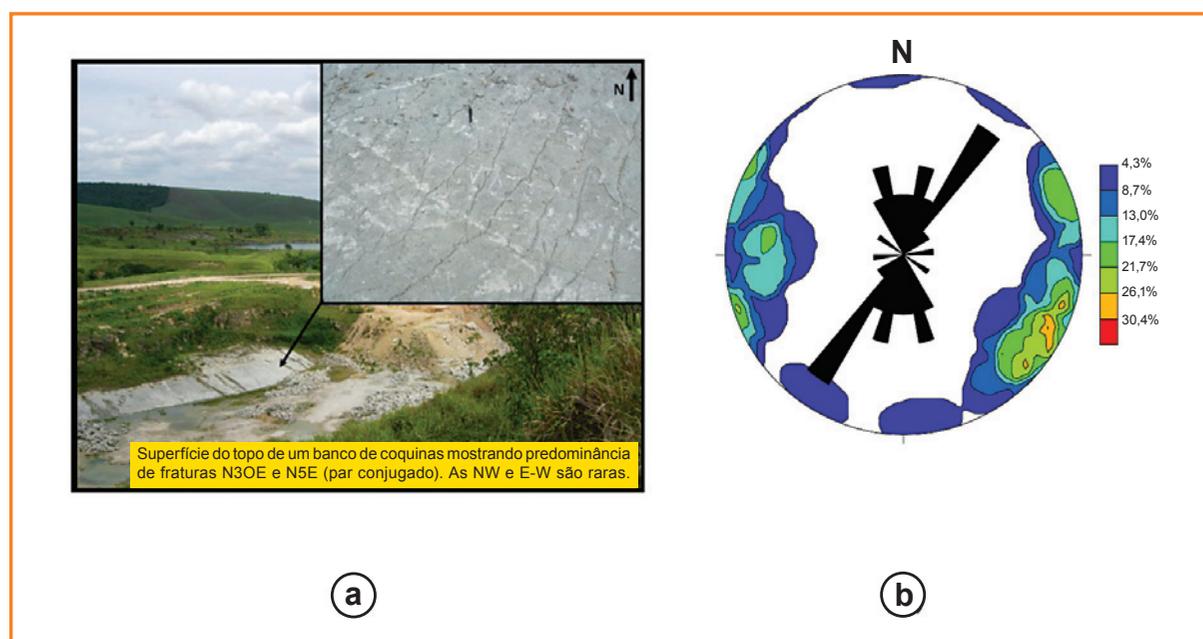
Portanto, em linhas gerais, o padrão dos falhamentos e fraturamentos observados no afloramento está concordante com o modelo teórico proposto por Lana (1990): a predominância dos fraturamentos N30E, conjugado ao N-S. Essas direções controlaram os afinamentos (altos estruturais) e espessamentos (baixos estruturais) dos carbonatos lacustres da Formação Morro do Chaves, isto

Figura 10

a) Superfície do topo de um banco de coquinas mostrando a predominância das fraturas N30E, secundariamente pelas fraturas N5E (par conjugado). b) Resumo do total de 23 medidas de fraturas realizadas no afloramento.

Figure 10

a) Surface of a coquinas bed showing the predominance of conjugated pair fracture (N30E/N5E). b) Graphic of the 23 measures of the fractures in the outcrop.



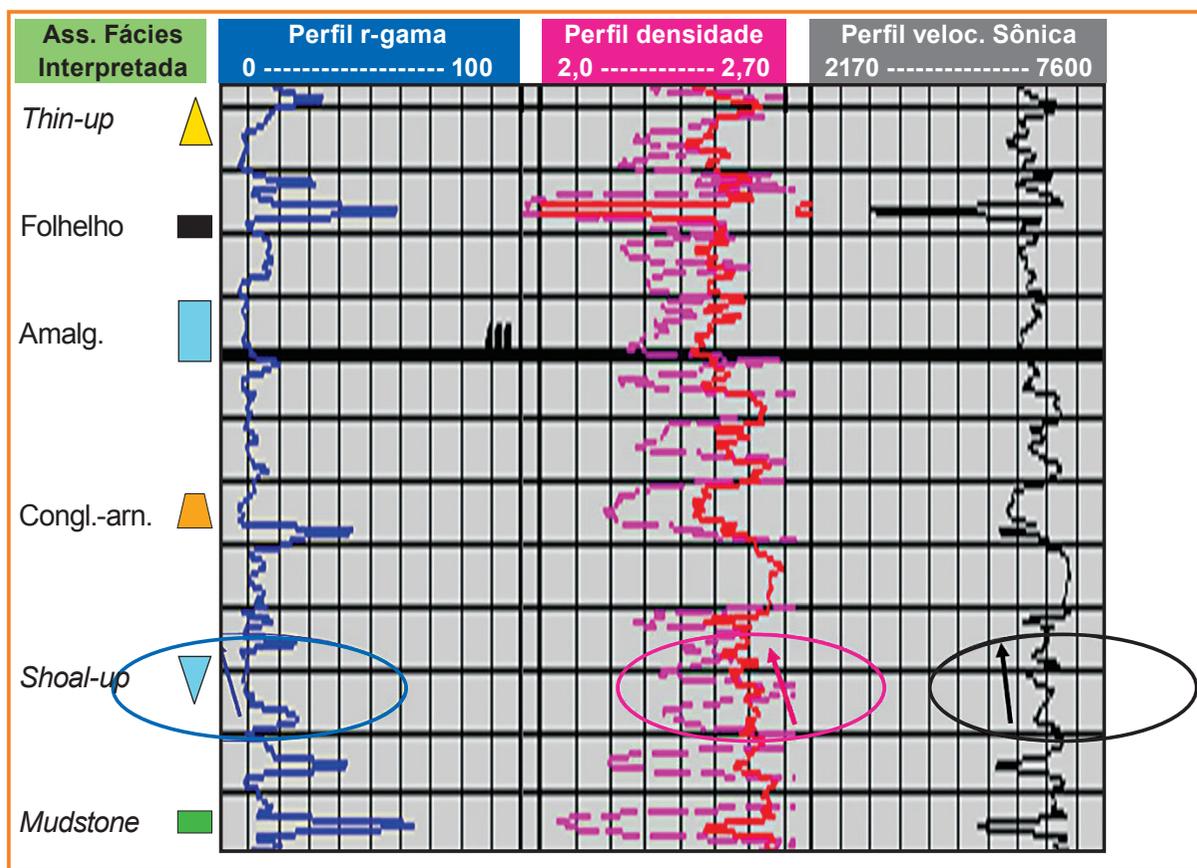


Figura 11
Trecho do perfil composto do FU-125, apresentando as características de velocidade sônica (preto), densidade (vermelho) e de raios-gama (azul) para cada tipo de associação de fácies.

Figure 11
Relationship between sonic velocity (black), density (red) and gamma-ray (blue) characteristics of the each type of facies association in well FU-125.

é, foram as principais direções de falhamentos sin-deposicionais dessas rochas.

imageamento do afloramento

Do ponto de vista puramente geofísico, a sísmica convencional dessas rochas, tanto na exploração quanto na produção de petróleo, encontra resolução sísmica limitada inerente ao método, por possuírem velocidades sônicas e densidade normalmente altas. Além desse fato, a correspondência do imageamento sísmico de qualquer sequência não é direta, isto é, existem várias soluções para uma mesma imagem sísmica.

A interface mais utilizada para correlacionar as informações geológicas dessas exposições com o imageamento sísmico é a utilização de métodos que propiciem medidas de propriedades petrofísicas dessas rochas (velocidade, densidade, porosidade). Com esse objetivo, foram realizadas medidas de raios-gama (espectrômetro de raios gama GR-320)

nas rochas do perfil geológico do afloramento. A correlação entre os valores de raios gama medidos nas rochas expostas com as perfuradas pelo poço FU-125 permitiu extrapolar, indiretamente, os valores de velocidade sônica, densidade e porosidade correspondentes para todo o afloramento (fig. 11).

imageamento laser-scanner

Utilizou-se o laser-scanner Leica HDS-3000 para imagear as três bancadas do afloramento em três dimensões, permitindo obter informações acerca das espessuras, variações e o mergulho das camadas e geometrias dos corpos, além de feições sedimentares, tais como estratificações e limite das camadas. Integrado a informações das descrições litológicas de fácies e associação de fácies, torna-se elemento indispensável na elaboração de uma seção geológica e estratigráfica de AF de fácies sem distorções de todo o afloramento (fig. 12).

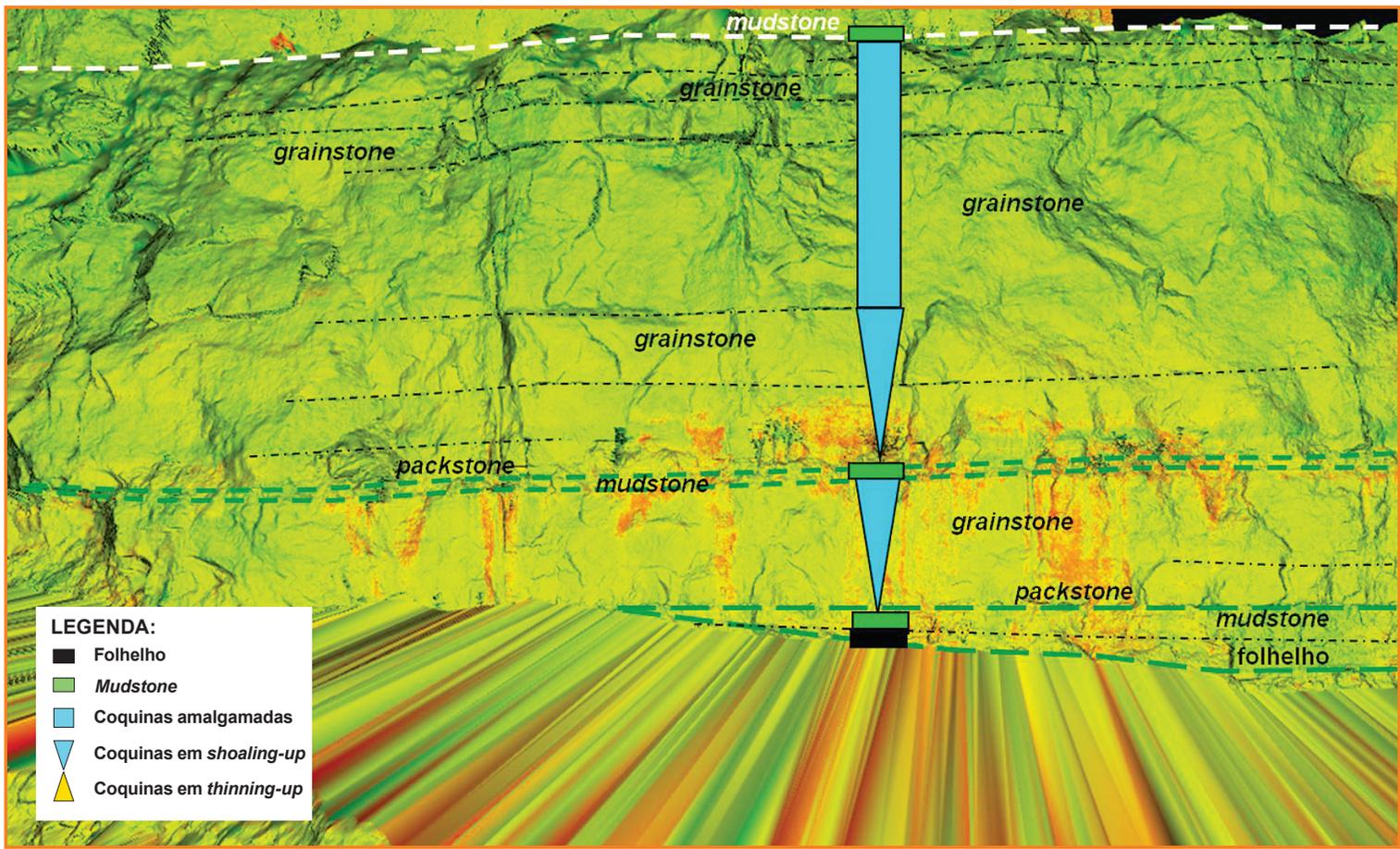


Figura 12
Exemplo de um trecho do afloramento em que se integra o imageamento laser-scanner com os elementos descritos das associações de fácies no afloramento.

Figure 12
Example of the 3D laser-scanner image integrating different types of facies association elements described in the outcrop.

modelagem acústica 2-D

O programa de modelagem acústica 2-D foi utilizado para a definição da parametrização da aquisição sísmica de alta resolução na área e também para a geração de uma seção sísmica sintética do afloramento.

Os parâmetros de aquisição foram definidos a partir de uma seção geológica obtida pela correlação de três poços do Campo do Furado. A geometria escolhida foi a *End-on*, intervalos de tiro e de estações a cada 50cm, totalizando cerca de 300m.

Uma seção sísmica sintética do afloramento foi gerada pelo programa a partir do imageamento completo do afloramento em 3-D, obtido pelo laser-scanner (valores de X, Y e Z) e com o preenchimento dos valores correspondentes de velocidade e densidade das AFs obtidas indiretamente a partir da correlação dos valores de raios gama do poço FU-125 e das rochas expostas.

aquisição e seções sísmicas de alta resolução

A aquisição sísmica de alta resolução na área da Pedreira Atol foi realizada por uma equipe de mestrandos e doutorandos do Programa de Pós-Graduação da UFPR, num total de quatro linhas, sendo duas de direção N-S (*strike*) e duas de direção SW-NE (aproximadamente *dip*), totalizando cerca de 2.000m. Na figura 4, pode-se observar a posição de três linhas sísmicas registradas, inclusive a linha prioritária, denominada de bancada-1, de direção N-S e paralela às bancadas aflorantes cerca de 50m a leste.

O trecho inicial da seção sísmica preliminar dessa linha é apresentado na figura 13. A comparação dessa seção com a seção sísmica sintética obtida a partir da Modelagem acústica 2-D mostra uma boa correlação, com as camadas mantendo as mesmas espessuras em tempo e também apresentando a

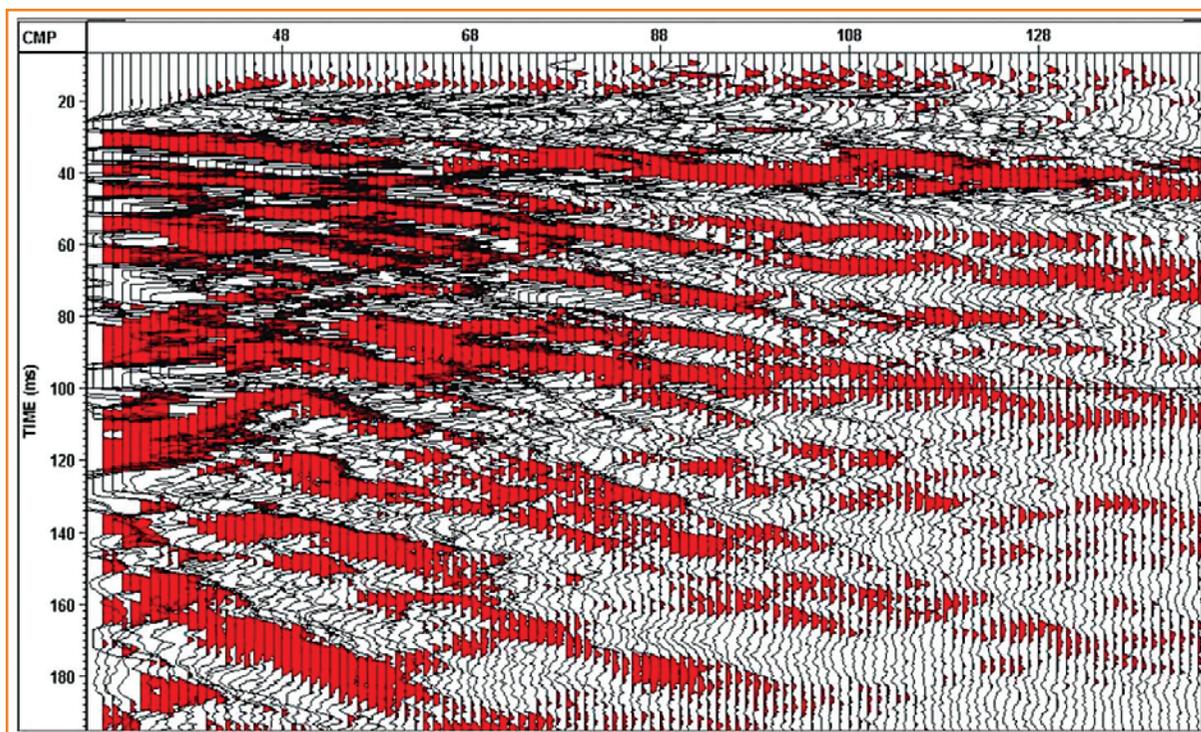


Figura 13

Trecho da seção sísmica preliminar da bancada1, linha N-S paralela cerca de 50m das bancadas expostas. Esta seção deve representar o imageamento sísmico mais aproximado da seção geológica do afloramento.

Figure 13

Part of the N-S high-resolution seismic line outthrust-1, which is located at 50m parallel to the outcrop. This section probably represent the seismic image closest to the geologic section of the outcrop.

mesma tendência de mergulho de norte para sul. Esse fato é de primordial importância para corroborar o fato de o processamento sísmico e o modelo de velocidade aplicado estarem coerentes com o modelado.

A partir da integração das informações obtidas pela análise geológica com o imageamento do afloramento, foram gerados modelos que se tornam essenciais para a caracterização sísmica-geológica das rochas carbonáticas lacustres da Formação Morro do Chaves.

modelos gerados por integração de dados

Lagos que depositam carbonatos são sistemas dinâmicos e suscetíveis a flutuações do clima, altamente variáveis nos contextos tectônicos e sedimentológicos, não existindo um conjunto padrão de critérios confiáveis para o reconhecimento desses depósitos. A correta identificação das fácies presentes no ambiente sedimentar torna-se essencial para a definição de seu modelo deposicional. Esse modelo de fácies, por sua vez, deve conter todas as informações faciológicas e geométricas que caracterizem a área analisada. No entanto, a análise de depósitos antigos lacustres é mais complexa, necessitando frequentemente da utilização de vários modelos de fácies, como deve ser o caso dos carbonatos lacustres da Formação Morro do Chaves.

modelo de integração de fácies

O modelo de fácies do afloramento definido neste trabalho é caracterizado por pacotes médios de 6m de coquinas compostas por AFs de barras de *grainstones* e *packstones* em ciclos de *shoaling-upward* de alta frequência e geometria sigmoide; secundariamente, por AF de barras de *grainstones* amalgamados com geometria tabular/corte-preenchimento, separadas por camadas centimétricas de AF *mudstone*-folhelho preto.

As informações contidas nesse modelo de fácies integrado às geometrias das fácies, perfil de raios gama levantado, porosidades e velocidades sônicas estimadas a partir do FU-125, definem o modelo de integração de fácies do afloramento (fig. 14). Esse modelo é considerado a base para todos os modelos gerados

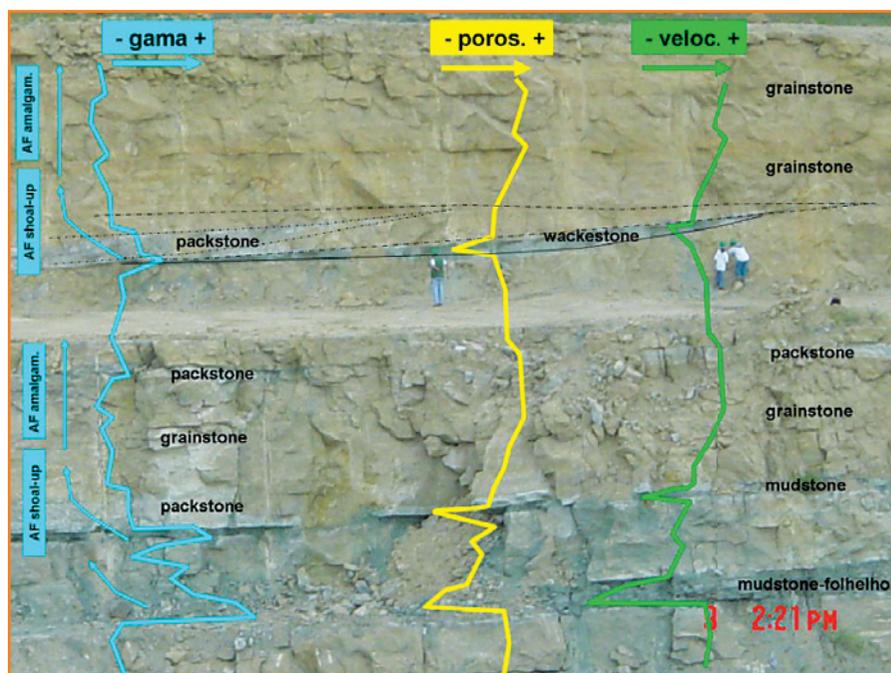


Figura 14
Modelo de integração
de fácies.

Figure 14
Integrated Facies
Model.

posteriormente e, a partir dele, torna-se possível correlacionar as rochas expostas da Formação Morro do Chaves com as rochas perfuradas na mesma sequência por qualquer poço, através da comparação do perfil gama do afloramento com o perfil gama do poço. Consequentemente, as informações do afloramento e do perfil composto do poço podem ser interligadas, permitindo obter características como velocidade, densidade e porosidade dos perfis compostos do poço para as fácies e AFs, imprescindíveis para a inter-relação rocha-sísmica. Inversamente, as características geológico-estruturais do afloramento podem ser incorporadas aos dados do poço, possibilitando uma interpretação sísmica mais acurada, definindo melhor os níveis sísmicos correspondentes às fácies reservatório.

modelo estratigráfico-estrutural de fácies

O mapeamento dos principais níveis estratigráficos e superfícies como acamamentos, estratificações, falhamentos, corpos com geometrias sigmoidais, tabulares ou mesmo de corte-preenchimento, formando um conjunto de linhas estratigráfico-estruturais, foram definidas principalmente com a utilização do laser-scanner. A combinação desse conjunto com

o modelo de integração de fácies do afloramento, aliada às informações da geometria das fácies e AFs e da análise estrutural, resulta no modelo estratigráfico-estrutural de fácies do afloramento (fig. 15).

modelo de velocidade de fácies

Para que o programa de modelagem acústica 2-D possa gerar uma seção sísmica sintética é necessário que o modelo estratigráfico-estrutural de fácies seja substituído por dados de velocidade e de densidade. Simplificou-se o modelo considerando-se a densidade constante para todas as fácies e somente dados de velocidade médios para cada fácies e AFs, gerando o modelo de velocidade de fácies do afloramento (fig. 16). Os valores de velocidade das fácies do poço FU-125 sofreram um redutor constante (cerca de 20%), já que essas rochas encontram-se a cerca de 400m de profundidade (mais compactadas), e o modelo de velocidade refere-se a rochas na superfície, menos compactadas. Para se chegar a esse redutor, utilizaram-se os registros da aquisição sísmica e, a partir do método da refração, obteve-se o valor da velocidade do topo da sequência.

modelo sísmico-geométrico de fácies

A utilização da sísmica de alta resolução tem sido crescente, principalmente para relacionar o modelo de fácies do afloramento com a sísmica convencional. Os estudos acadêmicos envolvendo a aquisição e o processamento sísmico de alta resolução em afloramentos é recente, e tanto os parâmetros de aquisição como a sequência de processamento sísmico são temas de amplo debate.

A figura 17 mostra as diferenças de resolução vertical e horizontal entre a seção sísmica convencional e a de alta resolução da bancada-1. Ao comparar as duas seções sísmicas, a segunda mostra uma melhoria da resolução vertical em torno de três vezes e a resolução horizontal, de vinte vezes. Apesar dessas melhorias, questiona-se se a sequência de processamento

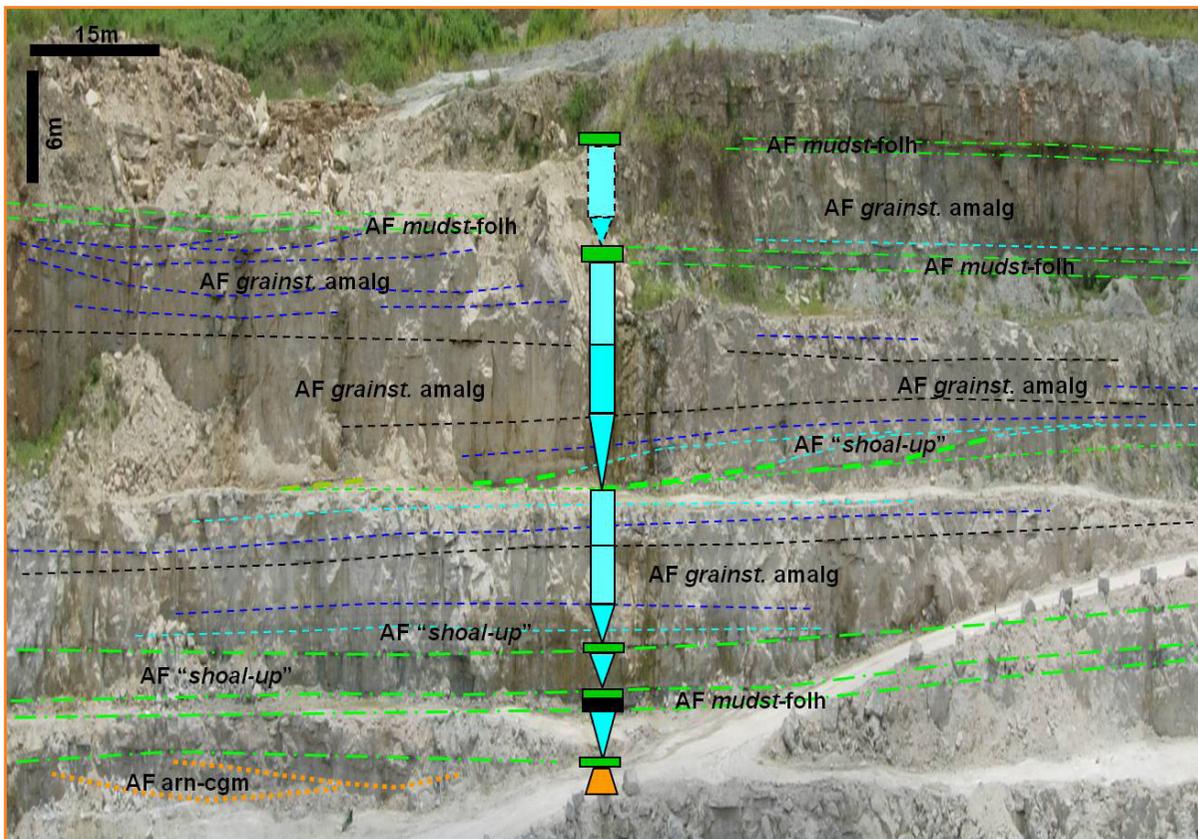


Figura 15
Trecho do Modelo
Estratigráfico-estrutural
de Fácies do afloramento.

Figure 15
Part of the outcrop
Stratigraphic-Structural
Facies Model.

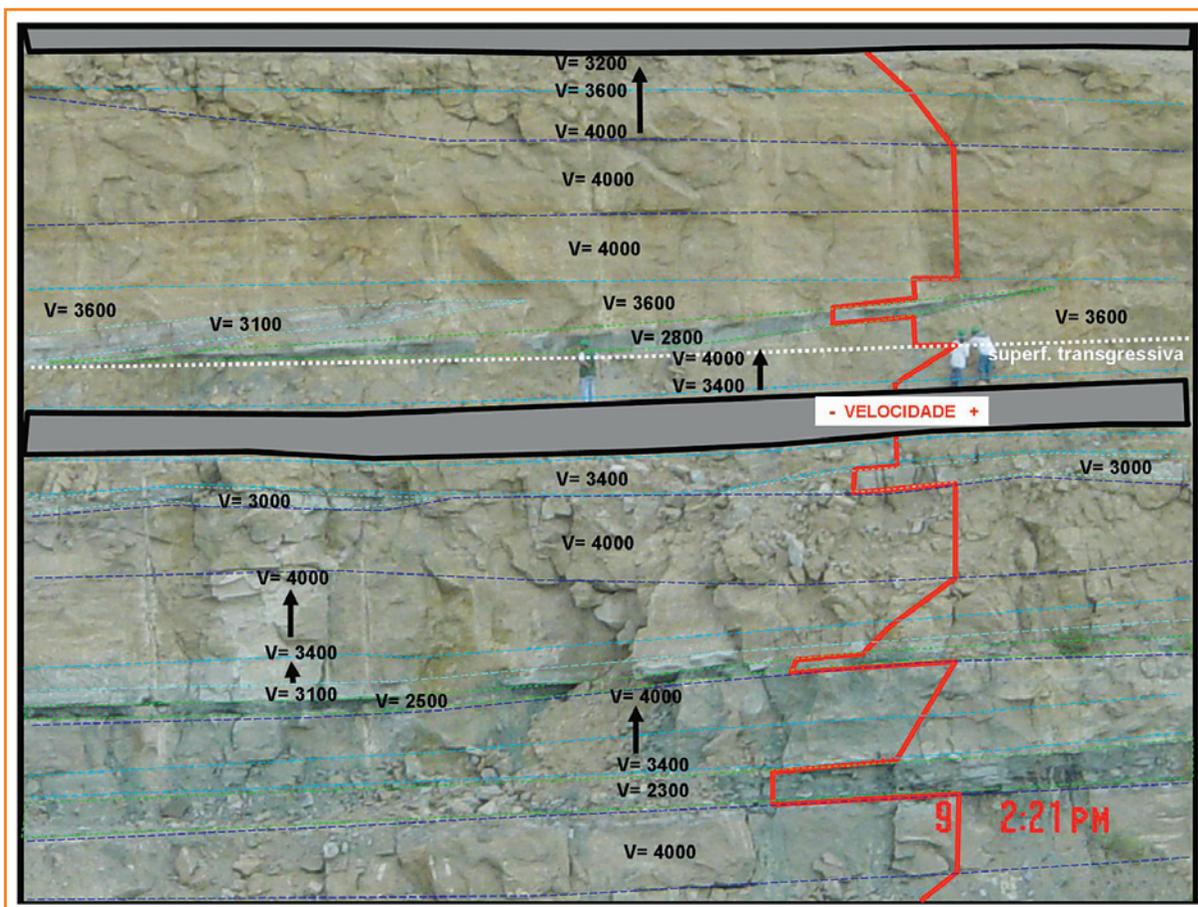


Figura 16
Trecho do Modelo
de Velocidade de
Fácies do afloramento.

Figure 16
Part of the outcrop
Facies Velocity Model.

Figura 17

Comparação entre a sísmica convencional e a de alta resolução. Melhoria da resolução vertical (~ 3 vezes) e horizontal (20 vezes).

Figure 17

Comparison between conventional and high-resolution seismic sections. Resolution Increase: vertical (3 x), horizontal (20 x).

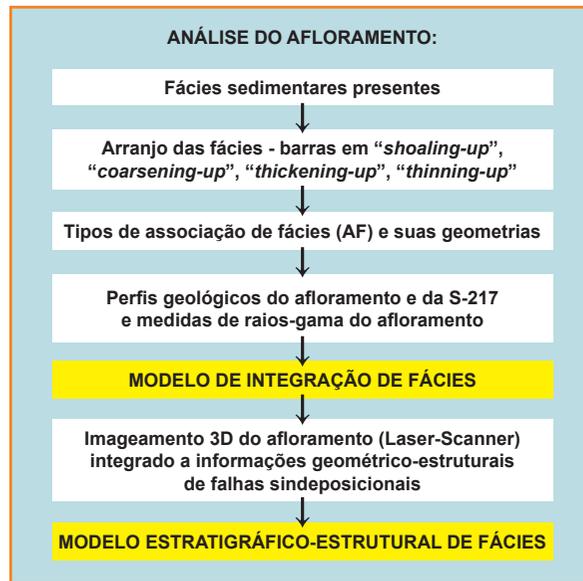
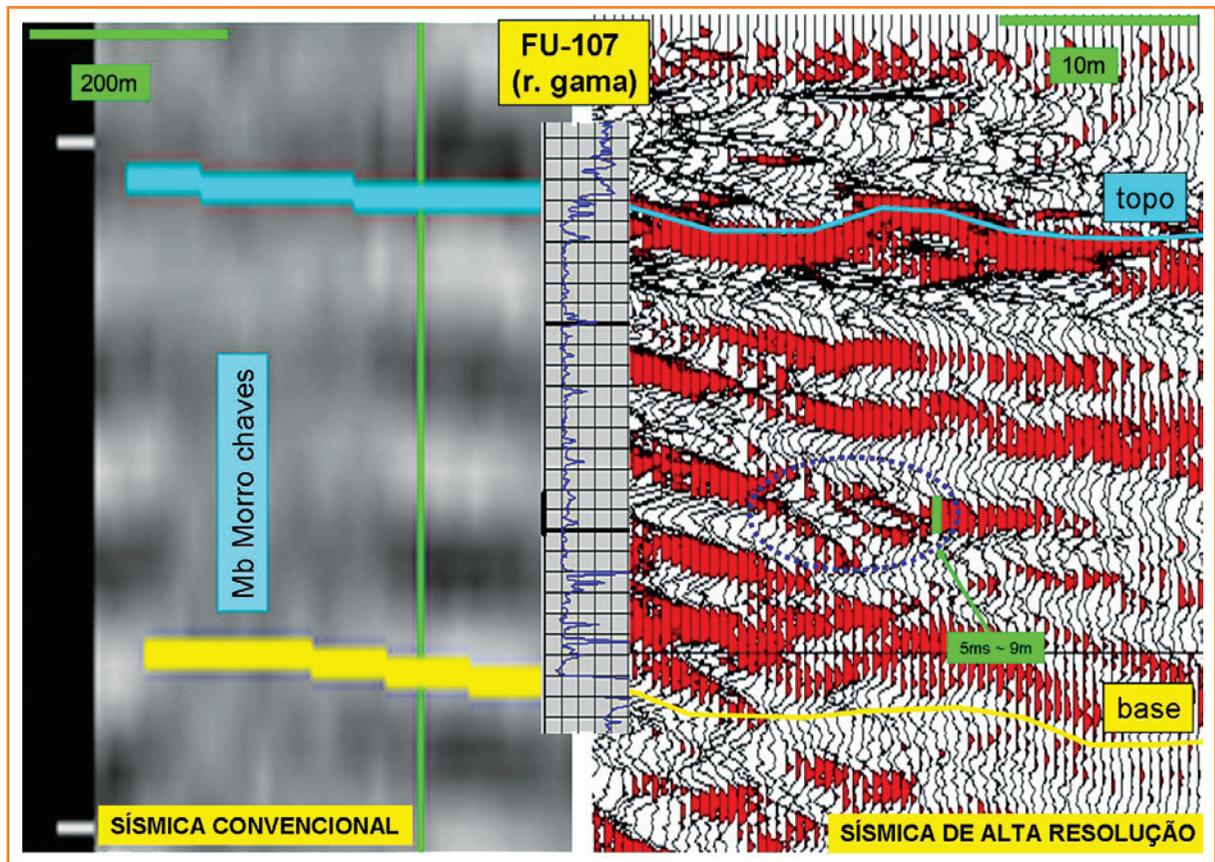


Figura 18 – Sequência para a análise do afloramento, para definir os Modelos de Integração de Fácies e Estratigráfico-estrutural de Fácies.

Figure 18 – Outcrop sequence analysis to define the Integrated Facies and Stratigraphic-Structural Facies Models.

sísmico efetuado foi coerente, ao levar em consideração as análises geológico-estruturais realizadas no afloramento.

Para tentar responder essa pergunta, adotou-se uma linha de pesquisa baseada na tentativa de ajustar tanto o modelo estratigráfico-estrutural de fácies quanto o modelo de velocidade de fácies, com a geração de algumas versões de seções sísmicas sintéticas do afloramento, escolhendo-se aquela que apresente um padrão sísmico-geométrico similar ao da seção sísmica de alta resolução da bancada-1, cerca de 100m do afloramento.

A concepção do modelo sísmico-geométrico de fácies está embasada na construção e definição de três principais modelos anteriormente definidos. Com o objetivo de facilitar o entendimento da sequência geral para se obter os modelos, foram gerados dois fluxogramas esquemáticos: um, que envolve a análise do afloramento e outro, envolvendo a integração de métodos.

O fluxograma da análise do afloramento (fig. 18) mostra a sequência para a geração do modelo de integração de fácies e do modelo estratigráfico-estrutural de fácies do afloramento. Para obter esses modelos,

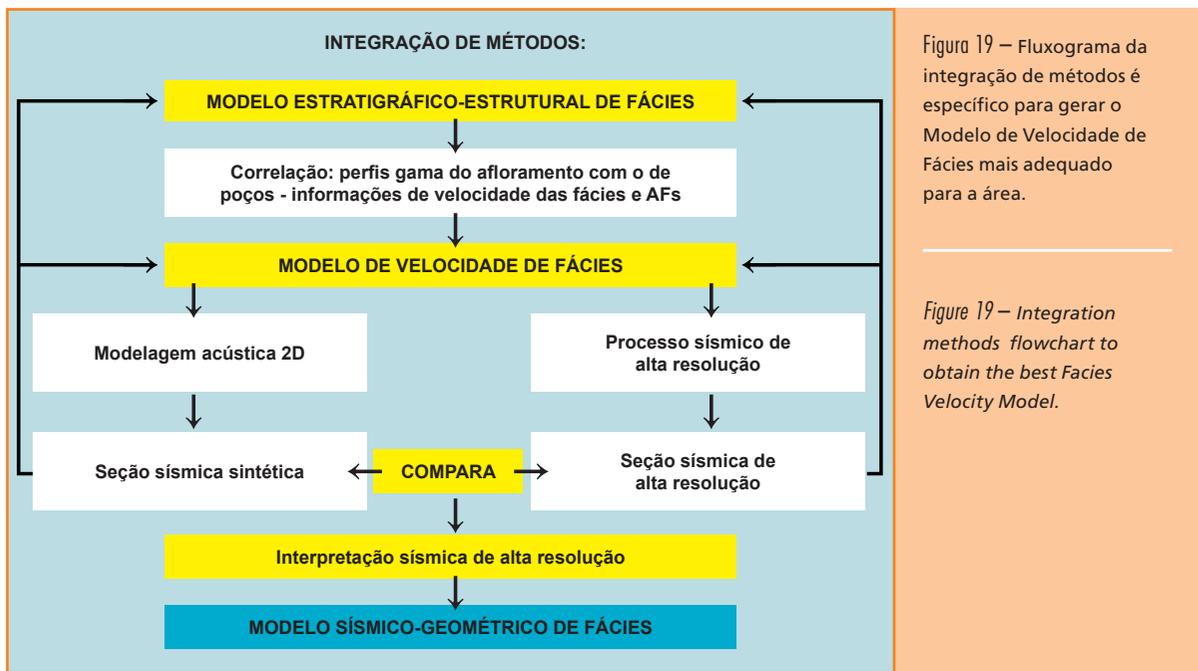


Figura 19 – Fluxograma da integração de métodos é específico para gerar o Modelo de Velocidade de Fácies mais adequado para a área.

Figure 19 – Integration methods flowchart to obtain the best Facies Velocity Model.

é necessário identificar os tipos de fácies presentes, associação de fácies e formas geométricas, informações de raios gama e de porosidades, imageamento 3-D laser-scanner e análises estratigráfico-estruturais.

O fluxograma de integração de métodos (fig. 19) mostra a sequência esquemática para que se obtenha o modelo de velocidade de fácies mais adequado e que gere a seção sísmica sintética mais similar com a seção sísmica de alta resolução (bancada1). Essa seção sísmica de alta resolução é submetida a uma interpretação sísmica, correlacionando-se com informações geológico-geofísicas de poços e sondagens (FU-107 e S-217) e integradas com o modelo de integração de fácies.

modelo sísmico-geométrico de fácies

Nos capítulos anteriores, foram analisados quase todos os aspectos geológicos e estruturais envolvidos em uma exposição de rochas carbonáticas lacustres. Portanto, é imprescindível utilizá-los na interpretação sísmica, especialmente aqueles relacionados às fácies, associação de fácies, geometria desses corpos e tectônica local sin-sedimentar. As medidas de raios gama do perfil geológico possibilitaram correlacioná-las

aos perfis de raios gama de poços próximos à área aflorante e também os mais distantes, desde que correspondentes à mesma sequência estratigráfica.

Sabe-se que a resolução vertical da sísmica convencional em reservatórios carbonáticos fica em torno de 35m de espessura e o algoritmo lterdec pode melhorar essa resolução pela metade (17m). Conforme demonstrado na figura 17, a seção sísmica de alta resolução da bancada1 permite identificar camadas abaixo de 9m.

O afloramento é composto por duas litologias básicas: coquinas de altas velocidades e *mudstones*-folhelhos pretos de velocidades menores, sendo esta última a de maior continuidade lateral. Portanto, um refletor positivo espacialmente contínuo, contendo valores aproximadamente iguais na seção de alta resolução, pode ser o indicativo da interface *mudstone*-folhelho preto/coquina; já a interface inversa, o refletor negativo poderá apresentar-se ondulado com valores de amplitudes negativas variáveis, pois as fácies presentes na base da AF de coquinas em *shoaling-upward* podem variar de tipo (*wackestone* e/ou *packstone*) e espessura, funcionando como uma camada de espessura variável e de velocidades variáveis. Portanto, um refletor negativo pode não significar exatamente a interface coquina/*mudstone*-folhelho.

Ao interpretar o “recheio” dessas subsequências, exatamente onde se encontram as fácies reservatórios, a dificuldade aumenta, pois esses elementos

podem apresentar espessuras próximas ao limite de resolução vertical da sísmica de alta resolução levantada. A não ser que, em posições de baixos estruturais, as AFs se desenvolvam dentro de contextos deposicionais mais adequados, produzindo um conjunto de AFs de espessura maior que o limite de resolução do método. Justamente nesses casos é que a metodologia utilizada e exposta neste trabalho pode fornecer interessantes subsídios para auxiliar na interpretação sísmica, seja ela convencional ou de alta resolução, através do modelo sísmico-geométrico de fácies (fig. 20).

Nesta figura, pode-se correlacionar a geometria sigmoidal-progradacional típica da AF de barras de coquinas em *shoaling-upward* presente no modelo de integração de fácies com a geometria da sísmica de alta resolução. Essa integração é reforçada pela correlação direta entre as medidas de raios gama do perfil geológico com o perfil de raios gama do poço FU-107. Portanto, se todos os elementos arquiteturais desse modelo são adequadamente utilizados na interpretação sísmica de alta resolução, conclui-se que o modelo sísmico-geométrico de fácies construído é o adequado para o afloramento das rochas carbonáticas lacustres da Formação Morro do Chaves.

interpretação sísmica de alta resolução

Um exemplo de interpretação sísmica representativa da AF de barras de coquinas em *shoaling-upward* é mostrado na figura 21 na C-4 (camada 4), entre os folhelhos 4 e 5 (F-4 e F-5). A geometria sísmica sigmoidal-progradacional, destacada pela elipse tracejada vermelha na mesma figura, pode ser correlacionada com aquela AF, já que apresentam a mesma geometria. Porém, a partir da correlação da seção sísmica com o perfil de raios gama do poço FU-107 (cerca de 100m) e com o perfil da sondagem S-217 (cerca de 50m), identificou-se a subsequência C-4 como característica da AF de coquinas em *shoaling-upward*. Ademais, pelo modelo de integração de fácies, essa AF possui cerca de 9m de espessura, dentro da resolução vertical da sísmica de alta resolução.

No âmbito estrutural, a falha da figura 21 foi contemporânea à deposição da camada C-4.

O basculamento diferencial do bloco baixo provocou a formação de um alto relativo, ladeado de dois baixos relativos (diferença de isópaca sísmica). Nesses baixos relativos, a camada 4 apresenta a mesma geometria sísmica sigmoidal pela criação de maior espaço disponível pela atividade da falha. Esta camada é interpretada como AF de coquinas em *shoaling-upward* na base e amalgamadas no topo pelo modelo de integração de fácies. Já no alto relativo, o padrão sísmico (amplitude positiva) é semelhante à camada C-3 no poço FU-107 e no perfil S-217 (vide padrão r-gama no modelo de integração de fácies), e ambos apresentam características da AF de coquinas amalgamadas. Portanto, a atividade sin-deposicional da falha deve provocar modificações nas fácies sedimentares depositadas. Nos baixos estruturais, a criação do espaço de acomodação é maior e as AFs serão mais espessas, apresentando geometria sigmoidal e em *shoaling-upward*. Enquanto no alto relativo, pelo espaço menor disponível e águas mais rasas, as AFs mais prováveis seriam as amalgamadas. Essas interpretações têm suporte nas análises estruturais que foram realizadas no afloramento e que podem ser visualizadas na figura 8.

Outra questão está relacionada à posição em que se encontram as melhores fácies reservatório. Como já referenciado anteriormente, as melhores porosidades encontram-se nas AFs amalgamadas e no terço superior da AF de coquinas em *shoaling-upward*. Desconsiderando efeitos diagenéticos, as melhores porosidades podem se posicionar no alto relativo pela concentração da AF de coquinas amalgamadas compostas predominantemente por *grainstones* (a mais limpa e mais porosa), diferentemente nos baixos, que possuirão fácies menos porosas (*packstones* e *wackestones*).

Esta interpretação sísmica de alta resolução foi baseada em uma seção preliminar, mas a linha de pesquisa aplicada desde a análise geológico-estrutural do afloramento, seguida pelos imageamentos para caracterizá-lo e, posteriormente, integrá-lo ao método sísmico pelo modelo sísmico-geométrico de fácies, parece estar coerente com boa parte dos dados disponíveis. Reprocessamentos sísmicos futuros dessas linhas de alta resolução, quando disponíveis, poderão melhorar sua qualidade sísmica, porém, a metodologia aplicada para interpretá-las deve ser baseada no modelo sísmico-geométrico de fácies do afloramento da Pedreira Atol.

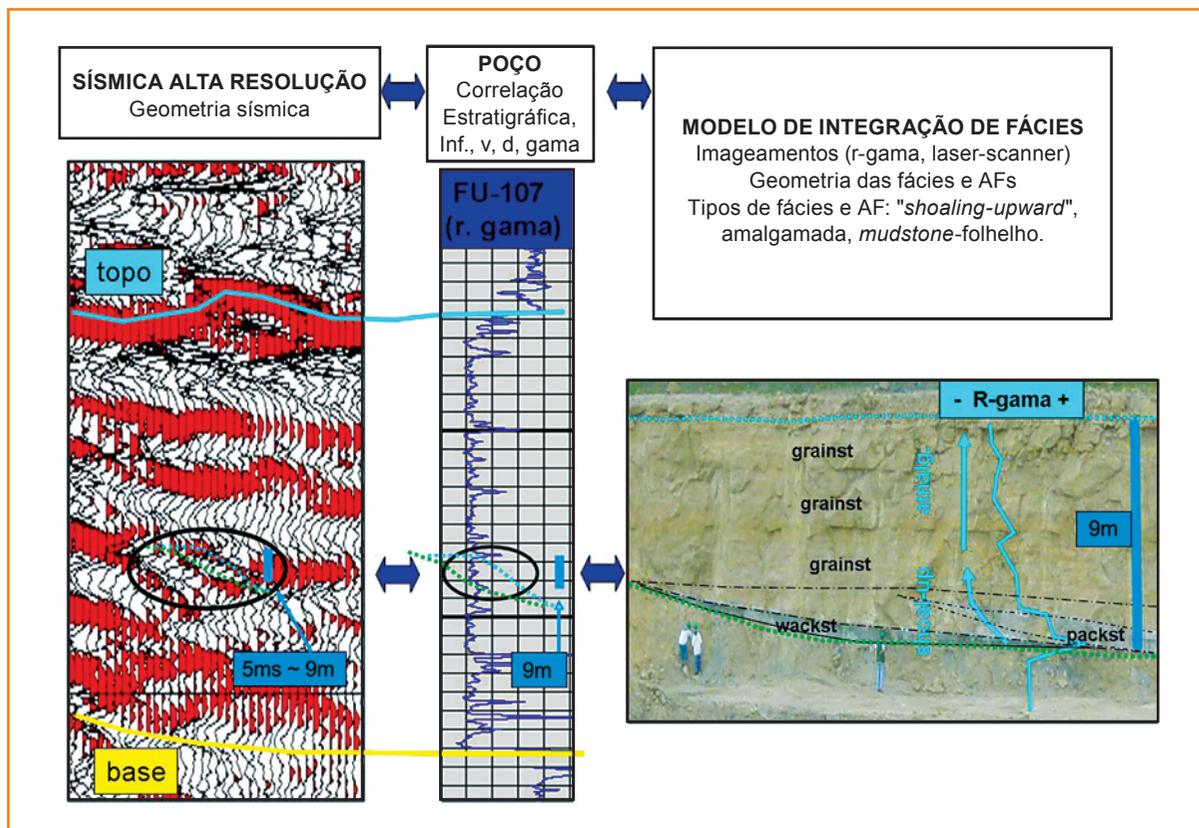


Figura 20
Modelo Sísmico-Geométrico de Fácies do afloramento. Correlaciona a sísmica de alta resolução com poços e este com o modelo de integração de fácies.

Figure 20
The outcrop Seismic-Geometric Facies Model. This model correlates the high-resolution seismic data with well data, and subsequently with the Integrated Facies Model.

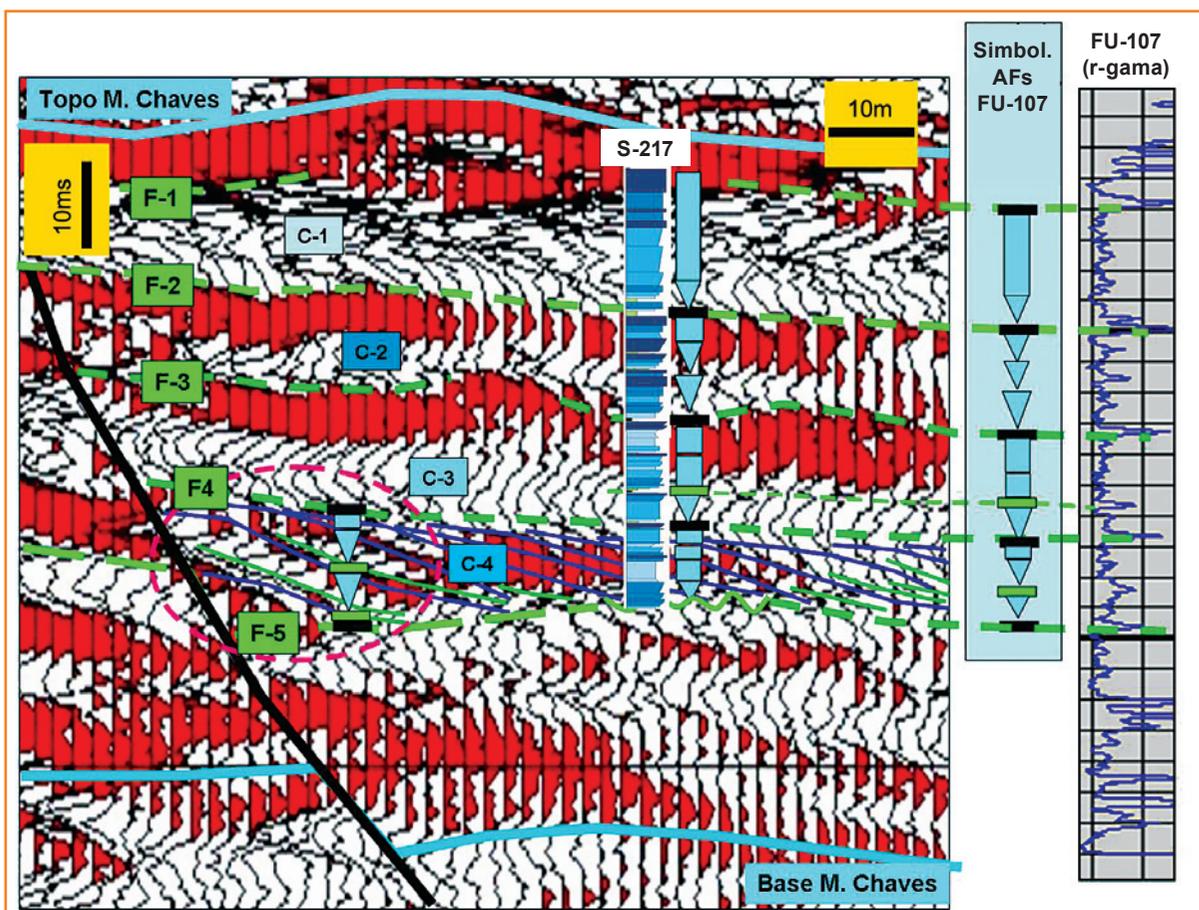


Figura 21
Trecho da seção preliminar de alta resolução da bancada-1 parcialmente interpretada, com destaque para a camada de coquinas C-4, onde se observa uma variação lateral de AFs (amalgamadas no alto estrutural e shoaling-upward nas laterais). A correlação do perfil da S-217 com o poço FU-107 é muito boa.

Figure 21
Part of the interpreted high-resolution seismic line of outthrust-1. In the C-4 bed can be observed a lateral variation of the facies associations (amalgamated in the high structure and shoaling-upward on the sides). There is a good correlation between the profile S-217 and well FU-107.

considerações finais

As associações de fácies predominantes no afloramento são as AFs de barras de coquinas (*grainstone/pacstone*) em *shoaling-upward* de geometria sigmoidal e AF de barras de coquinas (*grainstone*) amalgamadas de geometria tabular. A presença de geometria sísmica sigmoidal na linha sísmica de alta resolução bancada1 pode representar AF de barras de coquinas em *shoaling-upward*, e uma amplitude positiva pode corresponder à presença de AF de barras de coquinas amalgamadas. Essas interpretações sísmicas podem ser corroboradas pela correlação sísmica x poços (S-217 e FU-106).

De uma maneira geral, as AFs mais porosas são as barras de coquinas amalgamadas e em *shoaling-upward*. Esta última possuindo aumento da porosidade em direção ao topo, normalmente no seu terço superior. Essas observações no afloramento podem ser indiretamente correlacionadas com as informações dos poços do Campo de Furado e das sondagens contínuas analisadas por meio da relação r-gama poço-afloramento.

Os principais elementos estruturais presentes no afloramento possuem direção predominante nordeste e norte-sul. Em altos estruturais, as AFs de coquinas amalgamadas são predominantes e com espessuras mais delgadas e em baixos estruturais, as coquinas depositadas são mais espessas e apresentam-se preferencialmente em ciclos de *shoaling-upward*. A falha sin-deposicional presente na linha sísmica bancada1 mostra a presença de uma amplitude positiva no bloco alto (geometria tabular – AF de barras de coquinas amalgamadas) e geometria sigmoidal no bloco baixo (presença de AF de coquinas em *shoaling-upward*).

Os modelos de integração, estratigráfico-estrutural e de velocidade de fácies do afloramento construídos a partir de todas as informações geológico-geofísicas foram essenciais para a definição do modelo sísmico-geométrico de fácies.

O modelo sísmico-geométrico de fácies, considerado o resultado mais importante desse trabalho, possibilita relacionar as geometrias sísmicas presentes nas seções sísmicas de alta resolução com as formas geométricas das AFs presentes no afloramento. Em suma, é uma integração de todos os modelos disponíveis, com o objetivo de integrar os elementos geológicos simples à sísmica de alta resolução.

agradecimentos

À Petrobras, ao Convênio Cenpes-Petrobras/FINEP, a Universidade Federal do Paraná, ao meu orientador Dr. Sidnei Pires Rostirolla e aos meus amigos Ricardo Jahnert, Maria Dolores de Carvalho, Adali Spadini e Wagner de Souza Lima.

À minha esposa Sônia e meus filhos Elisa, Elton e Nicolas pelo incentivo ao longo desta dissertação.

referências bibliográficas

AZAMBUJA FILHO, N. C.; ARIENTI, L. M.; MELLO, M. R. Sedimentological and geochemical evidence of high frequency climatic cycles controlling the deposition of source and reservoir Rocks in a Lower Cretaceous Rift Lake, Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. In: AAPG ANNUAL MEETING, 1998, Salt Lake City, Utah, USA. **Abstracts...** Salt Lake City, 1998.

CAMPOS NETO, O. P. A.; LIMA, W. S.; CRUZ, F. E. D. Bacias de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 405-415, 2007.

CARVALHO, M. D.; PRAÇA, U. M.; SILVA-TELLES, A. C.; JAHNERT, R. J.; DIAS, J. L. Bioclastic carbonate lacustrine facies models in the Campos Basin (Lower Cretaceous), Brazil. In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. H.; KELTS, K. R. (Ed.) Lake basins through space and time. **AAPG Studies in geology**, v. 46, p. 245-256, 2000.

DUNHAN, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: HAM, W. E. (Ed.) **Classification of Carbonate Rocks**. Tulsa, 1962. p. 108-121 (AAPG Memoir, n. 1).

LANA, M. C. Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (Coord.) **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: Gávea; Petrobras, 1990. p. 311-332.

TUCKER, M. E.; WRIGHT, V. P. **Carbonate Sedimentology**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990. 482 p.

bibliografia

DIAS, J. L.; OLIVEIRA, J. Q.; VIEIRA, J. C. Sedimentological and stratigraphic analysis of the Lagoa Feia Formation, rift phase of Campos Basin, offshore Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 18, n. 3, p. 252-260, 1988.

LOMANDO, A. J.; HASHIMOTO, A. T.; AZAMBUJA FILHO, N. C.; RANGEL, M. D.; CRUZ, W. M.; HANASHIRO, M. Architectural characteristics within lacustrine carbonate reservoirs, Angola and Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. **Abstracts...** Rio de Janeiro, 2000.

SOUZA-LIMA, W.; ANDRADE, E. J.; BENGTON, P.; GALM, P. C. **A bacia de Sergipe-Alagoas**: evolução geológica, estratigrafia e conteúdo fóssil. Aracaju, Sergipe: Fundação Paleontológica Phoenix. Edição especial 1. 2002. 34p.

expanded abstract

Important volumes of hydrocarbons recently discovered in carbonate rocks in Brazil have motivated detailed studies of analogue rocks and their correlation with conventional seismic data. However, due to its high acoustic impedance, the correlation between carbonate rocks and seismic data is not straightforward. This study seeks to apply methods and models to connect the observed facies geometry and facies association in outcrops with seismic facies of a high-resolution seismic section acquired in situ.

The studied area is located 5km to the west of São Miguel dos Campos, in the Alagoas State, Sergipe-Alagoas Basin, northeastern Brazil. In this area, lacustrine carbonate rocks (coquinas) of the Morro do Chaves Formation, are exposed. These rocks may be correlated with the coquinas of the Lagoa Feia Formation, which are considered important hydrocarbon reservoirs in the Campos Basin. Currently, the CIMPOR Company extracts these coquinas for cement manufacture and Petrobras produces gas from sandstone reservoir rocks from older formations (Furado Field).

The study was divided into two basic phases: (1) geologic analysis and (2) acquisition of different types of images of the outcrop. In the first phase, different facies and facies associations were identified and a relationship between geometric and porosity variations in the rock with sin-depositional activity of faults was established. Also, additional information was obtained from shallow drill hole S-217 and the development well FU-125 of the Furado Field. In the second phase Laser-scanner three-dimensional (3D) topographic images were acquired, together with direct gamma-ray measurements in the facies associations and a high-resolution seismic line parallel to the exposed rocks (outthrust-1).

The geologic analysis showed that the coquinas are characterized by the presence of "shoaling-upward" and amalgamated grainstone and packstone bars separated by thin beds of mudstones-black shales. The coquinas in the "shoaling-upward" cycle possess sigmoidal geometry and better porosities in the upper third portion of the bars, and the amalgamated coquinas exhibit tabular geometry and predominantly good porosity in all bars.

The measurements of fractures and faults directions indicate the structural trend is predominantly northeast, N-S to N47E directions. Good exposures of these faults facilitated the recognition of their influence on the facies deposition and facies associations. In the lower blocks the facies associations exhibit thicker "shoaling-upward" grainstone and packstone bars, while in the higher blocks are thinner amalgamated grainstone bars. It was also observed that the best porosities are generally located in the higher blocks. Sonic velocities, gamma-ray, densities and porosities of the facies and AFs were obtained from well FU-125 and facies variations and qualitative porosities from shallow drill hole S-217.

An integrated 3D-image of the whole outcrop was generated with the Laser-scanner 3D topographic imager. Most discontinuities, such as beds or stratification limits, tops of facies associations and faults were identified. The correlation between the direct measurements of gamma-rays from the facies associations with the FU-125 gamma-ray provided the corresponding values of sonic velocity, porosity and density.

The first model generated from the integration of petrophysical data with the 3D-images resulted in the Integrated Facies Model. This model contains the relationship between the facies, facies associations and their geometries with the corresponding values of sonic velocity, density and porosity. Therefore, it's possible to correlate the exposed coquinas with those drilled in any well in the area or indirectly with similar sequences in any other basin.

The second model, defined as the Stratigraphic-Structural Facies Model, was the result of the combination of the Integrated Facies Model with an integrated 3D-image of the whole outcrop. This model served as the input for an Acoustic 2D Simulation that generated different versions of synthetic seismic sections of the outcrop by changing the percentage values of the sonic velocities.

The high-resolution seismic line of outthrust-1 was acquired in the N-S direction, parallel to the exposed coquinas and its initial section was used to compare the accuracy of the different generated synthetic seismic sections. The best version was where the facies associations velocities were reduced about 20% in the velocity model, to account for the difference in depth between the outcrop and well FU-125. As a result the third model was defined as the Facies Velocity Model.

The combination of the three models described above, resulted in the Seismic-Geometric Facies Model. This model facilitated the seismic geometries observed in the high-resolution seismic sections to be correlated with the architectural facies elements of lacustrine carbonate rocks.

A seismic interpretation based on the Seismic-Geometric Facies Model carried out in the out-thrust-1 seismic section, revealed that in the lower block of a sin-depositional fault there was a predominance of sigmoid geometries. These seismic geometries are represented by thick grainstones and packstones in "shoaling-upward" bars. In a higher structural position was a high amplitude reflector represented by thinner concentrated

amalgamated grainstone bars. This observation is corroborated by S-217 information that also presents good porosities. This proved that the observed geometries of seismic facies in the high-resolution seismic section were related to the facies and facies associations in the outcrop.

Results from this study indicate that the Seismic-Geometric Facies Model may be applied in hydrocarbon exploration and production activities. Even though this study was developed in the Sergipe-Alagoas Basin, its findings can provide important stratigraphic-structural elements of data to better understand the distribution of reservoir facies in the litho-stratigraphic lacustrine carbonate rocks of the Lagoa Feia Formation, Campos Basin.

autores



Eliseu Massaaki Kinoshita
Internacional América Latina
Petrobras Colômbia
E&P UN-COL
Gerência de Ativos Offshore

e-mail: eliseuk@petrobras.com.br

Eliseu Massaaki Kinoshita geólogo formado pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) em 1981 e trabalha na Petrobras desde 1982. Possui especialização em Geofísica pelo CAGEF/86 e Mestrado em Geofísica (UFPR) em 2007. Como geofísico intérprete atuou nas Bacias do Solimões, Médio-Amazonas, Tacutu, do Paraná, Tucano-Jatobá, Cumuruxatiba, Sergipe-Alagoas, Campos e Espírito-Santo. Atualmente trabalha na Colômbia como geofísico intérprete nas áreas onshore e offshore.

