

CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA DOS CARBONATOS ALBIANOS DO RESERVATÓRIO QUISSAMÃ NA PORÇÃO MERIDIONAL DA BACIA DE CAMPOS

Julia FAVORETO¹, Rosemarie ROHN², Ricardo LYKAWKA³, Juliana OKUBO¹

- (1) Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro (SP), Brasil. Endereços eletrônicos: juliafavoreto@yahoo.com.br; juokubo@rc.unesp.br.
(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro (SP), Brasil. Endereço eletrônico: rohn@rc.unesp.br.
(3) Petrobras, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. Endereço eletrônico: rlykawka@petrobras.com.br.

Introdução
Contexto geológico regional
Formações Quissamã e Outeiro
Materiais e métodos
Fácies e associação de fácies
Associação de fácies I
Interpretação
Associação de fácies II
Interpretação
Associação de fácies III
Interpretação
Associação de fácies IV
Interpretação
Sucessão vertical de fácies e análise de ciclicidade
Evolução diagenética
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Rochas carbonáticas albianas da Formação Quissamã do sul da Bacia de Campos (RJ) e a Formação Outeiro são descritas em detalhe, com ênfase à petrologia, petrografia, ciclicidade, paleoambientes e diagenese. Foram reconhecidas seis litofácies na Formação Quissamã, principalmente *grainstones* e *packstones* (raros *wackestones*) com grãos carbonáticos compostos por ooides, oncoides, peloides e alguns bioclastos (moluscos, equinoides, microfósseis bentônicos). Sucessões de *packstones* peloidais/bioclasticos para *grainstones* representam típicos ciclos de alta frequência que representam a passagem de paleoambientes deposicionais relativamente profundos/calmos para rasos/com maior energia (“arrasamento ascendente”). O presente trabalho corrobora interpretações anteriores de que a Formação Quissamã foi originada numa rampa carbonática rasa, onde águas agitadas moldaram uma série de grandes bancos paralelos à costa constituídos por grãos carbonáticos. Desta forma, as outras fácies da formação (principalmente *packstones*) representam condições mais calmas nos flancos dos bancos e regiões de interbancos. Oncoides rudáceos formaram-se mais comumente na porção oeste do flanco, portanto em áreas mais protegidas, onde comunidades microbianas encontravam condições propícias para o seu desenvolvimento. Há evidências de retrabalhamentos por tempestades. A Formação Outeiro apresenta *mudstones* e *wackestones*, com microfósseis de organismos planctônicos marinhos distais gradualmente mais abundantes a partir da base, representando contexto transgressivo, em águas cada vez mais profundas. Há evidências de processos de micritização, compactação mecânica, dissolução, cimentação (franja, mosaico e sintaxial) atribuídos à eodiagenese, assim como compactação química e cimentação blocosa em fraturas, referentes à mesodiagenese.

Palavras-chave: Cretáceo, rampa carbonática, Bacia de Campos

ABSTRACT - Albian carbonates rocks of Quissamã Formation from the southern of Campos Basin (RJ) and the Outeiro Formation are described in detail, with emphasis on petrology, petrography, cycles, paleoenvironments and diagenesis. Six lithofacies were recognized in the Quissamã Formation, mainly grainstones and packstones (rare wackestones) with carbonate grains composed of ooids, oncoids, peloids and some bioclasts (mollusks, echinoids, benthonic microfossils). This study confirms previous interpretations that the Quissamã Formation was deposited in a shallow carbonate ramp with a set of banks oriented parallel to the coast composed of carbonate grains. The other facies (mainly packstones) represent the flanks of banks and interbank regions, deposited under lower energy conditions. Rudaceous oncoids were most commonly formed in the protected areas at the western flank of the bank, where microbial communities found the most favorable life conditions. There is evidence of reworking of grains by storms. Successions composed of peloidal/bioclastic packstones grading to grainstones are similar to typical high-frequency cycles which represent the transition from a relatively deep/low energy to a shallow/higher energy depositional environment (shallowing upwards successions). The Outeiro Formation has mudstones and wackestones, with distal marine planktonic organisms becoming more abundant from the base. This unit is ascribed to a transgressive context in gradually deeper environments. The diagenetic history of the rocks encompassed, during the eodiagenesis, micritization, mechanical compaction, dissolution, cementation (mainly fringe, mosaic and syntaxial cementation) and, during mesodiagenesis, chemical compaction and blocky cementation in fractures.

Key-Words: Cretaceous, carbonate ramp, Campos basin

INTRODUÇÃO

Aproximadamente a metade do petróleo e do gás em produção no mundo é explotado em rochas-reservatório carbonáticas (Mazzullo, 2004). Em geral, tais reservatórios têm distribuição relativamente heterogênea e são complexos em termos de permo-porosidade, variando conforme uma intrincada combinação de processos deposicionais e diagenéticos (Falkenhein 1981; Azevedo et al. 1987; Baumgarten & Scuta 1988; Spadini et al. 1988; Azevedo 2001). A partir das descobertas de óleo no chamado “Pré-Sal” do Brasil, vem

sendo empreendidos detalhamentos dos reservatórios através de diversas ferramentas.

Os carbonatos albianos da Bacia de Campos, pertencentes a Formação Quissamã (Figura 1A), enquadram-se nesse contexto. O presente trabalho apresenta os resultados de um estudo integrado de um campo de óleo de 16 km² do reservatório Quissamã localizado na porção meridional dessa bacia (Figura 1B). Aqui são caracterizadas as fácies carbonáticas, as associações de fácies, o arranjo cíclico das fácies e as feições diagenéticas.

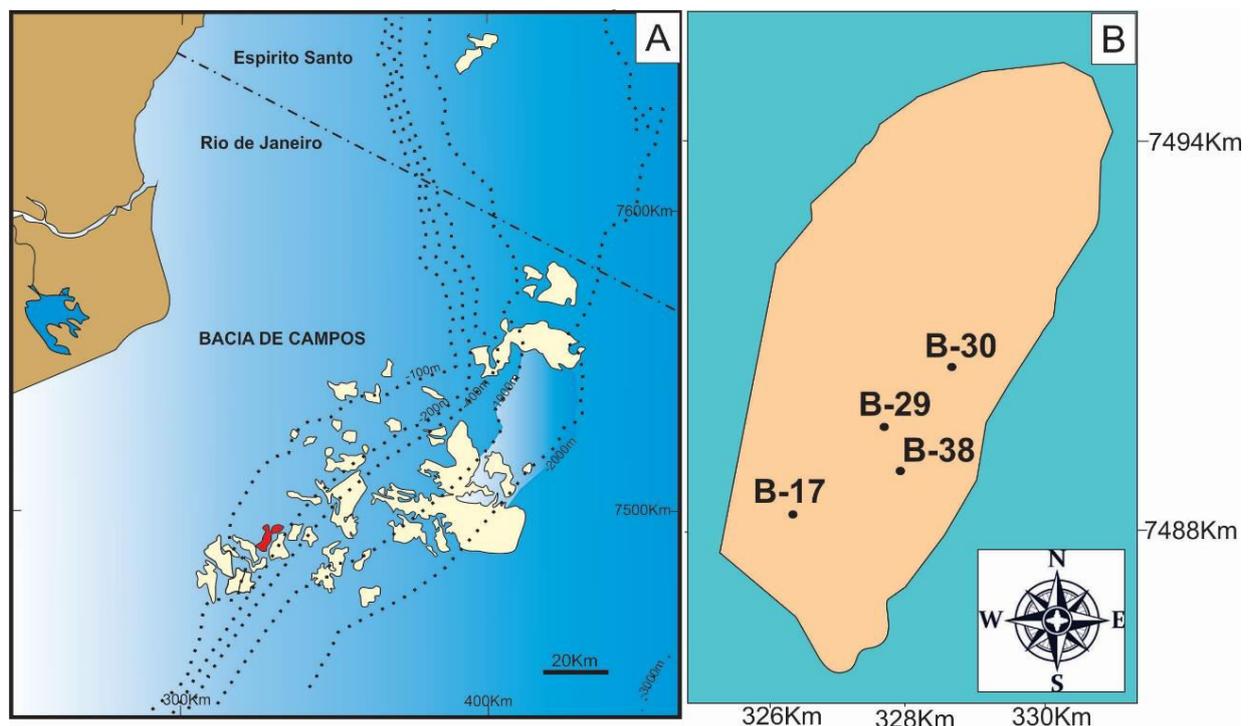


Figura 1. A) Mapa de localização da Bacia de Campos com campos petrolíferos e principais reservatórios. O campo estudado está indicado pela seta. Modificado de Bruhn et al. (2003); B) Detalhe do campo petrolífero e localização dos quatro poços testemunhados aqui descritos.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Bacia de Campos faz parte de um conjunto de bacias costeiras do Brasil relacionadas à abertura do Oceano Atlântico a partir do Eocretáceo. Compreende 500 km² e estende-se *offshore* até a isóbata de 3.400 m. É limitada a norte pelo Alto de Vitória e a sul pelo Alto do Cabo Frio.

A evolução tectono-sedimentar da Bacia de Campos foi discutida por diversos autores (Asmus, 1975; Asmus & Guazeli, 1981; Guardado et al. 1989; Dias et al. 1990; Mohriak et al. 1990; Chang et al. 1970; Cainelli & Mohriak 1998; Guardado et al. 2000), entre

outros. Winter et al. (2007), numa das últimas sínteses publicadas sobre a bacia, enquadraram sua evolução em três supersequências: Rife, Pós-rife e Drifte. As formações Quissamã e Outeiro, aqui tratadas, encontram-se na Supersequência Drifte, a qual apresenta paleoambientes deposicionais já francamente marinhos (Dias-Brito, 1982; Azevedo et al., 1987; Spadini et al., 1988 e Azevedo, 2001).

Formações Quissamã e Outeiro

A Formação Quissamã é constituída quase inteiramente por rochas carbonáticas,

possui espessura aproximada de 800 m e distribui-se ao longo de uma faixa com direção NE-SW. Esta unidade tem, como limite inferior, contato abrupto com a Formação Retiro, composta principalmente por halita. O limite superior corresponde a uma superfície de inundação máxima, denominada como Marco Glauconítico (Winter et al. 2007; Spadini, et al. 1988).

A Formação Outeiro possui até 300 m de espessura, é constituída por calcilitos com microfósseis planctônicos e porções intercaladas de margas e folhelhos (Spadini et al. 1988; Dias-Brito 1982).

O modelo deposicional para a Formação Quissamã proposto por Guardado et al. (1989) pode ser sintetizado como uma rampa suave com águas muito rasas, na qual existiam

bancos de alta energia na orientação NE e depressões interbancos (respectivamente para rochas do tipo *grainstones* e *packstones*). Ao mesmo tempo, na porção NW da bacia, ocorria a sedimentação da Formação Goitacás, em condições mais proximais com fandeltas.

A partir do mesoalbio, o campo em estudo esteve sujeito a modificações estruturais, com arqueamentos gerados por suaves almofadas de sal (Baumgarten & Scuta, 1988) e falhamentos lístricos, o que estabeleceu uma nova fisiografia deposicional. Dessa forma, as transformações da topografia de fundo por halocinese influenciaram fortemente a faciologia e a geometria externa dos corpos, além do controle pelas oscilações do nível do mar e pelo regime hidrodinâmico associado (Spadini, 1992).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do campo selecionado, a Petrobras forneceu aproximadamente 400 m de testemunhos de quatro poços (Figura 1B), 172 lâminas delgadas e dados de petrofísica básica dos testemunhos disponibilizados. Os testemunhos, os quais abrangem a porção superior da Formação Quissamã e a porção basal da Formação Outeiro, foram descritos em detalhe através da confecção de perfis colunares na escala 1:25 (Favoreto, 2014), aqui reproduzidos menores, por conta das limitações da publicação. Nesta primeira etapa, as rochas carbonáticas foram classificadas conforme Folk (1962). As lâminas delgadas disponíveis são abrangentes em termos da variedade de litologias macroscópicas reconhecidas. Para as lâminas, foi adotada a classificação petrográfica de carbonatos de Dunham (1962). O conjunto de dados, com adição das principais

características micropaleontológicas, fundamentou o estabelecimento de fácies carbonáticas na concepção de Walker (1992), denominadas por um código composto por uma letra maiúscula para a classificação petrográfica (*G = grainstone*, *P = packstone*, *M = mudstone*) e letras minúsculas para outras feições marcantes. As fácies foram agrupadas em associações de acordo com a sua relação espacial preservada e a sua relação inferida para os ambientes deposicionais. As fácies e as associações de fácies também foram analisadas em termos de ciclicidade, com indicação dos resultados junto aos perfis colunares. De acordo com as observações petrográficas, os dados de permo-porosidade fornecidos pela Petrobras e o contexto paleoambiental, foi esboçada a evolução diagenética das rochas carbonáticas.

FÁCIES E ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES

O quadro 1 sintetiza as fácies carbonáticas das formações Quissamã e Outeiro dos testemunhos dos quatro poços do campo de petróleo estudado. As fácies comumente se alternam com outras e podem ter coexistido lateralmente no mesmo contexto ambiental. Assim, as descrições detalhadas de algumas feições e as interpretações são apresentadas no âmbito das associações de fácies, a seguir.

Associação de fácies I

Essa associação compreende *grainstones* oolíticos (Go) (Figuras 2A, 2B e 2C) e *grainstones* oolíticos peloidais com oncoides (Gopo) (Figuras 2D, 2E e 2F). Pode alcançar até 30 m de espessura, principalmente no poço B-30.

Os *grainstones* oolíticos são compostos por ooides de granulação fina a média, esféricos a sub-esféricos, bem selecionados. Os ooides

geralmente estão micritizados e podem ter os núcleos compostos por grãos de quartzo (angulosos a sub-angulosos), especialmente no poço mais setentrional. Raramente ocorrem bioclastos de bivalves, espinhos de equinóides e foraminíferos aglutinantes. O arcabouço de rocha é aberto (Figura 2C), mas ocorrem situações onde os grãos se tocam pontual e/ou tangencialmente (Figura 2B). A rocha apresenta cimentação em mosaico de calcita espática e em franja prismática, fraturas verticais a sub-verticais. Ocorre porosidade primária interconectada principalmente no poço B-30 e secundária por dissolução móldica parcial e alargamento de fraturas, nos poços B-17, B-38 e B-29. A fácies *grainstone* oolítico peloidal com oncoides é mal selecionada, bioturbada e com fraturas subverticais (Figuras 2D, 2E e 2F).

Fácies	Classificação petrográfica	Principais características macroscópicas e petrográficas	Figuras
FORMAÇÃO OUTEIRO	Wpbm	Wackestone peloidal bioclástico intercalado com marga	Figura 3H
	M	Mudstone	Figuras 3G, 7G e 7H.
	Wb	Wackestone bioclástico	Figuras 3E e 3F.
FORMAÇÃO QUISSAMÃ	Ppb	Calcarenito fino, acastanhado, bioturbado, com abundantes peloides e bioclastos de bivalves (inoceramidos), foraminíferos aglutinantes, espinhos e placas de equinóides e ostracodes.	Figura 3C e 3D.
	Ppo	Packstone/grainstone peloidal com oncoides	-
	Go	Calcarenito de composição unimodal, com ooides micritizados e nucleados por quartzo. Raramente ocorrem bioclastos de bivalves, espinhos de equinóides, gastrópodes, fragmentos de tubos de vermes e foraminíferos aglutinantes.	Figuras 2A, 2B, 2C, 7A, 7B, 7C, 7D, 7E e 7F.
	Gopo	Calcarenito de composição bimodal, mal selecionado, com oncoides e ooides micritizados. Oncoides são frequentemente nucleados por bivalves, gastrópodes, placas de equinóides e raras algas vermelhas (<i>Marinella</i> sp.). Bioclastos de foraminíferos porcelânicos e aglutinantes dispersos na rocha.	Figuras 2D, 2E e 2F.
	Ppor	Packstone peloidal com oncoides rudáceos	Figuras 3A e 3B.
Wp	Wackestone/packstone peloidal	Calcilutito parcialmente dolomitizado. Apresenta grande quantidade de estilólitos e raros bioclastos de gastrópodes.	-

Quadro 1. Fácies discriminadas nos testemunhos de poços do reservatório Quissamã.

Em geral, os oncoides têm formato sub-esférico a ovalado e dimensões variando de 0,5 a 1,5 cm. São frequentemente nucleados por bivalves, gastrópodes, fragmentos de placas de equinoides, quartzo e raramente por algas vermelhas (Figura 2E). O arcabouço de rocha é relativamente aberto, com contatos pontuais a interdigitados entre os grãos. Os ooides tem de 0,1 a 0,3 cm de diâmetro, arredondados. A fácies apresenta cimentação em franja prismática e em mosaico, com porosidade móldica parcial e interpartícula.

Essa associação de fácies, especialmente no poço B-30 apresenta minerais silicáticos (quartzo, mica e K-feldspato), tanto nos núcleos dos ooides e oncoides, quanto dispersos entre os grãos.

Interpretação

A associação reflete condições de alta (fácies Go) a moderada (fácies Gopo) energia. Os *grainstones* oolíticos foram depositados por fluxo ativo oscilatório/turbulento na crista de um banco carbonático, onde havia contínua agitação por ação de correntes/ondas. Essas condições são inferidas pelo grau de seleção, arredondamento, ausência de cimento marinho e raros bioclastos. Os *grainstones* oolíticos peloidais com oncoides formaram-se em posição adjacente às fácies Go, na borda de banco.

A interpretação de que as fácies suportadas por grãos representem a porção superior de um banco carbonático é coerente em relação ao modelo proposto por Guardado et al. (1989) para a Formação Quissamã. Dos quatro poços estudados no presente trabalho, três estão praticamente alinhados na direção NE ao longo de ~4 km. A posição do quarto poço é ligeiramente para leste. A análise de dados sísmicos, indica continuidade lateral dos refletores quando ajustados para as fácies descritas, portanto, todos os poços perfuraram carbonatos que pertenceram a um único grande banco, com muitos quilômetros de extensão e cerca de 2 a 4 km de largura e poucos metros de espessura.

O fato de existir maior proporção de grãos de quartzo, K-feldspato e micas no poço setentrional deve refletir a sua maior proximidade a um alto estrutural local.

Igualmente, a maior proporção da associação I em tal poço sugere que o paleoambiente do norte da área de estudo mais frequentemente esteve raso, com alta energia, isto é, apresentava tendência de subsidência menor do que as áreas meridionais. O desenvolvimento de altos estruturais foi comum durante o Albiano face aos processos de halocinese e falhamentos lístricos nas regiões proximais da Bacia de Campos, cerca de 100 a 200 km a partir do litoral (Baumgarten & Scuta, 1988; Demercian et al. 1993).

Associação de fácies II

Corresponde à associação de fácies *packstone* peloidal com oncoides rudáceos (Ppor) (Figuras 3A e 3B) e *grainstone* oolítico (Go).

A rocha Ppor é mal selecionada pelas dimensões variáveis dos oncoides, atingindo 2,5 cm de diâmetro. Os oncoides apresentam laminações irregulares, alternando-se lâminas com maior ou menor cimentação, compostas por uma associação provavelmente de picnoporídeos e *Bacinella*. Os oncoides desenvolveram-se em torno de bivalves (Figura 4B), fragmentos de espinhos de equinoides e tubos de vermes. O arcabouço da rocha é relativamente fechado e a cimentação é total (mosaico de calcita espática). Os *grainstones* oolíticos são pouco espessos, entre um e dois metros.

Interpretação

Essa associação de fácies corresponde às bordas do banco carbonático, onde ainda havia influência de ondas/ fluxos de marés, porém com energia e/ou frequência menor. Os oncoides se desenvolveram devido à menor energia do ambiente, porém a presença de *grainstones* oolíticos indica a proximidade à crista do banco carbonático.

Associação de fácies III

Essa associação de fácies é representada principalmente pela fácies *packstone* peloidal com oncoides rudáceos (Ppor) e *grainstone* oolítico (Go), descritas anteriormente. Estão organizadas como camadas delgadas (de 20 a 30 cm) alternadas.

Os *packstones* peloidais (Figuras 3C e 3D) são rochas mais finas com matriz micrítica a micro-peloidal. Apresentam alguma cimentação em mosaico e porosidades secundárias (dissolução interpartícula).

A fácies Ppo possui oncoides tanto regulares/pequenos quanto irregulares/rudáceos micritizados, cujos núcleos são bioclastos (bivalves, gastrópodes e fragmentos de tubos de verme) ou com menor frequência grãos de quartzo. Os oncoides, como na associação anterior, possuem lâminas irregulares. Geralmente o fraturamento é expressivo, onde ocorre alargamento de porosidade por dissolução, acima do contato óleo/água. Abaixo desse contato os canais estão totalmente preenchidos por cimento em mosaico.

A diferença entre as fácies Ppb e Ppo se faz pela proporção de bioclastos e de oncoides. Posto isso, as variações observadas ao longo do testemunho mostram passagem gradual de uma fácies para outra. A grosso modo, as variações vão de granulação fina e textura bem selecionada (Ppb) para granulação heterogênea e textura mal selecionada (Ppo).

A fácies Wp tem alta proporção de micrita e foraminíferos porcelânicos – miliolídeos.

Interpretação

As características faciológicas dessas fácies e sua organização como camadas delgadas alternadas podem indicar a presença de pequenas depressões dentro do banco carbonático, as quais representariam sub-ambientes de menor energia em que se depositou lama carbonática juntamente com oncoides rudáceos similares aos da associação de fácies II. Outra possível interpretação para esta fácies é a deposição em regiões protegidas das ondas atrás de barreiras.

A fácies Ppo pode indicar conexão com a porção do banco em condições de maior energia (associação de fácies I). A mistura de grãos formados em condições hidrodinâmicas distintas sugere retrabalhamentos esporádicos durante tempestades e/ou marés de sigízia, ou ainda correntes de retorno.

Os foraminíferos miliolídeos da fácies Wp são relacionados a águas hipersalinas, em ambientes confinados (Debenay & Guillou 2002). Portanto, esta fácies mais micrítica pode

indicar condições de águas calmas proximais em relação ao banco carbonático.

Associação de fácies IV

Essa associação de fácies é formada por calcários finos (fácies Wpbm, M, Wb), podendo alcançar até 34 m de espessura (poço B-17), correspondentes às rochas da Formação Outeiro.

A fácies *wackestone* bioclástico (Wb) (Figuras 3E e 3F) está na passagem da Formação Quissamã para a Outeiro. A rocha apresenta uma trama complexa, composta por intraclastos, de aspecto brechoide podendo variar de texturas *grainstone* a *wackestone* e preenchimento geopetal. É totalmente cimentada por calcita espática em mosaico fino. Contém glauconita, fósseis de ambientes plataformais (gastrópodes, bivalves inoceramídeos, equinoides, algas vermelhas) e de ambientes mais profundos (foraminíferos uni e bisseriados, *Favusella washitensis*, *Pithonella sphaerica*).

Na fácies *mudstone* (Figura 3G), foram identificados foraminíferos planctônicos (*Favusella washitensis*, radiolários, *Pithonella sphaerica*) e fósseis bentônicos (raros bivalves, equinoides e ostracodes). Nota-se pirita framboidal no interior de alguns foraminíferos planctônicos. A fácies Wpbm (Figura 3H) compõe-se de um *wackestone* peloidal bioclástico intercalado por marga. Os contatos são gradacionais ou abruptos com a marga, chegando a espessuras aproximadas de 40 cm. Ocorre intensa bioturbação e nódulos calcíticos cimentados de 2 a 5 cm dispersos principalmente no *wackestone*.

Interpretação

As características faciológicas desta unidade indicam contexto ambiental de menor energia e início de aporte siliciclástico.

A fácies Wb representa uma diminuição de energia no sistema à medida em que o nível relativo do mar subia. O aspecto brechoide, a composição fóssilífera (tanto planctônicos quanto bentônicos) e o aspecto peloidal ainda evidenciam certa proximidade aos ambientes rasos. Essa fácies, sotoposta pelas fácies M e Wpbm ricas em pitonelídeos, radiolários e *Favusellas washitensis*, demonstram condições de mar aberto, com lâmina de água podendo

alcançar até 50 m (Koutsoukos & Dias-Brito, 1987).

As intercalações de margas representam eventos de maior aporte de terrígenos à bacia;

ao contrário, a presença da glauconita denota diminuição do aporte em sedimentos e condições de anoxia.

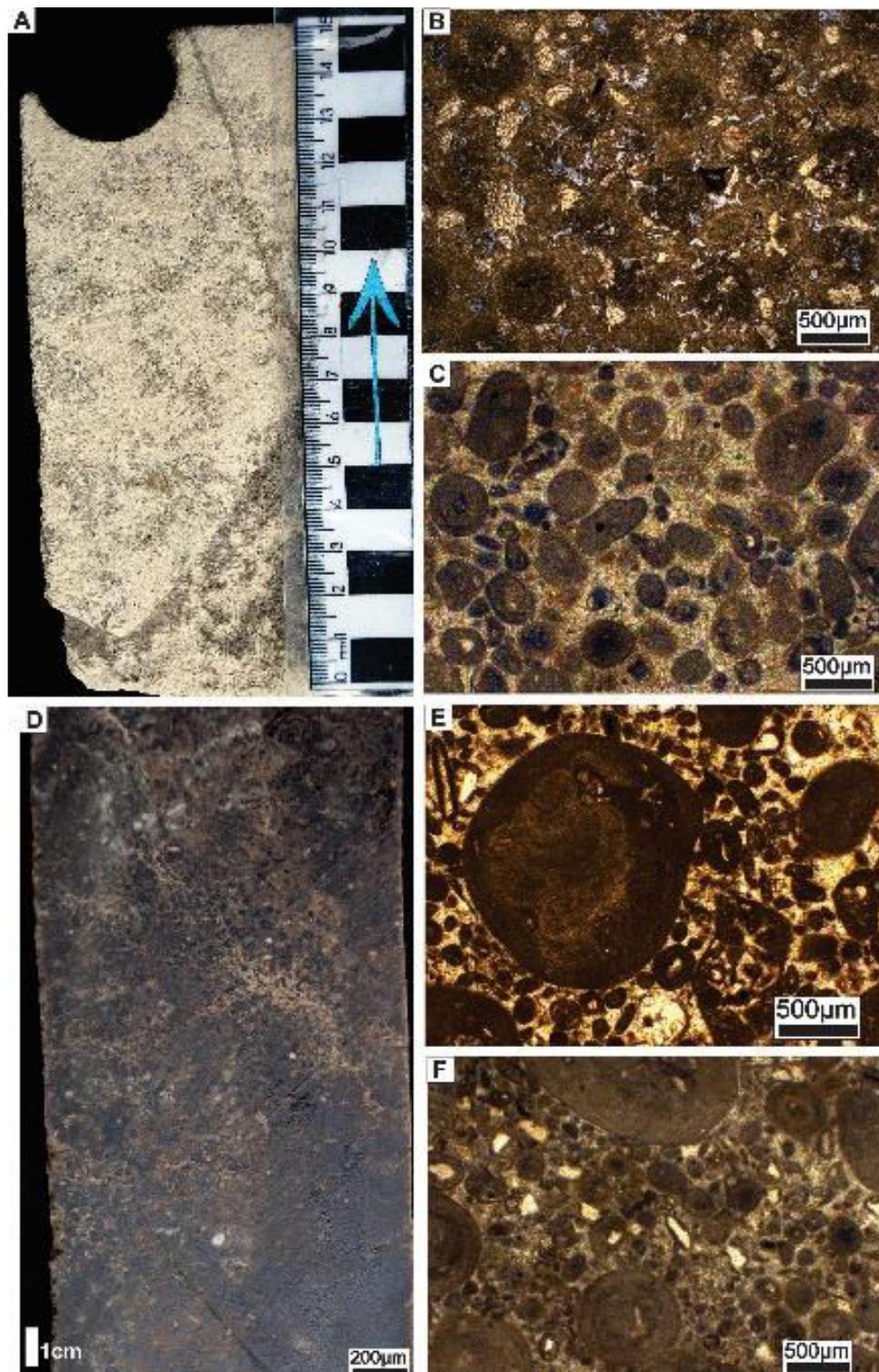


Figura 2. Associação I composta por calcarenito/ *grainstone* oolítico (Fácies Go, figs. A, B e C) e calcarenito/*grainstone* oolítico peloidal com oncoides (Fácies Gopo, figs D, E e F). **A)** Calcarenito com aspecto mosqueado e fraturas saturadas em óleo (poço B-17, testemunho #25, caixa 3/4). **B)** *Grainstone* oolítico com grãos de ooides micritizados, às vezes desenvolvidos ao redor de grãos de quartzo, com arcabouço relativamente aberto e porosidade intergranular conectada (B-30, prof.2430,1m). **C)** *Grainstone* oolítico que inclui ooides subsféricos ou agregados de ooides micritizados, com cimentação em mosaico de calcita espática, de arcabouço aberto e porosidade gerada por dissolução nas lamelas dos ooides (móldica parcial). **D)** Calcarenito com saturação em óleo e níveis bioturbados mais cimentados (B-17, #18, caixa 5/8). **E)** *Grainstone* oolítico peloidal com oncoides, completamente

cimentados, sendo todos os grãos micritizados, mal selecionados, às vezes com *Marinella* sp. como núcleo dos oncoides (B-17, prof. 2437m, #20, caixa 4/5); **F)** *Grainstone* oolítico peloidal com oncoides mal selecionados, incluindo foraminífero porcelânico (indicado pela seta amarela), e total cimentação (em mosaico de calcita espática) (B-17, prof. 2428,5m, #19, caixa 3/7).

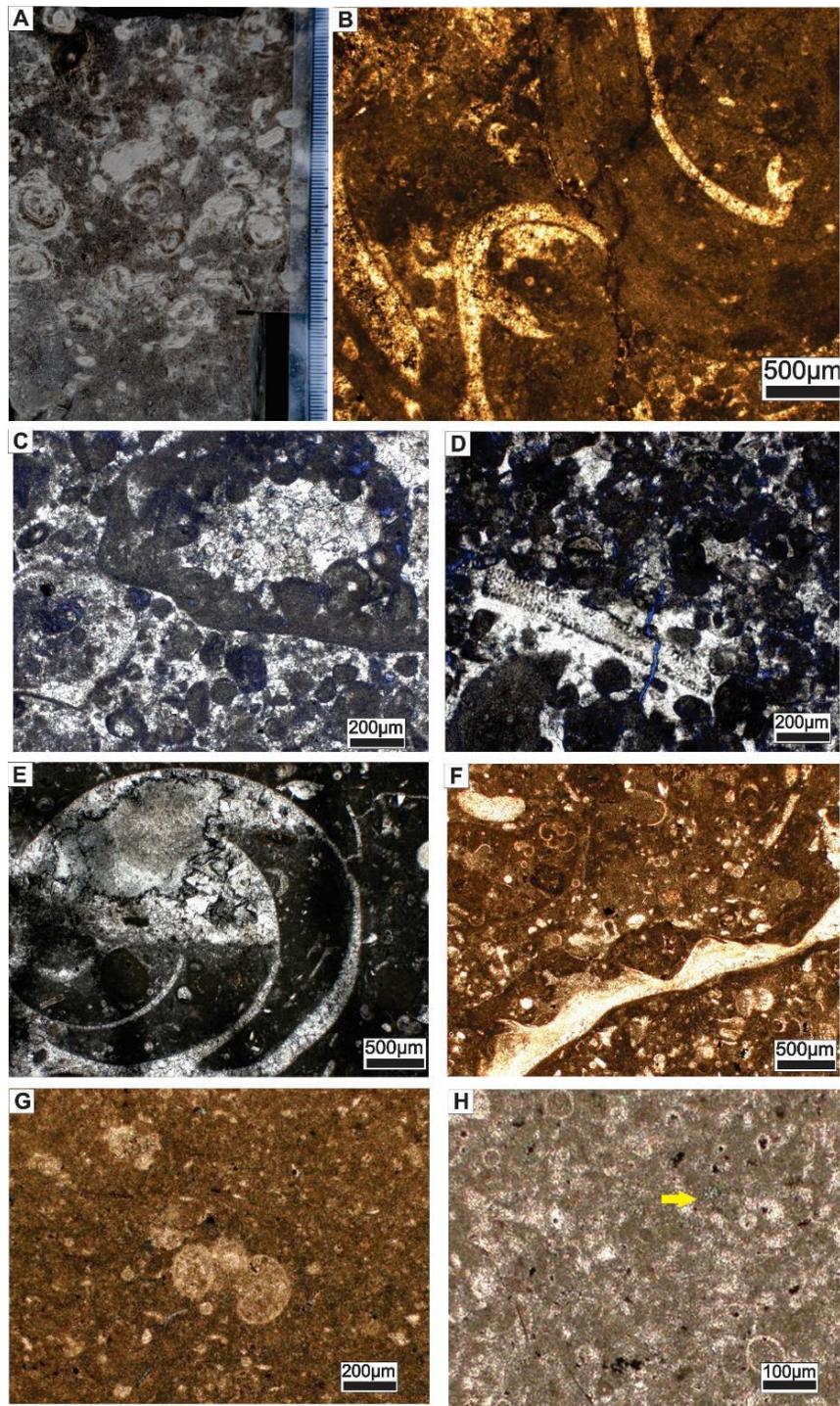


Figura 3. Exemplos das associações de fácies II, III e IV. **A)** *Packstone* peloidal com oncoides rudáceos; observar as lâminas irregulares dos oncoides (poço B-17, #29, caixa 2/9). **B)** Contato interdigitado entre dois grãos de oncoides dessa mesma fácies (Fácies Ppor), onde estes estão nucleados por fragmentos de bivalves (B-17, prof. 2512,65 m, caixa 6/9). **C)** *Packstone* peloidal/bioclastico com matriz micrítica e cimentação em mosaico de calcita espática. Fóssil de foraminífero aglutinante com núcleo recristalizado. Porosidade incipiente, móldica parcial (dissolução) (B-17, prof. 2397,95m; #15, caixa 2/4); **D)** Fácies Ppb com matriz micrítica e cimentação em mosaico de calcita espática. Bioclasto de espinho de equinóide com cimento sintaxial com possível bioclasto de alga vermelha. Porosidade em canais de fraturas e intergranular. Fraturamento posterior à cimentação (B-17, prof. 2397,95m; #15, caixa 2/4). **E)** Fácies *wackestone* bioclastico, gastrópode, parcialmente recristalizado, em matriz micrítica, com preenchimento também micrítico, com glauconita e foraminíferos planctônicos. Nota-se a clara diferença no preenchimento superior do

gastropodo, representando feição geopetal (B-17, prof. 2391,85m; #13, caixa 3/4). **F)** Fácies Wb, onde a matriz micrítica contém foraminíferos planctônicos, placa de equinoide e bivalve, sendo este último envolvido por crosta micrítica (B-17, prof. 2391,85m; #13, caixa 3/4). **G)** Fácies *mudstone*, cuja matriz micrítica contém foraminíferos planctônicos e *Favusella washitensis*. (B-17, prof. 2378,8m; #10, caixa 1/3). **H)** Fácies *wackestone* peloidal intercalado com marga. Na matriz micrítica há foraminíferos planctônicos. Mineral opaco (pirita) ocorre disperso na rocha ou como preenchimento dos microfósseis. Também há glauconita (indicado pela seta amarela) (B-17, prof. 2356,5m; #8, caixa 2/9).

SUCESSÃO VERTICAL DE FÁCIES E ANÁLISE DE CICLICIDADE

As sucessões cíclicas reconhecidas no campo em estudo não foram classificadas numa ordem hierárquica definida (por exemplo, ciclos de 3ª, 4ª ou 5ª ordem), devido à falta de marcadores precisos, em escala de bacia/regional, que pudessem indicar os intervalos de tempo envolvidos. Optou-se por definir hierarquia de alta frequência, em escala de testemunho.

Detalhando as descrições das associações e sucessões de fácies, o empilhamento vertical permite reconhecer hemiciclos de aumento ou diminuição da lâmina d'água (Figura 4), representados pelos *packstones* peloidais (subida relativa do nível de base – esquematizado através de triângulo azul) e *grainstones* (descida relativa do nível de base – esquematizada através de triângulo vermelho invertido).

Nos ciclos, a base da sucessão vertical é representada por fácies de baixa energia compostas por *wackestones* e *packstones* peloidais bioclástico, sendo sobreposta por fácies de energia moderada, compostas por

grainstones/packstones oncolíticos e *packstones* oncolíticos bioclásticos e com oncoides rudaceos, culminando nas fácies de alta energia compostas pelos *grainstones* oolíticos e oncolíticos.

O empilhamento dos ciclos em ambos os poços (Figura 4) representa uma sequência progressivamente mais profunda em direção ao topo, sugerida pela passagem de fácies predominantemente rasas – como os *grainstones* – para fácies mais profundas– em que predominam os pitonélídeos, caracteristicamente pelágicos.

A superfície transgressiva (ST) representa o afogamento do banco antes da instalação das condições oceânicas mais abertas registradas na Formação Outeiro. No caso desta formação, todas as fácies são da associação IV (Wb, M e Wpbm, predominantemente micríticas e repletas de foraminíferos plânctônicos, como a *Favusella washitenses*, que indicam condições gradativamente mais profundas).

EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA

Na caracterização dos processos e feições diagenéticas dos carbonatos da Formação Quissamã foram utilizadas as definições de estágios diagenéticos criadas por Choquette Pray (1970), adaptadas por Folk (1973) e detalhadas por Longman (1980).

As fácies carbonáticas analisadas mostram variações na frequência e na intensidade de alguns processos diagenéticos (Quadro 2), porém uma trajetória evolutiva similar, compreendendo: (1) eodiagênese, caracterizada por intensa micritização e leve compactação mecânica (Figura 5A); (2) geração de porosidade móldica parcial e microporosidade em decorrência de ligeiras variações do nível relativo do mar (NRM), exposição do banco e instalação de condições

de ambiente meteórico vadoso (Figura 5B); (3) início do processo de cimentação eogenética (franja prismática – Figuras 7A, 7E e 7F) num contexto ambiental meteórico freático também controlado por variações do NRM; (4) em fase mais tardia, intensa cimentação em mosaico fino (Figuras 7C e 7D), sintaxial, causando o fechamento dos poros, com incipiente recristalização de bioclastos (Figuras 5C e 5D). Em contexto de mesodiagênese, em subsuperfície, os principais processos foram: (5) dissolução interpartícula (Figura 7E), alargamento e cimentação de fraturas (Figura 7B); (6) dissolução por pressão (compactação química) e dissolução gerando porosidade interparticular pouquíssimo conectada. As fraturas foram alargadas e/ou cimentadas com

cimento blocoso. O aumento gradual do soterramento e seus efeitos causaram a diminuição da porosidade, contatos

interdigitados, bem como os estiolitos e *dissolutions seams*.

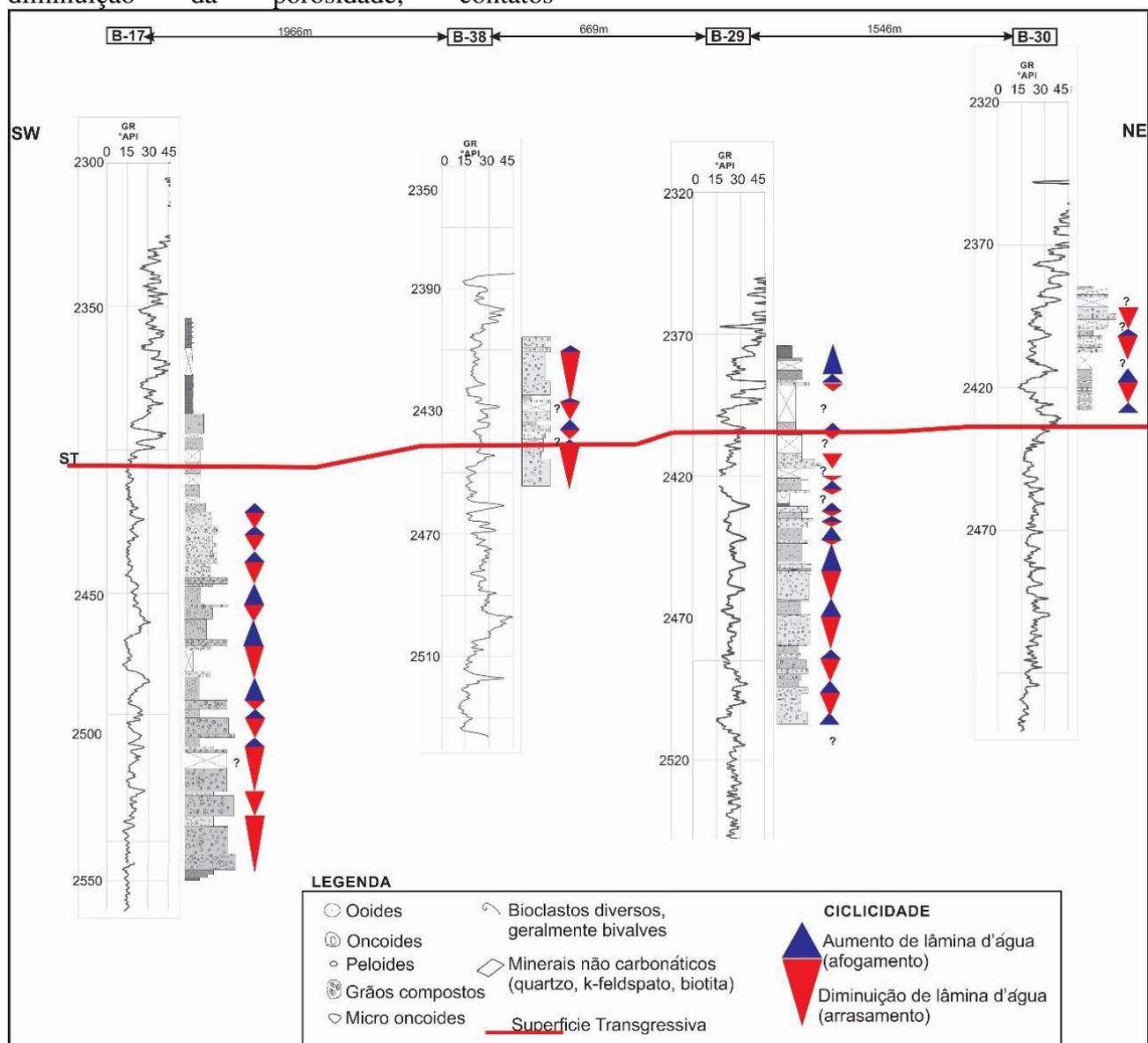


Figura 4. Correlação entre os perfis colunares dos poços B-17, B-38, B-29 e B-30, com indicação das sucessões cíclicas interpretadas e da importante superfície transgressiva (ST) que representa o afogamento da plataforma carbonática e o início das condições oceânicas do Atlântico.

Comumente ocorrem *patches* de cimentação em quase todas as fácies. São controlados por bioturbação e conferem à rocha um aspecto mosqueado (textura onde a rocha fica com óleo e cimento).

Na fácies Wp, observada apenas na parte inferior do poço B-17, é reconhecido o processo de dolomitização incipiente, tendo sido a dolomita provavelmente gerada em zona de mistura entre a marinha e a meteórica.

Nas áreas sul e central do campo (poços B-17, B-29 e B-38), observa-se cimentação intensa e bastante precoce, sugerindo que, antes

do soterramento efetivo, os depósitos já haviam sido submetidos ao processo de cimentação, o qual preservou, em diversas partes, o arcabouço de rocha aberto. Já na porção norte do campo (Poço B-30) ocorre porosidade primária.

As diferenças diagenéticas entre as porções norte e sul do campo devem-se a paleotopografia deposicional condicionada pela halocinese e falhamentos normais a partir do eo e mesoalbio. O campo em estudo esteve sujeito a modificações da estrutura, com arqueamentos gerados por suaves almofadas de sal (Baumgarten & Scuta, 1988), o que

estabeleceu a fisiografia deposicional. Portanto, com a topografia de fundo gerada por interações entre o substrato anterior e a halocinese, a faciologia e a geometria externa dos corpos ficaram condicionadas pelas oscilações do nível do mar e pelo regime

hidrodinâmico associado. Dessa forma, as áreas sul e central ficavam inteiramente cobertas por água (abaixo do contato óleo/água) e tinham processo de diagênese intenso, ao contrário da porção norte do campo.

Ambientes diagenéticos		Feições diagenéticas observadas na Formação Quissamã			
		Assoc. Fácies de banco de alta energia		Assoc. Fácies protegidas	
		Fácies Go e Gopo	Fácies Ppb	Fácies Ppor	Fácies Ppo
Eodiagnese	Marinho Freático	Micritização Compactação mecânica	Micritização (em bioclastos)	Micritização	Micritização
	Vadoso Meteórico (estagante)	Dissolução (microporosidade e porosidade móldica parcial)	Dissolução (microporosidade)	Dissolução (microporosidade)	Dissolução (microporosidade)
	Meteórico Freático	Cimento em franja (dente de cão) Dissolução (porosidade móldica parcial) Cimentação em mosaico fino Cimentação sintaxial Recristalização	Cimentação em mosaico fino Cimentação sintaxial	Cimentação em mosaico fino Cimentação sintaxial	Cimentação em mosaico fino Cimentação sintaxial
Mesodiagnese	Subsuperfície	Dissolução: -alargamento de fraturas; -porosidade intergranular. Cimentação em mosaico blocoso nas fraturas Compactação química	Dissolução: -alargamento de fraturas; -porosidade intergranular.	Compactação química	

Processo diagenético mais atuante
 Processo diagenético menos atuante

Quadro 2. Evolução diagenética da Formação Quissamã em um campo de óleo na porção meridional da Bacia de Campos.

Os dados de petrofísica básica (Figura 6) mostram porosidades acima de 25% e permeabilidades variando de 10mD a 1000 mD para os *grainstones* do poço B-30. Já nos poços B-38, B-29 e B-17, a diagênese atuou em todas as fácies, no sentido de eliminar a porosidade original (cimentação em mosaico) e gerar porosidade secundária microporosa pelo processo de dissolução. Desta forma, os valores refletem grande variação, de 0,1 a ~10% de porosidade e 5,1 a 30 % de permeabilidade.

Na porção extremo sul do campo, apesar da completa cimentação entre os grãos, a permeabilidade e a porosidade são altas. Esse fato pode ser explicado pela existência de uma

rede de intenso fraturamento que pode ter sido influenciada pela projeção da falha que limita a sul o Campo de Bonito (NW), no mesmo contexto tectônico, atingindo a porção sul campo em estudo (SE).

Uma última feição observada é a presença de pirita framboidal (Figuras 7G e 7H) principalmente no interior de foraminíferos planctônicos da Formação Outeiro, o que evidencia a criação de microambientes anóxicos no interior das câmaras dos microorganismos quando estavam depositadas no fundo marinho em condições de baixa energia.

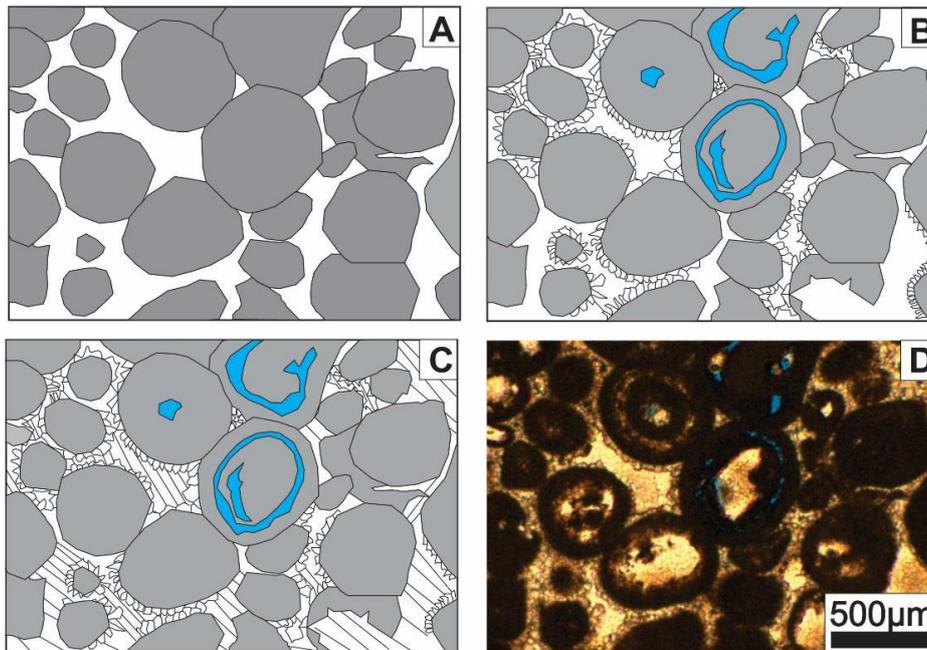


Figura 5. Sequência eodiagnética interpretada para a **Fácies Go** A) Os grãos carbonáticos recém-depositados são ligeiramente compactados (empacotamento de grãos) e simultaneamente micritizados em ambiente diagenético marinho freático. A micritização ocorre de forma intensa, causando total obliteração das estruturas internas dos grãos, ou ainda preservando apenas as lamínulas dos ooides. B) Em ambiente vadoso meteórico ocorre uma incipiente dissolução do núcleo de alguns grãos. Esse processo gera a porosidade móldica parcial e microporosidade. Posteriormente, em ambiente meteórico freático, ocorre cimentação em franja circungranular nos grãos carbonáticos (franja prismática), preservando o arcabouço de rocha relativamente aberto. C) Ainda em ambiente meteórico freático, ocorre a cimentação em mosaico equigranular de calcita espática, preenchendo totalmente os poros. D) Fotomicrografia da lâmina usada como exemplo para ilustrar os estágios eodiagnéticos (B-17, prof. 2427,35m.,#19).

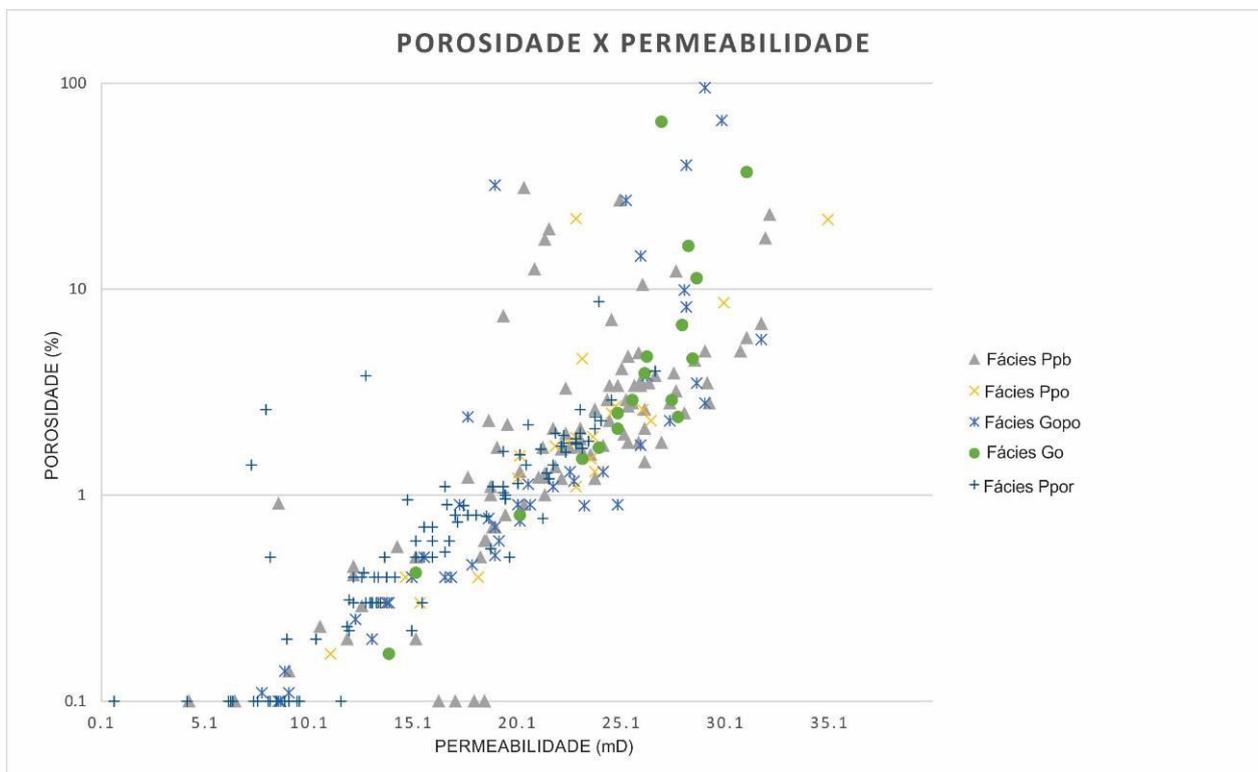


Figura 6. Gráfico de porosidade x permeabilidade (conforme dados de plugues fornecidos pela Petrobras) dos carbonatos da Formação Quissamã dos poços em estudo. No gráfico observa-se que a diagênese teve um forte controle em quase todo o campo. A maioria das amostras não ultrapassa a permeabilidade de 10mD e porosidade máxima de 30%, exceto no poço B-30 (porção norte), onde a permeabilidade chega a 80mD e a porosidade varia de 25 a 32%.

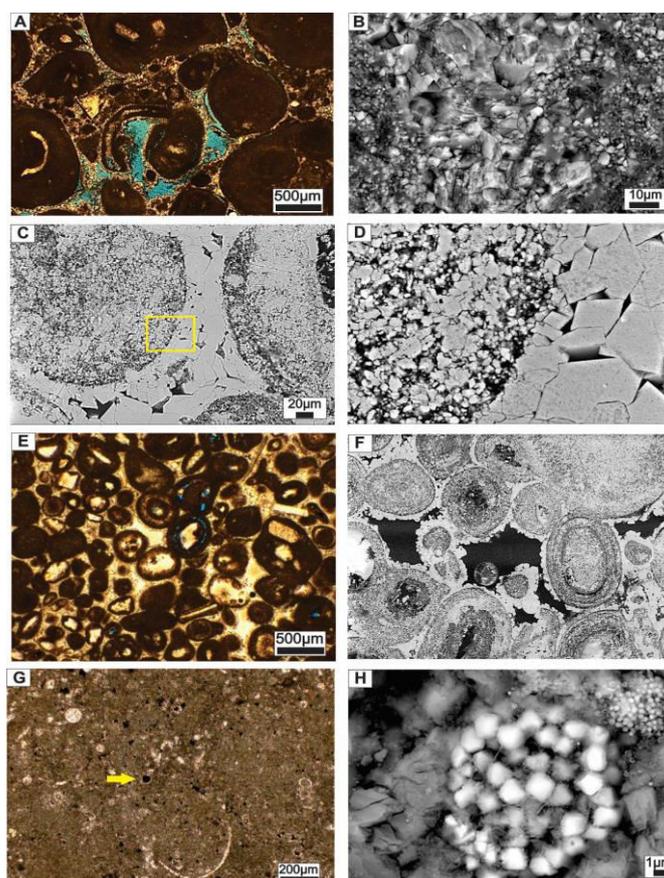


Figura 7. A) *Grainstone* oolítico com cimentação eugênica prismática, franjas parcialmente descoladas do grão. B) Preenchimento de fratura com cimento em mosaico grosso. C) *Grainstone* oolítico totalmente cimentado por calcita espática do tipo mosaico fino. Observa-se microporosidade nos grãos. O quadrado branco indica a posição da imagem D. D) Detalhe do grão de oolite e cimento de calcita espática em mosaico. E) *Grainstone* oolítico com cimentação em franja prismática e porosidade primária (ver figura 6F – espaço preto entre os grãos). F) Detalhe em MEV da imagem em E que mostra dissolução parcial nas franjas prismáticas e nos microporos (pontinhos pretos nos grãos). G) *Mudstone* bioclástico com seta branca indicando foraminífero planctônico preenchido por mineral opaco. H) Detalhe do mineral opaco no foraminífero da imagem anterior, em MEV, que esclarece tratar-se de uma pirita framboidal.

CONCLUSÕES

O estudo detalhado de testemunhos das formações Quissamã e Outeiro em quatro poços de um campo da Bacia de Campos permitiu o reconhecimento de nove fácies carbonáticas, combinadas em quatro associações, organizadas em ciclos (sequências de alta frequência). Os dados obtidos corroboram a interpretação de Guardado et al. (1989) de que a Formação Quissamã representa uma plataforma carbonática com diversos enormes bancos paralelos à costa. O campo de óleo estudado abrange um de tais bancos carbonáticos, cujo arranjo das fácies é relativamente complexo. Duas fácies são *grainstones* com ooides, as quais podem ser atribuídas à crista do banco, pois indicam condições rasas com energia moderada à alta. As fácies de *packstone* peloidal com oncoides rudáceos, *packstone* peloidal/bioclástico e *wackestone/packstone*

peloidal depositaram-se nos flancos do banco, em condições de energia gradativamente menores. Os maiores oncoides desenvolveram-se nas porções mais protegidas, provavelmente nas partes mais baixas do flanco oeste do banco, onde havia menor influência das ondas normais e de tempestade do oceano, além de salinidade um pouco mais alta. Os *wackestones* bioclásticos, *mudstone* e *wackestones* peloidais bioclásticos com intercalações de margá, encontrados na Formação Outeiro, representam uma redução na energia d'água devido ao afogamento gradual da plataforma.

A qualidade dos reservatórios da Formação Quissamã foi controlada pelas características primárias dos depósitos carbonáticos, incluindo bioturbação, superimpostas pelas modificações diagenéticas, especialmente a cimentação por calcita espática

(em condições meteóricas freáticas) e a dissolução que gerou microporosidade e porosidade móldica parcial (em ambiente vadoso meteórico). Porém, tanto a deposição dos carbonatos, quanto a diagênese também foram influenciados por fatores estruturais: na porção norte do campo a permo-porosidade é alta em função da maior proporção de *grainstones* e à sua menor cimentação, uma vez que havia tendência estrutural positiva nesta região, provavelmente condicionada por halocinese e falhas lítricas; a porção sul

apresentava tendência estrutural negativa e, portanto, condições batimétricas ligeiramente mais profundas, sem exposição subaérea, que geraram carbonatos mais cimentados e com baixa permo-porosidade; finalmente, na porção extremo sul do campo, onde também houve muita cimentação, a permo-porosidade originalmente baixa foi aumentada devido ao desenvolvimento de uma densa rede de fraturas provavelmente relacionada a uma falha em local próximo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional da UNESP e ao Projeto ‘Campo B’ UNESP/PETROBRAS. Foi preciosa a colaboração do Prof. Dr. Joel C. de Castro (UNESP) e do Prof. Tibana (Petrobras) na descrição das amostras; e à infraestrutura laboratorial do UNESPetro.

REFERÊNCIAS

1. Asmus, H. E. 1975. Controle da deposição mesozoica nas Bacias da margem continental brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 5:160-175.
2. Asmus, H. E.; Guazelli, M. 1981. Descrição sumária das estruturas da margem continental brasileira e das áreas oceânicas e continentais adjacentes. *Projeto Remac*. 9: 187 – 269.
3. Azevedo, R. L. M. *O Albiano no Atlântico Sul: Estratigrafia, Paleocanografia e relações globais*. 2001. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geociências, Univ. Federal do Rio Grando do Sul, Porto Alegre. 265 p.
4. Azevedo, R. L. M. Gomide J., Viviers M.C. 1987. Geohistória da Bacia de Campos: do Albiano ao Maastrichtiano. *Revista Brasileira de Geociências*, v.17, n.2, p.139-146.
5. Baumgarten C.S. & Scuta M.S. 1988. Geometria dos corpos carbonáticos do reservatório Macaé (Metade Superior), Campo de Pampo. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 3(1/2): p. 49-57.
6. Bruhn C. H. L., Gomes J.A.T., Lucchese C.D., Johann P.R.S. 2003. Campos basin: reservoir characterization and management - Historical overview and future challenges. In: Paper OTC 15220 presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas: 14p.
7. Cainelli, C. & Mohriak, W. U. 1998. Geology of Atlantic eastern Brazilian Basins. In: AAPG – International Conference & Exhibition, Rio de Janeiro, v. Brazilian Geology 2, p. 66.
8. Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueiredo, A. M. F.; Bender, A. 1970. Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system: An Overview. *Tectonophysics*, p.97-138.
9. Choquette, P.W. & Pray, L.C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54: 207-250.
10. Dias J.L., Scarton J.C., Esteves F.R., Carminatti M., Guardado L.R. 1990. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: Raja Gabaglia G.P.; Milani E.J. (Coords.) *Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro, PETROBRAS: p. 333-360.
11. Dias-Brito D. 1982. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilitos, margas e folhelhos da Formação Macaé (Albiano e Cenomaniano). *Boletim Técnico da Petrobras*, 25 (2): 84-97.
12. Demercian, L. S., Szatmari, P., Cobbold, P. R. 1993. Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basin, Offshore Brazil. *Tectonophysics*, v. 228, p. 393-433.
13. Debenay, J. P. & Guillou, J.-J. 2002. Ecological transitions indicated by foraminiferal assemblages in paralic environments. *Estuaries*, 25: 1107–1120.
14. Dunham R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.) *Classification of carbonate rocks*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1: p.108-122.
15. Falkenhein, F.U.H. 1981. *Carbonate microfacies and depositional evolution of the Macaé Formation (Albian – Cenomanian), Campos basin, Brazil*. Tese de Doutorado. Universidade of Illinois, Urbana. p.160.
16. Favoreto, J. 2014. *Modelo deposicional de carbonatos albianos da Formação Quissamã: análise faciológica, diagenética e estratigráfica de um campo de óleo na porção meridional da Bacia de Campos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho”, Programa de Geologia Regional, Rio Claro. 152p.
17. Folk, R.L. 1973. Carbonate petrography in the post-Sorbian age. In: *Evolving Concepts In Sedimentology*. Ed. Ginsburg. 118-158p. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
18. Folk, R.L. Spectral subdivision of limestone types, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. I, p. 62-84. 1962. In: A COLOR GUIDE TO THE PETROGRAPHY OF CARBONATE ROCKS: GRAINS, TEXTURES, POROSITY, DIAGENESIS. SCHOLLE, P. A. & ULMER-SCHOLLE, D. S. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists Memoir 77, 474p. 2003.
19. Folk, R. L., 1962, Spectral subdivision of limestone types, in Ham, W.E., ed., Classification of carbonate Rocks – A Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, p. 62-64.
20. Guardado L. R., Gamboa L. A. P., Lucchesi C.F. 1989. Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil, a Model for a Producing Atlantic Type Basin. In: Edwards J.C. & Santogrossi

- P.A. (Eds.) *Divergent/Passive Margin Basin*. Tulsa: AAPG Memoir 48, p.3-79.
21. Guardado, L.R., Mello, M. R., Spadini, A. R., Brandao, J. S. L. 2000. Petroleum System of the Campos Basin, Brazil: AAPG memoir 73.
22. James N.P. 1984. Shallowing-upward sequences in carbonates. In *Facies Models*, ed. RG Walker, pp. 213-28. Toronto: Geosci. Can. Reprint Ser. 1. 317 pp. 2nd ed.
23. Koutsoukos E. A. M. & Dias-Brito D. 1987. Paleobatimetria da margem continental do Brasil durante o Albiano. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**: 86-91.
24. Longman M. W. 1980. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **64**, (4): 461-487.
25. Mazzullo, S. J. 2004. Overview of porosity Evolution in Carbonate reservoirs. *Kansas Geological Society Bulletin*, v. 79.
26. Mohriak, W. E.; Mello, M. R.; Dewey, J. F.; Maxwell, J. R. 1990. Petroleum Geology of the Campos Basin, offshore Brazil. *Classic Petroleum Provinces*, 50:p.119-141.
27. Spadini A. R. 1992. *Processos deposicionais e ciclicidade em carbonatos albianos da plataforma rasa da Bacia de Campos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 143 p.
28. Spadini, A. R. 1992. Processos deposicionais e ciclicidade em carbonatos albianos da plataforma rasa da Bacia de Campos. 143p Dissertação. Mestrado em Universidade Federal do Rio de Janeiro.
29. Spadini A. R., Esteves F. R., Dias-Brito D., Azevedo R.L.M., Rodrigues R. 1988. The Macaé Formation, Campos basin, Brazil: Its evolution in the context of the initial history of the South Atlantic. *Revista Brasileira de Geociências*, **18**(3): 261-272.
30. Walker R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker R.G. & James N.P. (Eds.) *Facies models: response to sea level change*. Geological Association of Canada, 1992. p. 1-14.
31. Winter W. R., Jahnert R. J., França A.B. 2007. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**: 511-529.

Manuscrito recebido em: 29 de Abril de 2015
Revisado e Aceito em: 11 de Setembro de 2015