

RESERVATÓRIOS PROFUNDOS DA FORMAÇÃO PENDÊNCIA NO CAMPO DE PESCADA, BÁCIA POTIGUAR: POTENCIAL E FATORES CONTROLADORES DA POROSIDADE

DEEP RESERVOIRS OF THE PENDÊNCIA FORMATION
PESCADA FIELD, POTIGUAR BASIN: POROSITY POTENTIAL
AND CONTROLLING FACTORS

Rogério Schiffer de Souza

RESUMO – Os arcósiis e subarcósiis da Formação Pendência, no Campo de Pescada, são reservatórios de óleo e gás em profundidades superiores a 3 400 m, apresentando valores de até 16% de porosidade e 21 mD de permeabilidade. Os principais fatores controladores da qualidade e da diagênese destes reservatórios foram o sistema deposicional, a composição do arcabouço dos arenitos e a história de soterramento. Os principais cimentos dos arenitos são clorita, calcita e crescimentos secundários de quartzo e feldspatos. O sistema deposicional controlou a eodiagênese. Nos arenitos grossos fluviais a composição dos fluidos intersticiais foi fortemente influenciada pela presença de águas meteóricas subsaturadas, favorecendo a dissolução de feldspatos e lífticos instáveis. Nos arenitos de frente deltaica e ritmitos lacustres, depositados em um ambiente geoquímico relativamente mais estagnado, mais redutor e mais rico em cátions, a precipitação de clorita e calcita foi o processo dominante. A mesodiagênese caracterizou-se principalmente pelo desenvolvimento de crescimentos sintaxiais de quartzo e feldspatos, dissolução/reprecipitação de calcita, precipitação de clorita e fases tardias de pirita, esteno e albita. Os reservatórios fluviais apresentam as melhores porosidades efetivas e permeabilidades. Os reservatórios de frente deltaica são ricos em microporosidade e possuem baixas permeabilidades devido ao alto teor de clorita. Os ritmitos lacustres são fortemente cimentados por calcita. A presença de grande quantidade de clorita nos reservatórios é responsável pela baixa resistividade acusada pelos perfis elétricos, devido às altas microporosidade e saturação de água irreductível. Este fato pode conduzir a uma avaliação errônea dos fluidos saturantes e, conseqüentemente, a uma má definição do contato óleo-água.

(Originais recebidos em 10.12.90.)

ABSTRACT – The arkoses and subarkoses of the Pendência Formation form oil and gas reservoirs at depths greater than 3,400 m in the Pescada Field, Potiguar Basin. Depositional environment, framework composition, and burial history were the major controls on diagenesis and reservoir quality. Chlorite, calcite, and quartz and feldspar overgrowths are the main cements. Depositional environment played an important role in the course of eodiagenesis. Fluvial channel, delta-front, and lacustrine rhythmic facies were submitted to different geochemical conditions during eodiagenesis. In fluvial channels, undersaturated fresh waters prompted early dissolution, while diagenesis in the delta-front and turbidite sandstones can be explained as a result of the flow of lacustrine connate water saturated in Mg, Fe, and Ca in a strongly reducing environment. Fluvial reservoirs display the best porosities and permeabilities, and quartz/feldspar overgrowths and late chlorite are the main cements. Delta-front reservoirs present high microporosity as well as the lowest permeabilities, due to high early chlorite content. Lacustrine rhythmites are strongly cemented by calcite. The high chlorite content in the reservoirs causes several problems in evaluations based on induction logs. High microporosity values and amounts of irreducible water may lead to high water saturation and problems in defining the oil/water contact.

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

1 – INTRODUÇÃO

Um crescente avanço em novas tecnologias tem sido observado nos últimos anos na área de geologia do petróleo, especialmente desenvolvidas com o objetivo de conhecer melhor os reservatórios de bacias relativamente maduras.

Os avanços mais significativos foram nas áreas da estratigrafia quantitativa (histórias de soterramento), sedimentologia e geoquímica sedimentar (diagênese).

Um dos problemas mais cruciais no estudo e conhecimento de uma bacia é a definição do seu emba-

1 - Setor de Geologia para
Exploração (SEGEX),
Divisão de Geologia e
Engenharia de
Reservatórios (DIGER),
Centro de Pesquisas
(CENPES), Cidade
Universitária, Quadra 7, Ilha
do Fundão, CEP 21910, Rio
de Janeiro, RJ, Brasil.

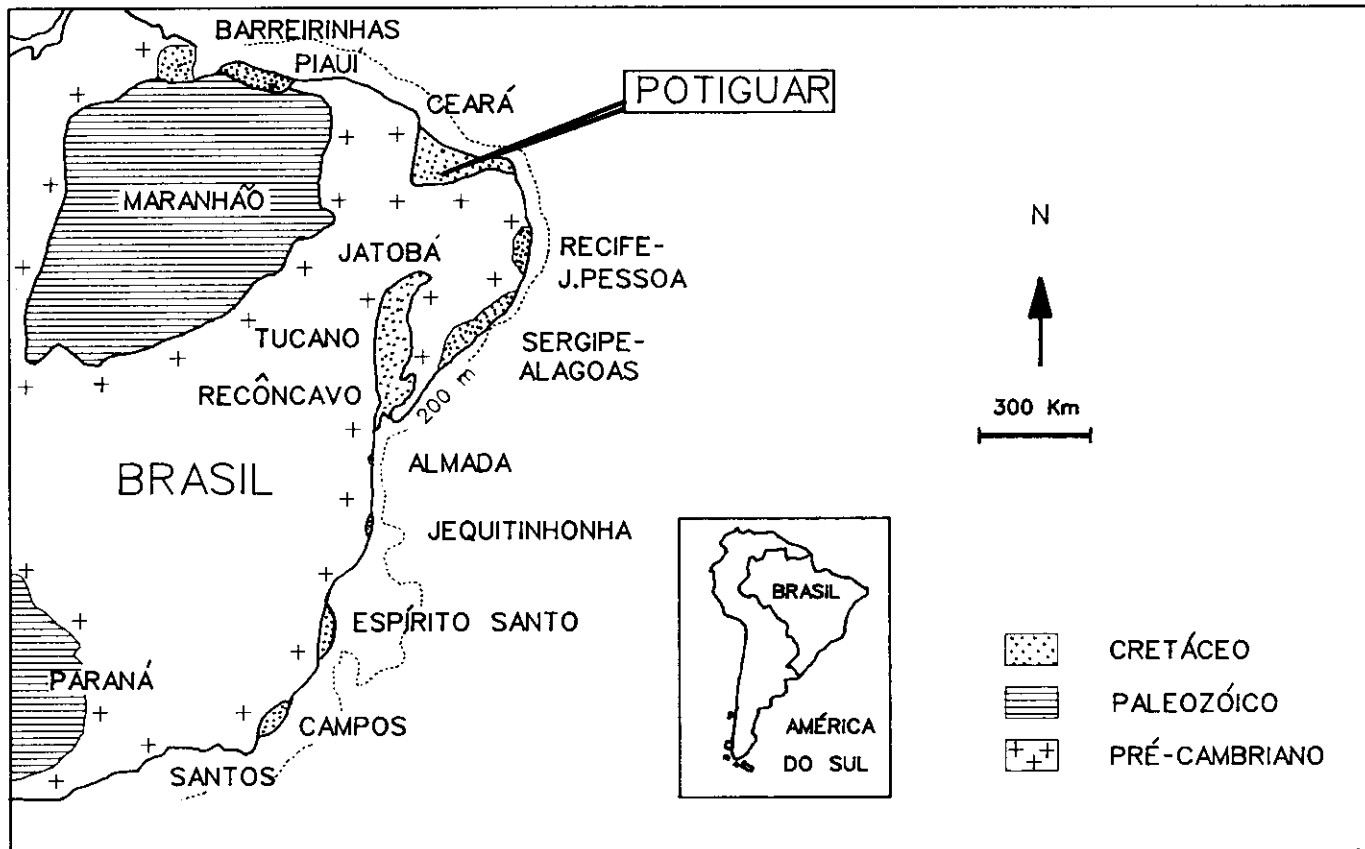


Fig. 1 - Mapa de localização da Bacia Potiguar.
Fig. 1 - Location map, Potiguar Basin.

samento econômico. Estudos sistemáticos em reservatórios de hidrocarbonetos do mundo todo têm confirmado a tendência geral da diminuição da porosidade com o contínuo soterramento.

No Brasil, embora a preocupação com o problema das fronteiras exploratórias já tivesse sido externada (Bauer, 1964; Franke e Silva, 1975; Bettini e Souza, 1978), alguns trabalhos mais específicos trataram, recentemente, dos possíveis controles sobre a geração/preservação da porosidade a grandes profundidades (Souza, 1987; Bruhn *et al.* 1988; Waick e Soares, 1989; Sombra, 1990, neste volume; Anjos *et al.* 1990, neste volume).

Os arenitos da Formação Pendência no Campo de Pescada, Bacia Potiguar *offshore*, objeto deste trabalho, são reservatórios de hidrocarbonetos (óleo e gás) abaixo de 3 400 m de profundidade, apresentando porosidades médias em tor-

no de 12 a 15%. Tais porosidades representam valores anormalmente altos se analisados com base na tendência apresentada pelos dados de campos produtores nos arenitos e conglomerados da Formação Pendência, na parte terrestre da bacia (Anjos *et al.* 1990, neste volume). De acordo com o *trend* apresentado por estes autores, seria otimista prever reservatórios a esta profundidade, com porosidade maior do que 10%.

Os reservatórios do Campo de Pescada apresentam maiores porosidades em zonas de água e grande produção de H₂S. Estas duas características são problemas enfrentados durante as fases de avaliação e produção, respectivamente.

O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar detalhadamente os reservatórios do Campo de Pescada, analisar esta aparente anomalia

de porosidade a grandes profundidades e explicar os maiores valores de porosidade em zonas de água e a produção de H₂S.

2 - GEOLOGIA DA BACIA POTIGUAR E HISTÓRIA DE SOTERRAMENTO

A Bacia Potiguar está localizada na costa equatorial brasileira (fig. 1), e sua origem está relacionada à separação das placas sul-americana e africana. A bacia possui cerca de 38 000 km², dos quais 16 000 estão na sua porção submersa (Figueiredo, 1985).

Três estágios tectono-sedimentares foram definidos na Bacia Potiguar (Souza, 1982): *rift*, transicional e *drift*, durante os quais a bacia foi preenchida por sedimentos cretácicos e terciários (fig. 2). Na fase *rift* foram depositados sedimentos eocretácicos (Neocomiano/Barremia-

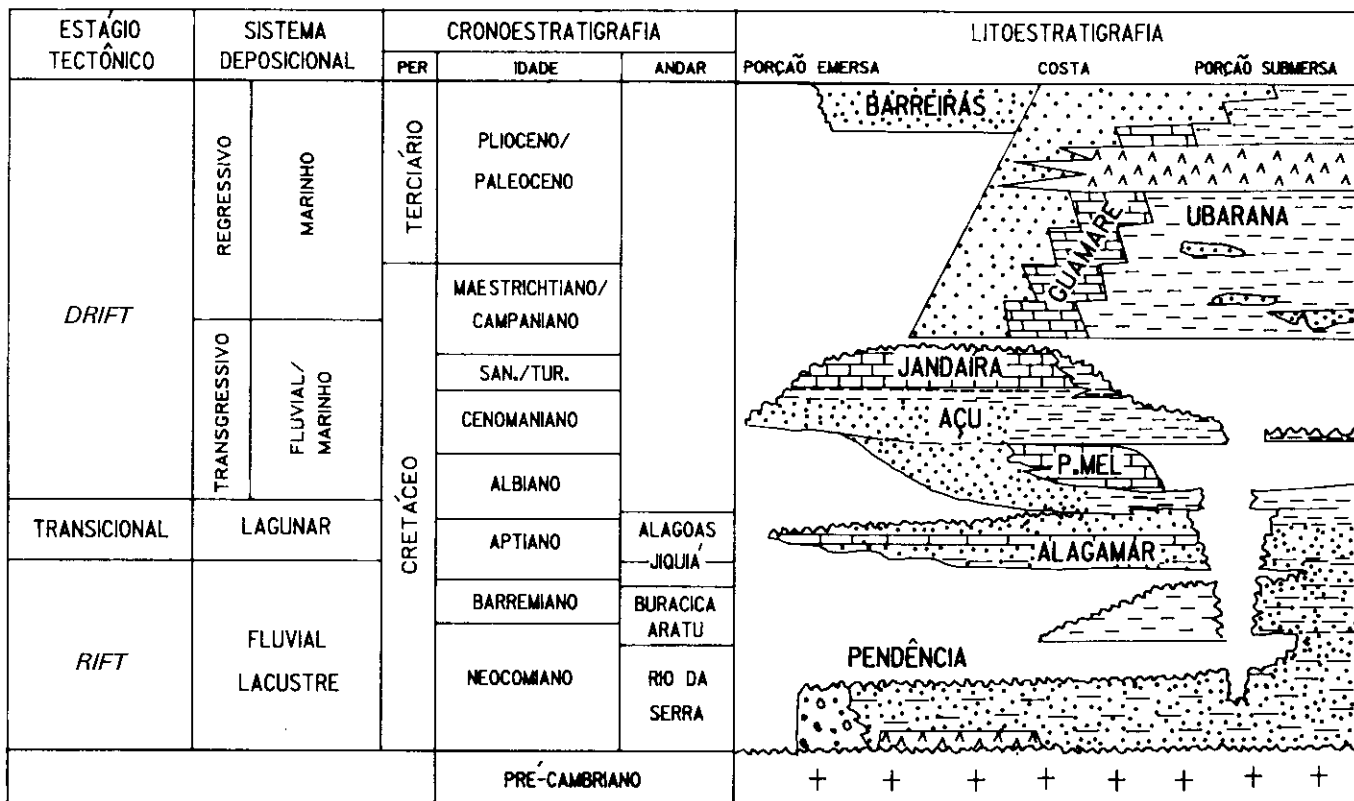


Fig. 2 - Estágios tectono-sedimentares e litoestratigrafia da Bacia Potiguar (modificado de Souza, 1982; Araripe e Fontes, 1985 e Matsuda, 1988).
 Fig. 2 - Tectono-sedimentary evolution and lithostratigraph of Potiguar Basin (modified from Souza, 1982; Araripe and Fontes 1985, and Matsuda 1988).

no) em sistemas de leques aluviais e flúvio-deltaicos lacustres da Formação Pendência. Os sedimentos albo-aptianos da fase transicional são representados por depósitos siliciclásticos e transicionais da Formação Alagamar, truncados por discordância. Sobre esta unidade depositaram-se sedimentos marinhos francos da fase *drift*, representados por duas plataformas carbonáticas (formações Jandaíra e Ponta do Mel) e seus equivalentes siliciclásticos proximais fluviais e flúvio-deltaicos (Formação Açú). Todos estes sedimentos foram recobertos por espessa cunha progradante terciária, constituída pelas formações Ubarana e Tibau (Matos *et al.* 1987).

As análises geoquímicas nas rochas da Bacia Potiguar revelam como potenciais geradores de hidrocarbonetos os folhelhos lacustres da Formação Pendência e os folhelhos lagunares da Formação Alagamar (Rodrigues *et al.* 1983).

3 - O CAMPO DE PESCADA

O Campo de Pescada localiza-se na plataforma continental do Estado do Rio Grande do Norte, a

30 Km da costa, em lâmina d'água de 15 a 20 m (fig. 3).

O campo possui um volume de óleo *in place* de $3,460 \times 10^6$ m³ pa-

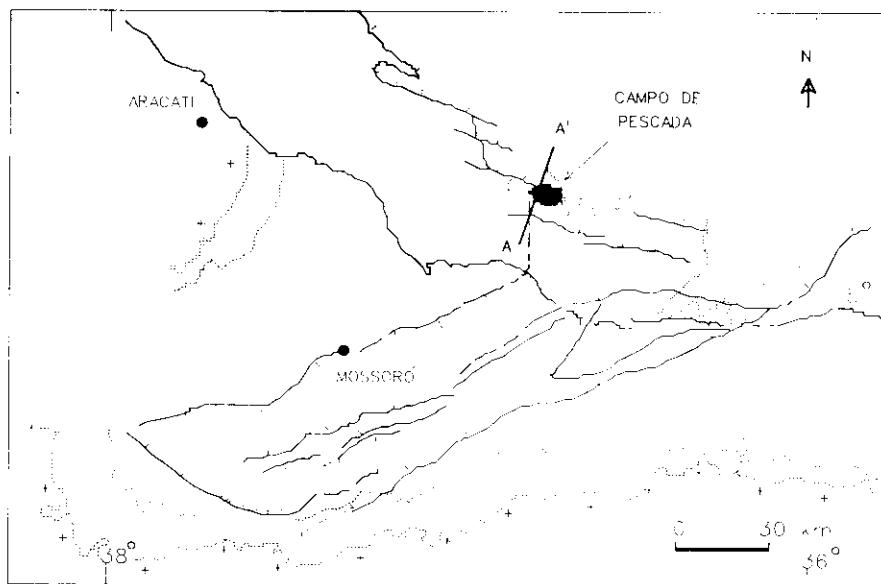


Fig. 3 - Mapa de localização do Campo de Pescada, Bacia Potiguar.
 Fig. 3 - Location map, Pescada Field, Potiguar Basin.

ra um volume recuperável de $0,742 \times 10^6 \text{ m}^3$ e um volume de gás *in place* de $7.791,766 \times 10^6 \text{ m}^3$ para um volume recuperável de $4.405,394 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Estruturalmente o Campo de Pescada é caracterizado por um homoclinal alongado na direção E-W com mergulho para sul (até 130°). Esta estruturação básica teve como causa principal o basculamento da bacia para S-SE após a deposição da Formação Pendência.

No Campo de Pescada, os reservatórios da Formação Pendência são caracterizados por intercalações delgadas de arenitos e folhelhos e encontram-se recobertos em dis-

cordância angular/erosiva pela Formação Alagamar.

Teixeira (1990), através de seções sísmicas com processamento 3D, observou que a seqüência caracterizada por espessos pacotes de arenitos e folhelhos, sotoposta aos arenitos da Formação Pendência, informalmente denominada seção Pescada, encontra-se ausente na área do Campo de Pescada propriamente dito (RNS-84, RNS-85, RNS-86). Esta seção (fig. 4) é bem caracterizada no bloco baixo da Falha de Pescada (área do RNS-89).

A evolução da história de soterramento da bacia na área do Campo

de Pescada é mostrada na figura 5, representada pelo diagrama de história de soterramento. Nesta figura, observa-se que o reservatório foi rapidamente soterrado após a sua deposição no Cretáceo Inferior e com menor intensidade durante o Terciário. Uma discussão mais detalhada sobre a influência da história de soterramento sobre as características finais dos reservatórios é feita no item "controles da diagênese e da porosidade".

Na área do Campo de Pescada, os folhelhos lacustres continentais da Formação Pendência apresentam um teor alto de carbono orgânico (até 4%), ricos em matéria orgânica dos tipos I e II. Os folhelhos transi-

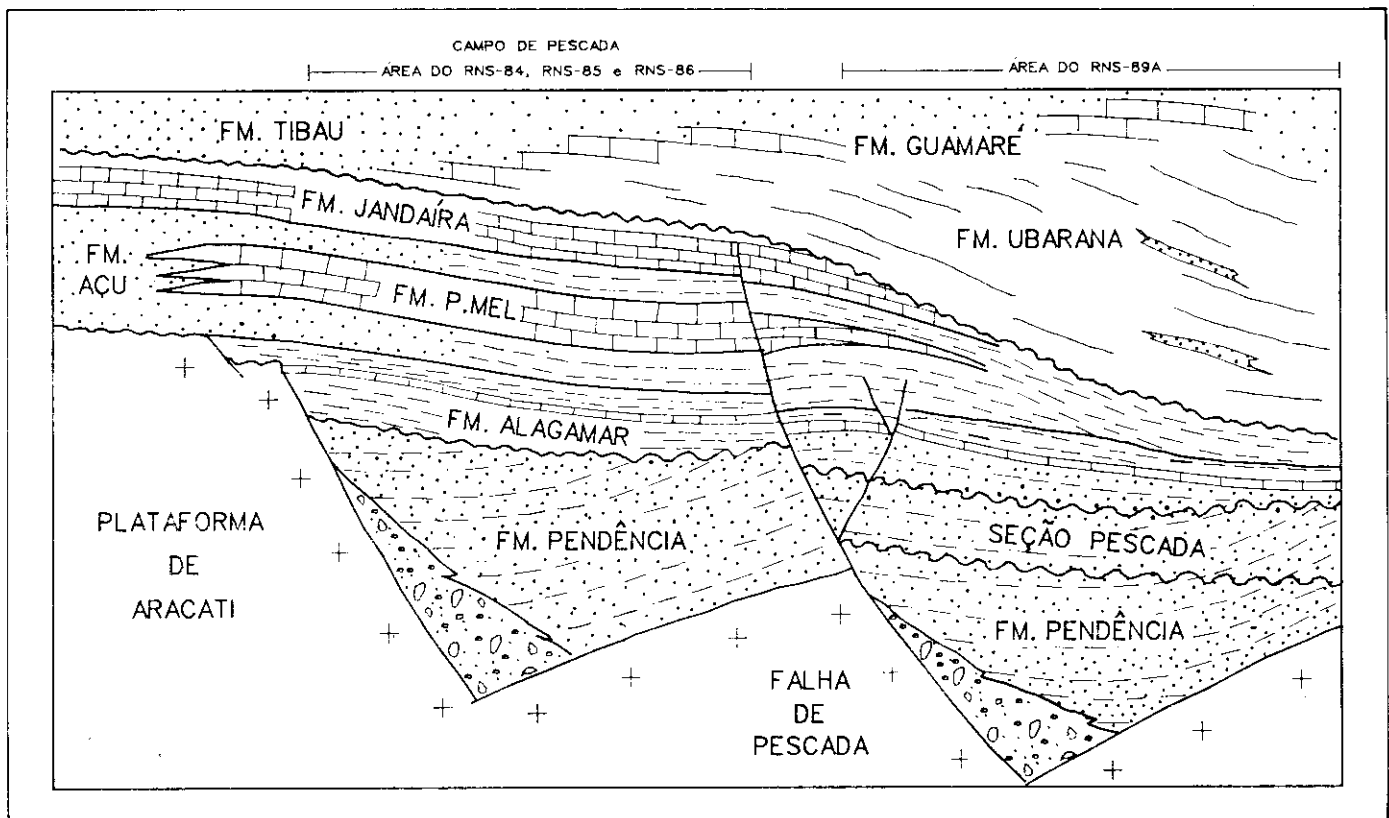


Fig. 4 - Seção geológica esquemática (AA') do Campo de Pescada, Bacia Potiguar (modificado de Matos et al. 1987 e Bertani et al. 1989).

Fig. 4 - Schematic geologic section (AA') of Pescada Field, Potiguar Basin (modified from Matos et al. 1987 and Bertani et al. 1989).

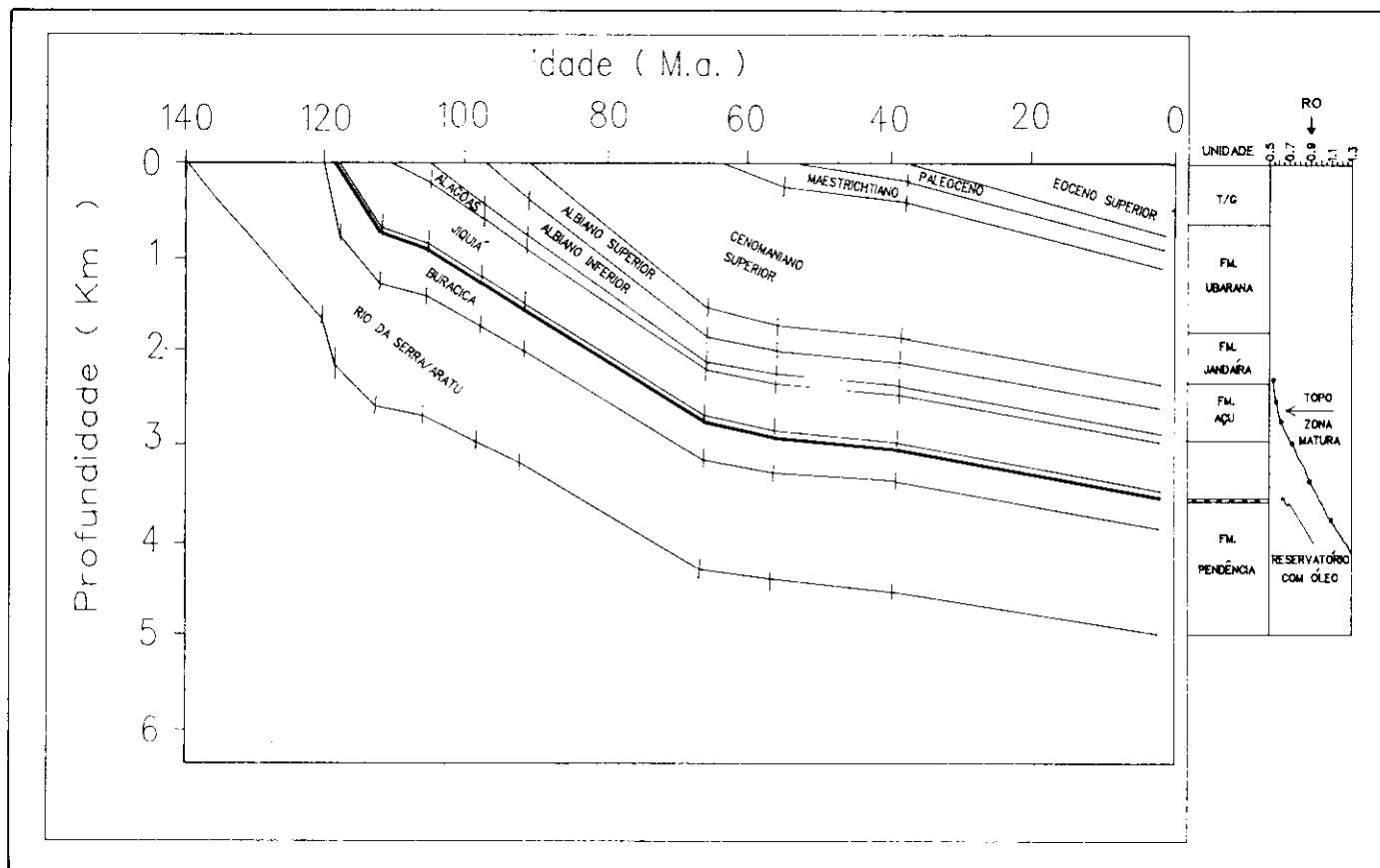


Fig. 5 - Diagrama tempo-profundidade e índices de reflectância de vitrinite do poço 3 RNS-86.
Fig. 5 - Time depth diagram and vitrinite reflectance indices for well 3 RNS-86.

cionais da Formação Alagamar possuem menores teores de carbono orgânico (até 2%), mas são igualmente ricos em matéria orgânica dos tipos I e II (Mello *et al.* 1984). O topo da zona matura na área situa-se ao redor de 2 500 m (fig. 5).

4 - METODOLOGIA

Foram analisados cinco testemunhos de quatro poços do Campo de Pescada e adjacências (RNS-84, RNS-85, RNS-86 e RNS-96), incluindo amostras das fácies fluvial, frente deltaica e ritmitos lacustres da Formação Pendência. As amostras foram analisadas por várias técnicas, incluindo petrografia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microsonda de energia dispersiva (EDS) acoplada, difração de raios X

(DRX) e isótopos estáveis de carbono e oxigênio do cimento carbonático.

As lâminas delgadas foram impregnadas com resina epóxi azul e os carbonatos foram tingidos de acordo com o método de Dickison (1966). A composição modal dos arenitos foi determinada por contagem de 300 pontos por lâmina delgada (tabela I).

Duas amostras de arenito foram selecionadas para a determinação do politipo da clorita presente na fração < 2 micra com base nas reflexões hkl, seguindo a metodologia de Hayes (1970).

A composição isotópica DEL18O e DEL 13C (‰ PDB) dos cimentos carbonáticos foi determinada pelo Setor de Geoquímica (SEGEQ) da

Divisão de Exploração (DIVEX) do Centro de Pesquisas da PETROBRÁS (CENPES), com o objetivo de avaliar a temperatura de precipitação e a possível fonte do cimento carbonático. A seleção das amostras foi feita através de critérios petrográficos com base na textura e relações paragenéticas do cimento de calcita presente nos reservatórios.

A história de soterramento foi construída através do programa BaSS - Basin Simulation System, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas da PETROBRÁS (CENPES).

Foram utilizadas 12 análises reflectométricas realizadas por Mello *et al.* (1984).

Foram usadas 95 análises petrofísicas (medidas de porosidade e permeabilidade) de plugues, reali-

TABELA I / TABLE I
DADOS PETROGRÁFICOS E PETROFÍSICOS DOS RESERVATÓRIOS DA FORMAÇÃO PENDÊNCIA NO
CAMPO DE PESCADA

PETROGRAPHIC AND PETROPHYSICAL DATA OF THE PENDÊNCIA FORMATION RESERVOIRS, PESCADA FIELD

Poço/Prof.	Arcabouço										Diagênese						Poros		K mD	Fácies	Fluido			
	Qm	Qp	Kf	Pl	Fp	Fm	Fv	lc	Bi	Mi	QZ	FD	CA	CL	ES	PI	Lm	Lb						
3-RNS-85																								
3428,80	11	18	16	14	10	01	Tr	02	-	01	03	06	01	05	01	Tr	10	12.0	7.2	F			Óleo	
3430,15	14	16	18	13	06	Tr	01	04	-	Tr	04	06	Tr	08	Tr	Tr	12	15.6	2.6	F			Óleo	
3431,50	18	11	17	15	03	Tr	Tr	04	-	Tr	02	04	01	08	01	Tr	11	13.9	2.4	F			Óleo	
3432,55	20	16	15	18	05	Tr	Tr	02	-	Tr	03	05	02	05	01	Tr	10	10.8	6.0	F			Óleo	
3438,35	38	02	21	12	-	-	01	02	-	02	01	01	01	15	Tr	01	5	12.8	0.1	D			Óleo	
3441,60	40	01	19	10	01	-	02	02	-	03	01	01	Tr	12	Tr	01	7	14.4	0.2	D			Óleo	
3443,10	42	03	16	12	-	-	02	Tr	-	02	02	01	01	09	Tr	01	9	15.9	2.4	D			Óleo	
3730,90	48	02	10	05	-	-	01	Tr	04	12	01	Tr	15	-	Tr	01	1	-	-	R			Água	
3732,25	41	03	19	08	-	-	Tr	-	-	01	06	03	10	-	01	Tr	8	-	-	R			Água	
3734,60	36	03	15	15	01	01	02	01	-	02	02	03	12	06	Tr	Tr	2	5.3	0.16	R			Água	
3-RNS-86																								
3435,30	38	05	14	13	02	-	Tr	07	-	05	05	03	05	-	01	Tr	2	6.6	0.19	F			Óleo	
3436,50	11	10	15	25	06	01	Tr	05	-	01	08	06	01	02	01	Tr	8	8.7	4.9	F			Óleo	
3873,40	45	01	08	10	-	-	-	05	-	15	03	02	08	02	Tr	01	0	-	-	R			Água	
3878,30	51	01	05	10	-	-	-	-	-	12	01	01	08	-	Tr	01	0	-	-	R			Água	
1-RNS-89																								
3368,90	10	15	15	19	07	01	Tr	05	-	Tr	05	04	04	07	01	Tr	9	12.1	4.3	F			Água	
3370,75	11	14	18	13	04	Tr	01	07	-	01	04	03	03	08	01	Tr	9	13.7	2.6	F			Água	
3371,60	09	18	18	10	03	Tr	01	06	-	01	05	03	03	08	01	01	10	11.7	5.8	F			Água	
3746,60	05	38	11	10	16	Tr	Tr	10	-	01	03	Tr	01	03	Tr	Tr	2	8.6	0.5	F			Água	
3-RNS-96																								
3550,40	40	05	12	16	-	-	-	10	-	03	03	01	02	05	Tr	Tr	3	15.8	0.2	D			Gás	
3558,40	45	07	15	13	-	-	-	-	-	01	01	15	-	Tr	01	01	1	16.6	0.7	D			Gás	
3558,60	35	09	11	09	02	01	02	03	-	02	01	02	12	01	01	07	7	14.4	1.3	D			Gás	
3559,80	30	07	12	12	02	-	Tr	04	-	04	03	03	15	03	01	01	3	-	-	D			Gás	
4386,50	14	18	15	20	08	-	-	01	-	01	04	02	16	-	Tr	Tr	1	3.8	0.15	F			Água	
4392,40	15	20	10	15	10	02	-	15	-	02	03	01	05	-	Tr	01	1	5.0	0.16	F			Água	
4393,15	14	16	12	18	09	-	-	13	-	Tr	04	03	08	-	Tr	01	2	5.2	0.6	F			Água	

Legenda:

Qm = quartzo monocristalino, Qp = quartzo policristalino, Kf = ortoclásio + microclínio, Pl = plagioclásio, Fp = fragmento de rocha plutônica (granito, gnaiss, quartzito), Fm = fragmento de rocha metamórfica (micaxisto), Fv = fragmento de rocha vulcânica, lc = intraclasto de folhelho, Bi = bioclasto (ostracodes), Mi = micas, QZ = overgrowths + cristais tardios de quartzo, FD = overgrowths + cristais tardios de plagioclásio e K-feldspatos, CA = calcita, CL = clorita, ES = esfeno, PI = pirlita, Lm = porosidade de laboratório, Lb = porosidade de laboratório, K = permeabilidade de laboratório, F = fluvial, D = frente deltaica, R = ritmitos lacustres rasos.

zadas pelo Setor de Análises de Reservatório (SEAREV) da Divisão de Geologia e Engenharia de Reservatórios (DIGER), do CENPES. As amostras foram agrupadas pelas três fácies definidas, com base na descrição de testemunhos.

5 – SEDIMENTOLOGIA E SISTEMA DEPOSICIONAL

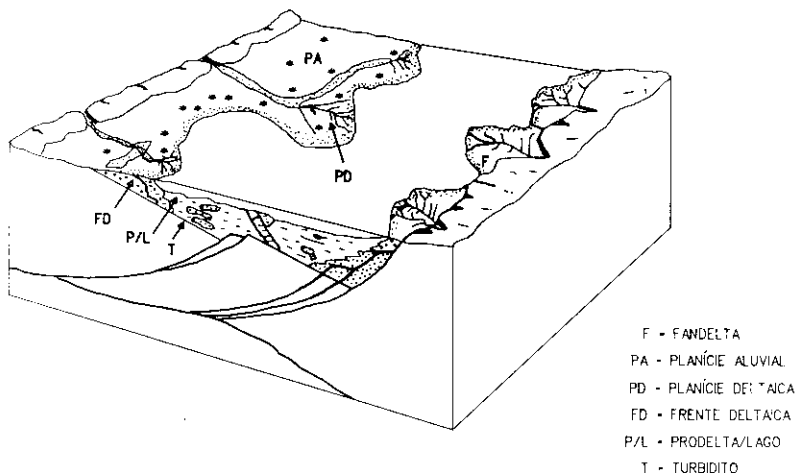
A Formação Pendência, no Campo de Pescada, é caracterizada por um sistema flúvio-deltaico (fig. 6) com evolução bastante complexa,

a qual tem sido estudada e melhor compreendida à medida que novos dados de sismoestratigrafia, perfis, paleontologia, sedimentologia e petrografia são adquiridos.

Castro e Carrasco (1987 a, b), estudando os testemunhos dos poços RNS-85 e RNS-86 reconheceram arenitos grossos de planície deltaica (canais distributários), com estratificação cruzada acanalada e com clastos de folhelho e carvão dispersos, intercalados com arenitos finos a médios com laminação

paralela e cruzada clinoascendente (*climbing ripples*) de depósitos de extravasamento (*crevasse splay*). Este conjunto prograda sobre arenitos finos com laminação paralela e laminação cruzada por corrente (*climbing ripples*) de frente deltaica e folhelhos de prodelta.

Um terceiro componente do sistema deposicional da seção inferior da unidade é constituído por arenitos muito finos a silteicos, micáceos, ricos em bioclastos, intercalados com folhelho, representando ritmitos cada vez mais arenosos e mais



esessos para o topo, e definindo um caráter progradante reconhecido em perfis de raios gama. As principais estruturas sedimentares reconhecidas em testemunho, além do caráter rítmico da seqüência, são ciclos de Bouma incompletos tipo Tce ou Tde, arenitos muito finos ou siltitos do topo dos ciclos apresentando microlaminação cruzada clinoascendente, e, localmente, retrabalhamento por ondas. Estas rochas estão relacionadas com depósitos lacustres rasos, provavelmente em áreas interdeltáicas. A figura 7 mostra a análise seqüencial do poço 3-RNS-85, identificando a associação de fácies

Fig. 6 - Bloco diagrama mostrando os sistemas deposicionais do estágio rift (segundo Bertani et al. 1989).
 Fig. 6 - Block diagram showing depositional environments during rift stage (after Bertani et al. 1989).

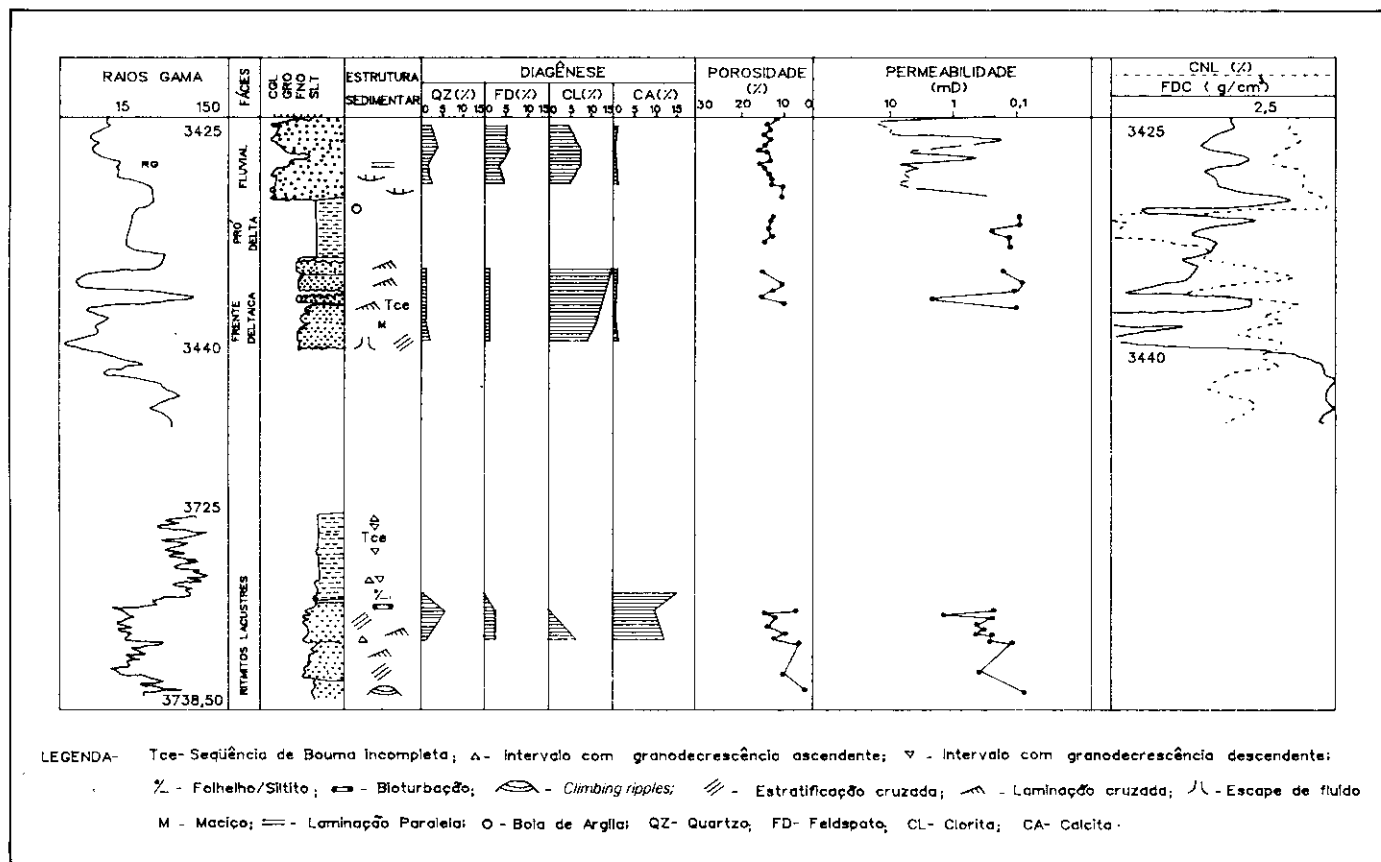


Fig. 7 - Análise seqüencial do poço 3-RNS-85 mostrando a distribuição dos cimentos pelas diferentes litofácies e as características dos reservatórios.
 Fig. 7 - Sequential analysis of well 3 RNS-85, showing cement distribution within facies plus reservoir characteristics.

descritas por Castro e Carrasco (1987a) e a distribuição dos cimentos e características dos diferentes reservatórios definidas neste trabalho.

6 – COMPOSIÇÃO DETRÍTICA DOS ARENITOS

Os arenitos da Formação Pendência na área estudada são arcósios e subarcósios, segundo a classificação de Folk (1968).

Os principais constituintes do arcabouço (tabela I) são:

Quartzo, na forma de grãos monocristalinos, com extinção reta ou ondulante, algumas vezes com inclusões de turmalina, muscovita e apatita, predomina nos arenitos mais finos; quartzo policristalino, geralmente composto por mais de três cristais, na maioria das vezes aparece com os cristais estirados, característico de gnaisses. Algumas vezes aparece com cristais equidimensionais com contato reto a 120°, característico de quartzitos. O tipo policristalino é mais frequente nos arenitos mais grosseiros.

O plagioclásio é o feldspato mais comum. Embora a grande maioria dos grãos identificados tenha revelado composição An20-30, este fato deve ser analisado com ressalvas devido à frequente albitização dos plagioclásios.

Entre os feldspatos potássicos predomina o ortoclásio, geralmente sericitizado, algumas vezes albitizado a maiores profundidades. O teor original de feldspatos potássicos pode ter sido subestimado devido ao grau de albitização intenso destes minerais em algumas áreas.

O microclínio é comum nas fácies mais grosseiras e aparece sem indícios de alteração.

Os fragmentos de rocha de composição quartzo-feldspática (granito/gnaisse) são comuns nas fácies fluviais. Como a classificação de Folk (1968), utilizada neste trabalho, enfoca os aspectos mineralógicos, estes fragmentos foram contados como feldspatos, o que desloca a composição destes arenitos em direção ao campo dos arcósios.

Fragmentos de rocha vulcânica fortemente alterados, cloritizados, e muitas vezes parcial ou totalmente dissolvidos, foram reconhecidos principalmente nos arenitos mais finos de frente deltaica e ritmitos lacustres. É necessário ressaltar, no entanto, que o teor de litoclastos vulcânicos identificado na unidade estudada pode ter sido subestimado devido à dificuldade de reconhecimento destes fragmentos líticos. O grau de alteração intenso, cloritização e esmagamento por compactação são alguns fatores que podem ter contribuído para o não reconhecimento destes fragmentos.

Fragmentos de quartzito e muscovita xisto são raros.

Intraclastos de folhelho são comuns nos arenitos fluviais e, muitas vezes, esmagados e deformados, constituem pseudomatriz. Intraclastos de rochas carbonáticas, pelóides e bioclastos (ostracodes) são mais comuns nos arenitos finos de frente deltaica e ritmitos lacustres rasos.

Os arenitos finos de *crevasse splay* e ritmitos retrabalhados por ondas são extremamente micáceos quando comparados com seus congêne-

res grossos de canais distributários. A mica mais abundante é a biotita, que aparece normalmente cloritizada. A muscovita contribui com teores acessórios.

Uma suite de minerais pesados composta por granada, esfeno, epidoto e turmalina é comum a todas as fácies. Estes minerais ocorrem disseminados nos arenitos mais grossos, e, também, concentrado em *placers* nos arenitos com retrabalhamento por ondas.

Em geral, portanto, observou-se um controle deposicional (granulométrico) sobre a composição dos arenitos. Os arenitos grossos fluviais, relativamente mais feldspáticos (feldspatos mais fragmentos de rochas quartzo-feldspáticas), possuem uma composição Q45F55LTr, enquanto os arenitos finos de frente deltaica e ritmitos lacustres rasos possuem uma composição Q60F38L2 e Q68F31L1, respectivamente (fig. 8).

7 – DIAGÊNESE

A seqüência diagenética geral observada nos arenitos da Formação Pendência no Campo de Pescada foi: precipitação de franjas de clorita precoce; compactação mecânica; compactação química; crescimentos sintaxiais de quartzo e feldspatos; dissolução de grãos pela ação de águas meteóricas; precipitação de calcita poiquilotópica não ferrosa; geração de porosidade secundária através da ação de ácidos orgânicos (?); precipitação de clorita tardia nos poros e ao redor dos grãos; precipitação de calcita ferrosa tardia; precipitação de fases tardias de quartzo, feldspato potássio-

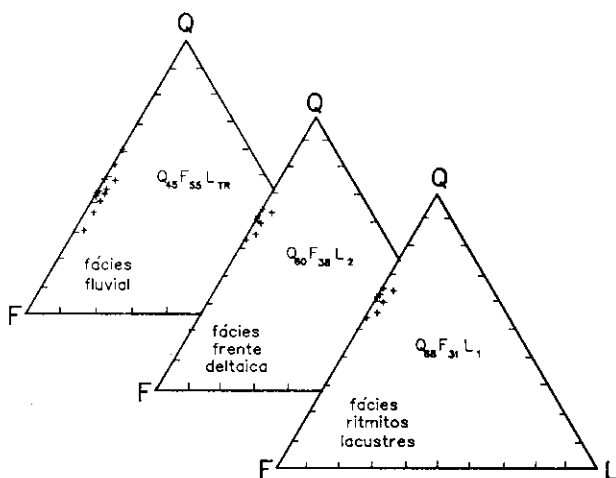


Fig. 8 - Diagramas triangulares de composição do arcabouço dos arenitos das diversas fácies da Formação Pendência no Campo de Pescada, segundo a classificação de Folk (1968).

Fig. 8 Ternary diagrams showing framework composition of the Pendência Formation sandstones, Pescada Field, according to Folk's classification (1968).

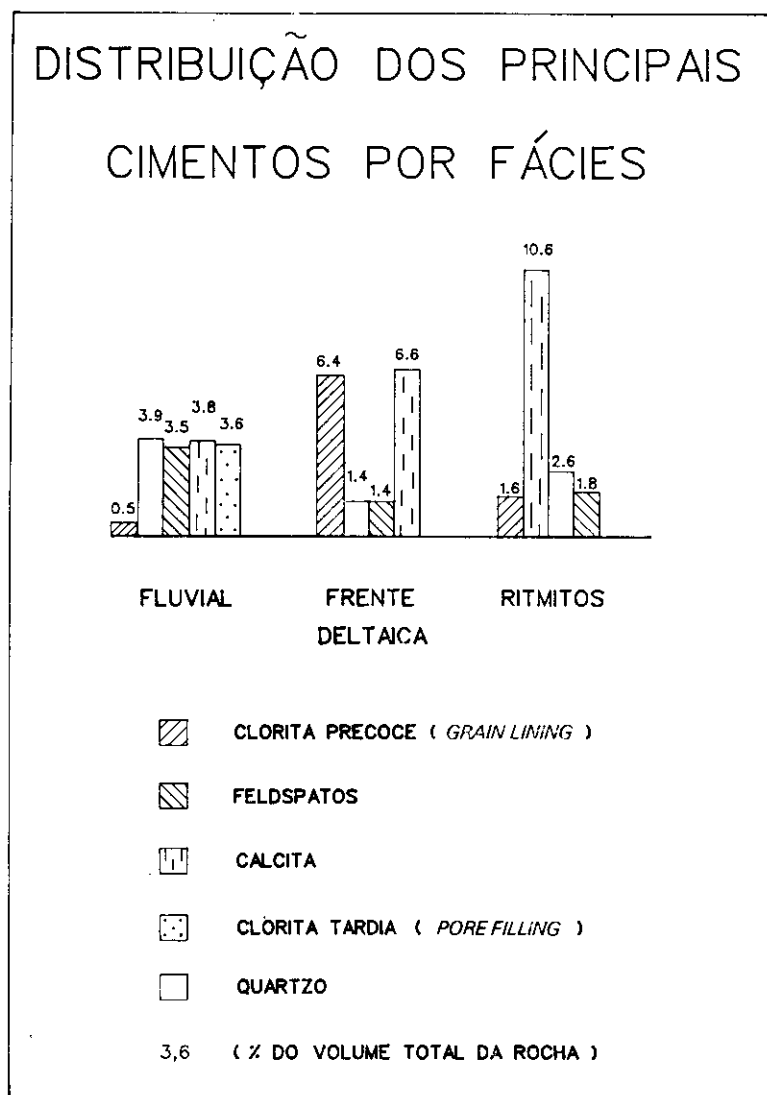


Fig. 9 - Diagrama de distribuição dos cimentos nos arenitos das diferentes fácies da Formação Pendência no Campo de Pescada.

Fig. 9 Cement distribution in sandstones of the Pendência Formation facies, Pescada Field.

co, albita, esfeno, pirita e minerais de titânio. Esta seqüência geral apresenta variações tanto em intensidade quanto relacionadas à cronologia dos eventos diagenéticos. As principais variações foram relacionadas à eodiagênese e tiveram um forte controle do sistema deposicional (figs. 7 e 9).

Os principais cimentos presentes nos arenitos da Formação Pendência no Campo de Pescada são clorita, calcita e crescimentos sintaxiais de quartzo e feldspatos, principalmente plagioclásios (tabela I). Fases tardias de quartzo, feldspatos, esfeno e pirita são cimentos volumetricamente secundários. Albitização de plagioclásio e feldspato potássico é comum nos arenitos estudados e ocorre preferencialmente a maiores profundidades.

Os cimentos volumetricamente mais importantes na fácies de arenitos grossos de canais distributários (fig. 9) são cloritas (precoce = 0,5% e tardia = 3,6%), quartzo (3,9%), feldspatos (3,5%) e calcita (3,8%). A primeira fase de clorita foi extremamente incipiente nos arenitos fluviais e não foi suficiente para inibir a diagênese mais tardia. Este mineral ocorre na forma de agregados descontínuos ao redor dos grãos (foto 1).

A fase eomesogênica mais importante nesta fácies foi a de crescimentos sintaxiais de feldspatos (principalmente plagioclásio) e quartzo (fotos 1 e 2). Fontes prováveis de Si, Na, Ca e K foram a dissolução de feldspatos por águas meteóricas nas porções mais proximais do sistema deposicional e transporte em solução destes cátions até encontrar barreiras de permeabilidade ou barreiras geoquímicas, e ilitização das esmectitas nos folhelhos associados.



Fig. 10 - Diagrama mostrando as sequências diagenéticas dos arenitos das três principais fácies sedimentares da Formação Pendência no Campo de Pescada.

Fig. 10 - Diagenetic sequences in sandstones of the three main sedimentary facies, Pendência Formation, Pescada Field.

Os valores de calcita mesogenética precoce (foto 2) são, em geral, baixos nos arenitos fluviais, com exceção dos arenitos da base da seção inferior da Formação Pendência, testemunhados no poço RNS-96, a 4390 m de profundidade. Este intervalo apresenta-se com água segundo dados de perfil.

A segunda e principal fase de precipitação de clorita ocorre na forma de agregados finos preenchendo poros (*pore filling*) e franjas tardias (fotos 3 e 4), e parece ter ocorrido após a geração de porosidade secundária mesogenética. A análise das reflexões hkl destas cloritas identificou o polítipo 11b (Hayes, 1970), característico de altas temperaturas, coerente com as temperaturas medidas no campo (*Bottom-Hole-Temperature*) entre 140-150 °C.

Fases diageneticamente tardias de quartzo e calcita ferrosa (foto 5), albita e feldspato potássico (foto 6) e pirita são volumetricamente menos importantes, mas contribuem

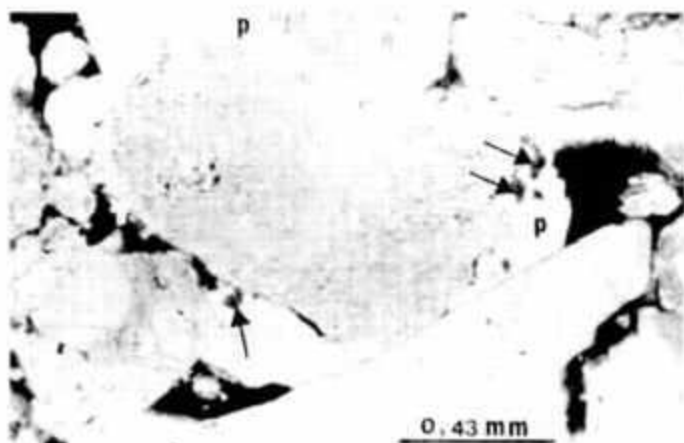


Foto 1 - Crescimentos secundários de plagioclásio (PI) englobando agregados descontínuos de clorita (setas). Poço RNS-85, 3.428,8 m. Nicóis paralelos (Ni//).
Photo 1 - Plagioclase overgrowths (PI) engulfing discontinuous chlorite aggregates (arrows). Well RNS-85, 3.428.8 m, parallel nicols.

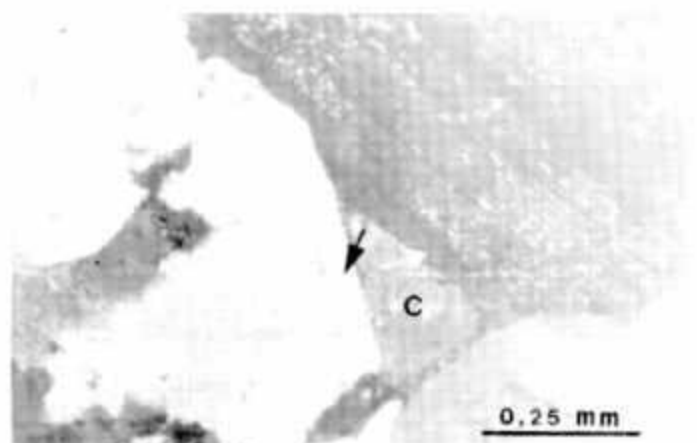


Foto 2 - Calcita (C) preenchendo poro primário reduzido por crescimentos secundários de quartzo e plagioclásio (setas).
Photo 2 - Calcite (C) filling primary pore, which has been reduced by quartz and plagioclase overgrowths (arrows). Well RNS-85, 3.431.5 m, crossed nicols.

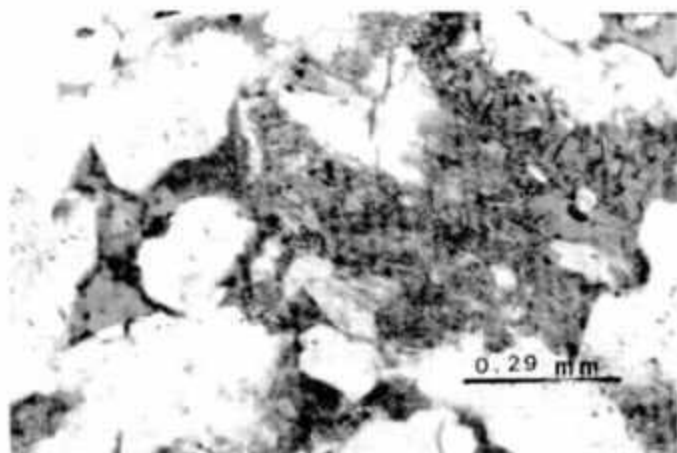


Foto 3 Clorita tardia na forma de agregados finos e franjas. Observe a heterogeneidade do sistema poroso constituído por poros intergranulares com formas geométricas e poros intragranulares. Poço RNS-85, 3 430,15 m. (N//).

Photo 3 Late chlorite in form of pore filling aggregates and fringes. Observe heterogeneous pore system, composed of geometric intergranular pores and intragranular pores. Well RNS 85, 3,430.15 m, parallel nicols.

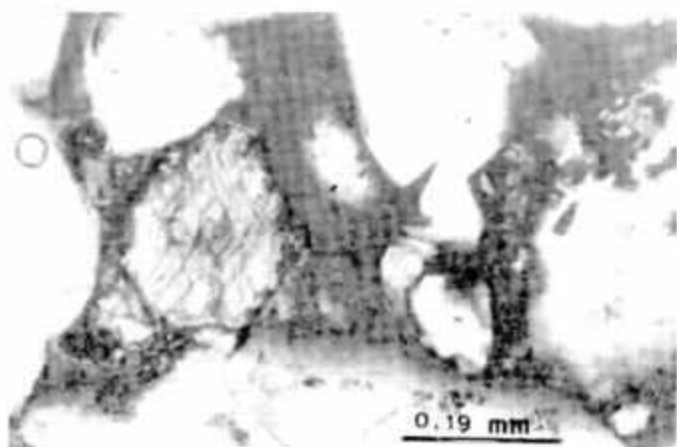


Foto 5 - Romboedro de calcita ferrosa e quartzo prismático tardios reduzindo porosidade primária. Poço RNS-85, 3 432,55 m. (N//).

Photo 5 Rhombohedron of late ferroan calcite and late prismatic quartz, which reduced primary porosity. Well RNS 85, 3,432.55 m, parallel nicols.

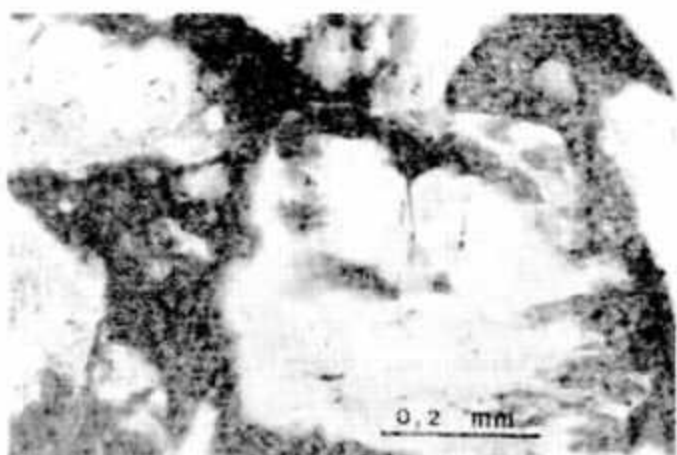


Foto 7 - Poros intergranulares e intragranulares em grãos parcialmente dissolvidos gerando um sistema poroso heterogêneo. Poço RNS-85, 3 430,15 m. (N//).

Photo 7 - Intergranular pores plus intragranular pores in partially dissolved grains, producing a heterogeneous pore system. Well RNS 85, 3,430.15 m, parallel nicols.

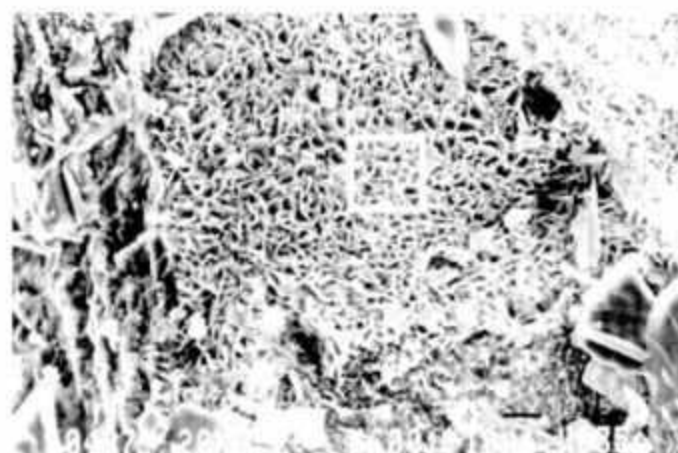


Foto 4 - Detalhe ao MEV da clorita tardia preenchendo poro. A área demarcada foi analisada por EDS. Poço RNS-86, 3 436,5 m.

Photo 4 SEM image of late chlorite pore filling. Box indicates area analyzed by EDS. Well RNS 86, 3,436.5 m.

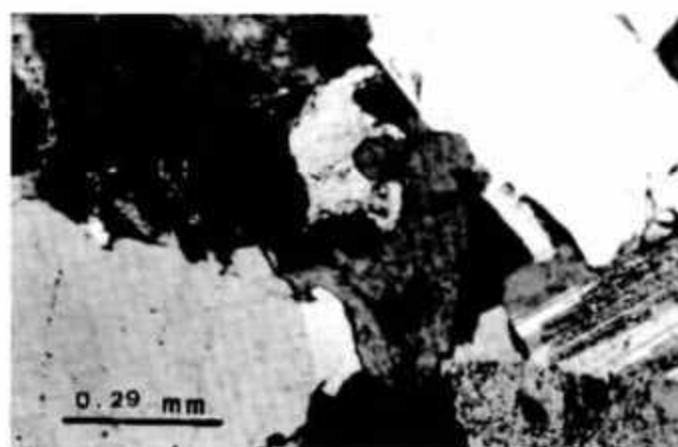


Foto 6 - Fases tardias de quartzo e plagioclásio bem desenvolvidas. Poço RNS-86, 3 436,5 m. NX.

Photo 6 Well developed late quartz and plagioclase phases. Well RNS 86, 3,436.5 m, crossed nicols.

significativamente para a alta heterogeneidade do meio poroso.

Os cimentos mais importantes nos arenitos finos de frente deltaica são clorita (6,4%) e calcita (6,6%). Quartzo e feldspatos são as fases volumetricamente menos importantes, contribuindo com 1,4% do volume total da rocha cada um.

A clorita precipitou-se principalmente em fase diagenética precoce na forma de espessas e contínuas franjas ao redor dos grãos (fotos 8 e 9) e, na maioria das vezes, aparece inibindo a compactação. Outra evidência do caráter precoce da clorita é a sua total ausência

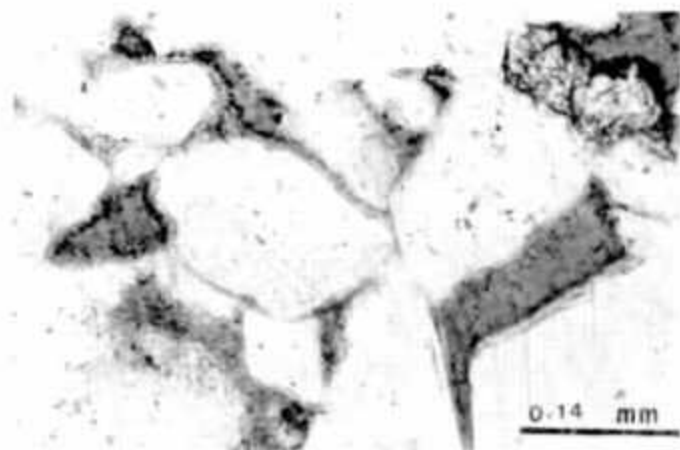


Foto 8 - Franjas de clorita precoce muito bem desenvolvidas ao redor dos grãos reduzem e preservam parcialmente a porosidade primária.
Poço RNS-96, 3 558,6 m. (N/I).

Photo 8 - Well developed early chlorite fringes around grains partially reduce and preserve primary porosity.
Well RNS-96, 3,558.6 m, parallel nicols.

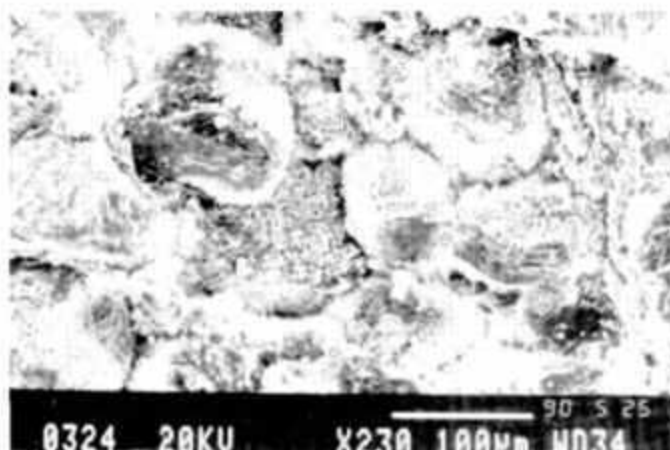


Foto 9 - Imagem ao MEV das franjas de clorita precoce. A área assinalada foi analisada por EDS.

Mesma amostra da foto 8.

Photo 9 - SEM image of early chlorite fringes. Box indicates area analyzed by EDS. (same sample as photo 8).

em poros secundários, gerados pela dissolução de calcita. Além disso, poros môldicos delineados por uma delicada franja de clorita (foto 10) indicam que a mesma é anterior à dissolução. As análises das reflexões hkl em amostras não orientadas revelou a presença do tipo Ia, típico de baixas temperaturas, (Hayes 1970).

As análises de DRX e microsonda de energia dispersa (EDS) demonstraram que estas cloritas são ricas em ferro. Esta importante fonte de ferro pode estar relacionada à dissolução de litoclastos vulcânicos

e/ou à contribuição dos folhelhos associados.

No caso dos reservatórios da Formação Pendência, a precipitação de clorita diageneticamente precoce preservou a rocha da compactação mecânica, mas destruiu drasticamente a porosidade primária.

Exemplos bastante conhecidos de preservação de porosidade primária através de precipitação de clorita precoce são os arenitos das formações Norphlet, Jurássico Superior, Alabama (Dixon *et al.* 1989); Woodbine-Tuscaloosa, Louisiana (Thompson, 1979) e os arenitos da

Formação Itajai, Membro Ilhabela, Campo de Merluza, Bacia de Santos (Sombra *et al.* 1990, neste volume).

A calcita poiquilotópica ocupa os poros onde a clorita não está presente, ou é de ocorrência limitada. Aparentemente não tem o caráter tão precoce (final da eodiagênese/início da mesodiagênese) como a clorita, mas teve o papel de estabilizar o arcabouço e mantê-lo aberto. Evidências texturais, tais como contatos retos e côncavo-convexos entre grãos mostram que esta calcita ocorreu após alguma compactação mecânica (foto 11).

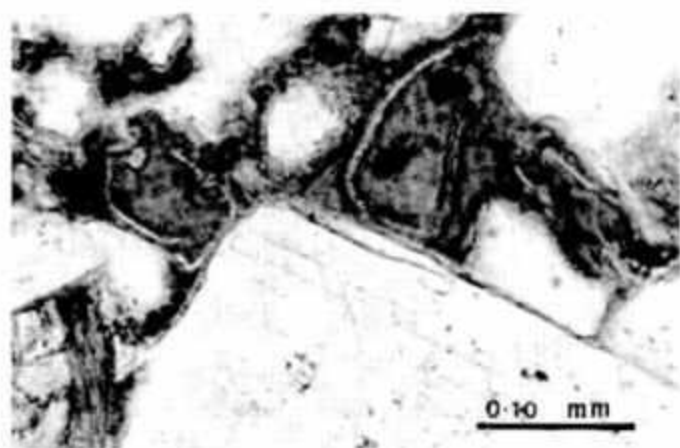


Foto 10 - Poros môldicos gerados por dissolução de grãos instáveis (provavelmente litoclastos vulcânicos) circundados por franjas de clorita precoce.

Poço RNS-96, 3 558,6 m. (N/I).

Photo 10 - Moldic pores generated by dissolution of unstable grains (probably volcanic rock fragments) and surrounded by early chlorite fringes.
Well RNS-96, 3,558.6 m, parallel nicols.

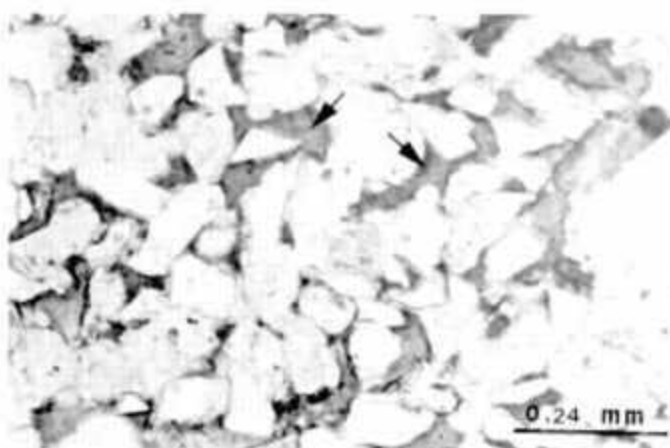


Foto 11 - Calcita pós-compactação (setas).

Poço RNS-96, 3 550,4 m. (N/I).

Photo 11 - Post-compactation calcite (arrows).
Well RNS-96, 3,550.4 m, parallel nicols.

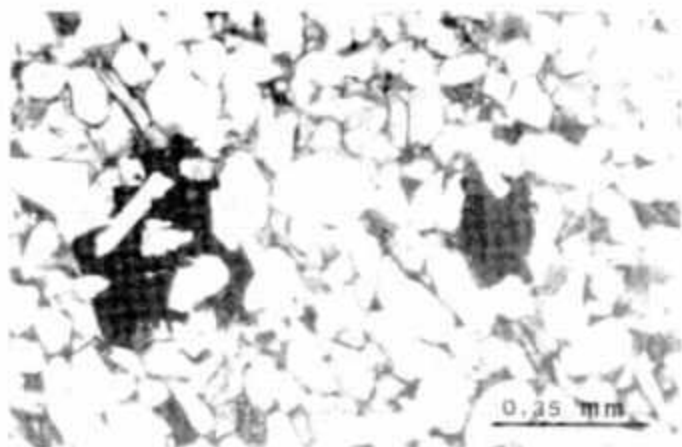


Foto 12 - Cimento de pirita na forma de agregados de cristais, corrosivo em relação aos grãos.

Poço RNS-85, 3 443,1 m. (N//).

Photo 12 - Pyrite aggregates corroding framework grains. Well RNS-85, 3,443.1 m, parallel nicols.

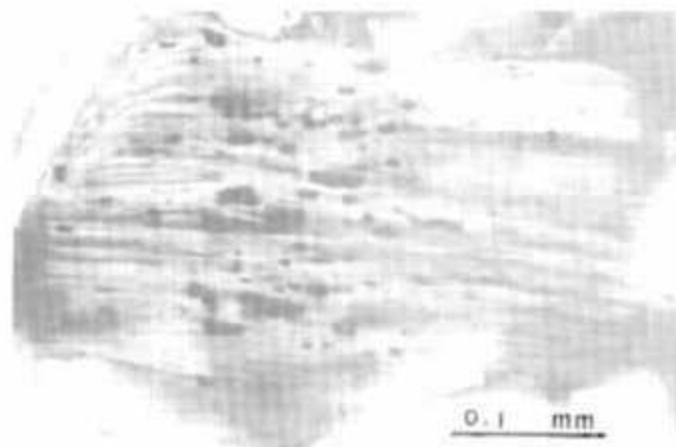


Foto 13 - Cristais de pirita precipitados ao longo dos planos de clivagem de grão de biotita cloritizada.

Poço RNS-85, 3 438,35 m. (N//).

Photo 13 - Pyrite crystals precipitated along cleavage planes of chloritized biotite grain. Well RNS-85, 3,438.35 m, parallel nicols.

Estas evidências petrográficas sugerem que tanto a clorita como a calcita foram precipitadas precocemente, pois ambas inibiram a compactação mecânica, estabilizaram o arcabouço e, provavelmente, dificultaram a circulação mais eficiente de fluidos mesogenéticos.

Os arenitos finos mais ricos em quartzo e feldspatos encontram-se intensamente cimentados por calcita poiquilotópica; os níveis silteicos, mais micáceos e com maior teor de litoclastos vulcânicos foram cimentados por clorita. Tanto num como noutro, onde a cimentação precoce não ocorreu, a compacta-

ção química e os crescimentos sintaxiais de quartzo reduziram em muito a porosidade. A compactação química e a dissolução por pressão foram tanto mais eficientes quanto mais micáceos eram os sedimentos. Este fato pode estar relacionado a filmes de difusão formados entre grãos de quartzo e micas em contato.

Estas evidências mostraram que a textura, associada à composição do arcabouço desta fácies, controlaram a eodiagênese.

A pirita, comum nesta fácies, ocorre como agregados de cristais cú-

bicos e octaédricos corroendo intensamente os grãos do arcabouço ou como cristais discretos precipitados nos planos de clivagem de biotitas (fotos 12 e 13).

Cristais tardios de quartzo, albita e esfero são comumente encontrados sobre as franjas de clorita precoce (foto 14).

Nos ritmitos lacustres, o principal cimento presente é a calcita (foto 15) com teores médios de 10,6% do volume total da rocha (fig. 9). Secundariamente, aparecem os crescimentos sintaxiais de quartzo



Foto 14 - Imagem ao MEV mostrando cristais tardios de quartzo (Q) e albita (Ab) precipitados sobre franjas de clorita precoce.

Poço RNS 96, 3 558,6 m.

Photo 14 - SEM image showing late quartz (Q) and albite (Ab) crystals precipitated over early chlorite fringes. Well RNS 96, 3,558.6 m.

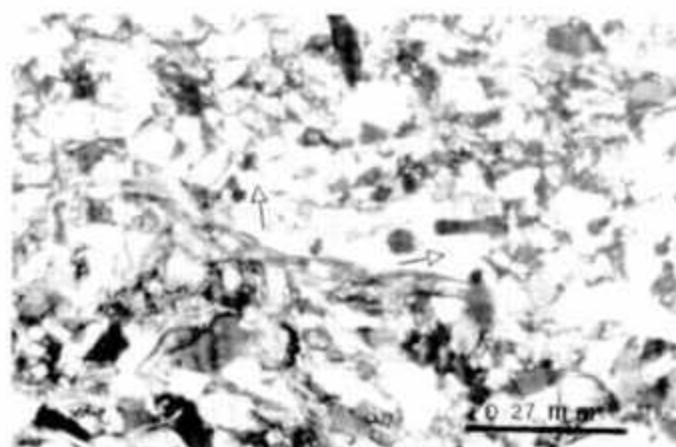


Foto 15 - Arenito muito fino turbidítico intensa e precocemente cimentado por calcita (setas).

Poço RNS-85, 3 730,9 m. NX.

Photo 15 - Turbiditic very fine-grained sandstone cemented by early pervasive calcite (arrows). Well RNS-85, 3,730.9 m, crossed nicols.

(2,6%), feldspatos (1,8%) e clorita (1,6%).

A fonte para a calcita pode ter sido a dissolução de intraclastos carbonáticos e bioclastos associados particularmente a estes sedimentos, preservados nas zonas intensamente cimentadas (foto 16).

Os cimentos de quartzo e feldspatos são predominantes nas zonas com maior grau de compactação química e dissolução por pressão. Isto indica que o processo de dissolução/reprecipitação ocorreu em escala de lâmina delgada.

A clorita aparece sempre associada às zonas bioturbadas. Nestas porções, o parâmetro textural também parece ter exercido forte controle na diagênese. As escavações feitas pelos organismos foram preenchidas por sedimento caracteristicamente mais fino do que os grãos adjacentes. Observou-se uma clara preferência do cimento carbonático pelas porções mais grosseiras, enquanto a clorita é o único cimento presente nos sedimentos finos bioturbados. Aparentemente, as bioturbações preenchidas por sedimento mais fino que o imediatamente adjacente, constituíram-se de microambientes geoquímicos, favoráveis à precipitação de clorita, o que inibiu a percolação de fluidos e, conseqüentemente, a cimentação carbonática.

8 – CARACTERÍSTICAS DE RESERVATÓRIO

Os arenitos fluviais são os reservatórios que apresentam as melhores porosidades (12% em média) e permeabilidades (entre 1 e 21mD) da Formação Pendência no Campo de Pescada (fig. 11, tabela II).

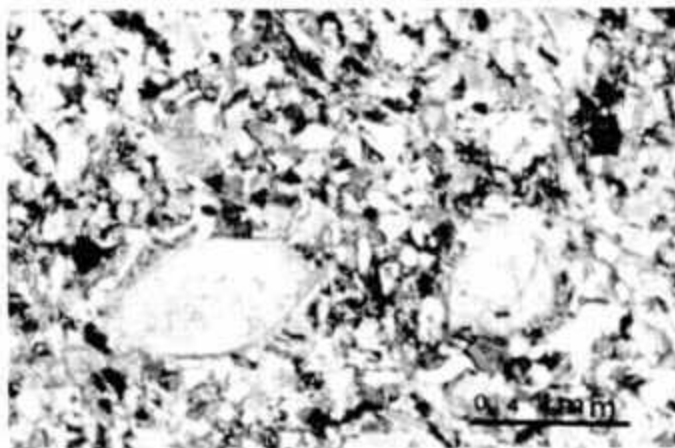


Foto 16 Arenito fino rico em bioclastos (ostracodes) intensamente cimentado por calcita.

Poço RNS-85, 3 730,9 m. NX.

Photo 16 Very fine grained sandstone rich in bioclasts (ostracods), pervasively cemented by calcite.

Well RNS 85, 3.730.9 m, crossed nicols.

A relação poro/garganta é baixa, com sistema poroso heterogêneo devido a crescimentos sintaxiais tardios de quartzo e feldspatos. A macroporosidade intergranular (foto 7) é predominante. São comuns os poros agigantados, alargados e intragranulares (foto 7) em feldspatos alveolados. Poros móldicos gerados pela dissolução de grãos, são pouco representativos. Microporosidade em clorita tardia e intraclastos argilosos foi quantificada em cerca de 32% do total da porosidade, através da diferença entre o valor da porosidade medida em porosímetro e a porosidade visual medida em lâmina delgada.

Nos arenitos fluviais da base da seção inferior da Formação Pendência (RNS-96 a 4 390 m) ocorrem baixos valores de porosidade (em torno de 5%) e permeabilidade (menores que 0.1mD), devidos à intensa compactação mecânica e química e cimentação por calcita ferrosa.

Intervalos de granulometria mais fina, característicos de depósitos de transbordamento (*crevasse splay*), também apresentam baixas porosidades e permeabilidades. Estes arenitos estão intercalados aos arenitos grossos de canais dis-

tributários e são, geralmente, mais micáceos, apresentando intensa dissolução por pressão e cimentação por crescimentos secundários de quartzo ou por calcita poiquilótópica.

Os arenitos finos de frente deltaica apresentam porosidades entre 2 e 17% e permeabilidades muito baixas, geralmente < 0,1mD, com um máximo de 2mD (fig. 11, tabela II). Os pontos com maiores permeabilidades referem-se a intervalos centimétricos de arenitos mais grossos, pertencentes às porções mais proximais de sigmóides de frente deltaica. Nestes intervalos, a calcita poiquilótópica é o principal cimento.

A microporosidade relacionada às espessas franjas de clorita representa cerca de 67% da porosidade total.

A maior parte da macroporosidade (33%) é do tipo intergranular, mas porosidade intragranular e móldica também ocorrem. Este tipo de porosidade é característico das porções texturalmente mais grossas. Feições de dissolução do cimento carbonático e dos grãos sugerem que esta porosidade é secundária. O empacotamento nesta fácies é geralmente aberto devido à cimentação precoce por clorita e calcita.

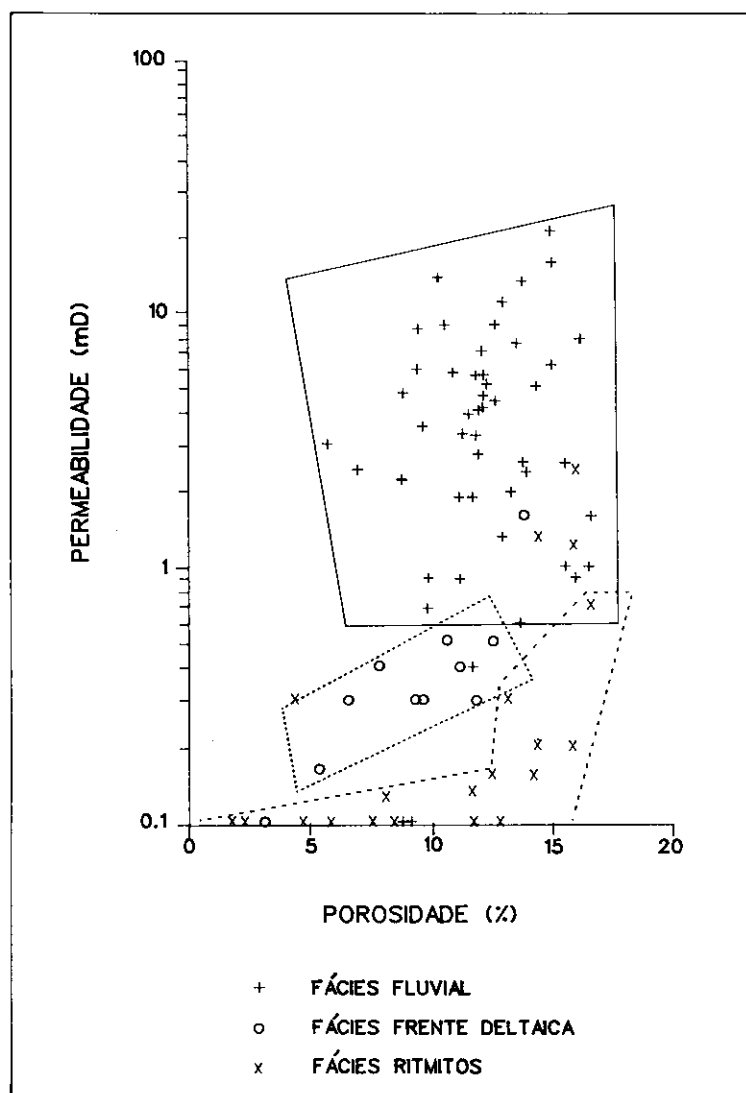


Fig. 11 - Gráfico da porosidade versus permeabilidade obtidas por análises petrofísicas de plugues dos arenitos das principais fácies da Formação Pendência no Campo de Pescada.

Fig. 11 Porosity as a function of permeability obtained by petrophysical analysis from plugs of the three main facies of the Pendência Formation, Pescada Field.

Os ritmitos são os piores reservatórios e apresentam porosidades entre 3 e 14% e permeabilidades geralmente < 1mD (fig. 11, tabela II). O sistema poroso destas rochas é extremamente heterogêneo, devido ao processo de cimentação e dissolução de cimento carbonático. Onde a calcita não precipitou, a compactação química e a dissolução por pressão de grãos de quartzo e feldspatos encarregou-se de diminuir drasticamente a porosidade.

A microporosidade em micas e intraclastos argilosos contribui com cerca de 59% da porosidade total. A macroporosidade é representada principalmente por poros secundários intergranulares e intragranulares, resultantes da dissolução de cimento carbonático e raros grãos.

Bruhn *et al.* (1988) observaram que, a despeito das maiores porosidades nos reservatórios profundos da porção marítima da bacia, os valores de permeabilidade são tão baixos quanto os dos reservatórios da porção emersa. Os valores baixos de permeabilidade nos reservatórios Pendência no Campo de Pescada podem ser explicados pelo alto teor de clorita precoce nos arenitos de frente deltaica, e de crescimentos secundários de quartzo e feldspatos, e clorita tardia nos arenitos fluviais.

9 - CONTROLES DA DIAGÊNESE E DA POROSIDADE

Hurst e Irwin (1982) listaram vários fatores controladores da diagênese de arenitos: temperatura, pressão, composição do arcabouço, composição dos fluidos intersticiais, fácies sedimentares, tectônica e tempo.

TABELA II / TABLE II
VALORES MÉDIOS DE DADOS DE ANÁLISES PETROFÍSICAS (N = 95) E TIPOS DE POROSIDADE OBSERVADOS EM LÂMINA DELGADA, CARACTERÍSTICOS DE CADA FÁCIES
AVERAGE VALUES FOR PETROPHYSICAL DATA (N = 95) AND TYPES OF POROSITY OBSERVED IN THIN SECTIONS, RELATED TO FACIES

		Fluvial	Frente Deltaica	Ritmitos Lacustres
Porosidade total (lab.)	mín.	6%	2%	3%
	méd.	12%	11%	9%
	máx.	17%	17%	14%
Porosidade intergranular		51%	27%	38%
Porosidade intragranular		17%	6%	3%
Microporosidade		32%	67%	59%
Permeabilidade (lab.)	mín.	1	<0.1	<0.1
	méd.	2.3mD	0.2mD	0.3mD
	máx.	21	2.4	1.6

Dependendo da situação que está sendo analisada, diferentes autores consideram este ou aquele fator mais importante como controlador dos processos diagenéticos. Davies *et al.* (1979), por exemplo, consideraram a composição do arcabouço e das águas intersticiais como fatores controladores principais, enquanto Bjørlykke *et al.* (1979) consideraram que as fácies sedimentares e a composição dos fluidos no meio poroso são fundamentais.

Füchtbauer (1974) concluiu que o ambiente deposicional foi o fator controlador do tipo de cimento precipitado nos arenitos triássicos e carboníferos da Alemanha.

No caso dos arenitos da Formação Pendência do Campo de Pescada, os principais fatores controladores da qualidade dos reservatórios foram o sistema deposicional, a composição detrítica dos arenitos, a história de soterramento e a diagênese.

9.1 – Sistema Depositional

O sistema deposicional exerceu um controle muito forte, principalmente na eodiagênese dos arenitos, à medida em que condicionou a textura dos sedimentos e a composição dos fluidos intersticiais. Enquanto nos arenitos grossos fluviais de planície deltaica a composição das águas era fortemente influenciada por águas meteóricas, subsaturadas e oxidantes, nos arenitos mais finos de frente deltaica e ritmitos lacustres estavam submetidos a condições redutoras e os fluidos intersticiais já tendiam para soluções mais ricas em cátions, resultado da interação com ambiente lacustre mais ou menos salgado. Conseqüentemente, estas diferen-

tes fácies iniciaram suas diagêneses em sistemas geoquímicos diferentes. Enquanto nos arenitos fluviais, mais permeáveis, o fluxo intenso de águas meteóricas subsaturadas favorecia a dissolução de grãos, e os grãos rearranjavam-se mecanicamente, nos arenitos de frente deltaica, menos permeáveis, formava-se precocemente a clorita, em um ambiente relativamente anóxico e com menor fluxo de fluidos.

9.2 – Composição Detrítica

A composição do arcabouço foi um fator fundamental no controle do padrão diagenético dos arenitos da Formação Pendência do Campo de Pescada. Os arenitos mais finos de frente deltaica e ritmitos lacustres são levemente mais ricos em litoclastos vulcânicos do que os arenitos fluviais. A total ausência deste tipo de fragmento nos arenitos fluviais pode ser advogada à sua dissolução por águas meteóricas ácidas subsaturadas.

Portanto, a clorita precoce presente nos arenitos mais finos, principalmente de frente deltaica, pode ter recebido contribuição da dissolução de litoclastos vulcânicos nas fácies proximais.

Em um ambiente geoquímico relativamente estagnado, onde a circulação dos fluidos é pouco eficiente, a ocorrência de microambientes é favorecida. A diagênese neste caso é heterogênea. Cada poro contém um fluido cuja composição iônica depende do equilíbrio deste fluido com as assembleias mineralógicas adjacentes (Hurst e Irwin, 1982).

Carrigy e Mellon (1964), estudando arenitos cretácicos e terciários do

Canadá, concluíram que existia uma perfeita relação entre os argilominerais autigênicos e a assembleia mineralógica detrítica. Os autores observaram que os arenitos ricos em litoclastos vulcânicos continham minerais autigênicos que requeriam magnésio, ferro, cálcio e potássio, como clorita, por exemplo.

No caso dos ritmitos lacustres, intervalos ricos em bioclastos aparecem fortemente cimentados por calcita, outro exemplo da interação dos fluidos intersticiais com os componentes do arcabouço à procura do equilíbrio.

9.3 – História de Soterramento

A influência da história de soterramento no controle da porosidade e da diagênese pode ser constatada se compararmos o mesmo tipo de reservatório da Formação Pendência nos campos terrestres com os reservatórios do Campo de Pescada (fig. 12).

O menor tempo de residência a grandes profundidades dos reservatórios da parte marítima da bacia, que só atingiram a profundidade de 3 000 m no Turoniano, foi um argumento usado por Bruhn *et al.* (1988) para explicar os valores mais altos de porosidade nestes reservatórios, quando comparados com os da porção emersa da bacia.

Com base na tendência apresentada pelos dados de campos produtores nestes mesmos reservatórios na parte terrestre da bacia (Anjos *et al.* 1990, neste volume), seria otimista prever reservatórios a 3 500 m com porosidades superiores a 10%. No entanto, a história de soterramento foi diferente nas duas áreas. Aplicando-se a meto-

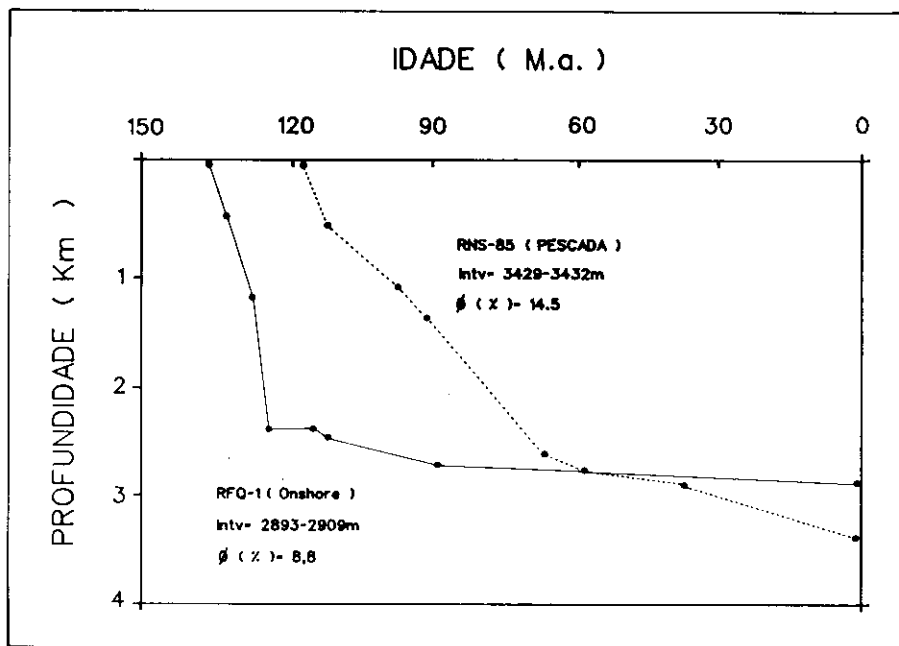


Fig. 12 - Diagrama tempo-temperatura comparando a história de soterramento do reservatório fluvial do Campo de Pescada (RNS-85) com o da parte emersa da bacia (RFQ-1). O reservatório da parte submersa da bacia mostra um tempo de residência em profundidade menor do que o reservatório da parte emersa e apresenta maiores porosidades, embora esteja a maiores profundidades.

Fig. 12 - Time-depth diagram comparing burial history of fluvial reservoir, Pescada Field (RNS-85), with a reservoir from onshore portion of basin (RFQ-1). The offshore reservoir displays shorter residence time at a great burial depth than the onshore one and displays greater porosity despite its deeper burial.

dologia desenvolvida por Sombra (1990, neste volume), observa-se que os reservatórios fluviais da Formação Pendência do Campo de Pescada (*offshore*) estiveram submetidos a um tempo de residência em profundidade menor do que os reservatórios da parte emersa da bacia (*onshore*), e por isso apresentam melhores porosidades, em concordância com a hipótese de Bruhn *et al.* (1988).

9.4 - Diagênese

Evidências que sugerem uma fase de geração de porosidade secundária mesogenética, tais como feições de dissolução de calcita, feldspatos e litoclastos instáveis, após a principal fase de compactação, foram observadas nos arenitos

de frente deltaica e ritmitos lacustres.

A geração de porosidade secundária mesogenética através de solventes oriundos da maturação da matéria orgânica, tais como CO₂ (Schmidt e McDonald, 1979), ácidos orgânicos (Surdam *et al.* 1984) e H₂S (Siebert, 1985) devem ser objeto de estudos posteriores mais detalhados, contudo, a intensa produção de H₂S (discutida no próximo item), característica dos reservatórios do Campo de Pescada, corrobora a hipótese de geração de porosidade secundária por esse processo.

Bruhn *et al.* (1988) sugeriram a existência de duas fases de geração de porosidade secundária nos arenitos da Formação Pendência,

na porção marítima da bacia, relacionadas a fluidos solventes originados por dois geradores diferentes (formações Pendência e Alagamar), com o objetivo de explicar os maiores valores de porosidade nestes reservatórios, quando comparados com os da porção emersa. No entanto, um segundo evento de geração de porosidade secundária relacionado ao gerador Alagamar não foi petrograficamente observado neste trabalho. A presença de cristais euédricos de calcita ferrosa tardia, sem nenhuma evidência de dissolução posterior, argumenta contrariamente a essa hipótese (foto 5).

10 - ANÁLISES ISOTÓPICAS

A análise isotópica de carbono e oxigênio dos cimentos de calcita foi realizada com o objetivo de estimar a temperatura de precipitação e origem do carbono presente nas diferentes fases de cimento calcítico, reconhecidas através de critérios texturais e relações paragenéticas. As diferentes fases de calcita foram classificadas segundo os tipos I, II e III, da mais precoce para a mais tardia (tabela III).

A calcita do tipo I é poiquilotópica e os cristais apresentam-se englobando os grãos do arcabouço (foto 16). Este tipo de calcita é mais comum nos arenitos turbidíticos, onde ocorre na forma de *patches*, e é fortemente corrosivo em relação aos grãos do arcabouço.

A calcita do tipo II precipitou-se após a principal fase de compactação mecânica e/ou após os crescimentos de quartzo e feldspatos (foto 11). Os grãos do arcabouço apresentam-se em contato reto ou côncavo-convexo. Os contatos retos entre cimento e crescimentos

TABELA III / TABLE III

DADOS DAS ANÁLISES ISOTÓPICAS DE CARBONO E OXIGÊNIO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO DE CALCITA DOS ARENITOS
 CARBON AND OXYGEN ISOTOPE DATA FOR DIFFERENT TYPES OF CALCITE CEMENT IN SANDSTONES

Poço	Prof. (m)	Del ¹³ C	Del ¹⁸ O	Tipo de Calcita
3-RNS-85	3432.55	-1.74	-15.51	II + III
3-RNS-85	3730.90	-3.87	-15.22	I
3-RNS-85	3732.25	-4.53	-16.49	I + II
3-RNS-85	3734.60	-3.40	-14.25	I
3-RNS-86	3435.30	-0.84	-10.02	II
3-RNS-86	3436.50	-1.50	-15.05	III
3-RNS-86	3873.40	-2.85	-15.48	II
3-RNS-86	3878.30	-5.10	-16.43	II
3-RNS-89	3370.75	-6.96	-16.23	II
3-RNS-96	3550.40	-2.35	-15.76	II
3-RNS-96	3558.40	-1.73	-11.74	II
3-RNS-96	4386.50	-5.30	-19.13	III
3-RNS-96	4393.40	-5.98	-19.01	III

secundários mostram que esta calcita não foi corrosiva em relação aos grãos.

A calcita do tipo III, mais comum a maiores profundidades, apresenta-se principalmente substituindo grãos, ou na forma de romboedros tardios precipitados em poros secundários sem qualquer evidência de dissolução posterior (foto 5).

O gráfico DEL¹⁸O x DEL¹³C mostra uma correlação positiva entre os valores de oxigênio e carbono (fig. 13).

As análises isotópicas mostram uma tendência de enriquecimento progressivo em isótopos relativamente mais leves de oxigênio e de carbono (valores mais negativos) com o aumento da profundidade (figs. 14 e 15).

Os valores relativamente mais negativos de DEL¹⁸O, com a profundidade crescente, são coerentes com maiores temperaturas de precipitação a maiores profundidades. Se utilizarmos valores de DEL¹⁸O entre 0 e -4 (‰ SMOW) para a composição da água do Lago Pendência, a temperatura estimada de precipitação do cimento de calcita, calculada segundo a equação de O'Neil *et al.* (1969), varia entre 73 °C-173 °C e 46 °C-120 °C, respectivamente. Este amplo intervalo de temperatura sugere que houve um contínuo processo de dissolução/reprecipitação de calcita com o soterramento. Embora os dados mostrem uma clara tendência de enriquecimento em isótopos mais leves, não foi observada nenhuma correlação com os diferentes tipos texturais de calcita (calcitas dos tipos I, II e III). Esperava-se que a calcita texturalmente precoce (tipo I) mostrasse valores de DEL¹⁸O

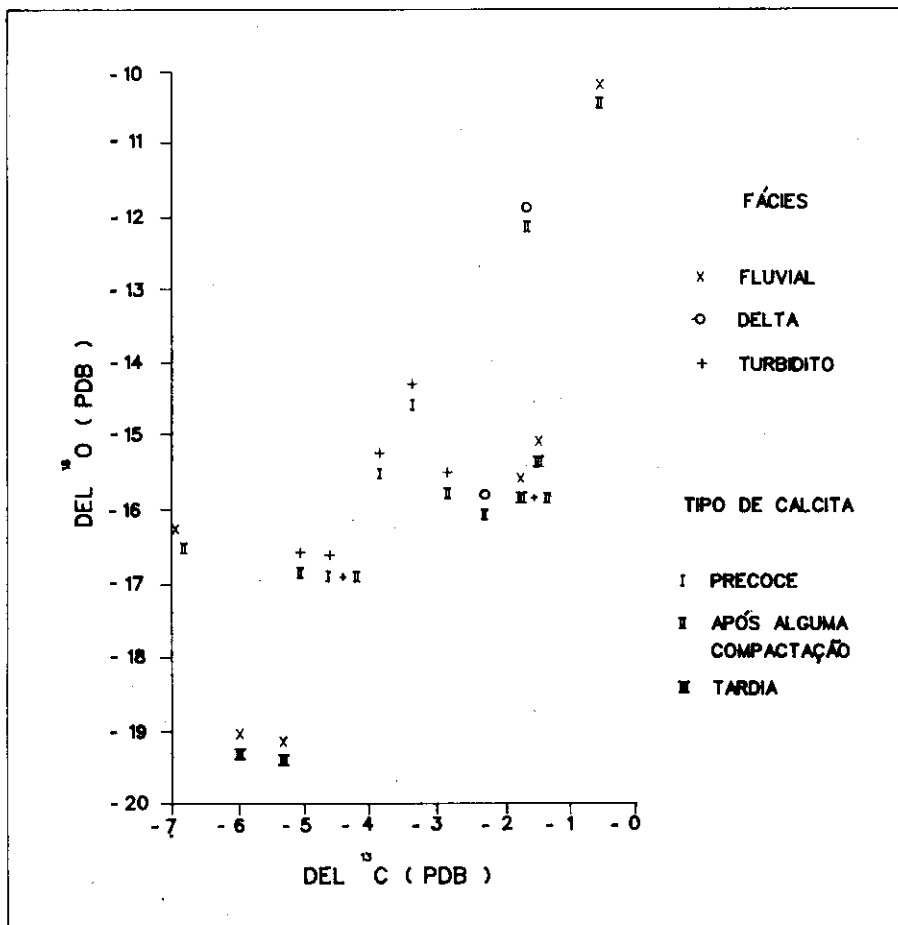


Fig. 13 - Gráfico DEL¹⁸O versus DEL¹³C mostrando os resultados das análises isotópicas dos diferentes tipos de calcita nas três fácies principais.
 Fig. 13 - DEL¹⁸O as a function of DEL¹³C, showing results of isotopic analyses for different types of calcite in the three main facies.

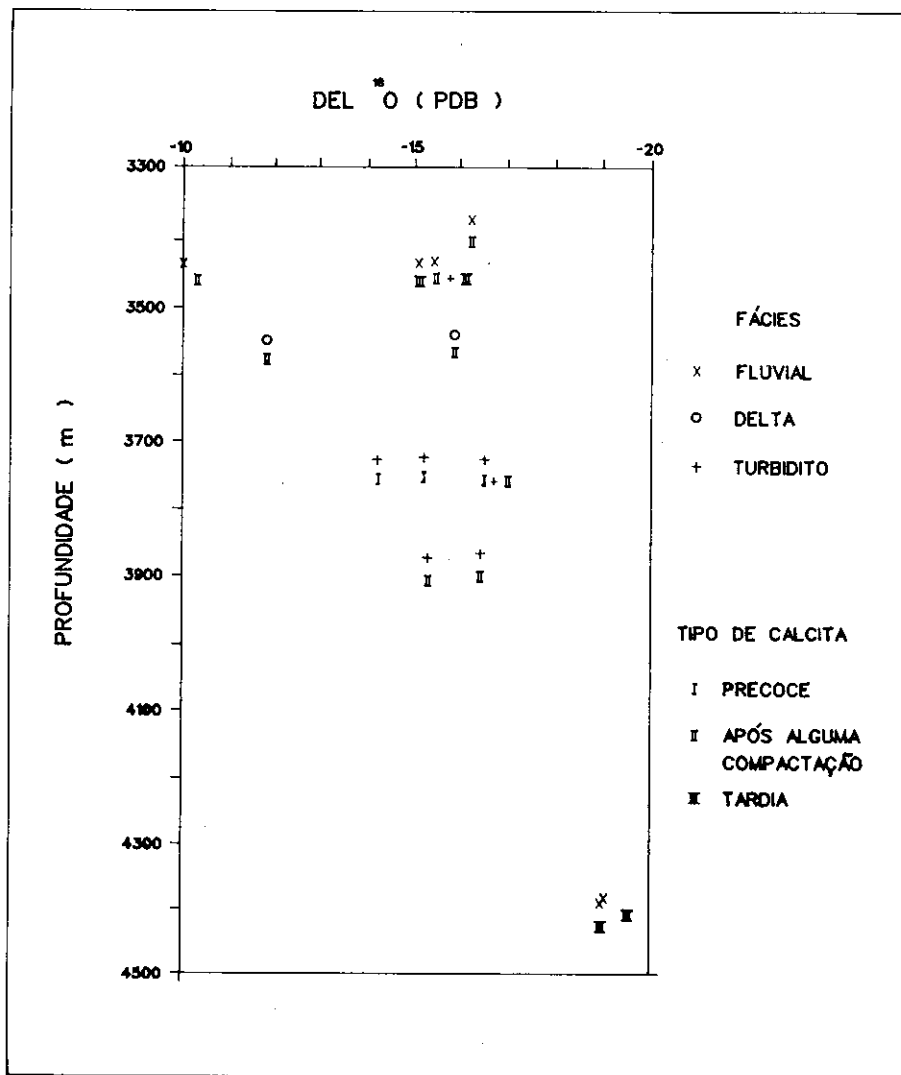


Fig. 14 - Gráfico da variação do DEL ¹⁸O com a profundidade.
Fig. 14 - Variations in DEL ¹⁸O as a function of depth.

relativamente menos negativos do que as calcitas dos tipos II e III, texturalmente mais tardias.

Os valores relativamente mais negativos de DEL ¹³C, com o aumento da profundidade, sugerem uma contribuição cada vez maior de carbono oriundo da descarboxilização térmica da matéria orgânica (Curtis, 1978).

11 - MAIORES POROSIDADES EM ZONA DE ÁGUA E PRODUÇÃO DE H₂S

Os arenitos da Formação Pendência no Campo de Pescada apresentam duas anomalias: a primeira é verificada durante a fase de avaliação dos reservatórios, quando as zonas com água apresentam maiores porosidades em perfis (F.J.

Maia, informação verbal); a segunda ocorre na fase de exploração, durante a qual ocorre intensa produção de H₂S.

A aparente anomalia de zonas com água apresentarem altas porosidades pode estar relacionada à presença de grande quantidade de clorita no reservatório. A presença destes argilominerais resulta em sistema poroso com área superficial extremamente grande e alto teor de microporosidade. Isto afeta significativamente a permeabilidade e a saturação de água irreduzível do sistema, devido ao grande poder de reter água, característico destes argilominerais. Este fato poderia induzir a uma avaliação errônea da porosidade e das saturações relativas de óleo e água e, conseqüentemente, a uma má definição do contato óleo-água. De fato, essa diferença no padrão dos perfis refletiria a passagem gradual de uma fácies pobre em clorita para outra rica em clorita, ambas com hidrocarboneto. Neste caso, fraturamento de intervalos saturados de gás ricos em clorita (baixas permeabilidades) poderiam resultar em níveis produtores.

Uma outra hipótese para explicar essa aparente anomalia pode estar relacionada com a continuação da geração de porosidade secundária abaixo do contato óleo-água após o traqueamento dos hidrocarbonetos, como foi sugerido por Honda (1981) e Honda e McBride (1981).

A intensa geração de H₂S nos reservatórios do Campo de Pescada poderia ser o mecanismo responsável pela continuação do processo de geração de porosidade secundária após a geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos, abaixo do contato óleo-água.

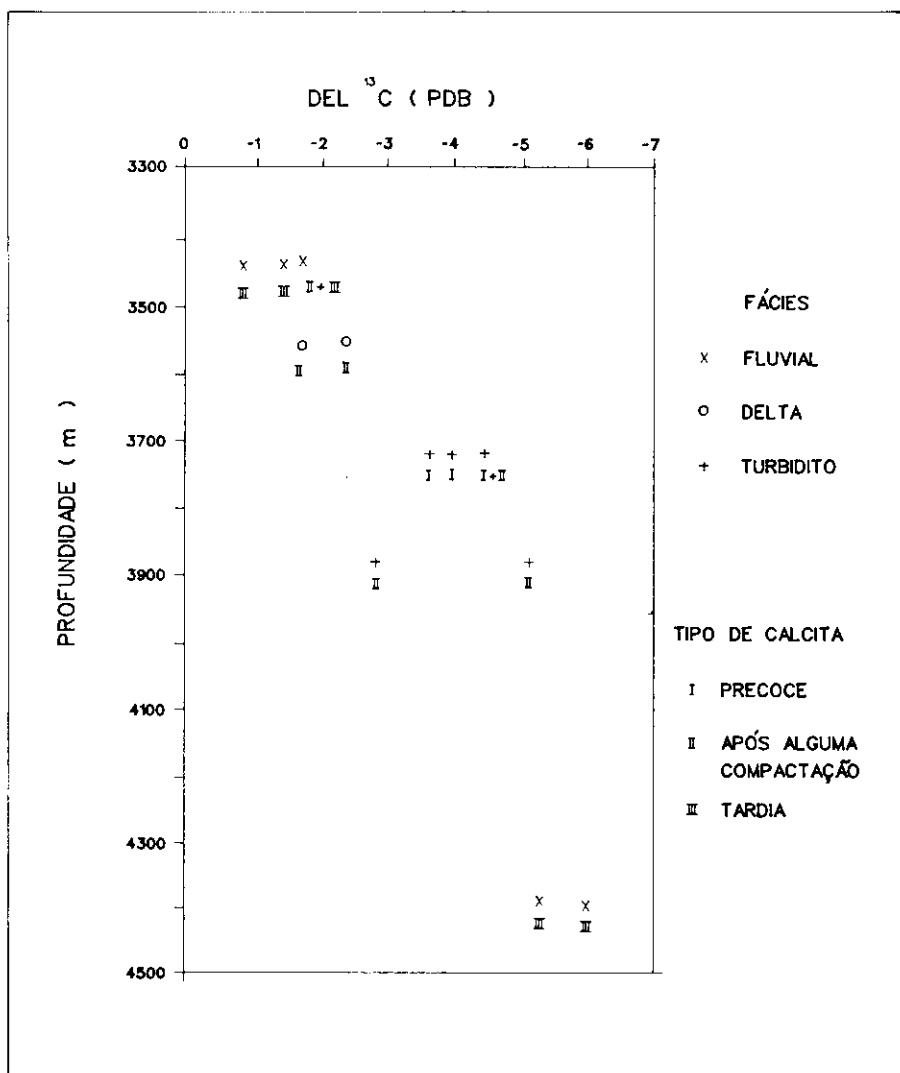


Fig. 15 - Gráfico da variação do DEL ¹³C com a profundidade.
Fig. 15 - Variations in DEL ¹³C as a function of depth

A geração de H₂S pode ser explicada de duas formas principais: 1)- redução de sulfatos por hidrocarbonetos (Siebert, 1985); 2)- craqueamento térmico do querogênio, principalmente do tipo I, rico em enxofre (Tissot e Welte, 1978). Castro (1990, 1991) atribui a este último processo o principal responsável pela geração de H₂S na área

de Pescada. O alto grau geotérmico da bacia e as altas temperaturas registradas no Campo de Pescada (cerca de 150 °C) favorecem a segunda alternativa para explicar a intensa geração de H₂S. A dissolução de litoclastos vulcânicos, feldspatos e cimento carbonático, e a precipitação de pirita, poderiam estar relacionados a este processo.

12 - CONCLUSÕES

- Os arenitos da Formação Pendência são reservatórios de óleo e gás no Campo de Pescada, apresentando porosidades de até 16% em profundidades maiores do que 3 400 m;

- os arenitos são arcósios e subarcósios e estão distribuídos por três litofácies principais: 1)- arenitos grossos a conglomeráticos de planície deltaica; 2)- arenitos finos/médios de frente deltaica; 3)- ritmitos lacustres rasos compostos de arenitos finos/muito finos e siltitos intercalados;

- o sistema deposicional, a composição detrítica dos arenitos, a história de soterramento e a diagênese foram os principais controladores da qualidade dos reservatórios;

- observou-se uma clara diferença em termos de estágios e processos diagenéticos nas diferentes fácies sedimentares. Nos arenitos fluviais os cimentos eodiagenéticos foram pouco desenvolvidos. Por outro lado, os processos mesogenéticos (crescimentos de quartzo e feldspatos, calcita, geração de porosidade secundária e clorita tardia) foram bem mais intensos quando comparados com os arenitos das demais fácies. Nos arenitos de frente deltaica a precipitação de franjas espessas de clorita precoce (nos níveis mais finos) e de calcita (nos níveis mais grossos), reduziram substancialmente a porosidade primária e estabilizaram o arcabouço. Os ritmitos lacustres são caracterizados por intensa cimentação por calcita;

- os arenitos fluviais possuem as melhores características de reservatório, com porosidade predomi-

nantemente intergranular secundária. Nos arenitos mais finos de frente deltaica e ritmitos lacustres predomina a microporosidade em clorita autigênica, intraclastos argilosos e micas;

– as análises isotópicas de carbono e oxigênio dos cimentos de calcita mostraram um enriquecimento em espécies mais leves (valores mais negativos) com o aumento da profundidade. Valores mais negativos de DEL¹⁸O indicam precipitação a maiores temperaturas, enquanto que DEL¹³C mais negativos podem sugerir maior contribuição de carbono oriundo da descarboxilação da matéria orgânica;

– a freqüente associação de zonas mais porosas a zonas de água definidas em perfis pode estar relacionada com a alta microporosidade em intervalos ricos em clorita. A grande capacidade de reter água da clorita afeta a saturação de água irreduzível, e pode induzir a uma avaliação errônea das saturações relativas de óleo e água;

– evidências de dissolução de grãos e calcita sugerem a continuação de geração de porosidade secundária abaixo do contato óleo-água. A intensa produção de H₂S e precipitação de pirita nos arenitos favorece a hipótese de diagênese sulfídrica tardia.

AGRADECIMENTOS

Aos geólogos Cristiano L. Sombra e Sílvia M. Couto dos Anjos (CENPES/DIGER/SEGEX), Francisco José Maia (DEPEX/DIRNOE/SEDEQ) e Carlos H. L. Bruhn (DEPEX/SEIDER) pelas criteriosas

revisões críticas do texto, discussões e valiosas sugestões; ao geólogo Marcio R. Mello (CENPES/DIVEX/SEGEQ) pela cessão dos dados de vitrinita; à geóloga Tikae Takaki (CENPES/DIVEX/SEGEQ) pelo processamento das análises isotópicas; e a todo o grupo de técnicos que colaboraram na realização das análises de difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e petrofísica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, S.M.C. SOMBRA, C.L., SOUZA, R.S., WAICK, R.N. Potencial de reservatórios profundos da Formação Pendência, Bacia Potiguar emersa. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.4, n.4, p.509-530. 1990.

BAUER, E.J. *Efeito da compactação na Formação Sergi e sua relação com as possibilidades de óleo*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/RPBA/DIVIGEO, 1964. (Relatório interno).

BERTANI, R.T., COSTA, I.G., MATOS, R.M.D. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar-Brasil. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA (SINTEX); 1, 1989, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, 1989. p.87-96.

BETTINI, C., SOUZA, S.M. *Estudo experimental do comportamento da porosidade nas bacias do Ceará e Potiguar*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1978. 69p (Relatório interno, DIVEX/SEGEL).

BJØRLYKKE, K., ELVELROI, A., MALM, O. Diagenesis in Mesozoic sandstones from Spitzbergen and the North Sea: a comparison. *Geol. Rundschau*, v.68, p.1152-1171. 1979.

BJØRLYKKE, K., RAMM, M., SAIGAL, G.C. Sandstone diagenesis and porosity modification during basin evolution. *Geologische Rundschau*, v.78, n.1, p.243-268. 1989.

BRUHN, C.H.L., CAINELLI, C., MATOS, R.M.D. Habitat do petróleo e fronteiras exploratórias nos rifts brasileiros. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.2, n.2-4, p.217-253. 1988.

CARRIGY, M.A., MELLON, G.B. Autigenic clay minerals cements in Cretaceous and Tertiary sandstones of Alberta. *Jour. Sed. Petrology*, n.34, p.461-472. 1964.

CASTRO, J.C., CARRASCO, B.N. *Análise de testemunho do poço 3-RNS-85*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987a. 9p. (Comunicação técnica DIGER/SEGEX, 16/87).

_____. *Análise de testemunho do poço 3-RNS-86*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987b. 5p. (Comunicação técnica DIGER/SEGEX, 14/87).

CASTRO, L.O.C.O. *Gás sulfídrico na Bacia Potiguar submersa: ocorrências e implicações*. Natal: PETROBRÁS/DEPEX/DEBAR, 1990. (Relatório interno).

CASTRO, L.O.C.O. *Fatores controladores da ocorrência de H₂S na Bacia Potiguar (Nordeste do Brasil) e suas implicações*. Na-

- tal: PETROBRÁS / DEPEX / DEBAR, 1991. (Relatório interno).
- CURTIS, C.D. Possibly links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones. *Jour. Geol. Soc. London*, v.135, p.107-117. 1978.
- DAVIES, D.K., ALMON, W.R., BONIS, S.B., HUNTER, B.E. Deposition and diagenesis of Tertiary-Holocene volcanoclastics. In: SCHOLLE, P.A., SCHLUGER, P.R. *Aspects of diagenesis*. [s.l.]: [SEPM], 1979. (SEPM special publication, 26).
- DICKISON, J.A.D. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Jour. Sed. Petrology*, v.36, n.2, p.491-505. 1966.
- DIXON, S.A., SUMMERS, D.M., SURDAM, R.C. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), Southern Alabama. *AAPG Bulletin*, v.73, n.6, p.707-728. 1989.
- FIGUEIREDO, A.M.F. Geologia das Bacias brasileiras. In: SCHLUMBERGER. *Avaliação de formações no Brasil*. Rio de Janeiro, p.1-38. 1985.
- FOLK, R.L. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin: Hemphill's, 170p. 1968.
- FRANKE, M.R., SILVA, V.J.L. *Fatores que condicionam a porosidade e a permeabilidade dos arenitos*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1975. 58p. (Relatório interno, DIVEX).
- FÜCHTBAUER, H. Zur diagenese fluviatiler sandsteine. *Geologische Rundschau*, n.63, p.904-925. 1974.
- HAYES, J.B. Polytypism of chlorite in sedimentary rocks. *Clay and Clay Minerals*, v.18, p.285-306. 1970.
- HONDA, H. *Diagenesis and reservoir quality of the Norphlet sandstone (Upper Jurassic), Hatters Pond area, Mobile County, Alabama*. Austin: University of Texas at Austin, 1981. 213p. (Tese de mestrado).
- HONDA, A., McBRIDE, E.F. Diagenesis and pore types of the Norphlet sandstone (Upper Jurassic), Hatters Pond area, Mobile County, Alabama. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, v.3, p.315-322. 1981.
- HURST, A., IRWIN, H. Geological modelling of clay diagenesis in sandstones. *Clay minerals*, n.17, p.5-22. 1982.
- MATOS, R.M.D., LIMA NETO, F.F., ALVES, A.C., WAICK, R.N. O Rift Potiguar: gênese, preenchimento e acumulações de hidrocarbonetos. In: SEMINÁRIO DE RIFTS INTRACONTINENTAIS, 1987, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, 1987. p.160-197.
- McCREA, J.M. On the isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *Jour. Chem. Phys.*, n.18, p.849-857. 1950.
- MELLO, M.R., CERQUEIRA, J.R., SOLDAN, A.L., ARARIPE, P.T., REGALI, M.S.P., KOWSMANN, R.O., KIANG, C.H. *Avaliação geoquímica da plataforma continental da Bacia Potiguar*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1984. (Relatório interno, 472).
- NAGTEGAAL, P.J.C. Diagenetic models for predicting clastic reservoir quality. *Revista del Instituto de Investigaciones Geológicas*, v.34, p.5-19. 1980.
- O'NEIL, J.R., CLAYTON, R.N., MAYEDA, T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journ. Chem. Phys.*, n.51, p.5547. 1969.
- RODRIGUES, R., FRANÇOLIN, J.B.L., LIMA, H.P. *Avaliação geoquímica preliminar da Bacia Potiguar terrestre*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1983. (Relatório interno).
- SCHMIDT, V., McDONALD, D.A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. In: SCHOLLE, P.A., SCHLUGER, P.R. *Aspects of diagenesis*. [s.l.]: [SEPM], 1979. p.175-207. (SEPM special publication, 26).
- SIEBERT, R.M. The origin of hydrogen sulphide, elemental sulfur, carbon dioxide and nitrogen in reservoirs. In: SOCIETY OF ECONOMIC PALEONTOLOGISTS AND MINERALOGISTS. GULF COAST SECTION, PROGRAM AND ABSTRACTS, 6, 1985. [s.l.]: [SEPM], 1985. p.30-31.
- SOMBRA, C.L. O papel da história de soterramento na evolução da porosidade de arenitos (bacias marginais brasileiras). *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.4, n.4, p.413-428. 1990.

- SOMBRA, CL., ARIENTI, L.M., PEREIRA, M.J., MACEDO, J.M. Parâmetros controladores da porosidade e permeabilidade nos reservatórios clásticos profundos do Campo de Merluza, Bacia de Santos, Brasil. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.4, n.4, p.451-466. 1990.
- SOUZA, R.S. *Análise seqüencial dos testemunhos do poço 6-RB-18-SES, Bacia de Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987. (Comunicação técnica. DIGER/SEGEX, 83-87).
- SOUZA, S.M. Atualização litoestratigráfica da Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. *Anais...* Salvador, 1982, SBG, p.2392-2406.
- SURDAM, R.C., BOESE, S.W., CROSSEY, L.J. The chemistry of secondary porosity. In: McDONALD, D.A., SURDAM, R.C. *Clastic diagenesis*. [s.l.]: [AAPG], 1984, p.127-150. (AAPG Memoir, 37).
- TEIXEIRA, L.B. *Reinterpretação sísmica do 3D de Pescada e adjacências*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, 1990. 22p. (Relatório interno).
- THOMPSON, A. Preservation of porosity in the deep Woodbine/Tuscaloosa trend, Louisiana *Transactions Gulf Coast Association of Geological Society*, v.30, p.396-403. 1979.
- TISSOT, B.P. WELTE, D.H. *Petroleum formation and occurrence*. Berlim: SPRINGER, 1978. 338p.
- WAICK, R.N.; SOARES, U.M. Reservatórios profundos na Bacia Potiguar emersa. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA, 1, 1989, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, 1989. p.205-216.

EXPANDED ABSTRACT

The arkoses and subarkoses of the Pendência Formation form oil and gas reservoirs at depths greater than 3 400 m in the Pescada Field, Potiguar Basin. Depositional environment, framework composition, and burial history were the major controls on diagenesis and reservoir quality. Chlorite, calcite, and quartz and feldspar overgrowths are the main cements.

Depositional environment played an important role in early diagenesis. In the coarse-grained fluvial sandstones, undersaturated meteoric water favored the dissolution of unstable grains in an oxidized environment. The fine sandstones of the delta-front and lacustrine rhythmites, subjected to different geochemical conditions (pore waters rich in Mg, Fe, and Ca in reduced Eh conditions), were cemented by early chlorite and calcite, respectively. In addition, the original composition of the

lacustrine water plus mineralogical and textural evidence suggest that dissolution of volcanic rock fragments also contributed (with Mg and Fe) to early chlorite precipitation.

Burial history also had a strong influence on diagenesis and porosity loss. Reconstitution of burial history shows that the reservoirs of the Pendência Formation in the Pescada Field have undergone shorter residence time at depth than those found in onshore parts of the basin, which present faster porosity decay.

Fluvial reservoirs display the best porosities and permeabilities, and quartz/feldspar overgrowths and late chlorite are the main cements. Delta-front reservoirs have high microporosity and low permeability due to their high chlorite content. Lacustrine rhythmites

are strongly cemented by calcite and are the poorest reservoirs.

Oxygen and carbon isotopes reveal more negative ($\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$) values with increasing burial depth. Isotopically lighter oxygen at greater depths indicates precipitation of calcite at higher temperatures, while more negative ^{13}C values suggest that the dominant source of calcite cement was decarboxylation of organic matter (Bjørlykke et al. 1989 and Curtis, 1978).

The high chlorite content of the reservoirs creates several problems in evaluations based on induction logs. High microporosity values and large amounts of irreducible water may lead to high water saturation and difficulties in defining oil/water contacts.