

TIPOS E DISTRIBUIÇÃO DE POROSIDADE NOS ARENITOS DO MEMBRO MACEIÓ, CRETÁCEO DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS, NE DO BRASIL

TYPES AND DISTRIBUTIONS OF POROSITIES OF SANDSTONES OF THE CRETACEOUS MACEIÓ MEMBER, SERGIPE-ALAGOAS BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL

Carlos Jorge de Abreu¹ e Paul Edwin Potter²

RESUMO — A porosidade e a permeabilidade dos arenitos do Membro Maceió da Formação Muribeca, Cretáceo Inferior, foram estudadas em 51 testemunhos na parte alagoana da Bacia Sergipe-Alagoas. Os arenitos do Membro Maceió são arcósios e atingem espessuras superiores a 5 000 m em direção ao mar. O Membro Maceió contém sete fácies que variam de leques aluviais a leques submarinos e inclui ambientes lacustre e evaporítico. Cento e treze lâminas delgadas de plugues cortados de testemunhos foram utilizadas para quantificar sistematicamente 12 tipos de poros e suas dimensões, e identificar uma seqüência diagenética de 13 fases mineralógicas. Através da aplicação de regressão multivariada foram determinadas as melhores variáveis que controlam permeabilidades em plugues: poros intergranulares limpos, intergranulares com sólidos residuais e intergranulares limpos com cimento carbonático. Foram feitas mais de 380 análises diatométricas de argilas que contribuíram no estabelecimento da história diagenética. As conclusões mais importantes foram as seguintes: as melhores porosidades e permeabilidades estão no topo do Membro Maceió e os maiores valores ocorrem no Maceió raso e próximo de seus afloramentos. A porosidade intergranular secundária é predominante em todo o topo do Maceió, sendo o melhor controlador da permeabilidade. A maior parte desta porosidade intergranular, especialmente onde o Maceió é raso, formou-se pela ação de água meteórica. Entretanto, uma parcela menor desta porosidade possivelmente formou-se pela ação de ácidos orgânicos, onde o Maceió está profundamente soterrado.

(Originais recebidos em 30.04.90.)

ABSTRACT — The porosity and permeability of the sandstones of the Lower Cretaceous Maceió Member of the Muribeca Formation were studied in 51 cores taken from the northeastern half of the Sergipe-Alagoas Basin, located on the Brazilian passive continental margin. The Maceió Member is a feldspathic sandstone that thickens offshore to more than 5 000 m. The Maceió includes seven facies ranging from alluvial to submarine fans in the upper part and includes lacustrine and evaporite environments in the lower part. One hundred and thirteen thin sections from plugs were used to systematically quantify 12 pore types and sizes and to identify a diagenetic sequence of 13 mineral phases. Stepwise regression helped to identify the best predictors of plug permeability: intergranular clean pores, intergranular pores displaying residual solids, and intergranular open pores displaying carbonate cement. The performance of over 380 clay mineral analyses contributed to the understanding of diagenetic history. The most important conclusions reached include the following: Porosity and permeability are best at the top of the Maceió Member, while the highest values are observed where the Maceió is shallow and near its outcrops. Intergranular secondary porosity is predominant at the top throughout the Maceió and is the best predictor of permeability. Most of this intergranular porosity was formed by the invasion of meteoric waters, especially in the shallow Maceió. However, minor porosities were possibly formed by organic acids in the deeply buried Maceió.

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

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.

2 - Department of Geology,
University of Cincinnati,
Cincinnati, OH, 45221-13,
USA.

1 - INTRODUÇÃO

Este estudo analisa os tipos, distribuição espacial e origem da porosidade do Membro Maceió e define uma equação para calcular permeabilidades em arcósios a partir de lâminas delgadas. O Maceió é

um arenito feldspático da Formação Muribeca, do Cretáceo Inferior, e ocorre ao longo de 200 km na parte alagoana da Bacia Sergipe-Alagoas, no nordeste do Brasil (fig. 1). A Bacia Sergipe-Alagoas está situada na microplaca do nordeste brasileiro (Szatmari *et al.* 1984 e

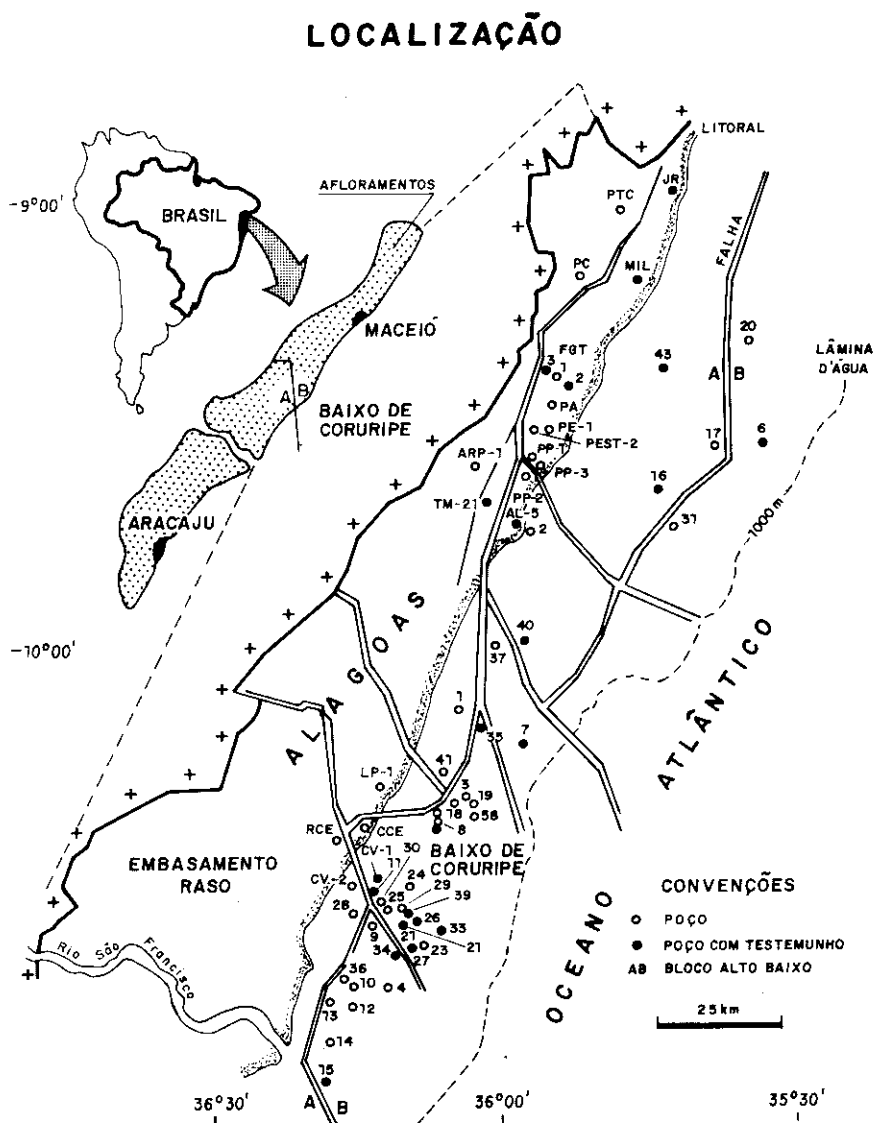


Fig. 1 - Mapa de Localização com poços estudados.
Fig. 1 - Location map showing studied wells.

Lana, 1985), que resultou da ruptura norte-sul do Continente Gondwana, que originou a América do Sul, África e o Oceano Atlântico Sul. A espessura total da coluna sedimentar da Bacia Sergipe-Alagoas pode atingir até 12 km nos baixos regionais, como no Baixo de São Francisco.

A bioestratigrafia da bacia é baseada em espécies de ostracodes para o estágio pré-rift, rift e proto-oceânico, e em foraminíferos para o estágio marinho, enquanto palinologia é usada para todos os estágios. A idade do Membro Maceió é considerada Alagoas, que corresponde grosseiramente ao Aptiano

(Schaller *et al.* 1969 e Uesugui, 1987). Recentemente, Arai *et al.* (em edição) revisou a carta geocronológica usada pela PETROBRÁS e sugeriu que a idade do Andar Alagoas varie de 118 a 112 M.a., apesar de anteriormente ter sido considerado idade entre 115 e 108.

A nomenclatura atual da estratigrafia da Bacia Sergipe-Alagoas (fig.2) é baseada em uma revisão realizada por Schaller *et al.* (1969). O Membro Maceió é definido em subsuperfície no poço 1-TM-1, no intervalo 708/1 284 m, conforme relatório interno da PETROBRÁS de 1960 (Schaller, 1969).

A complexa estruturação tectônica atual da bacia (fig. 3) e o preenchimento sedimentar que prevaleceram durante a sua evolução foram estabelecidos mais tarde por Asmus, Porto (1972), Porto, Dauzacker (1978), Ponte *et al.* (1980) e Ojeda (1982), os quais reconheceram quatro estágios tectono-sedimentares principais (tabela I). Os estágios mencionados acima adaptam-se aos da classificação de tipos de bacias de Klemme (1975). O estágio pré-rift é o seu tipo I, o estágio rift é o tipo III e estágio marinho aberto é o tipo V. No tempo Alagoas a bacia estava em transição do tipo rift (tipo III) para a margem continental passiva (tipo V).

2 - ESPESSURAS, SISTEMAS DEPOSICIONAIS E PALEOGEOGRAFIA

A seção perfurada do Membro Maceió varia de poucos metros a mais de 3 000, entretanto foi estimada uma espessura máxima de 5 000 m, com base em linhas sísmicas marítimas.

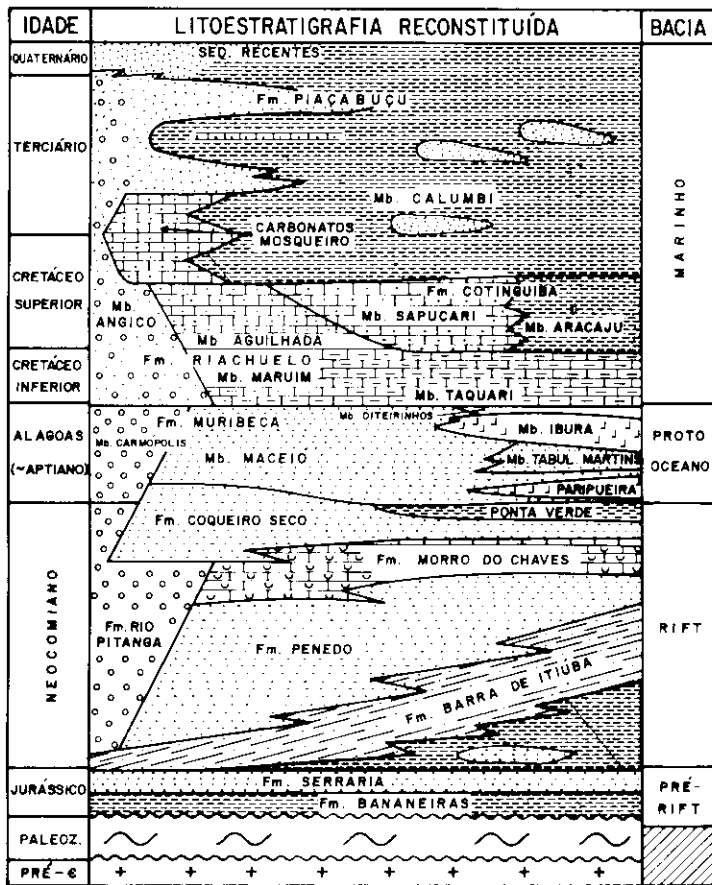


Fig. 2 - Coluna estratigráfica generalizada da Bacia Sergipe-Alagoas. O Membro Maceió foi depositado no estágio proto-oceano (modificado do SESEA, Petrobrás).
 Fig. 2 - Generalized stratigraphic column of the Sergipe-Alagoas Basin. The Maceió Member was deposited during the proto ocean stage (modified from SESEA section, PETROBRÁS).

Médias litológicas em 30 poços perfurados no Membro Maceió determinaram que arenitos e conglomerados constituem 52% do membro, folhelhos 40%, calcários 6% e evaporitos 2%. Estas litologias ocorrem em sete fácies (tabela II), as quais foram cuidadosamente identificadas em mais de 50 testemunhos, totalizando 593 m, em afloramentos e em perfis de raios-gama.

2.1 - Paleogeografia

Dois mapas paleogeográficos, um para o Andar Alagoas inferior e outro para o superior, foram feitos com base nas fácies sedimentares, seções geológicas, mapa de isópacas, tectônica e datação palinológica.

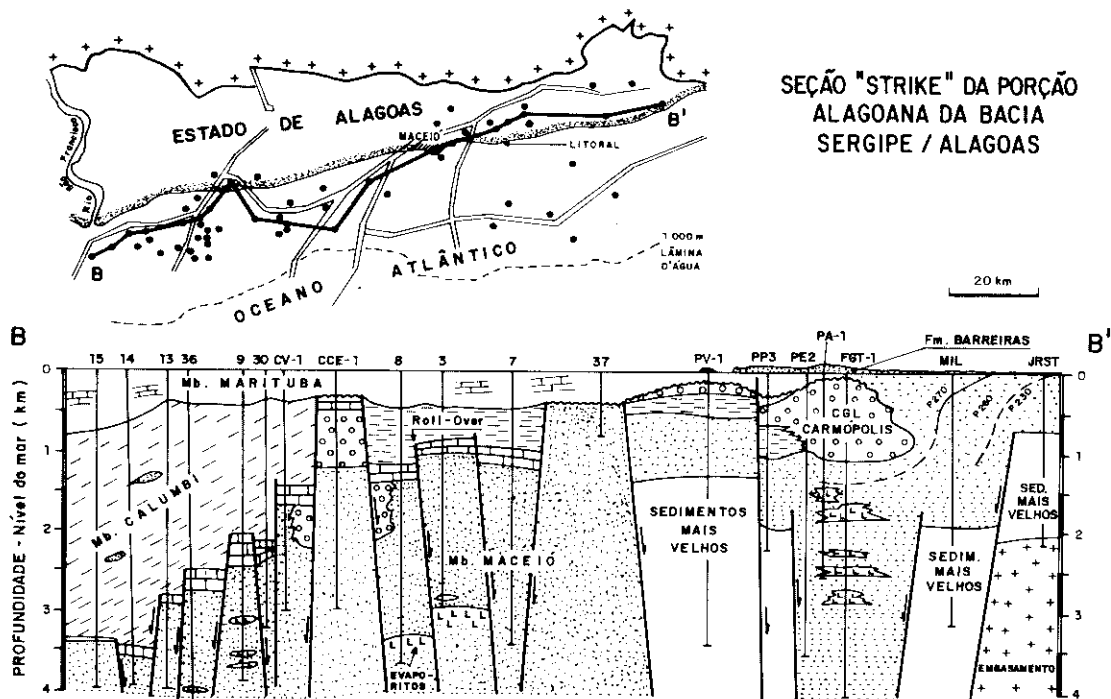


Fig. 3 - Seção geológica strike da porção alagoana da Bacia Sergipe-Alagoas; denota a complexidade tectônica e a enorme variação de profundidade do topo do Membro Maceió.
 Fig. 3 - Strike geologic section of the Alagoas portion of the Sergipe-Alagoas basin, showing the great tectonic complexity and variation in depth of the top of the Maceió Member.

TABELA I/TABLE I
ESTÁGIOS TECTONO-SEDIMENTARES DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS
TECTONIC-SEDIMENTARY STAGES OF THE SERGIPE-ALAGOAS BASIN

Pré-Rift (Neo-Jurássico) — Sinéclises no continente gondwânico foram preenchidas por sedimentos clásticos continentais, principalmente fluvial-eólico e *red-beds* lacustrinos. Seqüências similares ocorrem em diferentes bacias da margem continental brasileira.

Rift (Neocomiano, Cretáceo) — Ocorreu a ruptura da crosta levando à formação de *horsts* e *grabens* que foram preenchidos por sedimentos flúvio-lacustrinos e coquinas de pelecípodos associadas. Importantes folhelhos geradores de hidrocarbonetos depositaram-se neste estágio.

Proto-Oceano (Aptiano, Cretáceo) — A abertura do *rift* evoluiu para uma completa separação dos continentes sul americano e africano e criação de incipiente crosta oceânica. Sedimentação de ambiente lacustre mudou para lagunar com evaporitos e, posteriormente, marinho. Excelentes rochas geradoras de hidrocarbonetos depositaram-se neste estágio.

Marinho Franco (Albiano, Cretáceo) — A bacia abriu-se completamente ocorrendo deposição francamente marinha em plataforma carbonática e turbiditos em taludes e bacia profunda. A seqüência foi penetrada por evaporitos do estágio proto-oceânico.

TABELA II/TABLE II
FÁCIES SEDIMENTARES DO MEMBRO MACEIÓ
SEDIMENTARY FACIES OF THE MACEIÓ MEMBER

Tipos e Características	Abundância e Distribuição	
	Alagoas Inferior	Alagoas Superior
Fandelta: conglomerados polimíticos com fragmentos de granitos, gnaisses e calcários depositados em leques. Espessuras até 40 m.	Abundante e próximo à falha principal (charneira).	
Fluvial-Deltaico-Eólico: arenitos pobremente selecionados com estratificações cruzadas acanaladas e sigmoidais. Arenitos com lâminas individualmente bem selecionadas. Espessuras variam de poucos metros até 90 m.	Abundante no Maceió raso.	Ausente.
Folhelhos e Siltitos Lacustrino/Marinhos: folhelhos escuros laminados, intercalados com siltitos com micro estratificações cruzadas, contendo ostracodes e pólenes. Espessuras variam de centímetros a dez metros.	Abundante e amplamente distribuídos.	
Plataforma: calcários bioclásticos com oncolitos e areias terrígenas. Camadas delgadas.	Ausente.	Abundante no Baixo de Coruripe.
Turbiditos e Talude: arenitos com ciclos de Bouma, marcas de sola, estruturas de prato e pilares e intraclastos de calcários. <i>Sets</i> de poucos centímetros a dois metros. Dez metros quando amalgamados.	Abundante e amplamente distribuído.	Abundante principalmente no Baixo de Coruripe.
Evaporitos: halitas principalmente como diápiros, e delgadas camadas de anidritas. Espessuras de várias centenas de metros em diápiros.	Halita comum, anidrita rara.	Anidrita comum, halita rara.
Brechas: fragmentos de folhelhos, siltitos, arenitos muito finos e laminitos. Espessuras de poucos metros.	Comum próximo à falha principal.	Comum (?)

ca. Estes mapas mostram a evolução deposicional da parte alagoana da bacia.

O mapa paleogeográfico do Alagoas inferior, inclui sedimentos mais velhos que a zona palinológica P-270 (fig. 4) e o do superior sedimentos da zona P-270 e/ou mais novos. Esta divisão é significativa porque os sedimentos mais velhos que P-270 são continentais, enquanto sedimentos P-270 e mais novos são predominantemente marinho-lagunares.

Durante o Alagoas inferior, fandeltas desenvolveram-se ao longo da borda da bacia, a qual possivelmente situava-se mais a oeste. Estes leques eram intercalados com evaporitos, que mais tarde foram remobilizados formando diápiros. As condições de restrição do lago nesta época foram controladas principalmente pelo Aito Walvis-Rio Grande, no sul do Brasil (Campos *et al.*, 1974).

Sedimentos eólicos e flúvio-deltaicos também foram depositados no Alagoas inferior (fig. 4), na extremidade norte da bacia, área que posteriormente foi soerguida no tempo Alagoas superior, passando a servir como fonte de sedimentos.

Durante o Alagoas superior e início do Albiano, o ambiente deposicional tornou-se essencialmente marinho, provavelmente porque falhas foram reativadas formando uma bacia profunda, bordejando a falha principal. Nesta época, uma plataforma mista carbonato-siliciclástica desenvolveu-se no Baixo de Coruripe, em frente a uma série de fandeltas. Leques turbidíticos eram supridos por sedimentos dos leques que ultrapassavam a plataforma e por sedimentos retrabalhados da própria plataforma.

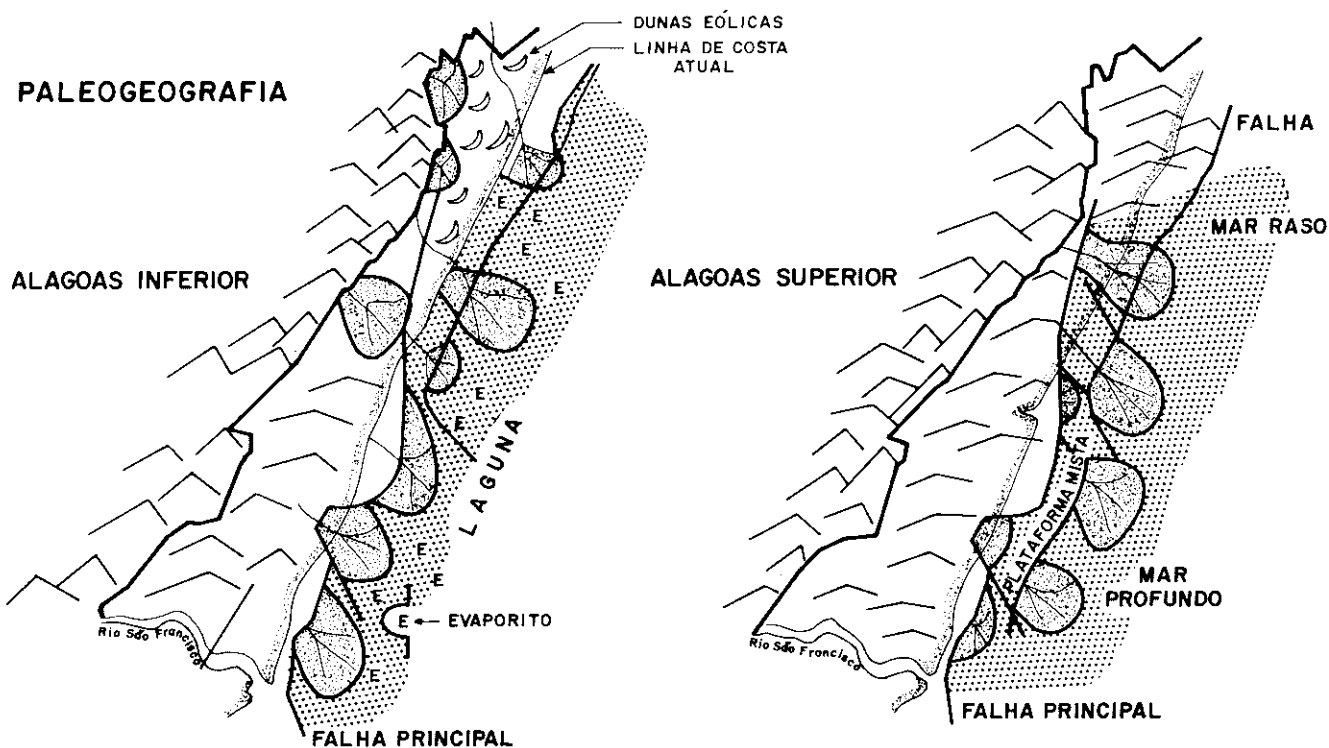


Fig. 4 - Mapas paleogeográficos do Membro Maceió inferior e superior. Durante o Alagoas superior o ambiente tornou-se predominantemente marinho e parte do Alagoas inferior foi fonte de sedimento para o Alagoas superior.

Fig. 4 - Paleogeographic maps of the lower and upper Alagoas stages. During the late Alagoas, the depositional environment became predominantly marine and part of the lower Alagoas sediments was the source of the upper Alagoas.

Em direção à parte norte da Bacia Maceió, o mar era raso e depositaram-se anidritas, as quais são raras, possivelmente devido à erosão pré-Calumbi.

3 - COMPOSIÇÃO DETRÍTICA DOS ARENITOS

Os arenitos do Membro Maceió são petrograficamente 80% arcósicos, 16% subarcósicos e 4% líticos e sublíticos. A composição mineralógica consiste de 57% de quartzo, 30% de feldspato e 13% de fragmentos de rocha. Esta composição corresponde a um arcósio típico, conforme Pettijohn *et al.* (1987).

4 - TIPOS DE POROSIDADE E DISTRIBUIÇÃO

Durante os últimos dez anos, o conhecimento sobre porosidade e

permeabilidade em arenitos aumentou enormemente, porque os gerentes de companhias petrolíferas estão mais conscientes da importância do sistema poroso dos reservatórios no aumento da produção dos campos já descobertos e na redução dos custos exploratórios.

Duas classificações principais de tipos de poros em arenitos foram publicadas, uma por Schmidt *et al.* (1977), e posteriormente por Pittman (1979). A classificação de Schmidt *et al.* (1977) é essencialmente genética e não enfatiza a existência de microporos, isto é, poros menores que duas micra. A classificação de Pittman é mais descritiva que genética. Discute microporos e o conceito de garganta de poros aplicado à produção de óleo e eficiência de recuperação. Mais tarde nova classificação, com critérios adicionais para reconhecer

a porosidade secundária, foi publicada por Shanmungam (1985).

A classificação de porosidade aqui apresentada é principalmente descritiva. Os 12 tipos de poros mais freqüentes no Maceió foram contados e agrupados em três classes: intergranular, intragranular e microporos (fig. 5). Poros gerados por fratura e encolhimento são raros no Maceió, assim como na maioria dos reservatórios de arenitos (Schmidt, McDonald, 1979; Pittman, 1979; Burley, 1986), por isso eles não foram aqui considerados. A maioria dos subtipos de poros reconhecidos no Maceió (fig. 5) pode ser encontrada na literatura especializada que será mencionada. Entretanto, antes que os 12 tipos de poros sejam caracterizados, alguns comentários são necessários.

Primeiro, argilas autigênicas que ocorrem na superfície dos grãos não foram contadas, por serem

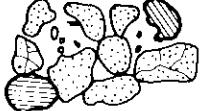

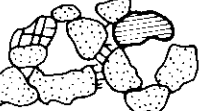









INTERGRANULAR	1		Com sólidos residuais; dissolução de cimento e grãos.	INTRAGRANULAR	7		Múltiplos poros intragranulares; dissolução parcial de feldspatos.
	2		Totalmente limpos; dissolução completa de cimento e grãos.		8		Móldico; avançado estágio de dissolução de feldspatos ou líticos.
	3		Reduzido por crescimento secundário de quartzo; poros primários, sem dissolução.		9		Microporos intragranulares; incipiente dissolução de feldspatos.
	4		Reduzido por crescimento secundário de quartzo e cimento carbonático; poro primário reduzido por crescimento secundário de sílica e cimentos carbonáticos.		10		Microporos nos espaços móldicos; avançado estágio de dissolução de feldspatos com caulinita.
	5		Poros intergranulares limpos com cimento carbonático; poro secundário reduzido por cimento.		11		Microporos nos espaços intergranulares; poro intergranular com caulinita.
	6		Agigantado; dissolução completa de feldspatos e líticos.		12		Intergranulares-intercristalinos; poro secundário ou primário com abundante cimento carbonático.
				MICROPOROSIDADE			

Fig. 5 - Os poros dos reservatórios do Membro Maceló foram agrupados em três classes principais: intergranular, intragranular e microporos.
 Fig. 5 - The pores of the sandstone reservoirs of the Maceló Member were classified into three major groups: intergranular, intragranular, and micropores.

muito delgadas e de difícil definição no microscópio petrográfico. Segundo, o maior poro em um grão de feldspato ou lítico, com múltiplos poros, foi considerado o tamanho do poro intragranular. O limite superior de microporo foi considerado duas micra, porque é o menor tamanho discernível no microscópio petrográfico. Finalmente, microporosidade intercristalina foi inferida usando a diferença entre porosidade dos plugues e das lâminas delgadas em amostras totalmente cimentadas.

Os 12 tipos de poros estão delineados na figura 5 e estampas 1 e 2.

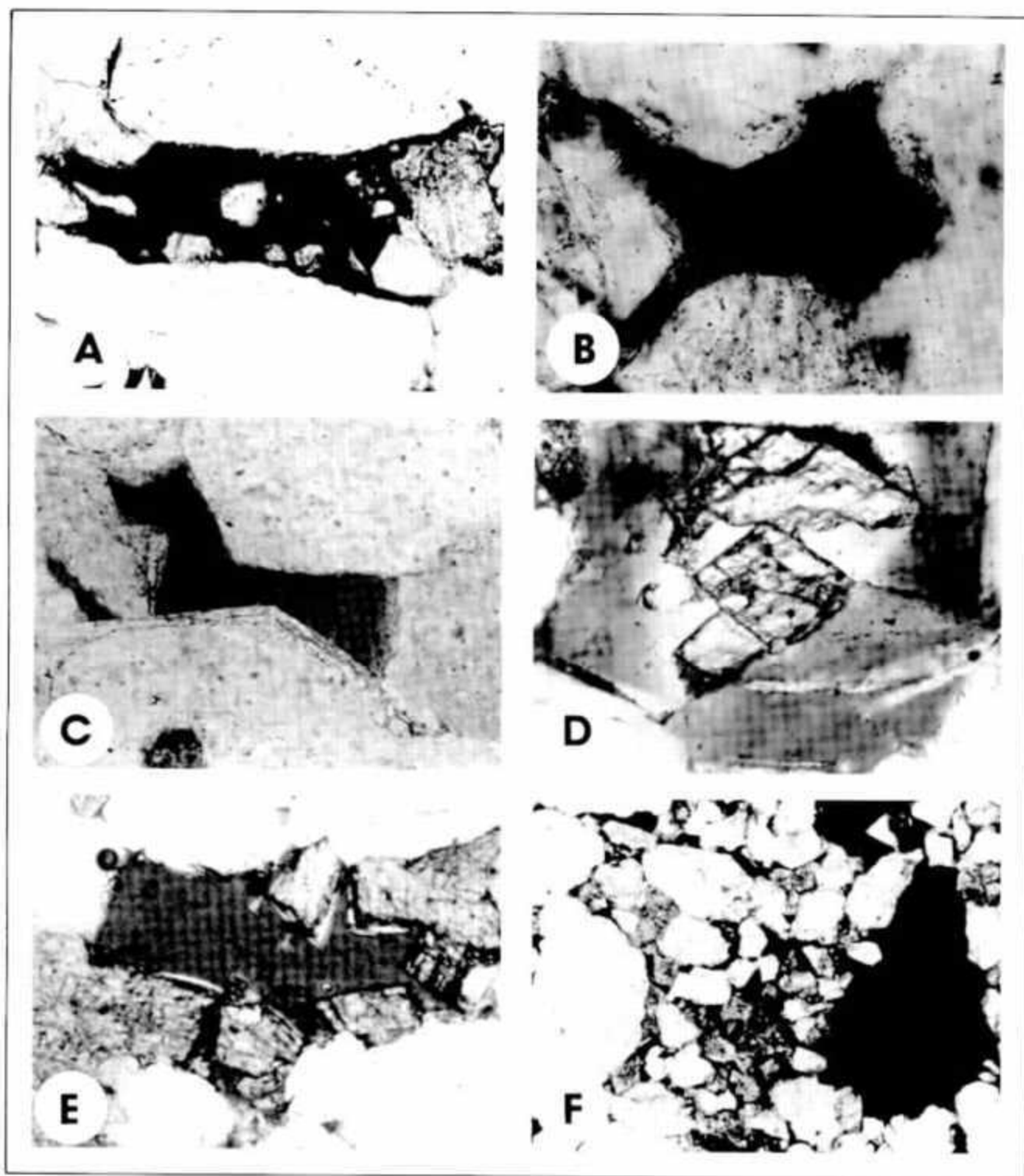
4.1 - Intergranular

Intergranular são todos os poros entre os grãos do arcabouço e que estão conectados entre si. Seis tipos de intergranulares foram descritos:

1 - Poros intergranulares com sólidos residuais (1₁) - São os que contém diminutos fragmentos de feldspatos, quartzo, carbonatos, geralmente restos de uma forte dissolução de grãos do arcabouço, de cimento, quartzo diagenético, anatósio, etc. (estampa 1-A). Este tipo de poro é o mais comum e ocorre

com uma grande variação de tamanhos, mas a média dos dez maiores é 0,21 mm.

2 - Poros intergranulares totalmente limpos (1₂) - Estes poros intergranulares são totalmente desprovidos de resíduos. São geralmente secundários, com uma completa dissolução de cimento e/ou grãos (estampa 1-B). A figura 7, de Lonoy *et al.* (1986), é um bom exemplo de poro intergranular totalmente limpo. Como o tipo (1₁), este tipo de poro possui também uma grande variação de tamanhos, cuja média é 0,24 mm.



Estampa 1 - A - Poro intergranular com sólidos residuais. Aumento 59X; B - Poro intergranular limpo. Aumento 320X; C - Poro intergranular reduzido por crescimento secundário de quartzo. Aumento 320X; D - Poro intergranular reduzido por crescimento secundário de quartzo e cimento carbonático. Aumento 200X; E - Poro intergranular limpo com cimento carbonático. Aumento 80X; F - Poro intergranular agigantado. Aumento 50X.

Plate 1 - A - Intergranular pore with residual solids (magnified 59X); B - Clean intergranular pore (magnified 320X); C - Intergranular pore reduced by quartz overgrowth (magnified 320X); D - Intergranular pore reduced by quartz overgrowth and carbonate cement (magnified 200X); E - Clean intergranular pore with carbonate cement (magnified 80X); F - Enlarged intergranular pore (magnified 50X).

3 – Poros intergranulares reduzidos por crescimento secundário de quartzo (I_3) – Este tipo de poro possui seu espaço poroso reduzido por sílica secundária (estampa 1-C), não contém resíduos de dissolução, e são geneticamente classificados como poros primários reduzidos. O tamanho médio desta classe de poros é de 0,16 mm.

4 – Poros intergranulares reduzidos por crescimento secundário de quartzo e cimento carbonático (I_4) – Este tipo de poro não é tão comum, apresentando-se livres de resíduos, e cimento de quartzo e carbonatos são os únicos materiais dentro dos poros (estampa 1-D). Geneticamente são poros primários reduzidos por cimentação.

5 – Poros intergranulares limpos com cimento carbonático (I_5) – Estes poros são reduzidos somente por cimento carbonático, calcita ou dolomita, mas não por quartzo secundário. Os poros foram inicialmente aumentados por dissolução marginal dos grãos, e posteriormente reduzidos por carbonatos (estampa 1-E). Incluído nesta classe de poros está o poro mostrado por Markert, Al Shaieb (1984), do Memoir 37 da AAPG. O tamanho médio dos dez maiores poros desta classe é 0,12 mm.

6 – Poros intergranulares agigantados (I_6) – Estes constituem o segundo maior tipo de poros reconhecidos no Maceió, com tamanho médio de 0,63 mm. Tais poros resultaram da completa dissolução de feldspatos ou líticos, e mesmo quartzo do arcabouço. A forma do grão é facilmente reconhecida devido ao seu contorno ser preservado após completa dissolução de feldspatos (estampa 1-F). Os poros

deste grupo podem ter alguma conexão com os outros tipos intergranulares de poros.

4.2 – Intragranular

Somente dois tipos de poros são incluídos neste grupo: G_7 e G_8 (fig. 5). As principais características destes poros são sua pobre conexão, resultando em permeabilidades extremamente baixas.

7 – Múltiplos poros intragranulares (G_7) – Estes poros intragranulares podem ocorrer em muitas situações porque dependem exclusivamente do grau de dissolução dos grãos. Quanto maior for a dissolução, maior será o poro. Os poros também ocorrem em uma rede remanescente de feldspato após dissolução parcial (estampa 2-A). Quando esta rede também é dissolvida, se forma um poro com poucos ou somente um espaço vazio. Então, esta classe inclui poros maiores que duas micra, exceto aqueles que são mólidos. Dois exemplos deste tipo de poro estão ilustrados na foto 42, de De Ros (1987) e figura 5, em Siebert *et al.* (1984). Poros intragranulares do tipo G_7 são os mais abundantes e a sua média é 0,10 mm.

8 – Porosidade intragranular mólida (G_8) – Esta é também uma classe de macroporos, que resultou de um avançado estágio de dissolução de feldspatos ou líticos. Os poros são delineados por restos de feldspatos que restaram com a dissolução dos seus núcleos (estampa 2-A). Esta é a única diferença com os poros intergranulares (I_6), que possuem alguma conexão. Os poros desta classe são raros,

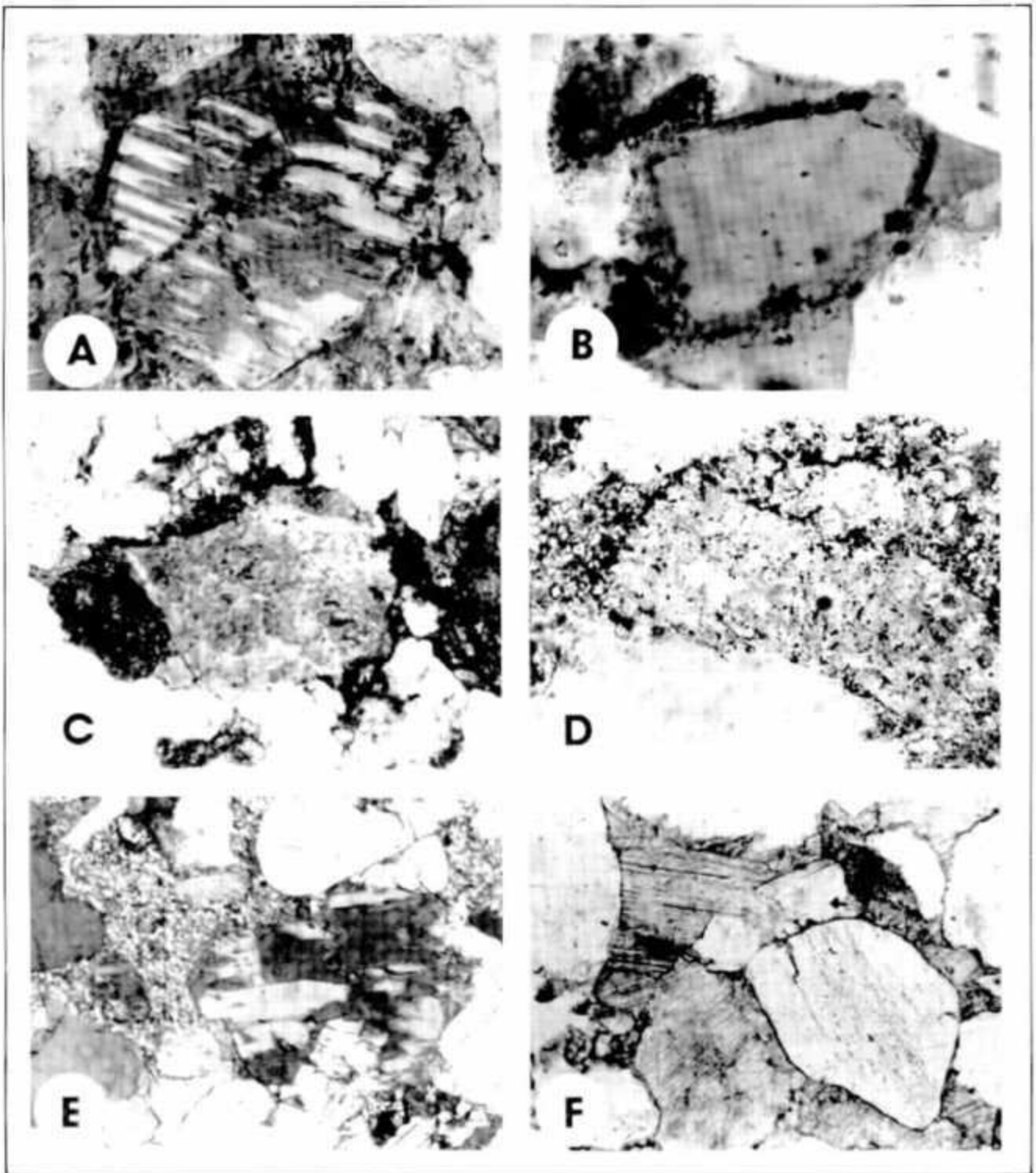
mas gigantes, com tamanho médio de 0,80 mm e não são tão bons quanto aos I_6 para permeabilidade. Exemplos muito bons deste tipo de poro são mostrados por Pittman (1986, fig. 5) e Loucks *et al.* (1984, fig. 21).

4.3 – Microporosidade

O terceiro grupo de poros é constituído por poros menores que duas micra e denominados microporos, termo inicialmente usado por Choquette, Pray (1970), modificado mais tarde por muitos autores, dependendo dos objetivos; por exemplo, Pittman (1979) usou um micron em diâmetro. Eles podem ser intergranular, intragranular ou cristal-intergranular. Microporosidade foi contada usando a diferença entre porosidade em plugue e lâmina delgada. Por isso, sua quantidade foi inferida indiretamente em estudo microscópico. Quatro tipos de microporos foram reconhecidos.

9 – Microporos intragranulares (M_9) – Os poros desta classe são similares aos do tipo G_7 (múltiplos poros intragranulares), exceto com relação ao tamanho dos vazios, que são menores que duas micra (estampa 2-C). Portanto, eles sempre ocorrem em uma fina rede, dificilmente discernível em microscópio ótico, apesar da coloração conferida pela impregnação com resina azul ser facilmente vista. Estes poros são geneticamente relacionados a um processo incipiente de dissolução de feldspatos. Lonoy *et al.* (1986, fig. 4) mostra um bom exemplo deste tipo de poro.

10 – Microporos nos espaços mólidos (M_{10}) – Estes microporos consistem de um aglomerado de



Estampa 2 - A - Múltiplos poros intragranulares. Aumento 200X; B - Poro intragranular móldico. Aumento 320X; C - Microporos intergranulares. Aumento 80X; D - Microporos nos espaços móldicos. Aumento 155X; E - Microporos nos espaços intragranulares. Aumento 98X; F - Microporos intergranulares intercristalinos. Aumento 61X.

Plate 2 - A - Intragranular multiple pores (magnified 200X); B - Intragranular moldic pore (magnified 320X); C - Intragranular micropore (magnified 80X); D - Moldic micropores (magnified 155X); E - Intergranular micropores (magnified 98X); F - Intergranular intercrystalline micropores (magnified 61X).

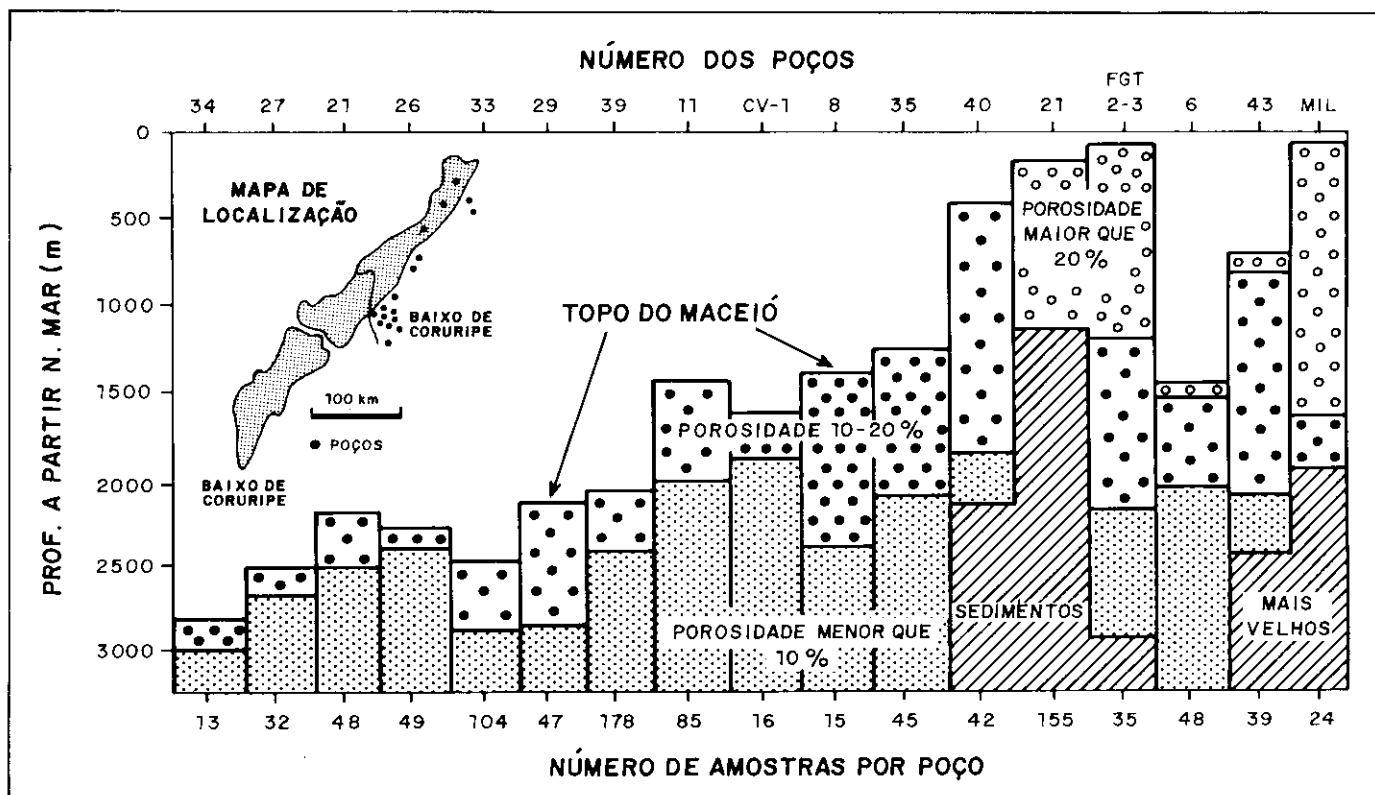


Fig. 6 - Seção esquemática, sem escala horizontal, mostrando a variação lateral e vertical de porosidade no Membro Maceió. Notar que quanto mais profundo for o topo do Maceió, menor é o intervalo mais poroso e menor são os valores de porosidade.

Fig. 6 - Schematic cross-section (no horizontal scale), showing the lateral and vertical variation in porosity of the Maceió Member. Note that the deeper the top of the Maceió, the thinner the porous interval and the smaller the porosities.

caulinita antigênica, crescendo dentro de um poro móldico-intragranular (estampa 2-D), muito parecido com o tipo G_3 , constituindo provavelmente um dos piores tipos para a permeabilidade; primeiro, porque a própria caulinita diminui a permeabilidade; segundo, porque eles estão em poros intragranulares pobremente conectados e independe do seu tamanho. Veja Lonoy *et al.* (1986, fig. 9) para outro bom exemplo de microporos nos espaços móldicos.

11 - Microporos nos espaços intergranulares ($M_{1,1}$) - Microporos deste tipo resultaram de preenchimento dos vários tipos de poros intergranulares por caulinitas antigênicas (estampa 2-E). Provavelmente, este tipo de poro é mais efetivo para a permeabilidade do que microporos móldicos ($M_{1,0}$). Dois bons exemplos de microporos intergranulares ocorrem em Goodchild, Whitaker (1986, fig. 11), onde mostram uma foto com elétrons re-

trospalhados, e Siebert *et al.* (1984, fig. 5).

12 - Microporos intergranulares-intercristalinos ($M_{1,2}$) - Esta classe de poros é de difícil reconhecimento com o microscópio petrográfico, entretanto em algumas lâminas delgadas ocorre o processo de separação cromatográfica do corante (Zinszner, Meynot, 1982), que penetra na interfaces cristal-cristal de cimento carbonático e cimento-grão, facilitando a identificação direta de microporos. Apesar dos baixíssimos valores em lâminas delgadas, foram medidas porosidades em plugues fortemente cimentados (estampa 2-F).

Devido a grande superfície específica dos microporos, a saturação de água tende a ser maior em reservatórios com predomínio desta classe de poros. Também, partículas finas, tais como caulinita, comuns nos poros inter e intragranulares, tendem a migrar e obstruir a garganta

dos poros, causando redução da permeabilidade.

4.4 - Distribuição de Porosidade e Permeabilidade

Os maiores valores de porosidade dos arenitos do Membro Maceió ocorrem no seu topo e próximo aos seus afloramentos (figs. 6 e 7). Aí, a porosidade é normalmente superior a 20% e muitos valores chegam a atingir 28% (poços AL-5 e TM-21). Porosidades abaixo de 1500 m são muito menores, normalmente menores que 20%, algumas até menores que 10%. Finalmente, abaixo de 2500 m as porosidades são menores que 10%. Pode-se afirmar com segurança que, quanto maior for a profundidade do topo do Maceió, menor será a porosidade e mais delgado é o intervalo poroso (fig. 6).

A boa porosidade no topo do Maceió está relacionada às discordân-

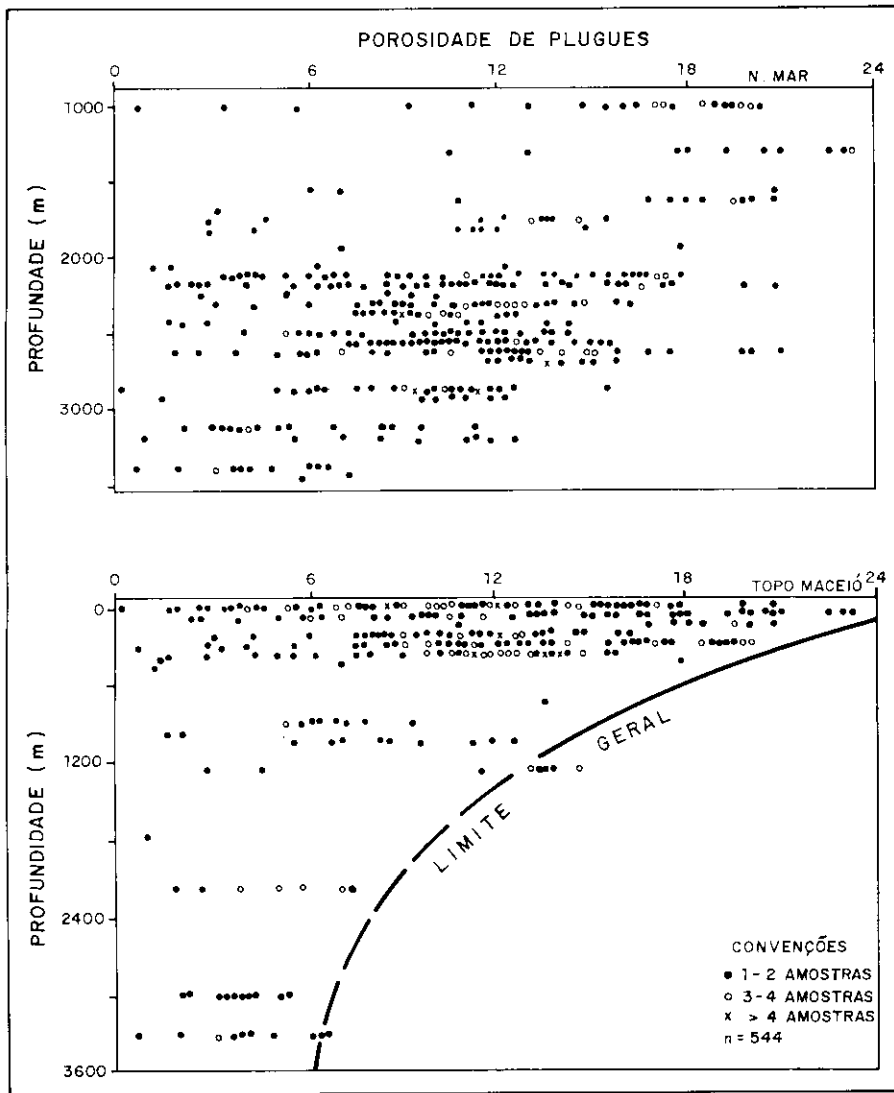


Fig. 7 - Estes dois gráficos mostram que a porosidade diminui a partir do topo do Membro Maceió e não em relação à profundidade atual.
 Fig. 7 These two scattered diagrams show that porosity decreases from the top of the Maceió Member but there is no relation between porosity and present depth.

cias regionais, exceto no Baixo de Coruripe, onde sua origem é obscura. Os melhores tipos de porosidades estão no topo do Maceió, e decrescem gradualmente com a

profundidade. Não há uma relação linear entre porosidade e profundidade atual (fig. 7). A tabela III demonstra a distribuição dos três grupos principais de poros em cada

intervalo de porosidade mostrado na figura 6. Primeiro, pode-se notar que porosidades maiores que 20% são predominantemente intergranulares – em torno de 57% do total do espaço poroso – e que há somente 28% de microporosidade. Segundo, cerca de 50% de microporosidade predomina em arenitos com porosidade variando de 20 a 10%, enquanto a intergranular constitui somente 31%. Finalmente, microporosidade é o tipo mais abundante, com 58% em arenitos com porosidades menores que 10%, onde somente 23% do total de poros são intergranulares. A tabela III mostra também que o tipo intragranular é o mesmo para todos os intervalos de porosidades.

Porosidade primária reduzida por cimentação ocorre principalmente no Baixo de Coruripe e é totalmente ausente no Maceió raso, onde predomina porosidade intergranular, com sólidos residuais e com poros completamente limpos. Porosidades intragranulares predominam no Maceió profundo, apesar de ocorrerem também na parte rasa do Maceió.

A distribuição de permeabilidade segue a mesma tendência observada na distribuição da porosidade. Os melhores valores de permeabilidades estão no topo do Membro Maceió e não são aqui apresentadas em seção porque não há expressivo número de dados.

TABELA III/TABLE III
 RELACIONAMENTO ENTRE POROSIDADE TOTAL E TIPOS DE POROS
 RELATIONSHIP BETWEEN TOTAL POROSITY AND TYPES OF PORES

	Intergranular %	Intragranular %	Microporosidade %	Qt. plugs
Menos de 10%	23,0 ± 29	18,4 ± 19	58,3 ± 36	48
10 a 20%	30,6 ± 30	18,6 ± 15	50,4 ± 29	48
Mais de 20%	57,4 ± 26	14,9 ± 11	27,6 ± 20	7

5 - MELHORES CONTROLADORES DE PERMEABILIDADE

Regressão multivariada (*stepwise regression*) foi utilizada para determinar os melhores tipos de poros que controlam a permeabilidade dos arenitos Maceió. A regres-

são multivariada é um procedimento estatístico que avalia a importância de um conjunto de variáveis independentes que controlam uma variável dependente: primeiro, a variável mais importante é identificada, depois a segunda, a terceira, etc. e o processo avança iterativamente (Crow *et al.* 1960; Davis, 1986 e Sokal, Rohlf, 1969). No Maceió, as variáveis independentes foram definidas multiplicando a porcentagem de tipos de poros pela porosidade total em plugues. Finalmente, regressão foi processada com o programa SAS, versão 6, do SAS Instit. Inc.

Procedimento: alguns procedimentos foram adotados para preparar os dados para entrada e correr o programa. Primeiro, a porosidade e a permeabilidade foram obtidas nas mesmas amostras em que se obteve lâminas delgadas. Segundo, todos os microporos definidos por resina azul foram contados para avaliar a quantidade relativa dos seus tipos, mas não para quantificar a porosidade. A microporosidade foi determinada subtraindo a porosidade de lâmina delgada da porosidade de plugues como mostra do abaixo:

Microporosidade = porosidade de plugue - porosidade de lâmina delgada.

Regressão linear simples foi utilizada para definir uma equação para corrigir a porosidade de lâmina delgada.

Porosidade de plugue = $5.70 + 0.80 \times$ (porosidade de lâmina delgada).

Equações similares são raras na literatura, entretanto, De Ros (1988) definiu uma para os subarcósis da Formação Sergi, na Bacia do Re-

côncavo. Porosidades de plugues calculadas com a sua equação são de zero a 20% maiores do que as porosidades calculadas pela equação para o Maceió. Esta variação é explicada pela mudança da quantidade relativa de poros intergranulares, intragranulares e microporos. A equação de De Ros é mais apropriada para amostras com alta microporosidade, enquanto a do Maceió é para amostras com menor microporosidade. Portanto, é recomendável que se defina uma equação específica para cada arenito estudado, para minimizar erros na equação para calcular permeabilidade, que será apresentada adiante.

Resultados: Dentre os 12 tipos de poros que ocorrem no Maceió, somente três são bons controladores de permeabilidades (tabela IV): poros intergranulares limpos (I_2), poros intergranulares com sólidos residuais (I_1) e poros intergranulares limpos com cimento carbonático (I_5).

Regressão multivariada demonstrou que os três tipos de poros mencionados acima são responsáveis por 65% da variação de permeabilidade, e que o cimento contribui negativamente com 2,5% (ambos com um nível de significância de 5%). Todas as variáveis que entraram na regressão estão listadas na tabela IV.

A matriz de correlação das variáveis sobre permeabilidade demonstra que quase todas as porosidades intergranulares e o tamanho de poros correlacionam-se positivamente com a permeabilidade. Isto porque os poros intergranulares são melhor conectados do que os intragranulares. Segundo, microporos intragranulares tipo M_9 , e quantidade de cimento correlacionam-se negativamente com a permeabilidade, devido à falta de conexão entre os poros e ao cimento que os preenche, isolando-os. A regressão também confirma que quanto maior a profundidade a partir do topo do Maceió (DTOP), menor é a permeabilidade. Finalmente, tama-

TABELA IV/TABLE IV
LISTA DAS VARIÁVEIS ORDENADAS DE PERMEABILIDADE DE PLUGUES
RANKING OF WEIGHTED PREDICTORS OF PLUG PERMEABILITY

Variável	Símbolo	R ²	100xR ²	Sig. a 5%
Integr. Totalm. Limpos	I_2	0.509	50.9	Sim
Inter. c/ Sol. Resid.	I_1	0.112	11.2	Sim
Inter. Limp. c/ Cim. Carb.	I_5	0.026	2.6	Sim
Conteúdo de Cimento	CEM	0.025	2.5	Sim
Prof. a partir T. Maceió	DTOP	0.010	1.0	Não
Microporos Intragran.	M_9	0.007	0.7	Não
Interg. Reduz. Qz. Sec.	I_3	0.0003	0.3	Não
Microp. no spac. Inte.	M_{11}	0.003	0.3	Não
Poros Agigantado	I_6	0.002	0.2	Não
Tamanho de Poro	TPORO	0.002	0.2	Não

nho de poros controla a permeabilidade somente em sistema de poros intergranulares, não exercendo controle sobre a permeabilidade em um sistema intragranular. As permeabilidades são baixas, menores que 1,6 mD, mesmo em amostras com grandes poros.

A quantidade relativa de cada um dos três maiores grupos de poros que controlam a permeabilidade é mostrada na figura 8. Pode-se notar que a porosidade intergranular é o maior controlador de permeabilidade, mesmo em amostras com considerável microporosidade; no-

ta-se também que a permeabilidade é extremamente baixa onde a porosidade intragranular é alta. O tamanho médio dos múltiplos poros intragranulares (G_7) é de 0,10 mm, um tamanho compatível com boas permeabilidades em um sistema de poros intergranulares. Entretanto, a permeabilidade é pobre porque os poros intragranulares são mal conectados.

A regressão linear mostrou que o melhor controlador de permeabilidade – poros intergranulares limpos – é menos importante em arenitos com alto grau de dissolução

de feldspatos; isto é, onde predomina porosidade secundária intergranular com sólidos residuais. Tais poros ocorrem onde o topo do Maceió é raso, porque a percolação de águas meteóricas dissolveu os feldspatos, como será discutido adiante.

5.1 – Equação para Permeabilidade em Arcósios

Após uma profunda revisão da literatura, ficou claro que o Maceió contém a maioria dos tipos de poros que um arcósio poderia ter. Portanto, parece ser razoável usar os resultados deste estudo no Maceió para inferir permeabilidade a partir de tipos e quantidade de poros reconhecidos em lâminas delgadas de outros arenitos feldspáticos do Membro Maceió. A equação definida foi aplicada em três amostras de arenito feldspático da Formação Pendência, da Bacia Potiguar, para verificar se sua aplicabilidade é genérica. Entretanto, os valores de permeabilidades calculados foram dez vezes maiores do que os valores de permeabilidades petrofísicas obtidos em plugues. Portanto, não é recomendável a utilização indiscriminada desta equação. É possível que ela seja válida para amostras cuja diagênese seja similar a dos arenitos do Maceió. Usando um contador automático é possível quantificar a porosidade de um arenito em aproximadamente 30 min e, então, estimar sua permeabilidade. Este método compensa, rapidamente, a falta de análises petrofísicas para porosidade e permeabilidade.

Previsão de permeabilidade a partir de lâminas delgadas já foi tentada anteriormente, mas os resultados não foram satisfatórios porque as

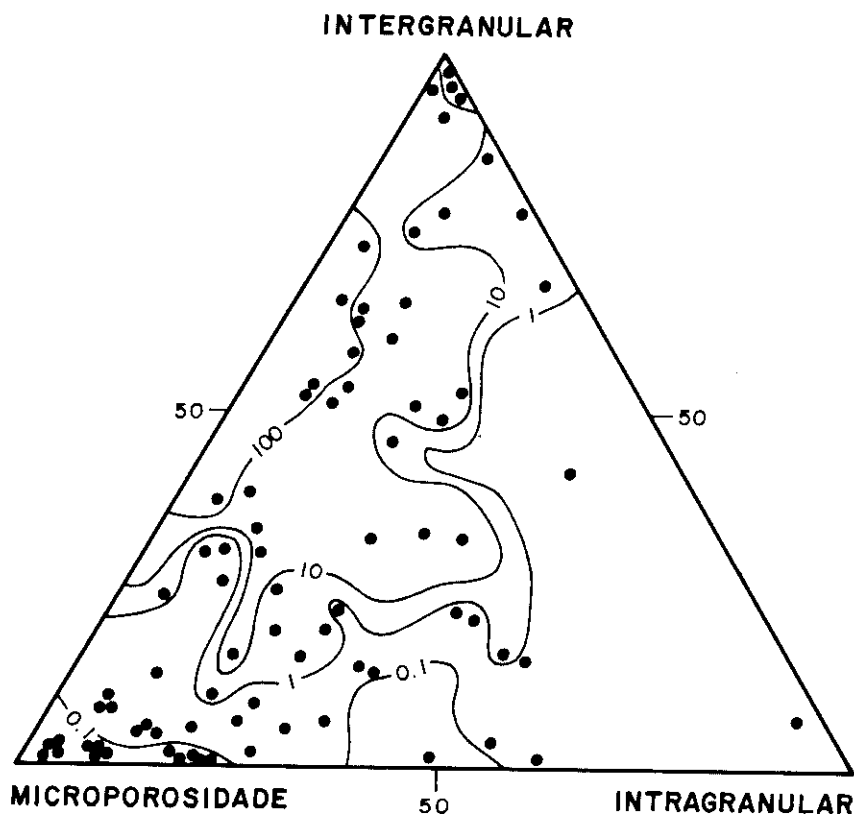


Fig. 8 - Diagrama triangular mostrando a influência dos três tipos principais de poros na permeabilidade absoluta em amostras dos arenitos Maceió. Observe que a permeabilidade decresce fortemente com o aumento de porosidade intragranular (modificado de Pittman, 1979).

Fig. 8 - Triangular diagram showing the influence of the three main pore types on the absolute permeability in samples of Maceió sandstones. Observe that permeability decreases strongly with the increase in intragranular porosity (modified from Pittman, 1979).

lâminas delgadas não eram impregnadas com resina azul, e porque só se considerou a quantidade de poros e não os tipos. Netto (1974), por exemplo, observou porosidade em lâminas delgadas de subarcólios da Bacia do Recôncavo, mas previu permeabilidade usando somente porosidades de plugues. Situação similar ocorre para reservatórios carbonáticos. Lucia (1981) não encontrou uma equação satisfatória para carbonatos. Paumer (1984) correlacionou porosidades visuais em lâminas delgadas com permeabilidades, e definiu uma equação satisfatória para avaliar permeabilidade em calcarenitos.

Finalmente, a equação definida pela regressão multivariada para o Membro Maceió é:

$$\log K = -0.003693 + (0.001417 \times I_1 \times \Phi) + (0.001738 \times I_2 \times \Phi) + (0.001256 \times I_3 \times \Phi) - (0.020944 \times \text{percentagem cimento}),$$

onde:

porosidade total, tipos de poro e cimento são dados em percentagem, permeabilidade em milidarcies (o antilog de K) e I_1 , I_2 e I_3 são os tipos de porosidades intergranulares que melhor controlam a permeabilidade. A letra grega Φ é a porosidade de lâmina delgada corrigida para porosidade de plugue, com a equação mostrada anteriormente. Finalmente, o leitor deverá notar que a profundidade não constituiu uma variável tão importante no controle da permeabilidade, pois ela não aparece na equação, apesar de diminuir com a profundidade.

6 – DIAGÊNESE E EVOLUÇÃO DA POROSIDADE

A história diagenética de um arenito é conhecida principalmente através de observações das relações paragenéticas de diferentes fases mineralógicas, em lâminas delgadas. Informações sobre a tectônica, reflectância de vitrinita, discordâncias e temperatura da bacia são importantes também para melhor entender a evolução diagenética.

A evolução diagenética e formação de porosidade do Membro Maceió podem ser consideradas em quatro estágios cronológicos, com suas respectivas peculiaridades. a) estágio de cimentação precoce; b) estágio de dissolução precoce; c) estágio de cimentação tardia e d) estágio de dissolução tardia. Estes estágios ocorreram com maior ou menor predomínio no Maceió raso e profundo, como mostra o fluxograma da figura 9.

	Eventos	Maceió Raso	Maceió Profundo
Tempo	Película de Oxidação Compactação Cresc. Sec. Quartzo	Sim Moderada Raso	Sim Forte Abundante no topo
	Cimentação Precoce Calcita não ferrosa Calcita ferrosa Mosaico de Anidrita	Sim Sim Não	Sim Sim Sim
	Dissolução	Cimento e feldspatos por água meteórica acima de 1 000 m	Cimento e feldspatos por ácidos orgânicos abaixo de 1 000 m
	Hidrocarbonetos	Sim	Sim
	Cimentação Tardia Caulinita Dolomita e anquerita Quartzo Clorita, ilita e camada mista I/S Pirita e anatásio	Intervalo + espesso Sim Sim Sim Sim	Intervalo - espesso Sim Sim Sim Sim
	Formação de Caulinita microcristalina por água meteórica	Sim	Não

Fig. 9 - Evolução diagenética dos arenitos do Membro Maceió.
Fig. 9 - Diagenetic evolution of Maceio Member sandstones.

6.1 – Estágio de Cimentação Precoce

Neste estágio os sedimentos sofreram alterações antes de ter havido soterramento significativo. Suas fases estão discutidas abaixo.

a – *Coating*: um dos primeiros processos que ocorreu foi a formação de uma película de oxidação na superfície dos grãos. Arenitos com *coating* estão predominantemente no topo do Membro Maceió.

b – *Crescimento secundário de quartzo*: cimento silicoso (estampa 1-C) precipitou em continuidade ótica sobre os grãos de quartzo, simultaneamente à compactação mecânica e à dissolução por pressão entre os grãos. Os crescimentos são separados dos grãos pelas películas de oxidação e/ou por fluidos trapeados durante o crescimento secundário. Este cimento não é abundante, e até 25% da porosidade foi preservada para ser reduzida por compactação e por cimento carbonático.

Com relação à fonte de sílica para o crescimento secundário de quartzo, muitos autores argumentam contra a dissolução por pressão entre grãos próximos. Sibley, Blatt (1976) argumentaram que a sílica de dissolução por pressão não é suficiente para precipitar os volumes de crescimentos secundários comumente observados. Entretanto, Houseknecht (1988) estudou quatro quartzarenitos do Permiano e do Jurássico e concluiu que alguns arenitos são importadores de sílica durante a diagênese rasa, enquanto outros são exportadores durante a diagênese profunda. Walker (1960) considerou que a substituição de grãos siliciclásticos por carbonatos é a principal fonte de sílica. Outra fonte de sílica invo-

cada por Boles, Franks (1979) é a transformação de smectita para camada mista illita/smectita e depois para illita, nos folhelhos. Entretanto, de acordo com Eslinger, Pevear (1988), a diagênese dos folhelhos é um processo isoquímico, constituindo um argumento contrário à idéia de que sílica liberada de smectita seja uma fonte para a formação de quartzo secundário.

O crescimento secundário de sílica é predominante no topo do Maceió e decresce com a profundidade. Portanto, apesar de não haver dados suficientes para concluir sobre a origem de sílica para o crescimento secundário, é possível que tenha ocorrido dissolução de sílica a profundidades e temperaturas mais elevadas e reprecipitação em horizontes mais rasos e de baixas temperaturas.

c – *Compactação*: é um processo que age intermitentemente durante toda a diagênese, mas é mais intenso no início, e que pode ser estabilizado após a cimentação inicial (Allen, Chillingarian, 1975). Recompactação pode acontecer após a dissolução de cimento e grãos, entretanto, esta recompactação ocorre no espaço intergranular e não intragranular, conforme se observa no Maceió, e Siebert *et al.* (1984) também observou na Formação Frio, Oligoceno, do Golfo do México.

d – *Calcita Não-Ferrosa*: o espaço intergranular que restou após a cimentação silicosa foi parcial ou totalmente preenchido por calcita grosseira, presumivelmente calcita com baixo teor de magnésio (Folk, 1973) ou, segundo Longman (1980), calcita da zona meteóricofreática. Uma provável origem para calcita não-ferrosa pode ter sido a dissolução de fósseis calcários do

arcabouço. Porém, com as evidências disponíveis, não é possível definir exatamente a origem de calcita no Maceió. A calcita constitui o segundo cimento mais abundante no Maceió, após a dolomita.

e – *Anidrita*: a anidrita precipitou simultaneamente à calcita nos leques proximais (poços ALS-11 e CV-1), mas com menor expressão que a calcita. Os cristais de anidrita, grosseiros, foram extensivamente substituídos por dolomita. A presença de anidrita parece ser um dos raros exemplos, no Maceió, do controle ambiental sobre a diagênese.

f – *Calcita Ferrosa*: mosaicos de calcita ferrosa substituíram parcial a totalmente a calcita não-ferrosa. O íon ferroso foi possivelmente fornecido por biotitas dos arenitos do Maceió. Hower *et al.* (1976) argumentaram que o ferro liberado durante a illitização de smectita forma a clorita, entretanto, é possível que parte dela tenha sido incorporada pela calcita. Boles, Franks (1979) consideraram que o ferro liberado com a illitização tenha sido consumido pela ankerita, no arenito Wilcox (Eoceno), assim como Reinson, Foscolos (1986) consideraram a mesma reação para a Formação Viking.

6.2 – Estágio de Dissolução Precoce

O estágio cimentante discutido acima foi seguido por uma fase de aumento de porosidade devido à dissolução de calcitas ferrosa e não-ferrosa e de feldspatos, principalmente de ortoclásio. Este estágio provavelmente desenvolveu-se a profundidades maiores que 1 000 m, sem a influência de águas meteóricas. A ação de ácidos or-

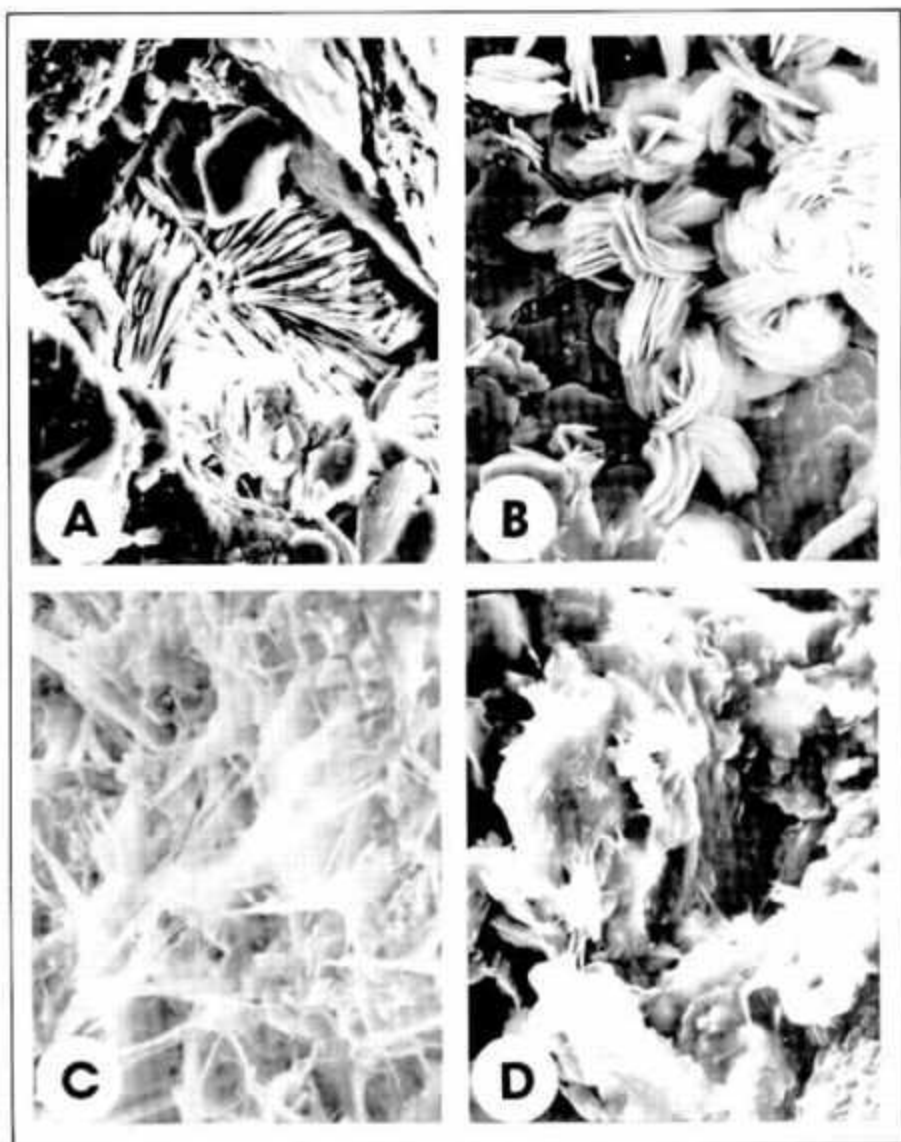
gânicos liberados durante a maturação do querogênio, antes da geração de hidrocarboneto, deve ter contribuído com a dissolução de feldspatos do Maceió. Muitos investigadores tem adotado as idéias de Surdam *et al.* (1984) para explicar geração de porosidade. Eles argumentam que ácidos orgânicos são mais eficazes que ácidos carbônicos na remoção de alumínio dos feldspatos.

O ortoclásio foi mais intensamente substituído do que a microclina porque é menos estável, pois esta possui uma estrutura cristalina mais organizada (Helmond, 1985). O plagioclásio foi menos dissolvido, provavelmente porque a água da formação estava em equilíbrio químico com relação ao sódio, que foi fornecido pelos evaporitos do Membro Maceió. Land, Milliken (1981) e Boles (1982) usaram este raciocínio para explicar a albitização de feldspatos na Costa do Golfo. Recentemente, Milliken (1988) observou o desaparecimento de feldspato potássico-sódico com a profundidade, também na Costa do Golfo. Processo similar de dissolução ocorre atualmente em areias do fundo oceânico, conforme descrição de Maynard (1984).

A dissolução de ortoclásio é mais intensa onde o Maceió é mais raso (fig. 3) devido à ação também de águas meteóricas, como será discutido adiante.

6.3 – Estágio de Cimentação Tardia

Uma nova fase cimentante se processou a partir da dissolução que caracterizou o estágio anterior. Argilas e carbonatos são os principais agentes redutores de porosidade desta nova fase.



Estampa 3 - A - Agregados de caulinitas autigênicas dentro de poros de um arenito-reservatório do Membro Maceió. Foto em microscópio eletrônico de varredura aumentada 5.400X; B - Clorita autigênica rica em ferro, com textura típica de rosetas, dentro do poro de um arenito Maceió. Foto em microscópio eletrônico de varredura ampliada 1.900X; C - illita autogênica geralmente forma pontes entre os grãos do arcabouço. Foto em microscópio eletrônico de varredura ampliada 1.200X; D - Camada mista de illita/smectita recobre os grãos do arcabouço dos arenitos do Membro Maceió em qualquer profundidade. Foto em microscópio eletrônico de varredura ampliada 2.300X.

Plata 3 - A - Stacked authigenic kaolinite within pores of a sandstone reservoir of the Maceió Member (SEM picture, magnified 5400X); B - Authigenic iron-rich chlorite, with typical cabbage shape, fills the pores of a reservoir sandstone (SEM picture, magnified 1900X); C - Authigenic illite commonly forms bridges between the grains of the framework (SEM picture, magnified 1200X); D - Illite/smectite mixed layer coats the framework of the Maceió sandstones at all depths (SEM picture, magnified 2300X).

a - *Caulinita Autigênica*: porções do espaço poroso gerado pela dissolução foram parcialmente preenchidos por caulinita, a qual ocorre de duas formas: empilhadas como livros (*stacked crystals*) (estampa 3-A), que são argilas neoformadas, segundo Wilson, Pittman (1977), e como alteração de muscovita do arcabouço, observado em

fotos de microscopia eletrônica. Esta mica ocorre tanto no espaço intra quanto intergranular do arenito.

Três amostras de arenito de afloramento do Membro Maceió mostraram que houve formação de caulinita microcristalina em todo o espaço poroso, intra e intergranular. A formação desta caulinita foi

condicionada pelo ambiente ácido, devido à penetração de águas meteóricas.

b – *Dolomita, Dolomita Ferrosa e Ankerita*: sob condições menos ácidas, a dolomita, cimento predominante no Maceió, precipitou-se e preencheu poros secundários ou substituiu calcita não-ferrosa, calcita ferrosa e anidrita. A dolomita no Maceió apresenta-se com dois hábitos: cristais grosseiros em mosaico e cristais romboédricos muito finos, que geralmente revestem os grãos do arcabouço.

Com a evolução da diagênese de soterramento, como esta fase pode ser chamada, parte da dolomita foi substituída por dolomita ferrosa e ankerita, indicado pelas inclusões de dolomita nestes minerais.

c – *Quartzo Tardio*: é comum a ocorrência de diminutos cristais euédricos de quartzo dentro dos poros secundários, onde os prismas de quartzo são oblíquos ou ortogonais à superfície dos grãos. Felizmente, devido à sua pequena ocorrência, não reduzem a porosidade significativamente.

d – *Clorita, Iilita e Camada Mista I/S*: este grupo de minerais formou-se sob condições alcalinas por vários processos. A clorita é um dos minerais de argila mais freqüentes nos arenitos do Maceió e ocorre na sua textura típica de rosetas (estampa 3-B). Entretanto, parece que a maioria das cloritas dos reservatórios Maceió resultou de cloritização de biotitas detríticas, como ficou evidenciado em lâmina delgada. Dutton, Land (1985) sugerem que biotita detrítica faz parte do arcabouço dos arcósios pensilvanianos da Bacia de Anadarko. Pettijohn *et al.* (1987) também enfati-

zam que biotita cloritizada é muito comum em arcósios.

A illita ocorre em cristais fibrosos e comumente formam pontes entre os grãos (estampa 3-C), e se originaram, possivelmente, de duas maneiras: por precipitação direta de soluções saturadas dos poros ou por illitização de camadas mistas I/S (estampa 3-D) dos arenitos. As pontes de illitas causam forte redução na permeabilidade dos reservatórios, e possuem tendência em gerar material fino, que podem migrar.

e – *Pirita e Anatásio*: estes dois minerais formam-se tardiamente no processo diagenético. A pirita substituiu silicatos, calcários ou preencheu parcialmente poros. A pirita forma-se em ambientes redutores, onde enxofre poderia ser fornecido pelo óleo ou pela maturação de querogênio nos folhelhos (Tissot, Welte, 1984) ou por redução de sulfato de água de formação por bactéria (Mankiewicz, Steidtmann, 1979).

Óxidos de titânio (anatásio) formam nuvens de pequenos cristais euédricos dentro dos poros. Muitas destas nuvens estão no lugar de grãos dissolvidos, provavelmente minerais precursores ricos em titânio. Anatásio é comum em arcósios, por alteração de biotita titanífera, magnetita e ilmenita (Morad, 1986).

f – *Hidrocarbonetos*: teor de carbono orgânico, gráficos de Lopatin (Waples, 1980) e reflectância de vitrinite demonstram que o Membro Maceió tem gerado hidrocarboneto desde o Alagoas Inferior, a mesma idade dos reservatórios. A geração desde o Alagoas Inferior foi condicionada pela rápida deposição do Maceió e o rápido soterramento

dos folhelhos ricos em matéria orgânica do tipo II, principalmente no Baixo de Coruripe (fig. 1). Entretanto, a parte superior do Maceió raso, que contém boas rochas geradoras, não entrou na zona de maturação, conseqüentemente o Baixo de Coruripe parece ter tido as melhores chances de geração, apesar de não conter os melhores reservatórios.

6.4 – Estágio de Dissolução Tardia

O estágio de dissolução tardia ocorreu e está ocorrendo em áreas e tempos diferentes. Durante este estágio houve intensa dissolução de cimento carbonático e de silicatos do arcabouço, por ácido carbônico, gerado com a percolação de água meteórica. Atualmente, há percolação de água meteórica através dos afloramentos do Membro Maceió, que atingem profundidades maiores que 1 000 m, conforme análise química e de salinidade da água de formação, reportadas por Chang *et al.* (em edição), para a parte alagoana da bacia.

Na área dos poços ALS-37 e 40 (fig. 1) o Membro Maceió esteve exposto (subaereamente?) do tempo Alagoas até o Terciário, quando então foi depositada a Formação Marituba. Portanto, é muito provável que água meteórica tenha percolado o Maceió até a deposição desta formação no Terciário e que, a partir daí, passou a atuar como barreira à percolação.

No Baixo de Coruripe, o Maceió possivelmente foi afetado por água meteórica logo após sua deposição, processo que foi imediatamente interrompido no Albiano, devido à deposição dos calcários finos do Membro Taquari, que recobrem o Maceió. É possível que a percola-

ção tenha ocorrido a partir de afloramentos na costa, fluindo em sub-superfície em direção ao mar. Galloway (1984) reporta profundidades de até 1 500 m, com influência de água meteórica no sul da planície costeira do Texas, e Manheim (1967) relata que água doce penetra na plataforma da Flórida por uma distância de 120 km.

O espaço intragranular dos feldspatos no Maceió raso é muito maior do que o do Maceió profundo. A dissolução mais forte de cimento carbonático e feldspatos em direção ao topo do Maceió teve um efeito dramático sobre a porosidade. O cimento carbonático aumenta de 10% em profundidades até 600 m para aproximadamente 40% a altas profundidades.

O ortoclásio, como os carbonatos, é muito mais dissolvido no Maceió raso. A percentagem de ortoclásio é de 5% a 600 m, aumentando para 28% a 3 500 m. Gráfico de porosidade *versus* quantidade de ortoclásio mostra que a porosidade aumenta enquanto o ortoclásio diminui. Portanto, a porosidade está intimamente ligada à intensidade de dissolução de ortoclásio. Nem o plagioclásio nem a microclina mostraram variações significativas com a profundidade.

7 – DISCUSSÃO

A geração de porosidade e permeabilidade nos arenitos do Membro Maceió está intimamente ligada à ação de águas meteróricas, entretanto, algumas perguntas intrigantes persistem. Existe porosidade gerada por ácidos orgânicos? Quanto e onde está? Ou, foi toda a porosidade gerada por ação de água meteórica? Por que a gera-

ção de porosidade no Maceió profundo não foi tão intensa?

Considerando as hipóteses: a) que ácidos orgânicos podem ser gerados em subsuperfície (sem a interferência de bactérias) em temperaturas que oscilam entre 80 e 120 °C e que caulinita é um dos produtos de dissolução de feldspatos, e que, b) água meteórica pode causar dissolução de feldspatos e também formar caulinita como subproduto; a pequenas profundidades de soterramento, pode-se prever que: a presença de caulinita formada por ácidos orgânicos deveria estar limitada a arenitos cujas temperaturas estivessem entre 80-120 °C, temperaturas de geração de hidrocarbonetos e que caulinitas formadas sob influência de água meteórica deveriam ser encontradas a baixas profundidades e temperaturas menores que 80 °C.

As caulinitas autigênicas dos arenitos do Maceió ocorrem desde a superfície (afloramentos) até profundidades maiores que 2 900 m, com respectivas temperaturas de 25 e 110 °C. Portanto, considerando as hipóteses acima, pode-se inferir que as caulinitas do Maceió raso originaram-se sob influência de água meteórica, e as do Maceió profundo estão ligadas possivelmente à ação de ácidos orgânicos. Observa-se, em lâminas delgadas, que as caulinitas da parte rasa do Maceió ocorrem em todos os tipos de poros, enquanto que as caulinitas da parte profunda ocorrem preferencialmente no espaço intergranular. Isto pode ser evidência da percolação generalizada de água meteórica nas partes rasas do Maceió, que dissolveu indiscriminadamente cimento e feldspatos e, em subsuperfície, de ação de ácidos orgânicos que teriam preferência pela dissolução de feldspatos.

Bjorlykke (comunicação oral) acredita que a formação de porosidade devido à percolação de água meteórica processa-se ciclicamente e próximo à superfície, após cada evento deposicional, e que a porosidade seria preservada durante o soterramento. Entretanto, como as maiores porosidades estão no topo do Maceió, sugere-se que a ação de água meteórica processou-se somente após a completa deposição do Maceió.

Por que a geração de porosidade não foi mais intensa no Maceió profundo? Se considerarmos que a porosidade do Maceió profundo foi gerada por ácidos orgânicos, como discutido acima, pode-se aventar as seguintes hipóteses: primeiro, que a geração de ácidos não foi suficientemente grande, apesar da razão arenito/folhelho, tipo e teor de matéria orgânica serem boas; segundo, ácidos produzidos podem ter sido consumidos por minerais do próprio folhelho e, finalmente, e mais provavelmente, porque os arenitos do Maceió foram fortemente cimentados em estágio precoce, dificultando a percolação de ácidos orgânicos.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é uma síntese parcial de tese de mestrado escrita no Brasil mas defendida em Cincinnati, Ohio, em maio de 1989. Por isso, tive a ajuda de pessoas de lá e da PETROBRÁS. Sou grato ao professor Potter, que acompanhou ativamente o desenvolvimento da tese, sendo co-autor deste artigo. Os Drs. Barry Maynard e Warren Huff fizeram parte da banca examinadora e deram boas sugestões para melhorar o texto.

Tive proveitosa discussão com os geólogos Gerson Fernandes, Marco Lana e Dr. Manoel Figueiredo sobre a geologia geral da Bacia Sergipe-Alagoas. A diagênese dos sedimentos foi discutida com Luiz F. de Ros, Pedro de Cesero e Dra. Sylvia dos Anjos. Na computação estatística, usando o programa SAS, fui muito ajudado por Roger Stuebin e Cindy Lee, em Cincinnati, e por Milton J. de Souza na PETROBRÁS. Dr. Chang Hung King e Renato Kowssman discutiram comigo a história de soterramento da bacia, e Flávio J. Feijó, James Ferreira, em Aracaju, e Paulo Gaglianoni, do Setor de Geoquímica, prontamente providenciaram dados para a tese.

Finalmente, agradeço também ao Cristiano L. Sombra, Maria das G. Feitosa, Afonso Barbosa e Valdete Barbosa, pela confecção de gráficos e slides em computador, e aos amigos do setor de desenho e fotografia do CENPES, pelas ilustrações da tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, D. R., CHILINGARIAN, G. V. Mechanics of sand compaction. In: *Compaction of coarse-grained sediments: 1. Developments in sedimentology*, 1975, Amsterdam: Elsevier, 1975. v.18A, p.43-77.
- ARAI, M., HASHIMOTO, T., UESUGUI, N. Significado cronostratigráfico da associação microflorística do cretáceo inferior do Brasil. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v.3, n.1-2, p.87-103, 1989.
- ASMUS, H. E., PORTO, R. Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. In: 26. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1972, Belém, *Anais...* Belém: PETROBRÁS, 1972. v.2, p.67-90.
- BOLES, J. R. Active albization of plagioclase, Gulf Coast tertiary. *American Journal of Science*, v.282, n.2, p.165-180, 1982.
- BOLES, J. R., FRANKS, S. G. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.49, n.1, p.55-70, 1979.
- BURLEY, S. D. The development and destruction of porosity within upper jurassic reservoir sandstones of the piper and Tarton fields, Outer Moray Firth, North Sea. *Clay Minerals*, v.21, n.4, p.649-694, 1986. (Publicação especial sobre diagênese)
- CAMPOS, C. W. M., PONTE, F. C., MIURA, K. Geology of the brazilian continental margin. In: *The Geology of Continental Margins*, New York: Springer-Verlag, 1974. p.447-461.
- CHOQUETTE, P. W., PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, v.54, n.2, p.207, 1970.
- CROW, E. L., DAVIS, F. A., MAXFIELD, M. W. *Statistics manual*. Dover, New York, 1960, 288p.
- DAVIS, J. C. *Statistics and data analysis in geology*. 2 ed., John Wiley, New York, 1986, 646p.
- DE ROS, L. F. Petrologia e características do reservatório da Formação Sergi (Jurássico) no Campo de Sesmaria, Bacia do Recôncavo, Brasil. In: *Ciência Técnica Petróleo, Seção Exploração de Petróleo*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987. n.19, 107p.
- DE ROS, L. F. *Caracterização geológica dos reservatórios da Formação Sergi em Dom João Mar-Sul*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DIGER/SEGEX, 1988. 66p. (Relatório Interno, 01/88)
- DUTTON, S. P., LAND, L. S. Meteoritic burial diagenesis of Pennsylvanian arkosic sandstones, southwestern Anadarko basin, Texas, *AAPG Bulletin*, v.69, n.1, p.22-38, 1985.
- ESLINGER, E., PEVEAR, D. Clay minerals for petroleum geologists and engineers. *SEPM Short Course Notes*, v.9, n.22, 1988.
- FOLK, R. L. Carbonate petrography in the post-sorbian age. In: *Evolving concepts in sedimentology*, Baltimore: John Hopkins University, 1973, p.118-158.
- GALLOWAY, W. E. Hydrologic regimes of sandstone diagenesis. In: *Clastic Diagenesis*, AAPG, 1984. p.3-14. (Memoir, 37)
- GOODCHILD, M. W., WHITAKER, J. H. McD. A petrographic study of the rotliediges sandstone reservoir (Lower Permian) in the rough gas field. *Clay Minerals*, v.21, n.4, p.459-477, 1986.
- HELMOND, K. P. Provenance of feldspathic sandstones the effect of diagenesis on provenance interpretations: a review. In:

- Provenance of arenites*, Dordrecht: Reidel, 1985, p.139-163. (NATO ASI Series)
- HOUSEKNECHT, D. W. Intergranular pressure solution in four quartzose sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.58, n.2, p.228-246, 1988.
- HOWER, J. et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: mineralogical and chemical evidence. *Geological Society of America Bulletin*, v.87, n.5, p.725-737, 1976.
- KLEMME, H. D. Giant oil fields related to their geologic settings: a possible guide to exploration. *Canadian of Petroleum Geology*, v.23, n.1, p.30-66, 1975.
- LANA, M. C. *Rifteamento na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 1985. 120p. (Tese de Mestrado)
- LAND, L. S., MILLIKEN, K. L. Feldspar diagenesis in the Frio formation, Brazoria County, Texas Gulf Coast. *Geology*, v.9, n.7, p.314-318, 1981.
- LONGMAN, M. W. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *AAPG Bulletin*, v.64, n.4, p.461-487, 1980.
- LONNOY, A., AKSELSEN, J., RONNING, K. Diagenesis of a deeply buried sandstone reservoir: Hild field, northern North Sea. *Clay Minerals*, v.21, n.4, p.497-511, 1986.
- LOUCKS, R. G., DODGE, M. M., GALLOWAY, W. E. Regional controls on diagenesis and reservoir quality in lower tertiary sandstones along the Texas Gulf Coast. In: *Clastic Diagenesis*, AAPG, 1984. p.15-45. (Memoir, 37)
- MANHEIM, F. T. Evidence for submarine discharge of water on the Atlantic continental slope of the southern United States, and suggestions for further search. *Trans. of the New York Acad. Science*, v.29, n.7, p.839-853, 1967. (Série II)
- MARKERT, J. C., AL-SHAIEB, Z. Diagenesis and evolution of secondary porosity in upper Minnelusa sandstones, Powder River basin, Wyoming. In: *Clastic Diagenesis*, AAPG, 1984. P.367-389. (Memoir, 37)
- MAYNARD, J. B. Composition of plagioclase feldspar in modern deep-sea sands: relationship to tectonic setting. *Sedimentology*, v.31, n.4, p.493-501, 1984.
- MILLIKEN, K. L. Loss of provenance information through subsurface diagenesis in plio-pleistocene sandstones, northern Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.58, n.6, p.992-1002, 1988.
- MORAD, S. SEM study of authigenic rutile, anatase, and brookite in proterozoic sandstones from Sweden. *Sedimentary Geology*, v.46, n.1-2, p.77-89, 1986.
- OJEDA, H. A. O. Structural framework, stratigraphy and evolution of Brazilian marginal basins. *AAPG Bulletin*, v.66, n.6, p.732-749, 1982.
- PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E., SIEVER, R. *Sand and sandstone*. 2. ed., Springer-Verlag, New York, 1987. 553p.
- PITTMAN, E. D. Porosity, diagenesis and productive capability of sandstone reservoirs. In: *Aspects of Diagenesis*, Soc. Econ. Paleont. Mineral., 1987. p.159-173. (Special Publication, n.26)
- PITTMAN, E. D., KING, G. E. Petrology and formation damage control, upper cretaceous sandstone, offshore Gabon. *Clay Minerals*, v.21, n.4, p.781-790, 1986.
- PONTE, F. C., FONSECA, J. R., CAROZZI, A. V. Petroleum habitats in the mesozoic-cenozoic of the continental margin of Brazil. In: *Facts and principles of world petroleum occurrence*, Canadian Soc. Pet. Geology, 1980. p. 857-886. (Memoir, 6)
- PORTO, R., DAUZACKER, M. V. Plataforma continental brasileira. In: 30. REUNIÃO DE TÉCNICOS DA ARPEL, 1978, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ARPEL, 22-26 jun. 1978. (Não publicado)
- REINSON, G. E., FOSCOLOS, A. E. Trends in sandstone diagenesis with depth of burial, Viking formation, southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 34, n.1, p.126-152, 1986.
- SAS INSTITUTE INC. Introductory Guide, for personal computers. 6. ed., Cary, NC: SAS Institute Inc., 1985. 111p.
- SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim Técnico da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v.12, n.1, p.21-81, 1969.
- SCHMIDT, V., McDONALD, D. A., PLATT, R. L. Pore geometry and reservoir aspects of secondary

- porosity in sandstones. *Canadian Petroleum Geology Bulletin*, v.25, p.271-290, 1977.
- SCHMIDT, V., McDONALD, D. A. Texture and recognition of secondary porosity in sandstones. In: *Aspects of diagenesis, Soc. Econ. Paleont. Mineral.*, 1979. p.209-225. (Special Publication, n.26)
- SHANMUGAM, G. Types of porosity in sandstones and their significance in interpreting provenance. In: *Provenance of Arenites*, Dordrecht: Mathematical and Physical Science, v.148, p.115-137, 1985.
- SIBLEY, D. F., BLATT, H. Intergranular pressure solution and cementation of the Tuscarora orthoquartzite. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.46, n.4, p.881-896, 1976.
- SIEBERT, R. M., MONCURE, G. K., LAHANN, R. W. A theory of framework dissolution in sandstones. In: *Clastic Diagenesis*, AAPG, 1984. p.163-175. (Memoir, 37)
- SOKAL, R. R., ROHLF, F. J. *Bio-metry*. Freeman, San Francisco, 1969. 776p.
- SURDAM, R. C., BOESE, S. W., CROSSEY, L. J. The chemistry of secondary porosity. In: *Clastic Diagenesis*, AAPG, 1984. p.127-149. (Memoir, 37)
- SZATMARI, P. *et al.* Mecanismo tectônico do rifteamento Sul-Atlântico. In: 33. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1984. p.1589-1601.
- TISSOT, B. P., WELTE, D. H. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Berlin, 1984. 699p. (2. Revisão)
- UESUGUI, N. Posição estratigráfica dos evaporitos da Bacia de Sergipe-Alagoas. *Revista Brasileira de Geociências*, v.17, n.2, p.131-134, 1987.
- WALKER, T. R. Carbonate replacement of detrital crystalline silicate minerals as a source of authigenic silica in sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin*, v.71, n.2, p.145-152.
- WAPLES, D. W. Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration. *AAPG Bulletin*, v.64, n.6, p.916-926, 1980.
- WILSON, M. D., PITTMAN, E. D. Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.47, n.1, p.3-31, 1977.
- ZINSZNER, B., MEINOT, Ch. Visualisation des propriétés capillaires des roches réservoir. *Revue de L'institut Français du Pétrole*, v.37, n.3, p.337-361, 1982.

EXPANDED ABSTRACT

The porosity and permeability of the sandstones of the Lower Cretaceous Maceió Member of the Muribeca Formation were studied in 51 cores taken from the northeastern half of the Sergipe-Alagoas Basin, located on the Brazilian passive continental margin. The Maceió Member is a feldspathic sandstone that thickens offshore to more than 5 000 m. The Maceió includes seven facies ranging from alluvial to submarine fans in the upper part and includes lacustrine and evaporite environments in the lower part.

One hundred and thirteen thin sections from

plugs were used to systematically quantify 12 pore types and sizes, which were classified in three major groups: intergranular, intragranular, and micropores. A diagenetic sequence of 13 mineral phases was identified and discussed, taking into consideration the early and late events of its evolution. Stepwise regression helped to identify the best predictors of plug permeability: intergranular clean pores, intergranular pores displaying residual solids, and intergranular open pores displaying carbonate cement. The performance of over 380 clay mineral analyses contributed to the understanding of diagenetic history.

The most important conclusions reached include the following: Porosity and permeability are best at the top of the Maceió Member, while the highest values are observed where the Maceió is shallow and near its outcrops. Intergranular secondary porosity is predominant at the top throughout the Maceió and is the best predictor of permeability. Most of this intergranular porosity was formed by the invasion of meteoric waters, especially in the shallow Maceió. However, minor porosities were possibly formed by organic acids in the deeply buried Maceió, where percolation of meteoric waters was prevented.

