## 1 - INTRODUÇÃO

#### 1.1 - Apresentação do Estudo e Objetivos

A modelagem da arquitetura do sistema poroso é tema de extrema importância nas diversas etapas da indústria petrolífera, pois é através da modelagem que se extraem parâmetros importantes, tais como porosidade e geometria de reservatórios, que influenciam na definição de reservas e na produção de petróleo.

Os principais tipos de reservatórios estão associados a arenitos turbidíticos, tornandoos, desta maneira, alvo da grande maioria dos estudos (Hardage *et. al.* 1998). Entretanto, recentes descobertas de campos de petróleo em ambientes carbonáticos aumentou o interesse em reservatórios ligados a este tipo de ambientes. Pode-se citar como exemplo, os campos de petróleo relacionados a coquinas nas bacias do oeste africano. No Brasil, expressiva produção de petróleo vem sendo obtida em coquinas da Formação Lagoa Feia (Bacia de Campos). Por um outro lado, devido à heterogeneidade do sistema poroso, esses tipos de reservatórios apresentam uma série de problemas na produção de hidrocarbonetos. Para a solução desses problemas estudos de modelagem têm sido realizados no sentido de aumentar a produtividade e a prospectividade de reservatórios carbonáticos (Wang *et. al.*, 1998a; Wang *et. al.*, 1998b).

A modelagem de reservatórios tem sido realizada basicamente através de estudos geológicos (Wang *et. al.*, 1998a) e geofísicos, utilizando basicamente dados sísmicos (Hardage *et. al.*, 1998; Wang *et. al.*, 1998b). O trabalho aqui proposto envolveu a interpretação de dados GPR 3D em pedreira de carbonatos na Bacia de Sergipe-Alagoas. Estudar-se-á mais especificamente o Membro Morro do Chaves da Formação Coqueiro Seco (Feijó, 1994), que é uma unidade constituída por coquinas correlatas, litoestratigraficamente, com as das bacias do oeste africano e de Campos. O trabalho aqui apresentado pretende, através da interpretação de dados GPR (*Ground Penetrating Radar*), defínir a geometria tridimensional das camadas sedimentares da área de estudo, isto porque a metodologia GPR permitirá melhor nível de detalhamento que outros métodos geofísicos, como por exemplo, sísmica de reflexão ou mesmo sísmica de alta resolução. A partir deste detalhamento e da integração aos dados já existentes será possível a proposição da evolução deposicional deste tipo de ambiente tão complexo, para que o produto desta integração possa ser utilizado como análogo a outros reservatórios carbonáticos lagunares de importância econômica.

Para a interpretação destes dados GPR foram utilizadas técnicas de interpretação usualmente aplicadas a dados sísmicos (atributos sísmicos).

## 1.2 - Localização da área do trabalho

A área de interesse deste trabalho está inserida na Bacia de Sergipe-Alagoas, mais precisamente na Pedreira do Atol, situada no município de São Miguel dos Campos, estado de Alagoas, distante cerca de 60km da Capital Maceió (Figura 2.1.1). A Pedreira to Atol possui três grandes cavas, Santa Tereza, São Sebastião e São Miguel. A aquisição do cubo 3D GPR foi feita na cava sul, São Miguel, única em atividade para a extração de calcário para cimento.



**Figura 2.1.1: Mapa de localização do Brasil, estado de Alagoas** (destaque em amarelo na figura à direita) e a Pedreira do Atol (figura à esquerda). Notar na imagem da Pedreira do Atol, o retângulo azul delimitando a área de aquisição do GPR.

# 1.3 – Metodologia

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi a aplicação das técnicas de sismo-estratigrafía para dados de radar e a extração de atributos geométricos, dip e coerência, para alinhar à interpretação estratigráfica e estrutural obtida. Após esta etapa, os resultados foram integrados aos dados desta área já publicados.

# 2 - GEOLOGIA DA BACIA SERGIPE-ALAGOAS

2.1 - Estratigrafia e Evolução Tectono-Sedimentar

A Bacia de Sergipe-Alagoas situa-se na margem continental do nordeste brasileiro, cobrindo cerca de 35.000km<sup>2</sup>, dos quais dois terços localizam-se em porção marítima. Possui forma alongada na direção N45E, e limita-se ao norte pelo lineamento de Pernambuco com a Bacia de Pernambuco-Paraíba e ao sul pela falha de Itapuã com a Bacia de Camamu (Kinoshita, 2007).



Figura 2.1.1: Carta estratigráfica da sub-bacia de Alagoas e posição estratigráfica do Membro Morro do Chaves (destaque em vermelho), carbonatos lacustres da Fm. Coqueiro Seco (Feijó, 1994).

Comparada entre todas as bacias de margem continental brasileira, é a que registra sucessão estratigráfica mais completa, incluindo remanescentes de uma sedimentação Paleozóica, um pacote Jurássico a Eocretácico pré-rifte amplamente desenvolvido e as clássicas sequências Meso-Cenozóicas sin-rifte e pós-rifte (Figura 2.1.1).

A evolução tectono-sedimentar desta bacia iniciou-se após o término do Período Jurássico, quando teriam ocorrido os primeiros eventos relacionados à ruptura do grande continente de Gondwana, e sua crosta teria sofrido uma série de esforços tectônicos contínuos, resultando na formação de um grande número de falhas.

As falhas normais são predominantes na bacia, apesar de algumas seções sísmicas sugerirem falhas com movimentos laterais (Figura 2.1.2). Os rejeitos verticais mais expressivos (alguns superiores a 5km) estão ligados às direções N45E (alinhamento da Charneira Alagoas e borda noroeste da bacia), N-S e ENE (falhas limitantes dos compartimentos tectônicos). As falhas N-S, mais antigas, estão dispostas de forma escalonada (*en échelon*) em relação à estruturação da bacia (N45E) e sugerem, em alguns casos movimentação lateral, podendo o padrão de falhamentos no início do rifteamento ser explicado pela atuação de um regime transtensional sinistral (Lana, 1990. Figura 2.1.3). Enquanto que as falhas do final da fase rifte apresentam grandes rejeitos normais e orientação preferencial N30-45E, típicas de uma ruptura gerada por distensão NW-SE.

Estas falhas teriam sido os elementos arquitetônicos da deposição dos sedimentos nesta bacia a partir do início do Cretáceo (Souza-Lima *et. al.*, 1999).

Durante o rifteamento, as áreas mais baixas foram ocupadas preferencialmente por lagos amplos, relativamente profundos, para onde fluíam vários rios. Os sedimentos depositados nestes estágios iniciais são predominantemente areno-argilosos, do tipo lacustres/deltáicos da Formação Barra de Itiúba e flúvio-eólicos da Formação Penedo. Com o aumento dos esforços tectônicos na região, o *input* de sedimentos de granulometria mais grosseira foi intensificado, representados por seixos de grandes dimensões, principalmente nas bordas da bacia, definindo a Formação Rio Pitanga. No início do Aptiano, há cerca de 125 milhões de anos, iniciou-se o desenvolvimento da Formação Coqueiro Seco, sistema lacustre bastante peculiar, composta por um lago em cujas margens acumulavam-se conchas em abundância, formando depósitos denominados coquinas do Membro Morro do Chaves, objeto principal deste trabalho. Esta sequência foi definida por Falkenhein *et al.* (1986), como Megassequência rift.



Figura 2.1.2: Arcabouço estrutural generalizado da bacia de Sergipe-Alagoas (modificado de Falkenhein *et al.*, 1986).



Figura 2.1.3: Correlação entre as estruturas teóricas (cisalhamento simples, criada por um binário N45E) e estruturas da bacia, abstraídas as influências do embasamento e tectonismos posteriores (Lana, 1990).

A deposição da megassequência transicional, segundo Rabinowitch & La Beque (1979), teria iniciado a partir do Eo-Aptiano, indicado pelos evaporitos Paripueira. No entanto, as ingressões marinhas mais frequentes ocorreram a partir do Aptiano médio influenciadas ainda pela continuidade dos eventos tectônicos do rifteamento e abertura do Atlântico sul. No início desta megassequência, depositou-se uma sequência progradante na porção norte da bacia, representada pelos arenitos e folhelhos da Fm. Maceió (Ojeda & Fujita, 1972) e depósitos arenito-conglomeráticos aluviais do Membro Carmópolis da Formação Muribeca na porção sergipana, preenchendo paleovales de discordâncias regionais. Sobre esses sedimentos, depositaram-se folhelhos, calcilutitos (Mb. Oiteirinhos) e evaporitos (Mb Ibura) dessa Formação na porção sul da bacia, enquanto que na porção norte ocorreu a continuidade da deposição dos arenitos e folhelhos da Fm. Maceió. Segundo Falkenhein *et. al.* (op.cit) essa diferenciação pode estar relacionada à Cadeia Rio Grande-Walvis, uma barreira topográfica importante, separando o proto-Atlântico aberto ao sul e incursões marinhas periódicas, instaladas ao norte.

A Megassequência pós-rifte (estágio drift) engloba todos os sedimentos depositados em função da subsidência termal e sobrecarga sedimentar ocorridas em uma bacia gradativamente mais estável cada vez mais com eventos tectônicos localizados e adiastróficos. As condições de mar aberto já estavam estabelecidas no Albiano com o desenvolvimento de um amplo sistema de plataforma rasa carbonática. A Fm. Riachuelo representa bem este estágio pela presença de cunhas clásticas de borda (Mb. Angico), áreas de bancos carbonáticos oolíticos e oncolíticos e *patch reefs* (Mb. Maruim) e áreas de depressão lagunar (Mb. Taquari). A partir do Cenomaniano, iniciou-se um evento transgressivo afogando esse sistema plataformal da Fm. Riachuelo, desenvolvendo-se uma rampa carbonática e a consequente deposição da Fm. Cotinguiba (Falkenhein *et. al.*, 1986).

Outro evento transgressivo de escala regional a partir do Coniaciano foi responsável pela deposição de sedimentos siliciclásticos de talude e bacia oceânica da Fm. Calumbi sobre os carbonatos da Fm. Cotinguiba. Mudanças climáticas relacionadas à expansão do Atlântico Sul levaram à redução significativa da deposição carbonática, representada pela Fm. Mosqueiro, e arenitos médios a grosseiros da Fm. Marituba, distribuídos próximos à atual linha de costa. Segundo Pereira (1994, in Souza-Lima *et. al.*, 2002), esse evento provocou também o basculamento da bacia para sudeste e soerguimentos das áreas marginais e, provavelmente, registra a ruptura final entre a América do Sul e África.

A partir do Campaniano, a subsidência térmica diferencial aliada à expansão do Atlântico Sul, causaram um rebaixamento relativo do nível do mar, provocando uma regressão do mar para leste, expondo e erodindo as porções mais proximais das formações anteriormente depositadas. Os últimos sedimentos importantes depositados nesta bacia são representados pelos sedimentos siliciclásticos do Plioceno do Grupo Barreiras, principalmente sobre grande parte da sua atual porção emersa.

#### 2.2 - Ambiente Geológico da Formação Coqueiro Seco

Como já referido anteriormente, a deposição da Formação Coqueiro Seco iniciou-se no início do Aptiano. Inserido nesta formação encontra-se o Membro Morro do Chaves, composto por coquinas depositadas, principalmente em altos estruturais e em ambiente lacustrino, que são foco principal desta dissertação de mestrado. Nas sequências de coquinas deste Membro, assim como na Formação Lagoa Feia, na Bacia de Campos (Figura 2.2.3), observam-se variações laterais de qualidade do reservatório, e variações laterais de fácies, como na Formação Toca, na Bacia do Congo, Angola – África, mas até o momento não foi descoberta nenhuma área produtora de óleo comercial nestas rochas. Estas variações são tão marcantes dentro da Bacia de Alagoas, que em alguns lugares os pacotes de coquinas apresentam-se totalmente cimentados (Nogueira *et. al.*, 2003).

Nos afloramentos da Pedreira do Atol foram constatadas extensas exposições de coquinas contendo moluscos bivalvos, ostracodes e alguns gastrópodes (Figura 2.2.2), as quais encontram-se intercaladas por camadas centimétricas de folhelho e calcilutito nãomarinho, localmente apresentando conglomerados e arenitos com baixo conteúdo variável de bioclastos (Figura 2.2.1). Os níveis de folhelhos são, em sua maioria, ricos em restos de peixes, sendo encontrados tanto fragmentos quanto peixes inteiros, ostracodes não-marinhos pertecentes a biozona NRT-009, conchas de bivalvos e restos de peixes (Nogueira *et. al.*, 2003).



Figura 2.2.1: Visão da exposição leste da Mina de São Miguel – Pedreira do Atol. Observar os quatro níveis de bancada (0 a 4). Folhelhos predominam no nível 4 (topo). Seguindo nos níveis mais inferiores na estratigrafia, aumenta o conteúdo de carbonatos. Níveis de coquina são encontrados na base do nível 2, e abaixo do nível 0.

A deposição das coquinas do Membro Morro do Chaves ocorreu predominantemente nas fases iniciais das transgressões através de tempestades, enquanto que os folhelhos betuminosos depositaram-se nos períodos regressivos, onde os lagos teriam um balanço hídrico negativo, consequente anoxia e preservação da matéria-orgânica; já os conglomerados, restritos arealmente, estariam relacionados a períodos regressivos, formando depósitos de leques aluviais ou deltáicos (Azambuja Filho & Mello, 1992).



Figura 2.2.2: Fotografia de detalhes das coquinas do Membro Morro do Chaves (Nogueira *et. al.*, 2003).



Figura 2.2.3: (A) Fotografia das coquinas da Formação Lagoa Feia (Bacia de Campos) e (B) Microfotografia da coquina com óleo residual entre as conchas de bivalvos (Nogueira *et. al.*, 2003).

Lomando *et. al.* (2000) descreveram o afloramento e algumas sondagens contínuas realizadas na Pedreira do Atol utilizando a classificação de Dunhan (1962, Figura 2.2.4), que se baseia na presença ou ausência de lama carbonática e o conceito de matriz/grãos suportados (*mud-supported* e *grain-supported*). Esta classificação também será aplicada neste trabalho na identificação de cada fácies carbonática, como *mudstone, wackestone, packstone* e *grainstone*, que representam, respectivamente aumento na granulometria e diminuição na quantidade de matriz. Na descrição do afloramento e sondagens feita por Lomando *et al.*(2000) foram indentificados *grainstones* e *packstones* de pelecípodes de alta frequência, em ciclos de *shoaling-upward*, limitados muitas vezes por folhelhos pretos.

Azambuja Filho *et. al.* (1998) apresentaram um modelo de fácies esquemático (Figura 2.2.5) com quatro grupos de fácies (*fan-deltas*, conglomerados e arenitos com bivalves, espessas camadas de coquinas e folhelhos negros), que tiveram fortes oscilações climáticas e subsidência diferencial em pequenas bacias (cerca de 100km<sup>2</sup>) em ciclos de 4<sup>a</sup> a 6<sup>a</sup> ordens (Figura 2.2.6). Portanto, para estes autores, este membro representa um ambiente de trato de sistema transgressivo de 3<sup>a</sup> ordem, que sobrepõe depósitos fluviais mais antigos, sendo seu contato inferior uma superfície trangressiva e um limite de sequência.



Figura 2.2.4: Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962).



Figura 2.2.5: Modelo de sucessão de fácies esquemático proposto por Azambuja Filho *et. al.*, 1998.

Quanto ao arcabouço estrutural na área da Pedreira do Atol, o trabalho de Kinoshita (2007) é um dos poucos que apresentam informações estruturais. Segundo o mesmo, os falhamentos observados na cava em atividade mostram tendência da direção nordeste, concentrados entre N-S e N47E, todos apresentando mergulhos altos, com média em torno de 75 graus. Existem indicações de falhas exibindo movimentação lateral dextral (N28E) e transcorrentes (N47E) deformando a sequência carbonática (pós-deposicionais), mas também existem medições relativas às falhas que seriam contemporâneas à deposição (N-S e N30E - par conjugado).

Em linhas gerais, o padrão dos falhamentos e fraturamentos observados em afloramento está concordante com o modelo proposto por Lana (1990). E o padrão estrutural identificado na superfície de um banco de coquinas mostra a predominância de fraturamentos N30E, conjugado a aqueles N-S. Estas mesmas direções controlaram os afinamentos (altos estruturais) e espessamentos (baixos estruturais) dos carbonatos lacustres do Membro Morro do Chaves, ou seja, foram as principais direções de falhamentos sin-deposicionais dessas rochas.



Figura 2.2.6: Modelo evolutivo da deposição dos carbonatos lacustres do Membro Morro do Chaves (Azambuja Filho *et al.*, 1998).

A Figura 2.2.7 ilustra as medições feitas em afloramento corroborando a estruturação destas coquinas segundo as direções NE-SW e N-S.



Figura 2.2.7: Estereograma das medições de falhas e fraturas nas coquinas na região da Pedreira do Atol (Kinoshita, 2007).

## 2.2.1 - Estratigrafia de Sequências para Carbonatos

Neste item será feita uma breve discussão sobre a estratigrafia de sequências para carbonatos, mais propriamente sobre a Lei de Crescimento Sigmoidal (Newman & MacIntyre, 1985), já que foi a partir dos conceitos da técnica de estratigrafia de sequência e nas observações desta teoria que os dados deste trabalho foram interpretados.

A "Lei do Crescimento Sigmóide" baseia-se no fato de que a produção de sedimentos carbonáticos não é uma função direta do início do "*flooding*" até o subsequente desenvolvimento de um nível de mar alto, e pode ser dividida pelas fases de "*start-up*", "*catch-up*" e "*keep-up*" (Figuras 2.2.1.1.e 2.2.1.2). Além disso, a morfologia das deposições, na maioria das vezes, é sigmoidal, e há tendência das fácies de se associarem em ciclos de "*shoaling-upward*".



Figura 2.2.1.1: Ciclo de vida de sistema carbonático partindo de um trato de sistema de mar baixo ao mar alto, iniciando com a deposição dos carbonatos até o soterramento dos mesmos por sistemas siliciclásticos (compilação de informações de James e Kendal, 1992; Jones e Desrochers, 1992; e Schlager, 1992). Estágios distintos deste ciclo podem incluir: (1) crescimento inicial da plataforma, (2) karstificação, (3) regeneração e própria-delimitação de desenvolvimento da plataforma, (4) renovação do crescimento da plataforma, (5) afogamento da plataforma e (6) soterramento da mesma. Estes estágios não necessariamente sempre ocorrem nesta sucessão.



Figura 2.2.1.2: Crescimento populacional em relação ao tempo, indicando as fases "*start-up*", "*catch-up*" e "*keep-up*" de Newman & MacIntyre, 1985.

A fase "*start-up*" ocorre durante estágios iniciais do "*flooding*", onde a produção carbonática é relativamente baixa devido ao reestabelecimento mais lento dos organismos secretores de carbonatos por causa do aumento da profundidade da água.

Com base em dados de afloramento de Kinoshita (2007), essa fase pode explicar a presença de litologias com conteúdo maior de lama carbonática logo acima das superfícies de progradação (prováveis superfícies transgressivas, segundo Azambuja Filho *et al.*, 1998), e que regionalmente podem comportar-se como uma camada plano-paralela contínua, porém não muito espessa.

Na fase "*catch-up*", a fábrica carbonática é bem desenvolvida, a produção de sedimentos carbonáticos é maximizada e o espaço de acomodação disponível é gradativamente preenchido.

Provavelmente a deposição preferencial pelas fácies *packstones* e *grainstones* no afloramento deve ter ocorrido nessa fase, enquanto a fácies *wackestones* em situações mais profundas e mais protegidas da ação dos agentes físicos. O empilhamento das fácies depositadas nas fases "*start-up*" (associação de fácies folhelhos e *wackestones*) e "*catch-up*" (*packstones* e *grainstones*) podem ser os elementos formadores das barras de coquinas em "*shoaling-upward*". A geometria sigmóide desses corpos pode ser ocasionada pela progradação das barras geradas a partir do balanço fábrica carbonática x produção sedimentar x espaço de acomodação.

Na fase de "*keep-up*" o espaço de acomodação disponível é preenchido e a produção carbonática pode exceder a criação de novo espaço de acomodação.

As associações de fácies mais comuns depositadas na fase de "*keep-up*" seriam as barras de coquinas amalgamadas com geometria tabular e de corte-preenchimento. As fácies dessas barras poderiam variar de *packstones* (áreas mais protegidas) a exclusivamente *grainstones* (áreas agitadas e rasas), e a depender da taxa de criação de novo espaço x produção carbonática poderiam ocorrer empilhamentos espessos dessa associação de fácies.

Com base em dados de afloramento, o empilhamento completo das três fases da "lei do crescimento sigmoidal" de Newman & MacIntyre (1985) pode ser representado pela Figura 2.2.1.3 pela presença de dois tipos de associação de fácies. A associação de fácies de coquinas em "shoaling-upward" (wackestone, packstone e grainstone), com geometria sigmóide pode ser resultado da interação das fases "start-up" e "catch-up", enquanto a associação de fácies amalgamada, com geometria tabular e de corte-preenchimento, da interação das fases "catch-up" e predominantemente "keep-up".



Figura 2.2.1.3: Associação de fácies de coquinas (*wackstone*, *packstone* e *grainstone*) em "*shoaling-upward*" com geometria sigmóide (fases "*start-up*" e "*catch-up*"), e no topo a associação de fácies de grainstones amalgamadas com geometria tabular e de corte-preenchimento (fases "*catch-up*" e "*keep-up*") (Kinoshita, 2007).