1
Introdução

A geologia sedimentar se preocupa em estudar as formações e evoluções dos sedimentos que formam as camadas rochosas que encobrem a crosta terrestre. Com os conhecimentos em sedimentologia e estratigrafia pode-se avaliar os possíveis resultados de diversos processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pela formação e distribuição de sedimentos. Esses sedimentos são responsáveis pelo desenvolvimento de rochas sedimentares. Em um ambiente subaquoso são predominantes rochas sedimentares de origem terrígena e carbonática. As rochas terrígenas são oriundas de sedimentos erodidos de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares preexistentes e transportados através de meios fluviais e eólicos, entre outros. As variações do nível do mar e das condições climáticas ao longo do tempo influenciam muito a distribuição de sedimentos e são os principais controles do crescimento das rochas carbonáticas, que compõem entre 19 e 22% da totalidade das rochas sedimentares que cobrem a crosta terrestre (Reading, 1978).

Esse trabalho trata da simulação numérica computacional da formação e evolução de plataformas carbonáticas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

1.1.
Rochas carbonáticas

As rochas carbonáticas são formadas a partir de processos químicos, bioquímicos e aloquímicos envolvendo a deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio, como algas, conchas, corais e moluscos. Tendo sua formação estritamente ligada à vida marinha, micro e macroscópica, as rochas carbonáticas dependem de vários fatores que controlam a vida dos organismos para se desenvolverem. As condições climáticas restringem bastante o crescimento carbonático: temperaturas mais quentes e uma boa radiação solar são essenciais. As condições marinhas em que os organismos vivem influenciem bastante na formação de rochas carbonáticas pela necessidade de níveis de

salinidade aceitáveis e da boa renovação de nutrientes. Por isso, em uma região marítima mais restringida, ou seja, mais distante do mar aberto, somente organismos específicos adaptados a níveis mais altos de salinidade e à menor renovação de nutrientes são responsáveis pelo crescimento de rochas carbonáticas. Enquanto em regiões mais próximas ao mar aberto, uma maior variedade de organismos ajuda o crescimento carbonático, obtendo tipicamente taxas mais altas de crescimento. Devido à propriedade autotrófica das algas, a maioria dos carbonatos se encontra em águas rasas e claras devido à necessidade de radiação solar, por isso em ambientes com grande aporte de sedimentos terrígenos, a água tende a ficar mais turva, restringindo muito a presença e evolução dos organismos necessários para formar rochas carbonáticas. Em profundidades maiores a energia solar é quase totalmente absorvida, limitando a produção carbonática à dependência de alguns organismos adaptados aos baixos níveis de energia solar, possibilitando a deposição de sedimentos carbonáticos em ambientes mais profundos, porém em escalas muito inferiores.

As rochas carbonáticas são compostas de minerais carbonáticos como a calcita ($CaCO_3$), a dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) a siderita ($FeCO_3$) e a magnesita ($MgCO_3$), entre outras. O íon carbonático (CO_3^{-2}), obtido através da eq. 1.1 depende muito da presença de dióxido de carbono (CO_2) na água e sua não-solubilização, por isso também a importância de baixas profundidades e altas temperaturas, já que sua solubilidade aumenta em pressões mais altas e temperaturas mais baixas (Zeller e Wray, 1956).

$$CO_2+3H_2O = HCO_3^{-1}+H_3O^{+1}+H_2O = CO_3^{-2}+2H_3O^{+1} \quad (1.1)$$

Os íons resultantes da eq. 1.1 têm baixa estabilidade em pressões mais baixas, facilitando sua reação com íons de cálcio (Ca^{+2}) formando assim a calcita e outros minerais carbonáticos de forma análoga. Em temperaturas mais baixas e pressões mais altas, a calcita se dissolve mais facilmente da seguinte forma (Zeller e Wray, 1956):

$$CaCO_3 = Ca^{+2}+CO_3^{-2} \quad (1.2)$$

Assim sendo a água do mar fica saturada com calcita em temperaturas mais elevadas e profundidades mais baixas, levando à sua precipitação e à formação de rochas carbonáticas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

As taxas de produção carbonática são consideradas como crescimento vertical por intervalo de tempo (m/kA), assim sendo, além dos fatores previamente descritos, outro fator limitante do crescimento carbonático é o espaço de acomodação disponível, definido como a diferença entre a camada do fundo do mar e o nível do mar. Esse espaço pode variar com o tempo devido ao próprio crescimento carbonático, às flutuações do nível do mar e à subsidência do fundo do mar por movimentações tectônicas. Caso o espaço de acomodação cresça mais rápido do que a sedimentação carbonática, ela pode se afogar, caso contrário, não há crescimento vertical devido à falta de espaço e essa deverá migrar para outras localidades (Bosscher, 1992). Assim sendo, a evolução de plataformas carbonáticas tem como controle importante as mudanças nos espaços de acomodação (Precht, 1988) e são inclusive ótimos registros dessas (Schlager, 1981).

Deve-se salientar outro fator importante na evolução de plataformas carbonáticas, além da produção *in situ*, decorrente da deposição de organismos marinhos, a erosão subaquosa, diagênese e redeposição dos sedimentos erodidos pode mudar significativamente a geometria das plataformas. Essa erosão se deve principalmente à ação das ondas, das correntezas e instabilidades de taludes. A direção dominante do vento em um ambiente de produção carbonática é o principal controle dos fatores erosivos e redeposicionais.

Pode-se observar que as condições para formações de depósitos carbonáticos são bastante diversas. Em tempos atuais, as áreas de deposições carbonáticas são relativamente restritas (Figura 1.1.). Entretanto, no passado podem ter ocorrido situações mais propícias e abrangentes para esse tipo de deposição.

Figura 1.1. Exemplo da localização de depósitos carbonáticos modernos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

1.2. Organização da dissertação

Neste capítulo foram resumidas as principais características da formação e evolução de plataformas carbonáticas. Também foi descrito o contexto para o desenvolvimento deste trabalho e os seus principais objetivos. No próximo capítulo é feito uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos e programas de modelagem direta de sistemas carbonáticos, considerando exemplos de uma, duas ou três dimensões.

O terceiro capítulo apresenta o modelo geológico empregado no desenvolvimento do programa e demonstra os modelos matemáticos dos principais processos simulados. Os principais métodos computacionais adotados em CarbSM para representar os modelos vistos no terceiro capítulo são explicados no capítulo 4. No quinto capítulo, o modelo computacional é testado em uma simulação de uma plataforma carbonática isolada conceitual e idealizada por Handford e Loucks (1993). Finalmente, no sexto e derradeiro capítulo são discutidas as conclusões deste trabalho e são sugeridos futuros trabalhos para complementar o que foi desenvolvido até agora.

1.3. Ambientes deposicionais

Inúmeros processos influem na geração de sedimentos carbonáticos *in situ*. Além disso, fatores biológicos e químicos responsáveis pelo desenvolvimento de rochas carbonáticas oferecem diferentes situações ideais para a evolução dessas. Em relação à sensibilidade às condições marinhas descritas anteriormente, existem ambientes compatíveis para cada tipo de processo de produção carbonática. Por isso, pode-se agrupar esses processos em alguns ambientes deposicionais que apresentam condições marinhas ideais para os diversos tipos de fácies carbonáticas. As mais comuns descritas na literatura são: águas rasas e abertas, águas rasas e restritas, bacia e talude, e ambientes terrestres (Reading, 1978, Tucker & Wright, 1990, Warrlich, 2000); que serão descritas mais detalhadamente nos próximos itens.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

1.3.1.
Águas rasas e abertas

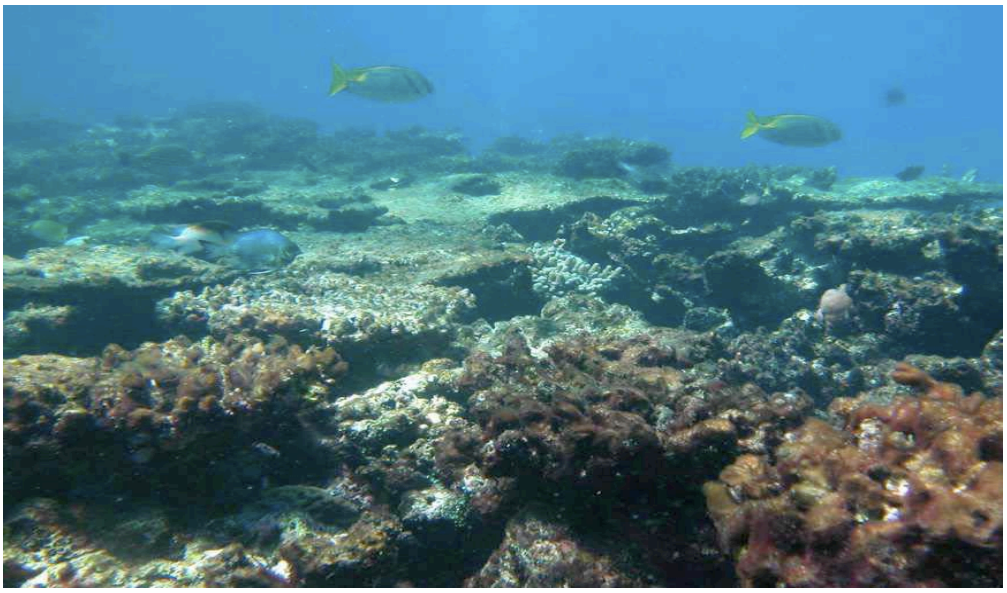

Figura 1.2. Exemplo moderno de recife de corais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

O primeiro ambiente deposicional de plataformas carbonáticas é o de produção em águas rasas e abertas. Neste ambiente, os organismos responsáveis por suas fáceis carbonáticas características, não toleram condições de hipersalinidade e índices de nutrientes muito altos, e necessitam de uma boa renovação de água marinha. Estruturas robustas de recifes de corais (Figura 1.2.) e acúmulos de matéria orgânica são comumente encontradas em águas rasas e início de taludes e formam as bordas de grandes plataformas carbonáticas. A parte de trás dos recifes também pode ter características parecidas mesclando características de ambientes de águas restritas. Apresentam estruturas bastante rígidas e com um crescimento bastante rápido, capaz de acompanhar em muitos casos a elevação progressiva do nível do mar e o espaço de acomodação é criado a partir da subsidência tectônica, assim apresentam muitas vezes estruturas com paredes muito íngremes. Em casos em que o crescimento carbonático não acompanha a elevação do nível do mar, a maior parte do ambiente recifal é afogada. Porém, podem aparecer alguns pináculos em locais restritos das margens da plataforma que conseguiram acompanhar a elevação do nível do mar, no lado interno ou no lado externo.

Com o rebaixamento do nível do mar a plataforma evolui nos taludes dos depósitos anteriores em direção ao mar aberto enquanto antigos depósitos de

margens da plataforma sofrem erosão ao ficarem expostos acima do nível do mar. Na parte superior da plataforma, as estruturas de bordas são geralmente estreitas, com menos de 100 metros de largura, em comparação com a parte interna da plataforma que pode ter até alguns quilômetros de largura, mas devido à migração da borda em direção ao mar no rebaixamento do nível do mar, essas fácies podem ser mais extensas levando em conta camadas deposicionais mais antigas.

O potencial para reservatório de hidrocarbonetos dessas estruturas é geralmente bastante alto devido a boa porosidade gerada pela deposição de sedimentos oriundos de organismos de diversos tamanhos. Porém essa porosidade é algumas vezes preenchida por cimentos carbonáticos e sedimentos menores que preenchem os vazios.

1.3.2. Águas rasas e restritas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

Figura 1.3. Exemplo moderno de estromatólitos em Shark Bay, Austrália

O segundo ambiente é o de produção em águas rasas que apresenta pouca renovação de água marinha onde os organismos responsáveis pelo crescimento carbonático toleram melhor condições de hipersalinidade. Geralmente acontecem em áreas protegidas por recifes e apresentam taxas de crescimento menores comparadas com as taxas das bordas. As fácies mais comuns nessas condições são

areias e argilas carbonáticas. Nesses ambientes são evidentes os efeitos causados pelas marés formando camadas bastante finas, bem regulares e homogêneas, porém em alguns locais podem ser menos regulares devido aos caminhos preferenciais da água do mar durante as mudanças de marés e de vegetações que podem acumular sedimentos em um determinado ponto.

As areias e argilas carbonáticas encontradas nesses ambientes são formadas de maneira compacta e geralmente proporcionam baixas porosidades e permeabilidades gerando bons seladores de possíveis reservatórios de hidrocarbonetos. Em condições de hipersalinidade, é mais comum a formação de estromatólitos (Figura 1.3) que devido a uma maior porosidade apresentam boas características para futuros reservatórios de hidrocarbonetos.

1.3.3. Águas profundas

Em ambientes de mar aberto e com grandes profundidades os organismos responsáveis pela produção carbonática de ambientes rasos não atuam. Com isso, outros organismos que não conseguem se desenvolver em ambientes rasos devido à competição com os organismos ali presentes são responsáveis pela produção carbonática em águas profundas. Estes organismos, porém, geram taxas de crescimento bastante inferiores às taxas de águas rasas. Geralmente esses sedimentos são formados perto da superfície do mar e são então depositados em profundidades sem influência das ondas. Formam camadas bastante regulares e homogêneas e de espessuras finas devido à deposição dominantemente gravitacional e de forma devagar. Outros depósitos carbonáticos em ambientes de águas profundas ocorrem devido a fluxos gravitacionais de carbonatos previamente depositados nos taludes das plataformas carbonáticas. Esses fluxos gravitacionais podem ocorrer tanto para depósitos terrígenos como para depósitos carbonáticos e apresentam espessuras variáveis. Ocorrem devido à ação de terremotos, instabilidade de taludes, tempestades e variações do nível do mar, entre outros.

Como são compostas geralmente por sedimentos argilosos, suas formações proporcionam pequena porosidade, porém em alguns casos são frágeis e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

suscetíveis a fraturas e por isso, podem gerar bons reservatórios de hidrocarbonetos.

1.3.4.
Ambientes terrestres

Figura 1.4. Estalagmites e Estalactites

Depósitos carbonáticos também podem ser encontrados em ambientes não-marinhos em formação de dunas, lagos e cavernas. Sedimentos arenosos carbonáticos soltos em ambientes marinhos próximos à costa, em momentos de maré baixa são transportados pela ação do vento e formam dunas carbonáticas. Em lagos salinos pode-se ter a presença de camadas finas de depósitos carbonáticos de tamanho argiloso que são distinguidos dos depósitos marinhos pela ausência de fauna marinha e presença de outros sedimentos não-marinhos. Os depósitos carbonáticos em cavernas mais comuns são as estalactites e estalagmites (Figura 1.4.) que se formam em cavernas de calcários através da água da chuva que transporta minerais carbonáticos. Esse ambiente deposicional não faz parte desse trabalho e seus processos não foram levados em conta nos modelos que se concentram na produção carbonática em ambientes exclusivamente marinhos.

1.4.
Modelagem numérica

O que são modelos? Modelos são ferramentas intelectuais para facilitar o entendimento de processos complexos (Lehr, 1990). Em todas as ciências o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

conhecimento dos processos e relações é obtido desenvolvendo modelos e testando seus resultados em comparação às observações (Hardy, 1994). Muitos modelos são inicialmente somente conceituais, porém alguns evoluem para uma formulação matemática e podem gerar previsões quantitativas com as seguintes vantagens: geram hipóteses menos ambíguas e mais fáceis de serem testadas, descartam hipóteses que pareciam plausíveis sugerindo novas nunca anteriormente pensadas e abrem o caminho para perguntas mais precisas (Paola, 2000). Um dos focos principais da geologia sedimentar reside em determinar os processos pelos quais as bacias sedimentares são preenchidas, conjunto esse de fatores implícitos no conceito de modelo geológico (Faccion, 2002). Com os avanços recentes em geologia, ocasionando o surgimento da estratigrafia sísmica (Posamentier *et al.*, 1988, Vail *et al.*, 1991) e genética (Cross, 1988, Homewood *et al.*, 1992) nos últimos trinta anos, os conhecimentos dos processos da geologia sedimentar cresceram significativamente para escalas amplas de tempo e espaço (Granjeon, 1997). Diferentes tipos de modelos são utilizados por geólogos para modelar tais processos:

- **Modelos conceituais:** baseado na teoria e observações de casos reais (por exemplo, afloramentos).
- **Modelos físicos:** são modelos experimentais, visando reproduzir fenômenos geológicos sob condições quantitativas controladas.
- **Modelos numéricos:** utilizam algoritmos matemáticos para simular e tentar reproduzir a geometria e a coerência quantitativa de um modelo geológico (Carvalho, 2003).

Os modelos numéricos podem ser divididos em dois grupos principais, modelagem determinística e estocástica. Na determinística não é utilizado nenhum elemento de natureza aleatória, para modelagens com as mesmas condições iniciais e mesmos dados de entrada, obtêm-se os mesmos resultados. Na estocástica, elementos aleatórios são utilizados na modelagem, podendo gerar diferentes resultados partindo dos mesmos dados de entrada e mesmas condições iniciais.

Na modelagem estratigráfica pode-se partir de dados e condições iniciais determinados e chegar a uma situação sedimentar final (modelagem direta), ou

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

partir de uma geometria conhecida e determinar os parâmetros e processos que originaram essa geometria (modelagem inversa) (Carvalho, 2003). A Figura 1.5. ilustra esses conceitos utilizados na modelagem numérica estratigráfica com exemplos de algumas técnicas conhecidas.

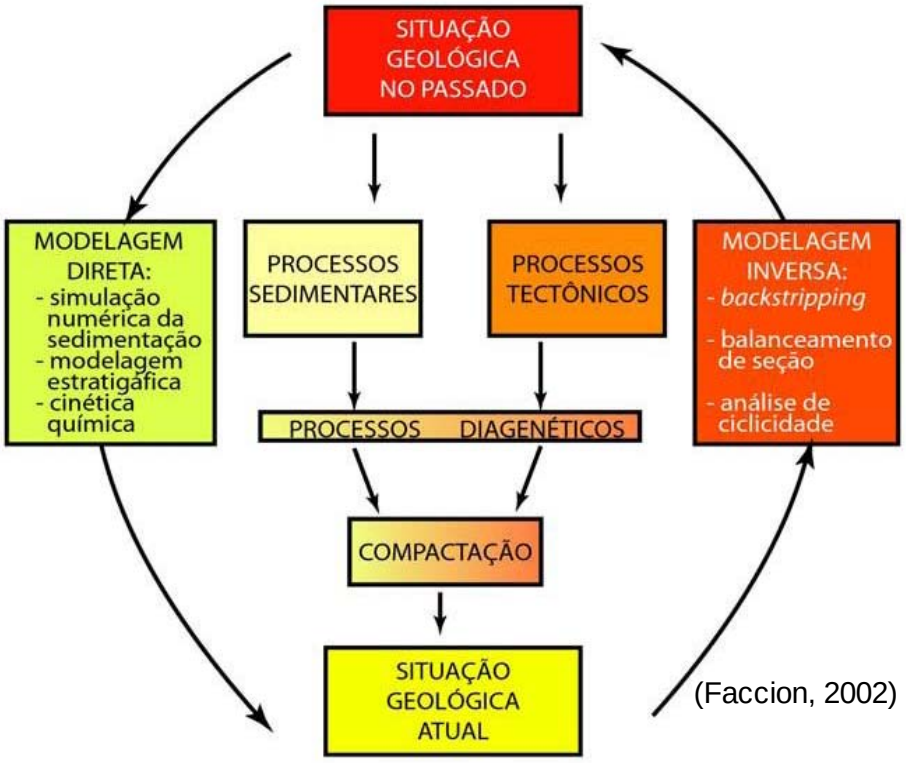

Figura 1.5. – Ilustração dos diferentes tipos de modelagem numérica utilizados na geologia sedimentar.

Modelos devem ser vistos com dois níveis de confiabilidade (Watney *et al.*, 1999):

1. Como ferramentas de aprendizagem para estudar diferentes hipóteses.
2. Como ferramentas de cálculo preciso para responder perguntas específicas.

Erros que comprometem a confiabilidade de um modelo podem aparecer em distintas formas. O erro pode estar na formulação matemática do modelo, na simplificação do modelo real, nos erros numéricos, no tratamento das incertezas e imprecisões dos parâmetros de entrada ou na variabilidade de sistemas naturais complexos. É de fundamental importância a aquisição de bons dados para auxiliar

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

a modelagem. Sem bons dados não se obtêm bons resultados. Para o uso de modelos com fins do melhor entendimento de fenômenos geológicos é crucial a obtenção de boas observações geológicas (Dalmasso *et al.*, 2001).

Uma grande vantagem da modelagem numérica na geologia sedimentar reside nas escalas de tempo geológicas, impossíveis de serem modeladas experimentalmente. Esses modelos podem testar diferentes hipóteses a partir da interação e variações dos parâmetros controladores, podendo assim simular e quantificar os processos físicos e biológicos para reproduzir geometrias e morfologias de corpos sedimentares (Watney *et al.*, 1999). Modelando áreas geológicas já conhecidas detalhadamente através de dados sísmicos do campo, é possível calibrar os parâmetros do modelo numérico para assim poder simular outras áreas carentes de dados. Modelos dessas áreas são muitas vezes obtidos extrapolando-se os dados conhecidos. Porém, com um modelo numérico estratigráfico baseado em conceitos físicos e biológicos e utilizando algoritmos matemáticos consegue-se muito mais precisão nos resultados. A modelagem estratigráfica conecta os processos sedimentares ao produto geológico de maneira mais direta comparada à geoestatística e oferece mais entendimento da evolução estratigráfica (Warrlich *et al.*, 2007).

No caso mais específico de sedimentação carbonática, é difícil determinar quais processos geram hiatos, como acontece a expansão lateral das plataformas carbonáticas e como são criados geometrias estratigráficas bastante complexas. O entendimento dessas complexidades e o estudo de diferentes situações e suas consequências são de grande importância para ajudar a conceituar e modelar estratigrafias carbonáticas (Burgess e Wright, 2003). Sabe-se que taxas de sedimentação carbonáticas modernas são bastante elevadas (Bosscher e Schlager, 1992). Comparando-as com taxas retiradas a partir dos estudos de depósitos antigos, verifica-se que essas são significativamente inferiores, geralmente uma ou mais ordens de magnitude (Sadler, 1981, 1994, Schlager, 2000). Isso se deve principalmente ao fato de essas taxas serem geradas a longo prazo, incluindo mudanças geológicas que podem afetar a evolução da sedimentação carbonática, como afogamento por subsidência tectônica e/ou elevação do nível do mar, ou erosão elevada. Assim sendo, a modelagem numérica pode ajudar no entendimento desses fatores, testando diferentes hipóteses e estudando seus resultados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

1.5. Motivação

O primeiro contato do grupo de pesquisa do Tecgraf/PUC-Rio com modelagem geológica sedimentar foi dada com o desenvolvimento do STENO, simulador numérico de sedimentação siliciclástica tridimensional com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de plataforma, talude e bacia (Carvalho, 2003). O STENO (Figura 1.6. e 1.7.) distribui sedimentos siliciclásticos oriundos de aportes pré-definidos pelos ambientes deposicionais. Esses sedimentos são transportados segundo uma solução simplificada das equações de *Navier-Stokes* onde é aplicada a Segunda Lei de Newton à Equação da Continuidade, para simulação do fluxo bidimensional de um fluido incompressível, em regime permanente, não-viscoso, em função da batimetria da região a ser modelada através de uma malha regular definido pelo usuário. O STENO trabalha com tempo de simulação na ordem de milhões de anos, com passos de tempo de milhares de anos e em malhas de centenas de km^2 contendo células de 100 m^2 a 5 km^2.

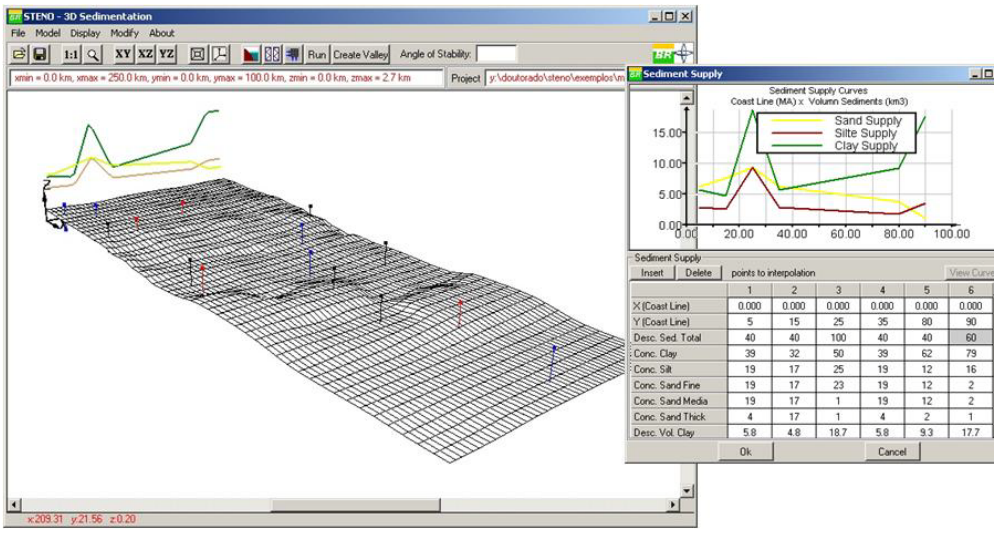

Figura 1.6. Tela principal do STENO e seu diálogo de aportes de sedimentos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

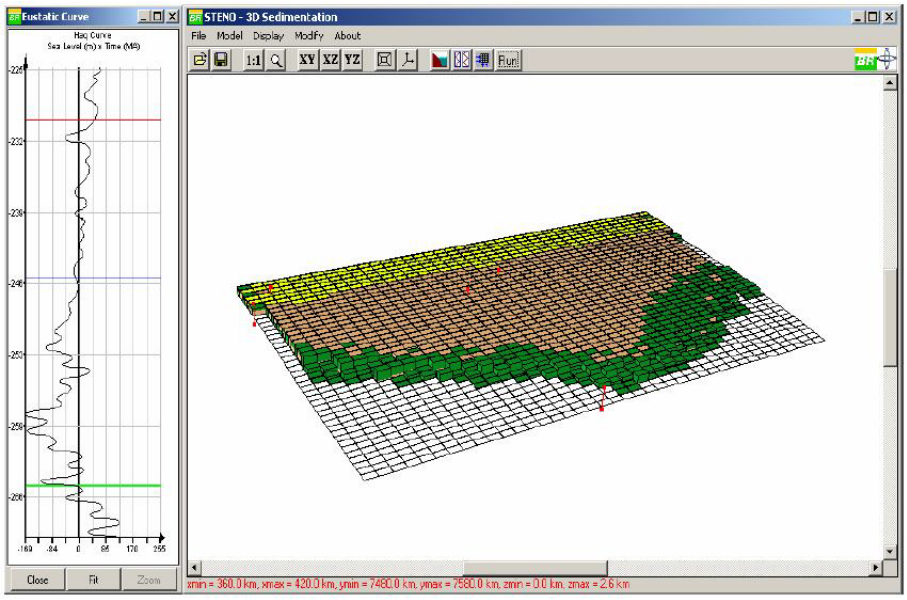

Figura 1.7. Modelo no STENO com sedimentos clásticos após alguns passos da simulação

Inicialmente, o STENO somente incorporava modelos de sedimentação siliciclástica e após um tempo adicionou módulos de sedimentação carbonática baseados nos modelos desenvolvidos no simulador SEDPAK (Kendall *et al.*, 1991a). Porém, essa implementação, acabou sendo subutilizada devido às diferenças nas escalas de atuação dos modelos siliciclástico e carbonático e à não-definição dos diferentes ambientes responsáveis pela produção carbonática.

Os depósitos carbonáticos sempre tiveram bons potenciais para reservatórios de hidrocarbonetos e, por isso, suas formações sempre foram bastante estudadas. Após a descoberta dos reservatórios do pré-sal, houve um *boom* de interesse em rochas carbonáticas e suas formações para auxiliar no descobrimento de novos reservatórios de maneira mais eficiente. Com base na experiência adquirida em modelagem geológica pelos trabalhos no STENO, e a crescente demanda por modelos de sedimentação carbonática, foi iniciada uma pesquisa pelo presente grupo de pesquisa, o que motivou este trabalho.

1.6. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de CarbSM (Carbonate Sedimentation Model), um *software* para simulação computacional

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA

tridimensional da formação e evolução de plataformas carbonáticas. O modelo direto e determinístico leva em conta produção carbonática *in situ* de três diferentes ambientes deposicionais: águas rasas e abertas (áreas de borda de plataformas), águas rasas e restritas (interior de plataformas) e águas profundas. Cada um desses ambientes trabalha com taxas máximas de crescimento carbonático que são restringidos através de uma série de funções que levam em conta a presença da luz, condições marinhas e taxas de sedimentação terrígena. Calculando essas funções de restrição para cada ponto do modelo, uma taxa resultante é encontrada para cada passo de tempo. O principal controle do espaço disponível para sedimentação é a curva de variação relativa do nível do mar. Os passos de tempo utilizados no modelo são na ordem 0.1-10 kA e a malha com resolução de 100-500 m. Inicialmente, um dos objetivos desse trabalho foi de criar um modelo específico para o caso dos depósitos encontrados na camada pré-sal no Brasil. Essa hipótese foi descartada após um tempo pesquisando, pois as características dos ambientes deposicionais dos reservatórios do pré-sal ainda são bastante nebulosas e seriam difíceis de quantificar em um modelo matemático. Por isso foi, preferencial iniciar-se no vasto mundo de sedimentação carbonática com um modelo mais geral.

Para entrada de dados foi desenvolvida uma amigável e intuitiva interface gráfica e para melhor análise dos modelos tridimensionais foram implementados ferramentas de visualização interativa, como planos de corte e iso-superfícies, por exemplo. Todos os algoritmos e interfaces gráficas foram desenvolvidos no ambiente MATLAB (The Mathworks Inc., 2008).

Em relação aos principais programas estudados (ver próximo capítulo), a principal vantagem em desenvolver o presente programa foi de ter um modelo bastante geral que possa simular diversos cenários geológicos, além de ter uma boa interface gráfica com ferramentas de visualização tridimensional.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821354/CA