



Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier

**Simulação Computacional Tridimensional da Formação e
Evolução de Plataformas Carbonáticas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro, março de 2011



Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier

Simulação Computacional Tridimensional da Formação e Evolução de Plataformas Carbonáticas

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Elisa Dominguez Sotelino
Universidade de Virginia Tech

Dr. Marcelo Costa Monteiro
CENPES/Petrobras

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de março de 2011.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas na PUC-Rio em 2008 e atualmente trabalha como pesquisador no Tecgraf/PUC-Rio

Ficha Catalográfica

Cambier, Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain

Simulação computacional tridimensional da formação e evolução das plataformas carbonáticas / Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier ; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. – 2011.
105 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Computação gráfica. 3. Plataformas carbonáticas. 4. Modelagem geológica. 5. MATLAB. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Aos meus pais Philippe “*kibi*” e Cecilia “*mamãe*”, minha irmã “*Piep*”, minha tia “*Predileta*”, minhas primas “*Lele*” e “*Tata*”, meu querido padrinho tricolor “*Huguinho*” e toda minha família pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Carolina por estar sempre ao meu lado quando eu preciso, agüentando meus desesperos e por todo o apoio e amor. À sua linda família por repor minhas energias com deliciosos almoços.

Aos amigos da PUC-Rio, da graduação e da Pós, em especial Paloma e Fernanda, aos amigos mais antigos do ND e aos amigos do velho continente pelos momentos de descontração.

Ao meu professor e orientador Luiz Fernando Martha, pela oportunidade que me proporcionou de realizar esta pesquisa, pela orientação e contribuição neste trabalho e por sempre ter acreditado em mim.

Ao Dr. Marcelo Monteiro do CENPES / Petrobras pelo tempo e atenção dispensados, pela ajuda e bons conselhos na área de carbonatos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio, em especial à Rita, sempre disposta, gentil e ajudando muito.

Ao Dr. Georg Warrlich pelas dicas e ajuda.

Aos amigos e colegas do Tecgraf, pela amizade, companheirismo, ótimos conselhos e ocasionais cervejas no Pires, pois ninguém é de ferro. Em especial, Alonso “*Peitodoleme*” Carbone, Antonio Sergio, Fábio “*Sócio*” Figueiredo, Fransisco “*Chico*”, Mauro “*Futeboléprahomem*” Carrion, Rafael “*Bronquidão*” Sousa e Zé “*Crusasé*” Berutti.

Ao Tecgraf e seus funcionários por proporcionarem todas as condições necessárias para que esta pesquisa pudesse ser realizada e pelo apoio financeiro e de infra-estrutura.

Resumo

Cambier, PedroHugo Michelle Marie Ghislain; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Simulação Computacional Tridimensional da Formação e Evolução de Plataformas Carbonáticas**. Rio de Janeiro, 2011. 105p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em geologia sedimentar estudam-se as formações e evoluções de sedimentos que formam camadas rochosas que encobrem a crosta terrestre. Diferentes processos físicos, químicos e biológicos são responsáveis pela formação e distribuição de sedimentos. Em um ambiente subaquoso são predominantes as rochas sedimentares de origem terrígena e carbonática. As rochas carbonáticas são oriundas de processos químicos, bioquímicos e aloquímicos envolvendo a deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio como algas, conchas e corais. Essas rochas vêm sendo amplamente estudadas na indústria de óleo e gás, pois podem ser bons reservatórios de hidrocarbonetos. Tendo em vista a importância destas rochas, este trabalho concentra-se na formação e evolução de plataformas carbonáticas, existentes principalmente em ambientes de águas quentes e claras. Neste contexto, é proposto um modelo matemático determinístico que possa representar a evolução de plataformas carbonáticas dados alguns parâmetros iniciais como a subsidência inicial, taxas de crescimento e variações do nível do mar. Em cima deste modelo matemático foi desenvolvido um simulador computacional de sedimentação carbonática tridimensional, CarbSM, que leva em conta três fábricas carbonáticas: interior da plataforma, borda da plataforma e águas profundas. Com esses ambientes são associadas taxas máximas de crescimento *in situ*, além de funções restritivas, tais como: profundidade, condições marinhas e sedimentação terrígena; possibilitando o cálculo das taxas resultantes. Desta forma, o sistema é capaz de simular a evolução de plataformas carbonáticas em diversos cenários geológicos. Para entrada de dados e análise dos resultados obtidos, CarbSM oferece uma extensa interface ao usuário e utiliza técnicas de computação gráfica para visualização tridimensional interativa dos modelos

Palavras-chave

Computação gráfica; plataformas carbonáticas; modelagem geológica; MATLAB.

Abstract

Cambier, Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Tridimensional Computational Simulation of the formation and Evolution of Carbonate Platforms**. Rio de Janeiro, 2011. 105p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sedimentary geology focuses on the formation and evolution of the Earth's surface. Various physical, chemical and biological processes are responsible for supplying and distributing sediments. The presence of sedimentary rocks of siliciclastic and carbonate origins are dominant in subaqueous environments. Carbonate rocks are originated from biochemical processes involving the deposition and decomposition of calcium rich organism such as algae, shells and corals. These types of rocks are of great interest for the oil and gas industry due to their potential to form good hydrocarbon reservoirs. Therefore, this work studies the formation and evolution of carbonate platforms, most common in clear and hot waters. A deterministic mathematical model is proposed to represent the evolution of carbonate platforms given a set of entry data like initial subsidence, growth rates and sea level fluctuations. Based on this mathematical model a tridimensional carbonate sedimentation computational simulator, CarbSM, was developed taking into account three carbonate factories: platform interior, platform margin and deep-water carbonates. These environments are linked to maximum *in situ* growth rates and the resulting rates are obtained through a series of restriction functions, such as: depth, marine conditions and clastic sedimentation. This way, the developed tool can simulate the evolution of carbonate platforms within diverse geological scenarios. CarbSM offers an extensive user interface and uses computer graphics rendering techniques for data input and interactive tridimensional visualization of the simulated models.

Keywords

Computer graphics; carbonate platforms; geological modeling; MATLAB..

Sumário

1 Introdução	15
1.1. Rochas carbonáticas	15
1.2. Organização da dissertação	18
1.3. Ambientes deposicionais	18
1.3.1. Águas rasas e abertas	19
1.3.2. Águas rasas e restritas	20
1.3.3. Águas profundas	21
1.3.4. Ambientes terrestres	22
1.4. Modelagem numérica	22
1.5. Motivação	26
1.6. Objetivos	27
2 Plataformas Carbonáticas	29
2.1. Plataforma com bordas	29
2.2. Rampa sem bordas	31
2.3. Plataforma Epicontinental	32
2.4. Plataforma Isolada	32
2.5. Plataforma Afogada	33
3 Modelagem direta de sistemas carbonáticos	34
3.1. Simulação unidimensional de depósitos carbonáticos	34
3.2. Simulação bidimensional direta de recife de corais	36
3.3. Simulação bidimensional direta de plataformas carbonáticas	39
3.4. Simulação tridimensional direta de plataformas carbonáticas	42
4 Modelo geológico	47
4.1. Eustasia e Subsidência	47
4.2. Produção Carbonática	51
4.2.1. Restrição por profundidade	52
4.2.2. Restrição por condições marinhas	55

4.2.3. Restrição por deposição de sedimentos soltos	58
4.2.4. Restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas	59
4.2.5. Produção carbonática resultante	60
4.3. Sedimentação carbonática	60
4.4. Classificação da sedimentação carbonática	61
5 Modelo computacional	63
5.1. Sistema CarbSM	63
5.2. Rotinas computacionais	64
5.2.1. Superfície Inicial	64
5.2.2. Convolução	67
5.2.3. Sedimentação carbonática	72
5.2.4. Rotina Principal	73
5.3. Interface Gráfica	74
5.3.1. Tela principal	74
5.3.2. Entrada de dados	75
6 Exemplo de Aplicação	80
6.1. Parâmetros de entrada	81
6.1.1. Superfície inicial	81
6.1.2. Curva de nível do mar	83
6.1.3. Taxas e Restrições	84
6.1.4. Resumo dos parâmetros de entrada	85
6.2. Resultados	86
6.2.1. Lowstand System Tract (LST)	86
6.2.2. Transgressive System Tract (TST)	90
6.2.3. Highstand System Tract (HST)	93
6.2.4. Lowstand System Tract Final	96
7 Conclusões e Trabalhos futuros	99
8 Referências Bibliográficas	101

Lista de figuras

Figura 1.1. Exemplo da localização de depósitos carbonáticos modernos	17
Figura 1.2. Exemplo moderno de recife de corais	19
Figura 1.3. Exemplo moderno de estromatólitos em Shark Bay, Austrália	20
Figura 1.4. Estalagmites e Estalactites	22
Figura 1.5. – Ilustração dos diferentes tipos de modelagem numérica utilizados na geologia sedimentar.	24
Figura 1.6. Tela principal do STENO e seu diálogo de aportes de sedimentos.	26
Figura 1.7. Modelo no STENO com sedimentos clásticos após alguns passos da simulação	27
Figura 2.1. Plataforma carbonática com borda acentuada.	30
Figura 2.2. Rampa Carbonática com pequena inclinação.	31
Figura 2.3. Plataforma Epêirica.	32
Figura 2.4. Plataforma Isolada.	33
Figura 2.5. Plataforma Afogada.	33
Figura 3.1. Subsidência e variação do nível do mar, com os depósitos carbonáticos unidimensionais de Read <i>et al.</i> (1983).	35
Figura 3.2. Exemplo de resultados obtidos com o programa de simulação unidimensional <i>Mr. Sediment</i> (Goldhammer <i>et al.</i> , 1987)	36
Figura 3.3. Taxas de crescimento de corais Caribenhos e curva de intensidade de luz comparada com função de crescimento de corais (Bosscher e Schlager, 1992).	38
Figura 3.4. Resultados de uma simulação de crescimento de corais com a dada curva de variação de nível do mar (Bosscher e Schlager, 1992).	39
Figura 3.5. Exemplos de resultados obtidos no programa MAPS (Demicco e Spencer, 1989).	40
Figura 3.6. Imagens do resultado de uma simulação em CARBPLAT (Bosscher e Southam, 1992) com alguns planos aproximados.	41

Figura 3.7. Exemplos de simulações com diferentes parâmetros de entradas modeladas em CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990).	42
Figura 3.8. Algumas telas do programa GPM (Hill, J. <i>et al.</i> , 2009), (A) antes da simulação, (B) depois da simulação com uma área em destaque mais detalhada.	43
Figura 3.9. Exemplos de resultados obtidos pelo programa SIMSAFADIM (Bitzer e Salas, 2002).	44
Figura 3.10. Exemplo de modelo de um atol no programa CARBONATE 3D (Warrlich <i>et al.</i> , 2002).	45
Figura 3.11. Modelagem da bacia de Níjar, Espanha, utilizando o programa CARBONATE 3D (Warrlich <i>et al.</i> , 2005).	45
Figura 4.1. Conceitos de eustasia, subsidência e nível relativo do mar.	48
Figura 4.2. Exemplo de curva de nível relativo do mar utilizada no modelo.	49
Figura 4.3.: Ciclos na curva de nível do mar onde ocorrem os principais <i>System Tracts</i> .	51
Figura 4.4. Função de restrição por profundidade.	54
Figura 4.5. Perfil de profundidade suavizado e normal através de um corte transversal de uma plataforma carbonática.	56
Figura 4.6. Exemplo de uma superfície suavizada com um filtro Gaussiano.	57
Figura 4.7. Função de restrição devido à deposição de sedimentos soltos.	59
Figura 4.8. Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962)	61
Figura 5.1. Pontos de controle predeterminados e área a ser modelada.	65
Figura 5.2. Grid interpolado com $\beta = 1$.	67
Figura 5.3. Mesmo Grid interpolado com $\beta = 4$	67
Figura 5.4. O <i>grid</i> principal da superfície deposicional com um filtro Gaussiano aplicado em um de seus nós.	69
Figura 5.5. Exemplo de valores inexistentes na aplicação do filtro no nó $(nx, 1)$.	71
Figura 5.6. Matriz auxiliar <i>z_{aux}</i> com as regiões onde os valores da borda	

da matriz z são replicados.	72
Figura 5.7. Camada de sedimentos adicionais, Δs , calculadas na rotina do tempo $(t+\Delta t)$ é sobreposta à camada de deposições antigas, $s(t)$	73
Figura 5.8. Tela principal do programa CarbSM com os controles de visualização, o <i>canvas</i> principal e o menu de entrada de dados	75
Figura 5.9. <i>Menu</i> para entrada dos dados necessários para rodar a simulação do CarbSM	75
Figura 5.10. Entrada de dados para taxas máximas de produção carbonática para as diferentes fábricas	76
Figura 5.11. Entrada dos tempos da simulação	76
Figura 5.12. Definição da curva do nível relativo do mar.	77
Figura 5.13. Definição dos parâmetros das funções de restrição e do uso das mesmas.	78
Figura 5.14. Diálogo para definição do <i>grid</i> que será utilizado na simulação	79
Figura 5.15. Visualização dos resultados	79
Figura 6.1. Modelo conceitual de Handford e Loucks (1993) de um atol sob condições de vento predominante.	81
Figura 6.2. Pontos gerados no software <i>Surfer</i> e importados para dentro do CarbSM.	82
Figura 6.3. Superfície inicial gerada no CarbSM com uma interpolação linear.	82
Figura 6.4. Curva de nível do mar utilizada no modelo, baseada na utilizada no modelo conceitual de Handford e Loucks (1993).	84
Figura 6.5. <i>Lowstand System Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	87
Figura 6.6. Variação eustática no período <i>LST</i> analisado	87
Figura 6.7. Modelo do período <i>LST</i> simulado em CarbSM, mostrando o nível do mar do fim do período <i>LST</i> .	88
Figura 6.8. Vista em planta do modelo simulado no período <i>LST</i> .	88
Figura 6.9. Corte transversal AA da Figura 6.8., as linhas pretas são linhas de tempo de 200 kA.	89
Figura 6.10. Legenda de cores utilizadas em CarbSM.	89

Figura 6.11. <i>Trangressive Systems Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	90
Figura 6.12. Variações eustáticas no período <i>TST</i> analisado.	91
Figura 6.13. Modelo do período <i>TST</i> simulado em CarbSM.	91
Figura 6.14 Vista em planta do modelo simulado no período <i>TST</i> .	92
Figura 6.15. Corte transversal AA da Figura 6.14.	92
Figura 6.16. <i>Highstand Systems Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	94
Figura 6.17. Variação eustática no período <i>HST</i>	94
Figura 6.18. Modelo do período <i>HST</i> simulado em CarbSM, com o nível do mar a mostra.	94
Figura 6.19 Vista em planta do modelo simulado no período <i>HST</i>	95
Figura 6.20. Corte transversal AA da Figura 6.19.	95
Figura 6.21. Corte transversal de um atol conceitual idealizado após os quatro ciclos levados em conta no modelo de Handford e Loucks (1993).	96
Figura 6.22. Variação eustática no período <i>LST</i> final	97
Figura 6.23. Modelo do período <i>LST</i> final simulado em CarbSM, com o nível do mar a mostra.	97
Figura 6.24 Vista em planta do modelo simulado no período <i>LST</i> final.	98
Figura 6.25. Corte transversal AA da Figura 6.24.	98

Lista de tabelas

Tabela 1: Classificação dos sedimentos carbonáticos nesse trabalho	62
--	----