



# IBP1480\_06 MODELO NUMÉRICO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO E COMPACTAÇÃO DE BACIAS SEDIMENTARES UTILIZANDO MALHAS NÃO-ESTRUTURADAS

Ewaldo Schubert Jr.<sup>1</sup>, Fernando S. V. Hurtado<sup>2</sup>,  
Jonas Cordazzo<sup>3</sup>, Clovis R. Maliska<sup>4</sup>

## Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

---

## Resumo

Este trabalho apresenta um modelo numérico do processo de deposição e compactação de bacias sedimentares em malhas não-estruturadas com elementos triangulares utilizando o método de volumes finitos baseado em Elementos – EbFVM. Considera-se que a compactação dos sedimentos ocorre apenas na direção vertical. Isto implica que apenas a tensão efetiva média é necessária para o cálculo da compactação eliminando-se o cálculo do campo total de tensões nos sedimentos. A tensão efetiva média pode ser relacionada com a tensão média da carga sedimentar e à pressão do fluido sobre as camadas. Assim, a introdução de novas camadas de sedimentos induz o aumento da carga sedimentar sobre as camadas anteriormente depositadas, fazendo com que elas sejam compactadas, refletindo na diminuição do volume poroso. O processo iterativo consiste na introdução da camada, a estimativa da porosidade, o cálculo da carga sedimentar, da pressão e do movimento dos nós, até que a movimentação dos nós atinja a tolerância estabelecida. Neste artigo são apresentados resultados preliminares que demonstram as potencialidades do modelo no processo de deposição e compactação de bacias sedimentares.

## Abstract

This work presents a numerical model for the deposition and compaction of sedimentary basins process in unstructured meshes with triangular elements using the Element Based Finite Volume Method - EbFVM. It is considered that the compacting of the sediments occurs only in the vertical direction. This implies that only the effective average tension is necessary for the calculation of the compaction, eliminating the calculation of the total tensions field in the sediments. The effective average tension can be related with the load of the sediments and the pressure of the fluid. Thus, the introduction of new layer of sediments increases the sedimentary load on the layers previously deposited, consequently compacting these layers, reflecting in the reduction of the porous volume. The iterative process consists of the introduction of the layer, the estimation of the porosity, the calculation of the sedimentary load, the pressure and the movement of nodes, until the movement of the nodes reaches the established tolerance. In this article are presented preliminary results that demonstrate the potentialities of the model in the deposition and compacting of sedimentary basins process.

## 1. Introdução

A modelagem e simulação de bacias sedimentares têm se tornado de grande importância para a exploração de reservatórios de petróleo para a maioria das grandes indústrias petrolíferas. Devido ao processo de perfuração de poços ser bastante custoso, a modelagem e simulação cria maior embasamento na definição de regiões potencialmente formadoras de petróleo.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico – SINMEC, Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>2</sup> Mestre, Engenheiro Mecânico – SINMEC, Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>3</sup> PHD, Engenheiro Mecânico – SINMEC, Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>4</sup> PHD, Engenheiro Mecânico – SINMEC, Universidade Federal de Santa Catarina

O processo de formação e evolução de uma bacia sedimentar é bastante complexo, envolvendo a decomposição e compactação de sedimentos, com sua evolução térmica gerando hidrocarbonetos (óleo) e o escoamento água-hidrocarboneto entre os sedimentos depositados. Neste artigo apenas uma parte inicial da modelagem de bacias sedimentares será estudada, ou seja, apenas a deposição e compactação de sedimentos em malhas não-estruturadas, excluindo o cálculo do escoamento e geração de óleo no meio poroso por simplicidade.

As malhas não-estruturadas ainda são pouco utilizadas em simulações de bacias sedimentares, mas têm grande potencial, pois conseguem melhor representar a complexidade geométrica das bacias e reservatórios. No entanto, não são todos os métodos numéricos que lidam com este tipo de geometria. O método de volumes finitos baseado em elementos – EbFVM emprega malhas não-estruturadas de forma bastante adequada (Maliska, 2004), e por isso pode ser útil nas simulações de bacias sedimentares e foi testado neste trabalho.

Este artigo foi dividido, além desta seção introdutória, em mais 5 partes. Inicialmente são discutidos os modelos de descompactação, soterramento e compactação das camadas. Na seqüência, é apresentado o modelo numérico empregado. Finalmente são apresentados alguns resultados preliminares e as conclusões.

## 2. Descompactação e Soterramento

O processo geológico de deposição de sedimentos é contínuo e lento, levando milhões de anos. Por isso modelos simplificados têm sido empregados para representar este processo (Mello et al., 2001; Chen et al., 2002; Schneider, 2003). No lugar de se considerar uma taxa de deposição temporal, cada camada é adicionada instantaneamente, o que torna a sedimentação um procedimento discreto no tempo. Este é o modelo empregado neste trabalho.

Este modelo considera que a geometria aproximada pela malha de elementos representa o estado atual do meio poroso. Os sedimentos distribuídos nas diversas camadas do modelo geológico estão em equilíbrio hidrostático e compactados. Mas como a compactação é um processo que ocorre ao longo do tempo, a camada não pode ser inserida no estado de compactação em que se encontra hoje. É necessário fazer a sua descompactação. Assim, o início de um processo de simulação de bacias sedimentares começa com a introdução de uma camada já descompactada no domínio.

Na introdução de uma camada, ajusta-se sua superfície de topo a batimetria da época, determinada pelo geólogo, e determina-se sua espessura descompactada. Já as demais camadas previamente depositadas devem ser soterradas, isto é, essas camadas são encaixadas abaixo da descompactada que foi ajustado a batimetria da época, porém, sem considerar a carga devido ao peso da última. Isso será levado em consideração no processo iterativo deste nível temporal.

Levando em conta que a nova camada depositada é adicionada instantaneamente, conforme mencionado anteriormente, deve-se adotar algum procedimento para determinar a sua espessura no início do intervalo de sedimentação. Neste artigo é considerado o modelo “totalmente expandido” para o cálculo da espessura da nova camada. Neste modelo, a espessura é determinada considerando-se uma distribuição de porosidade constante no interior da nova camada e igual à porosidade de referência da litologia associada à camada, geralmente a porosidade do fundo do mar.

### 2.1. Determinação da espessura de deposição

A determinação da espessura de deposição é realizada através da solução da equação de conservação da massa do sólido, dada por,

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\phi)\rho_s) + \vec{\nabla} \cdot ((1-\phi)\rho_s V_s) = 0 \quad (1)$$

Onde  $\phi$  representa a porosidade do meio,  $\rho_s$  a densidade do sólido e  $V_s$  a velocidade do sólido.

Como o modelo de descompactação considera que o topo da camada mantém-se na batimetria do período, o trabalho de determinar a nova espessura resume-se em encontrar a nova posição de sua base.

Adotando-se o conceito de incompressibilidade dos grãos de sedimento, pode-se dizer que a massa do sólido de uma camada compactada se conserva após ser descompactada, então a equação da conservação da massa do sólido deve ser resolvida, resultando em um sistema linear que determina uma nova posição da coordenada  $z$ , já que consideramos que apenas há movimentação na direção vertical.

A discretização desta equação é feita através do método EbFVM que se trata de um método conservativo, apresentado na seção 4.

### 2.2. Determinação do soterramento das camadas pré-depositadas

Após ser encontrada a nova posição de cada nó da camada que está sendo expandida, as camadas previamente depositadas são encaixadas uma a uma de forma sucessiva, abaixo da descompactada através de uma translação pura.

### 3. Compactação

O processo de compactação é provocado pela introdução de uma nova camada, que com o aumento do peso sobre as outras camadas introduzidas anteriormente, faz com que estas se compactem ainda mais.

O modelo de compactação adotado é representado matematicamente por uma lei de decaimento exponencial em função da tensão efetiva média do meio poroso e de valores de referência. A Equação (2) representa este modelo matematicamente:

$$\phi(\sigma_e) = \phi^o \exp(-\sigma_e / \sigma_e^o) \quad (2)$$

onde  $\phi^o$  é o valor de referência para porosidade e  $\sigma_e^o$  o valor de referência para tensão efetiva, cujos valores correspondem, geralmente, aqueles do fundo do mar. A tensão efetiva é definida pela diferença entre a carga de sedimentos  $S$  e a pressão de poro  $p_f$ , como mostrado na Equação (3).

$$\sigma_e = S - p_f \quad (3)$$

#### 3.1. Cálculo da carga de sedimentação

A carga de soterramento ( $S$ ) a partir da seguinte expressão:

$$S = \int_{z_0}^z (\phi \rho_m + (1 - \phi) \rho_s) g dz \quad (4)$$

A carga é calculada resolvendo-se a integral acima em uma linha vertical que parte do ponto onde o valor da carga é necessário até o topo da bacia. Como a bacia é discretizada, a integral da Equação (4) precisa ser aproximada, como será visto na seção 4.

#### 3.2. Cálculo dos deslocamentos do sólido

Para o cálculo dos deslocamentos dos nós no processo de compactação é utilizado a mesma metodologia do processo de descompactação, através do método EbFVM que será apresentado na seção 4.

#### 3.3. Processo Iterativo

À medida que as camadas são introduzidas, a carga de sedimentos comprime o meio poroso e tende a expulsar o fluido que se encontra nos poros, dando origem a um escoamento. Como a distribuição de porosidade resultante da compactação dos sedimentos é função da carga e da pressão resultante do escoamento no meio poroso, e estes por sua vez, dependem do campo de porosidade, necessita-se de um processo iterativo para solução deste acoplamento.

Neste trabalho, por simplicidade, o escoamento não será resolvido. A pressão hidrostática será utilizada no lugar do campo de pressão gerado pelo escoamento do fluido no meio poroso. Como é assumido que ocorre a compactação dos sedimentos somente na direção vertical, a modelagem do comportamento mecânico de rochas sedimentares fica simplificado.

O processo iterativo para o processo de compactação de uma bacia sedimentar consiste, inicialmente, em estimar a carga de sedimentação  $S$  da camada introduzida. Na seqüência, determina-se a distribuição de pressão hidrostática e, com os valores da carga e da pressão, encontra-se uma tensão efetiva através da Equação (3). Pode-se, agora, calcular uma nova porosidade através da Equação (2). Com esses valores de  $S$ ,  $p_f$ ,  $\phi$  e do passo de tempo calcula-se o deslocamento vertical dos nós (compactação), através da solução da Equação (1). Repete-se todo o procedimento até a convergência. Após este processo, uma nova camada é introduzida e o problema se repete novamente.

### 4. Modelo numérico

No processo de deposição e compactação, dois procedimentos numéricos são necessários. O primeiro está relacionado à discretização da Equação da conservação da massa do sólido, que é resolvida para determinar a espessura de deposição e de compactação das camadas. O segundo é a integração numérica na direção vertical da carga ( $S$ ) a partir de um determinado ponto.

#### 4.1 Discretização da equação de conservação do sólido no EbFVM

O método utilizado para a discretização da equação de conservação da massa do sólido é o EbFVM. Este método pertence à classe dos métodos de volumes finitos, mas é concebido de forma a usufruir algumas das boas características do método de elementos finitos, como o emprego de malhas não-estruturadas e das funções de forma. Estas características são importantes porque bacias sedimentares com geometrias complexas podem ser facilmente representadas. Por se tratar de um método conservativo, a conservação da massa em cada volume de controle é assegurada, o que permite uma interpretação direta das equações discretizadas resultantes.

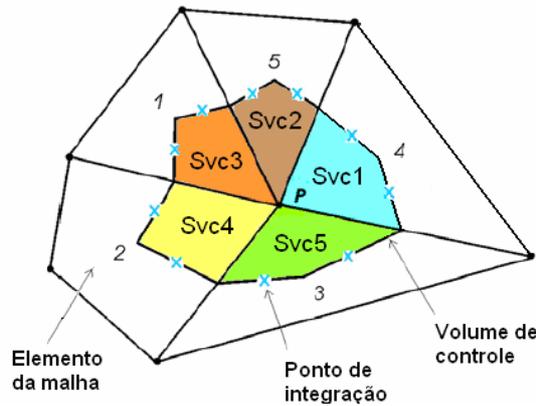


Figura 1 – Exemplo de um volume utilizada no EbFVM em malha não-estruturada.

Os volumes de controles são construídos ao redor dos nós, unindo-se o centro dos elementos com suas medianas (*cell vertex construction*). O volume de controle resultante é formado por porções (sub-volumes de controle - Scv) dos elementos da vizinhança, como mostra a Figura 1.

#### 4.2 Avaliação numérica da carga de sedimentação

No modelo empregado deve-se calcular a carga de sedimentação em cada nó da malha através da Equação (4). Como trata-se de uma integral na direção vertical, ela tem origem no nó em questão terminando no topo da bacia, como mostrado na Figura 2 (a).

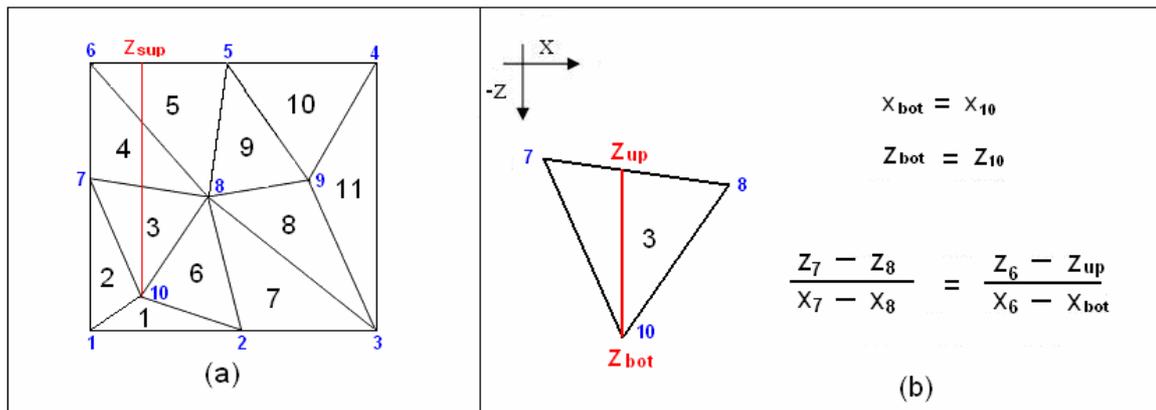


Figura 2 - Esquema ilustrando uma linha de integração

A integral sobre esta linha vertical pode cruzar não apenas os nós da malha, onde as propriedades são calculadas, mas cruza também arestas, como mostra a figura anterior. Por isso, uma interpolação linear poderá ser necessária neste processo, como demonstra a Figura 2 (b). Nesta Figura,  $X_{10}$  representa o valor da coordenada x do nó onde a carga será calculada,  $Z_{up}$  o valor de z na aresta superior do elemento intersectado e  $Z_{bot}$  o valor da coordenada z da aresta inferior intersectada.

O procedimento adotado consiste em dividir o intervalo de integração, que inicia-se na coordenada z do nó em questão, até a coordenada z do ponto de interseção da semi-reta vertical com a superfície de topo da camada. Para a linha de integração que aparece na Figura 2 (a) tem-se

$$\int_{z_{10}}^{z_{sup}} f(z)dz = \int_{z_{10}}^{z_{up}^{e3}} f^{e3}(z)dz + \int_{z_{bot}^{e4}}^{z_{up}^{e4}} f^{e4}(z)dz + \int_{z_{bot}^{e5}}^{z_{up}^{e5}} f^{e5}(z)dz \quad (5)$$

Com

$$(z_{10}, z_{sup}) = (z_{10}, z_{up}^{e3}) + (z_{bot}^{e4}, z_{up}^{e4}) + (z_{bot}^{e5}, z_{up}^{e5}) \quad (6)$$

Na Equação (5), os super índices das funções  $f$  e dos intervalos de integração referem-se ao elemento cujas propriedades associadas devem ser usadas para a definição desta função. Sabendo que  $z_{e1}$  é a coordenada  $z$  do nó 1 e  $z_{sup}$  a coordenada  $z$ , onde ocorre a intersecção da semi-reta vertical e a superfície de topo da camada. Deve-se observar que,

$$z_{up}^{e3} = z_{bot}^{e4}, \quad z_{up}^{e4} = z_{bot}^{e5} \quad \text{e} \quad z_{up}^{e5} = z_{sup} \quad (7)$$

## 5. Resultados preliminares

A fim de demonstrar as potencialidades do método proposto, nesta seção será analisado um caso de uma bacia sedimentar constituída por 2 camadas. Cada uma delas foi depositada em um período diferente, sendo a primeira camada a 90 milhões de anos e a segunda a 40 milhões de anos atrás.

A malha computacional desta bacia pode ser vista na Figura 3.

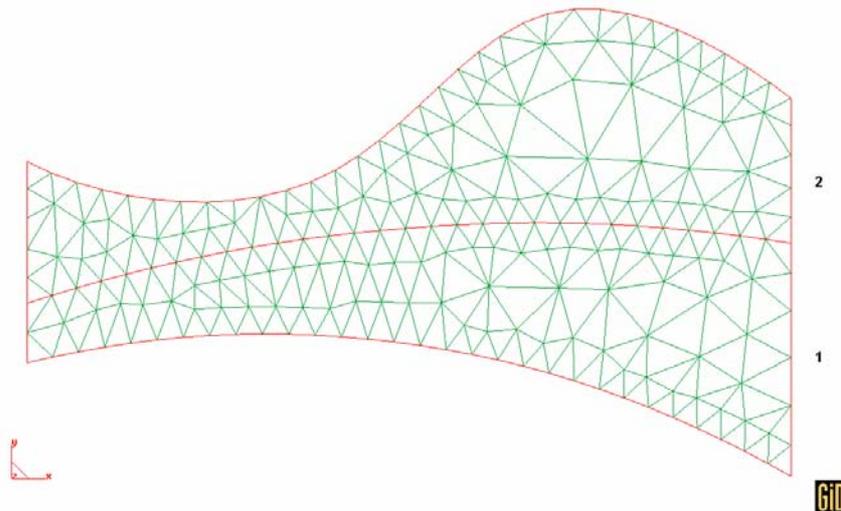


Figura 3 – Malha geométrica da bacia sedimentar que representa sua situação atual

Cada camada é constituída de um material diferente, possuindo propriedades como densidade e porosidade distintas sendo apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais.

|                               | Camada 1                              | Camada 2                              |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Densidade [ $\text{kg/m}^3$ ] | 2400                                  | 2650                                  |
| Porosidade                    | $\phi(z) = \frac{1}{2} \exp(-1e-4*z)$ | $\phi(z) = \frac{1}{2} \exp(-2e-4*z)$ |

A Figura 3 representa a geometria da bacia nos dias de hoje. Na simulação é necessário reproduzir sua formação inserindo cada camada descompactada de acordo com sua idade geológica.

Este processo inicia-se retirando a primeira camada da geometria atual, juntamente com suas propriedades físicas atuais, e adicionando-a ao novo domínio de solução, como mostrado na Figura 4.

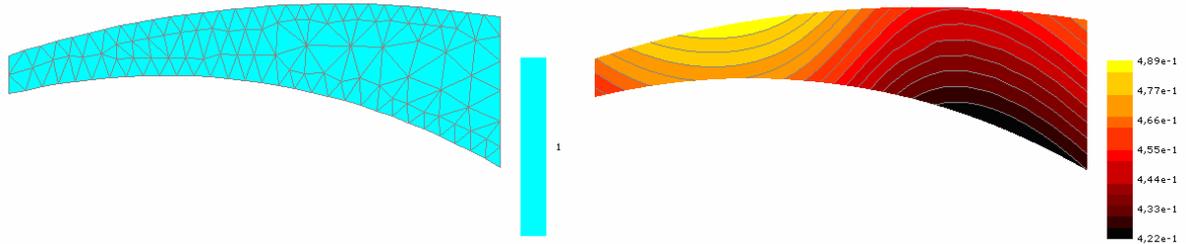


Figura 4 – Camada 1 extraída (esquerda) e seu campo de porosidade (direita)

A seguir, a camada é descompactada utilizando o método “totalmente expandido”, ou seja, o campo de porosidade é constante e igual à porosidade de referencia ( $\phi^o = 0,5$ ), como pode ser observado na figura 5.

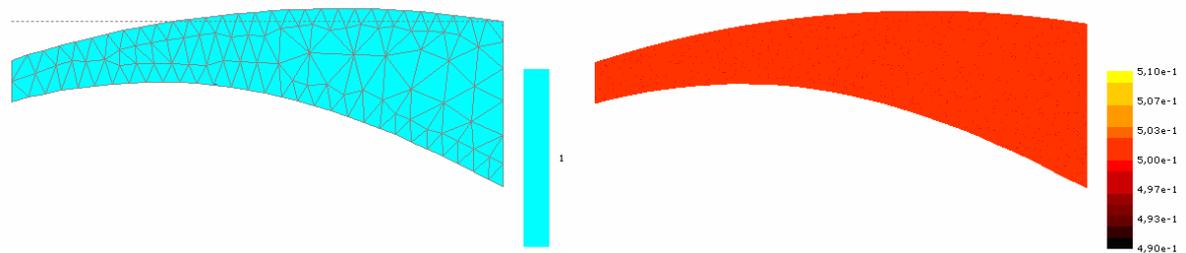


Figura 5 – Camada descompactada (esquerda) e campo de porosidade após descompactação (direita)

O topo da camada deve ser colocado na batimetria da época (horizontal) para se dar prosseguimento à compactação desta camada. Sendo esta camada a primeira, ela se compactará apenas devido ao seu próprio peso. Neste ponto o processo iterativo apresentado no item 3.3 é executado, podendo seu resultado ser visto na Figura 6.

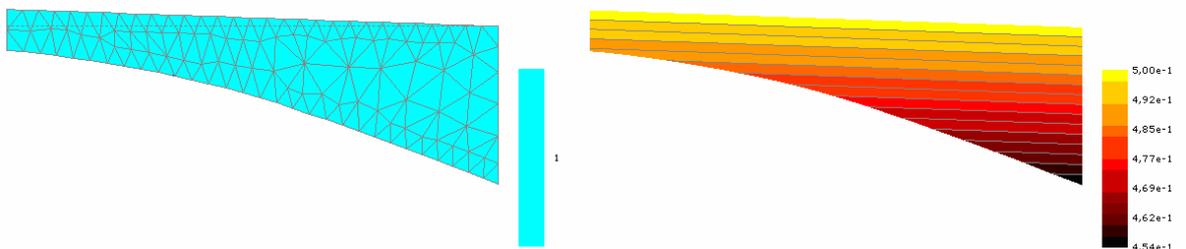


Figura 6 – Camada 1 compactada (esquerda) e campo de porosidade (direita)

Agora, a segunda camada e suas propriedades são extraídas da malha fornecida (Figura 7).

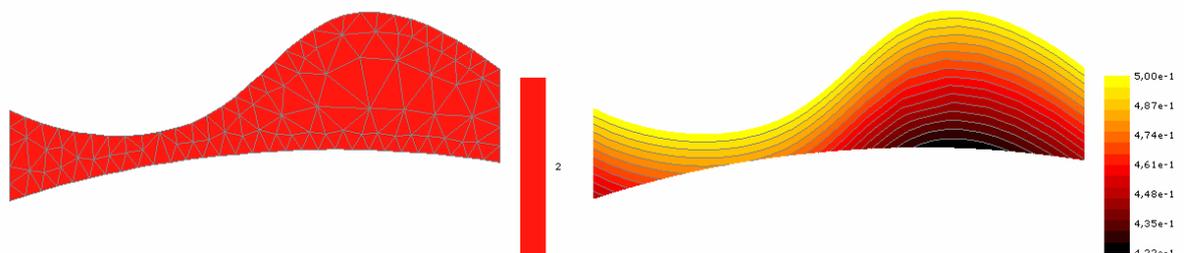


Figura 7 – Camada 2 extraída (esquerda) e seu campo de porosidade (direita)

Descompactando a camada através do método totalmente expandido obtém-se a geometria apresentada na Figura 8.

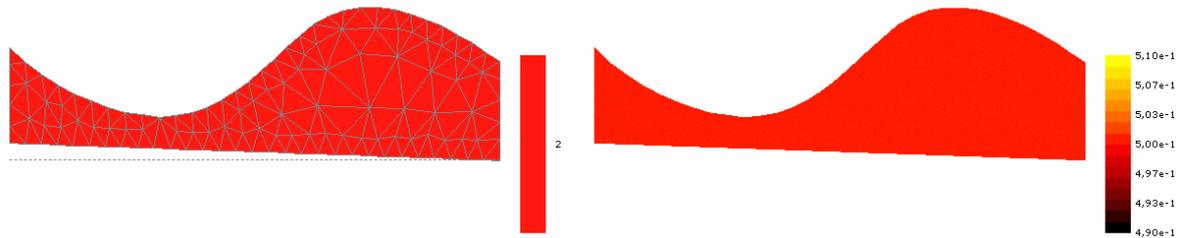


Figura 8 – Camada 2 descompactada (esquerda) e seu campo de porosidade (direita)

O próximo passo é a introdução da camada 2 no domínio de simulação atual, ou seja, a introdução desta camada em cima da camada já depositada anteriormente (Figura 9).

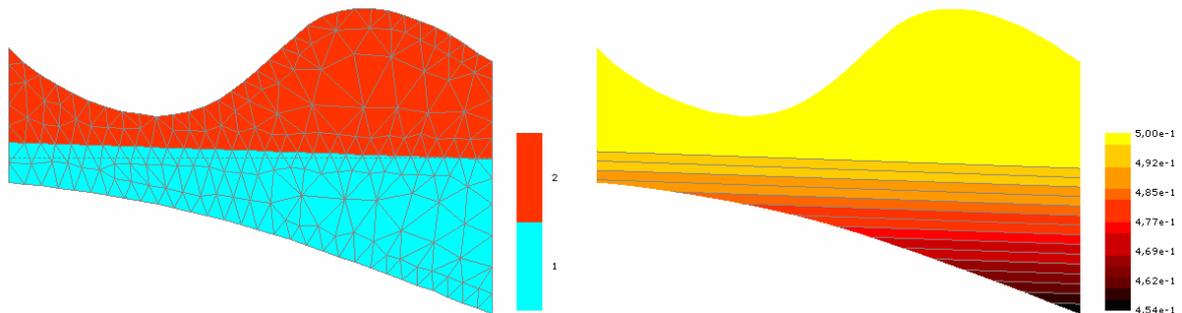


Figura 9 – Camada 2 introduzida no domínio atual (esquerda) e seu campo de porosidade (direita)

Novamente colocando a camada que acabou se ser compactada na batimetria da época, as camadas são compactadas, e o resultado pode ser visto na Figura 10.

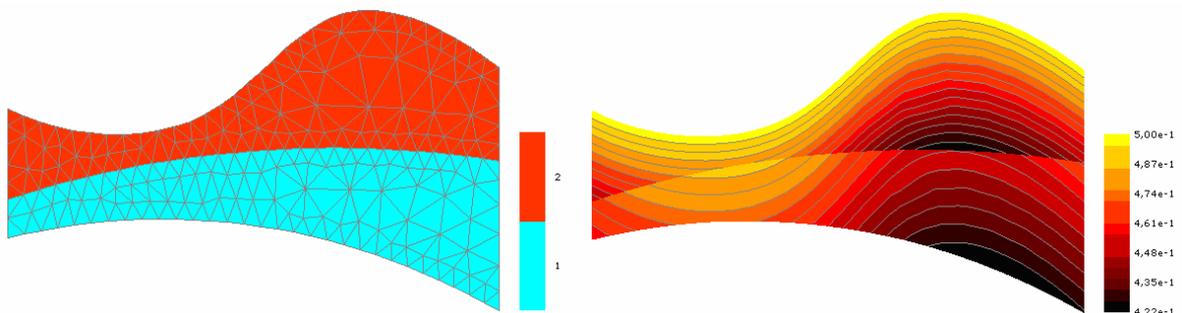


Figura 10 – Camadas compactadas (esquerda) e seus campos de porosidade (direita)

Note que as isolinhas de porosidade não são contínuas na interface das duas camadas. Isso acontece porque estas camadas são formadas por materiais diferentes, e em consequência, com curvas diferentes que definem as porosidades. Uma forma de validar estes resultados é o retorno das dimensões da malha às condições iniciais.

## 6. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo numérico do processo de descompactação e compactação de bacias sedimentares. Este modelo ainda é bastante simplificado porque o campo de pressões é sempre hidrostático, mas pretende-se aprimorá-lo resolvendo o escoamento bifásico água/óleo. Assumiu-se neste trabalho que a compactação ocorre apenas na direção vertical, eliminando o cálculo do campo total de tensões nos sedimentos, sendo que apenas a tensão efetiva média é necessária.

Mostrou-se que o método EbFVM é bastante adequado para simulações de bacias, pois, admite o uso de malhas não-estruturadas, além de tratar as equações na sua forma conservativa.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional do Petróleo (ANP) através do PRH-09 – Programa de Recursos Humanos em Petróleo e Gás pelo apoio financeiro e pelo incentivo à pesquisa nesta área realizada no Laboratório SINMEC. Agradecimentos também às pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## 8. Referências

- Mello, U. T., Rodrigues, J. R. P. and Cavalcanti, P. R., “Novel Algorithms for Modeling Sedimentation and Compaction using 3D Unstructured Meshes”, *Proceedings of the International Association for Mathematical Geology - IAMG 7th International Conference*, Cancún, Mexico, September 2001
- Chen, Z., Ewing, R. E., Lu, H., Lyons, S. L., Maliasov, S., Ray, M. B. and Sun, T., “Integrated two-dimensional modeling of fluid flow and compaction in a sedimentary basin”, *Computational Geosciences* 6: 545-565, 2002.
- Scheichl, R., Massom, J. and Wendebourg, J., “Decoupling and block preconditioning for sedimentary basin simulations”, *Computational Geosciences* 7: 295-318, 2003.
- Antontsev, S. N., Gangneux, G. and Vallet, G., “Mathematical Modelling of Sedimentary Basin Formation”, *Monografías del Seminario Matemático García de Galdeano*. 27: 81-88, 2003.
- Hansom, J. and Lee, M., “Effects of hydrocarbon generation, basal heat flow and sediments compaction on overpressure development: a numerical study”, *Petroleum Geoscience*, Vol. 11, pp. 353-360, 2005.
- Schneider, F., “Basin Modeling in Complex Area: Examples from Eastern Venezuelan and Canadian Foothills”, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 58 (2003), No. 2, pp. 313-324.
- Aziz, K., Settari, A., *Petroleum Reservoir Simulation*. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1979.
- Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*. London, Elsevier, 1972.
- Cordazzo, J.: “Element-based Finite Volume Method Applied to Reservoir Simulation”, Ph.D. Thesis in Portuguese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, to appear, 2004.
- Cordazzo, J.: “An Element Based Conservative Scheme using Unstructured Grids for Reservoir Simulation”, paper presented at the 2004 SPE International Student Paper Contest at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition being held in Houston, Texas, 26-29 September 2004.
- Hurtado, F. S. V.: “An Element-based Finite Volume Formulation for Numerical Simulation of Two-Phase Immiscible Displacement in Porous Media”, Master Thesis in Portuguese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2004.
- Maliska, C.R.: *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Segunda edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2004.