

INVESTIGAÇÃO E EXTENSÃO DA ESTRUTURA DE DADOS DE FORMULAÇÕES DO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS TIPO MPFA PARA LIDAR COM MALHAS NÃO-CONFORMES

Guilherme Praciano Karst Caminha¹; Paulo Roberto Maciel Lyra²

¹Estudante do Curso de Engenharia da Computação - CIn – UFPE; E-mail: gpkc@cin.ufpe.br,

²Docente/pesquisador do Depto de Engenharia Mecânica – CTG – UFPE. E-mail: prmlyra@padmec.org.

Sumário: Este artigo descreve a pesquisa, implementação e os resultados obtidos através de projeto de pesquisa realizada na área de reservatórios de petróleo para programa de iniciação científica com vigência no ano de 2014 a 2015. Nesta pesquisa, duas etapas foram efetuadas. A primeira tratou da extensão de um software de adaptação de malhas tipo h (Silva et al, 2008) para casos tridimensionais, além da comparação deste software com outro software de adaptação de malhas via remeshing em duas dimensões. Este software foi desenvolvido em C++ (Stroustrup, 2013) com base na biblioteca MADLib – Mesh Adaptation Library (Compère et al, 2008). Na segunda etapa, foi efetuada uma refatoração e extensão da estrutura de dados utilizada em softwares de simulação do grupo PADMEC, de forma que esta estrutura de dados seja mais flexível e robusta, e possa portanto lidar com malhas não-conformes.

Palavras-chave: adaptação de malhas; estruturas de dados; programação orientada a objetos; reservatórios de petróleo;

INTRODUÇÃO

Um grande fator que define a performance de softwares de simulação de reservatórios é a quantidade de elementos presentes na malha que discretiza o domínio físico do problema. Uma grande quantidade de elementos indica uma maior acurácia na solução. Porém, esta grande quantidade de elementos significa uma maior quantidade de graus de liberdade nos sistemas de equações, sendo necessário então maior tempo computacional para resolver os sistemas. Em contrapartida, um problema com uma malha com menos elementos pode ser resolvido mais rapidamente, mas a solução estará comprometida.

Com a adoção de malhas não-estruturadas, torna-se possível definir localmente de forma automática (i.e. adaptação de malhas) regiões onde se deseja uma maior concentração de elementos na malha para representar adequadamente a geometria do problema e/ou garantir acurácia da solução. Nas simulações de problemas transientes com, por exemplo, frentes se deslocando, como é o caso deste trabalho, é necessário também adotar adaptação transiente de malhas. Para isto, é necessário abrir mão da uniformidade da malha, e fazer uso então de malhas não-estruturadas. Esta condição garante simultaneamente acurácia da solução e baixo custo computacional.

Neste trabalho abordamos também uma nova estrutura de dados para lidar com malhas não-conformes, onde existem nós “irregulares”, ou *hang-nodes*. Este tipo de malha permite que fraturas sejam modeladas com grande precisão, além de dar uma grande liberdade ao sistema de adaptação de malhas, removendo a necessidade de tratar as conectividades dos novos elementos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de adaptação é executado acoplado a um simulador de escoamentos bifásicos água-óleo desenvolvido por Rogério S. da Silva e coautores (Silva et al, 2011). O sistema de adaptação de malhas utiliza a biblioteca de código aberto MAdLib, que suporta nativamente adaptações em três dimensões. Desta forma, não é necessário executar grandes esforços na extensão do código referente à utilização da biblioteca.

Para a execução da extensão para três dimensões do adaptador de malhas, foi necessário efetuar modificações no estimador de erros, onde uma aproximação do erro da solução numérica é feita, e no interpolador de dados, utilizado para recuperar dados de uma malha para a nova malha gerada pela adaptação.

Além desta continuação, as técnicas de adaptação via Remeshing local, implementada por Saulo Araújo e coautores (Melo et al, 2014), e tipo-h através da biblioteca MAdLib, discutida neste trabalho, foram comparadas exaustivamente em duas dimensões, e o resultado é mostrado neste artigo.

Para efetuar a extensão da estrutura de dados dos softwares de simulação de escoamento de petróleo do grupo PADMEC, utiliza-se a ferramenta MATLAB. O objetivo desta extensão foi conceber e implementar uma nova estrutura de dados capaz de lidar com malhas conformes e não-conformes.

Utiliza-se o potencial de Programação Orientada a Objetos do MATLAB para efetuar esta tarefa. Uma estrutura de dados genérica de malhas é implementada, abstraindo o acesso aos elementos da malha e garantindo, então, acesso às conectividades entre elementos mesmo no caso de não-conformidades.

RESULTADOS

A comparação entre as técnicas de adaptação MAdLib e Remeshing é mostrada na Figura 1, onde ambos se comportaram como esperado. O caso utilizado é adaptado de um caso referência (Helmig, 2009), e trata-se de um problema com meio heterogêneo isotrópico, com um poço injetor de água no canto inferior esquerdo e um poço produtor de petróleo no canto superior direito. Além destes, uma região quadrada no centro do reservatório possui baixíssima permeabilidade. Os pontos de injeção de água e produção de petróleo estão indicados na figura. Este resultado é mostrado para o PVI (Pore Volume Injected) 0.45.

Neste trabalho, também houve foco na extensão da ferramenta de adaptação para lidar com casos tridimensionais. Para isto, foi necessário estender a análise de erros. Um exemplo de análise de erros tridimensional é mostrado na Figura 2a. Esta figura apresenta um caso clássico nomeado “1/4 de five-spot” (Melo et al, 2014), considerando-se um escoamento monofásico.

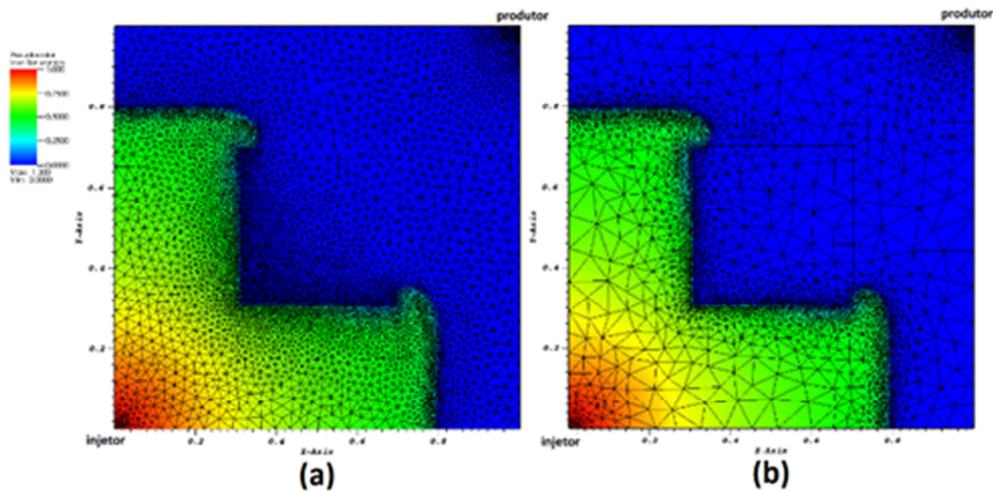


Figura 1 – Comparação da técnica Remeshing (a) e MAdLib (b).

Neste caso existem um poço produtor e um poço injetor em posições opostas em diagonal na malha, como ilustrado na figura. Nestas regiões, espera-se que o erro seja superior em relação ao resto da malha, devido a um grande gradiente de pressão existente nos locais. O erro é indicado na Figura 2a pela variável `Element_Error`, e o grau de refinamento é proporcional ao `Element_Error`, o que levará a um aumento na quantidade de elementos nas regiões indicadas na figura. A figura 2b mostra o resultado da adaptação do caso monofásico tridimensional.

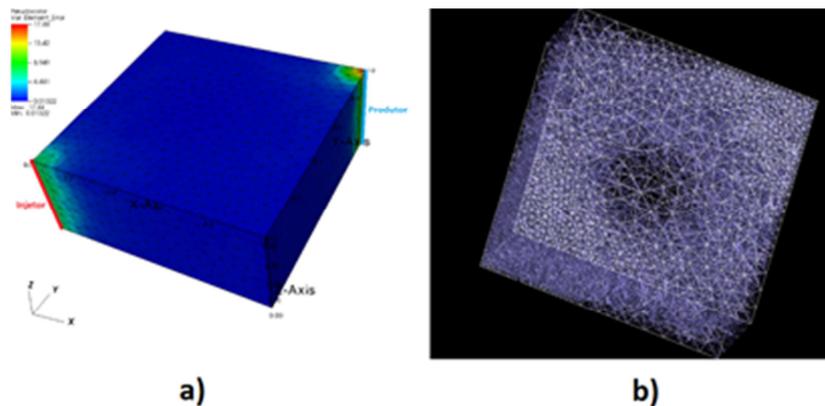


Figura 2 – Resultado da análise de erros (a) e adaptação efetuada (b).

No que concerne a etapa de refatoração da estrutura de dados de malhas do grupo PADMEC, para demonstrar a funcionalidade deste software para lidar com malhas não conformes, utilizou-se uma malha simplificada, mostrada na Figura 3a. A saída do software, mostrando a quantidade total de componentes da malha após a malha ser aberta é mostrada na Figura 3b. A razão de existirem 18 arestas e não 16 é que, observando pela Figura 3a, as arestas formadas pelos nós com numeração 1-2, 2-3, e 3-4 não são as únicas naquela reta. Para fins internos de processamento de adjacências, a aresta 1-4 também existe. O mesmo se repete na outra região com não-conformidades ilustrada na mesma figura. Por isso, contam-se duas arestas a mais.

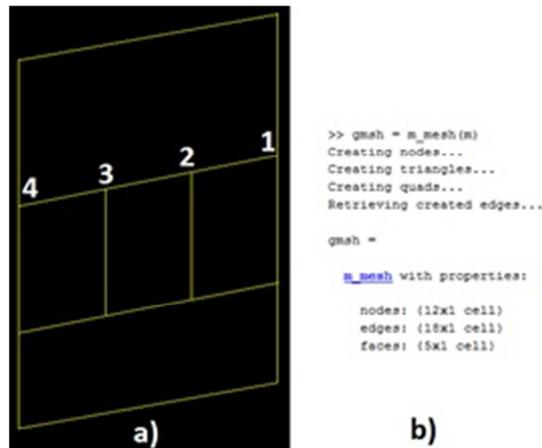


Figura 3 – Exemplo acadêmico de malha não conforme.

DISCUSSÃO

No Remeshing local, uma parte da malha é totalmente recriada com a utilização de algoritmos de geração de malha provenientes da biblioteca GMSH (Geuzaine e Remacle, 2009). No caso do MAdLib, utiliza-se adaptação tipo-h, onde abre-se mão da qualidade da malha em troca de uma maior eficiência. A biblioteca MAdLib cria nós e arestas em elementos já existentes, de forma que não há garantias de que os novos elementos terão boa qualidade. Esta diferença de qualidade é notada na Figura 2, onde na Figura 2a nota-se uma qualidade média de elementos superior na adaptação via Remeshing.

Na etapa de refatoração da estrutura de dados do grupo PADMEC, utilizou-se a funcionalidade de Orientação a Objetos do MATLAB. Adotou-se então uma classe base abstrada de nome *m_element*, cujas propriedades armazenam as conectividades genéricas de qualquer elemento de malha. Para representar faces, arestas e nós, utilizam-se três outras classes, nomeadas *m_face*, *m_edge* e *m_node*, cada uma herdando da classe *m_element*.

CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível obter prática na construção de estruturas de dados abstratas utilizando MATLAB. Com esta estrutura de dados, é possível representar qualquer tipo de malha. Estas representações serão usadas na simulação de reservatórios com domínios que possuam fraturas, que são dificilmente representadas com malhas conformes de forma eficiente. Foi possível também comprovar a eficácia de sistemas de adaptação tipo-h utilizando o MAdLib. Com esta biblioteca, é possível efetuar adaptações de malha em tempo computacional reduzido, ao mesmo tempo em que se mantém a qualidade média dos elementos. Com isto, é possível efetuar simulação de casos complexos com modelos de grande porte.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo auxílio financeiro de Iniciação Científica, que tornou este trabalho possível.

REFERÊNCIAS

Compère G., Remacle J-F., Marchandise E.: Transient mesh adaptivity with large rigid-body displacements. 17th International Meshing Roundtable. (2008)

Helmig, R.: Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface: A Contribution to the Modeling of Hydrosystems. Springer, 1th ed. (1997).

Geuzaine, C., Remacle, J.-F.: Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11), pp. 1309-1331, (2009).

Melo, S. M., Silva, R. S., Caminha, G. P. K., Carvalho, D. K. E., Lyra, P. R. M.: Simulação de Escoamento Óleo-Água Usando Adaptação de Malhas 2-D Via Remeshing. Rio Oil and Gas, Rio de Janeiro – RJ (2014).

Stroustrup, B.: The C++ Programming Language, Addison-Wesley, 4th ed. (2013).

Silva, E. O., Silva, R. S., Carvalho, D. K. E., Lyra, P. R. M.: Adaptação Tipo H Aplicada à Simulação de Reservatórios de Petróleo Usando Programação Orientada a Objetos em C++ (2008).

Silva, R. S.; Carvalho, D. K. E.; Lyra, P. R. M.; Willmersdorf, R. B.; Antunes, A. R. E.: Numerical Simulation of Oil-Water Displacements Using a Higher Order Control Volume Formulation in Parallel Computers with Distributed Memory. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal-RN (2011).