UMA ESTRATÉGIA PARA MODELAGEM GEOMÉTRICA E GERAÇÃO DE MALHAS USADAS EM SIMULAÇÕES 3D DE FLUXO EM MEIOS POROSOS E FRATURADOS

William W. M. Lira ¹*, Isabelle A. Telles ², Eurípedes A. Vargas Jr.², Luiz F. Martha²

1: Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), Centro de Tecnologia Universidade Federal de Alagoas Campus A. C. Simões, BR 104, km 97, Tabuleiro do Martins, CEP: 57072-970, Maceió – AL, Brasil e-mail: william@lccv.ufal.br

2: Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (Tecgraf) e Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, Cep 22453-900, Rio de Janeiro – RJ, Brasil e-mail: {lfm,telles}@ tecgraf.puc-rio.br, vargas@ civ.puc-rio.br

Palavras-chave: Modelagem Geométrica, Geração de Malhas, Meios Porosos e Fraturados

Resumo. Este trabalho apresenta uma estratégia para modelagem geométrica e geração de malhas de elementos finitos usadas em simulações tridimensionais de fluxo em meios porosos e fraturados. Essa estratégia envolve a integração de várias tecnologias que se tornam necessárias devido à alta presença de restrições (por exemplo, falhas geológicas), que geralmente não são triviais de serem tratadas, mas que estão presentes em problemas que envolvem os meios porosos e fraturados. A metodologia proposta consiste na combinação de uma estrutura de dados topológica especial baseada na Radial-Edge e no uso de vários procedimentos avançados para modelagem geométrica e geração de malhas dos meios porosos e fraturados. A estratégia proposta é implementada em um protótipo para modelagem geométrica e geração de malhas de problemas envolvendo meios porosos e fraturados. Modelos geométricos e malhas de elementos finitos associados a simulação de fluxo são apresentados com o objetivo de validar a estratégia proposta.

1. INTRODUÇÃO

O crescente estudo de problemas relacionados a exploração de petróleo, estabilidade de encostas rochosas e minas, e contaminação de aqüíferos subterrâneos tem gerado a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas de engenharia e geologia. Muitas vezes, o estudo adequado desses problemas requer a análise do fluxo de fluidos e transporte de solutos em meios porosos e rochosos, que em sua maioria apresentam-se fraturados. Essas fraturas representam os principais condutos de migração de água e de contaminantes em sistemas subterrâneos, e de óleo, água e gás em reservatórios de petróleo. A análise numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) [1] e a modelagem geométrica [2][3], incluindo procedimentos para geração de malhas, são itens importantes no processo de simulação desses problemas geológicos, principalmente quando a solução analítica é desconhecida ou de difícil obtenção. Dentro deste contexto, o estudo e o desenvolvimento desses itens vêm avançando consideravelmente nos últimos anos.

No MEF, a malha de elementos finitos normalmente é definida sobre a descrição geométrica do domínio do problema que está sendo estudado. Neste sentido, a criação do modelo geométrico torna-se um importante aspecto dentro do contexto de simulações tridimensionais usando o MEF. Existem várias fases envolvidas nessa tarefa, que vão desde as estratégias de interface com o usuário até os esquemas de representação dos dados. Além disso, a geometria e a forma dos objetos reais de engenharia são intrinsecamente complexas, usualmente compostas por vários materiais e regiões. Então, a criação do modelo geométrico requer a utilização de programas especiais, chamados modeladores, que podem reproduzir, em formato digital, as formas geométricas dos objetos da simulação.

No contexto de modelagem aplicada a geologia, um dos modeladores geométricos mais utilizados e conhecidos é o Gocad [4], que é um consórcio internacional de pesquisas, com a participação das principais empresas da indústria petrolífera, que coloca à disposição de seus membros um aplicativo para modelagem geológica tridimensional. O objetivo do Gocad é desenvolver novos métodos de modelagem interativa da geometria e propriedades de objetos geológicos complexos, para aplicações em geologia, geofísica e engenharia de reservatórios. Como modelador geológico, o Gocad se concentra nas seguintes áreas: geologia estrutural (modelagem de falhas, dobramento de horizontes e camadas 3D, etc.), geologia do petróleo (poços e modelagem de canais, por exemplo), geofísica aplicada (interpretação de sísmica 3D para construção ou edição de superfícies, sísmica 3D, etc.), modelagem de reservatórios (métodos geoestatísticos, manipulação de propriedades e computação volumétrica, etc.) e aplicação de minas (avaliação da geometria e propriedades de corpos complexos de minérios).

Apesar das várias facilidades que o Gocad dispõe para as diversas aplicações, o sistema não permite realizar simulações de problemas mecânicos e hidráulicos, como por exemplo, análises de tensões devido as cargas de gravidade das camadas geológicas, análises de tensões provenientes das escavações dos poços de petróleo e análises de fluxo de fluidos (óleo, gás e água) em reservatório de petróleo. Essas análises podem ser realizadas por programas que utilizam métodos numéricos como o MEF, por exemplo.

Entretanto, para geração de uma malha que envolva a consideração de várias peculiaridades de um modelo geológico, são necessárias ferramentas computacionais robustas que venham agilizar a tarefa de modelagem geológica. Neste sentido, Lira *et. al.* [5] apresentaram uma metodologia que envolvia a integração de várias tecnologias para modelagem geológica por elementos finitos. Essa metodologia contém várias etapas do processos de modelagem geométrica e geração de malhas, incluindo tecnologias apresentadas em trabalhos anteriores pelo mesmo grupo de pesquisa [6][7][8] e desenvolvendo uma ferramenta adequada para a modelagem geológica de problemas tridimensionais por elementos finitos. Além disso, tal metodologia é direcionada a um estudo mais abrangente de problemas envolvendo modelagem geológica, não havendo restrições, por exemplo, quanto a forma das representações geométricas dos meios porosos e fraturados, sendo este fator determinante para a elevação do custo computacional das operações numéricas envolvidas no processo de modelagem.

Com o objetivo de reduzir a complexidade inerente aos problemas relacionados a análise de fluxo tridimensional em meios porosos e fraturados, uma simplificação normalmente adotada na simulação desses problemas trata as fraturas como faces planares e o meios porosos como regiões delimitadas por superfícies poligonais.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma estratégia para modelagem geométrica e geração de malhas de elementos finitos usadas em simulações de fluxo em meios porosos e fraturados. A estratégia envolve a integração de várias tecnologias que se tornam necessárias devido à alta presença de restrições (por exemplo, falhas geológicas), que geralmente não são triviais de serem tratadas, mas que estão presentes em problemas que envolvem os meios porosos e fraturados. A metodologia proposta consiste na combinação de uma estrutura de dados topológica especial baseada na Radial-Edge [9] e no uso de vários procedimentos avançados para modelagem geométrica e geração de malhas dos meios porosos e fraturados. Essa metodologia é implementada em um protótipo para modelagem geométrica e geração de malhas de problemas envolvendo meios porosos e fraturados.

A Seção 2 apresenta resumidamente os detalhes relacionados a estrutura de dados topológica especial utilizada na metodologia proposta. A Seção 3 descreve a estratégia adotada. A Seção 4 mostra modelos geométricos e malhas de elementos finitos associados a simulação de fluxo apresentados com o objetivo de validar a estratégia proposta, enquanto que a Seção 5 descreve as considerações finais sobre o trabalho.

2. ESTRUTURA DE DADOS

Para alcançar os objetivos estabelecidos no desenvolvimento da estratégia proposta neste trabalho, é necessário a utilização de uma estrutura de dados especial que possa permitir a representação de forma adequada e eficiente de topologias arbitrárias associadas aos planos de fraturas e superfícies geológicas, representada por triangulações, bem como os meios porosos do problema.

Neste sentido, a estratégia utilizada é fundamentada em uma estrutura de dados baseada em uma subdivisão espacial conhecida como CGC (Complete Geometric Complex) [10] que permite a modelagem complexa de objetos adotando um esquema *non-manifold*. Essa

representação CGC foi apresentada e implementada por Cavalcanti [11][12], referindo-se a uma metodologia geral para criação e manutenção de uma subdivisão espacial em células de forma e geometria arbitrárias. Essa subdivisão espacial pode ser criada a partir da inserção de faces planares uma a uma, permitindo a criação de novas faces em tempo real. O objeto resultante da decomposição é classificada como uma CGC.

A implementação da CGC é baseada na estrutura de dados *Radial-Edge* (RED) proposta por Weiler [9]. Essa estrutura é conhecida como *Radial-Edge* porque armazena explicitamente a lista de faces ordenadas em torna de uma aresta. A RED foi concebida para modelagem *non-manifold* provendo a propriedade de completitude, que garante a obtenção de qualquer relação de adjacência a partir da sua representação. As entidades básicas dessa estrutura de dados são os vértices, arestas, faces e regiões. Além disso, a RED incorpora o conceito de uso de uma entidade topológica. Um uso pode ser visto como a ocorrência de uma entidade topológica em uma relação de adjacência referente a uma entidade de ordem superior. A Figura 1 mostra de forma resumida as principais entidades envolvidas na estrutura de dados *Radial-Edge*.



Figura 1 – Entidades da estrutura de dados Radial-Edge.

3. ESTRATÉGIA ADOTADA

A metodologia proposta consiste na utilização de uma estrutura de dados topológica especial baseada na *Radial-Edge* [9] e é fundamentada no uso de vários procedimentos avançados para modelagem geométrica e geração de malhas dos meios porosos e fraturados. Um modelo constituído de objetos geométricos que formam o meio poroso e fraturado é importado. Esses objetos caracterizam as fraturas (representadas por polígonos planos), as superfícies das camadas geológicas e as falhas (ambas representadas por triangulações arbitrárias) e as regiões (definidas por um conjunto de superfícies que delimitam o meio poroso e fraturado). Caso haja o cruzamento entre objetos, realizam-se interseções entre eles, forçando a compatibilidade topológica do modelo importado. Essas interseções geram um conjunto de sub-superfícies e sub-planos, resultantes das entidades originais, que são tratadas internamente pela estrutura de dados como faces planares. Da mesma forma, novas sub-regiões são obtidas a partir da

subdivisão das regiões originais. Utilizando o princípio de Delaunay para triangulação, são realizadas discretizações em cada face e em cada região, gerando malhas triangulares e tetraédricas, respectivamente. A partir dessas malhas locais, é obtida uma representação única de uma malha de elementos finitos contendo elementos triangulares e tetraédricos. Os atributos geológicos são armazenados internamente à malha, permitindo a completa representação numérica dos modelos associados aos problemas físicos estudados. A Figura 2 ilustra a estratégia adotada.



Figura 2 – Metodologia proposta.

3.1. Importação de meios porosos e fraturados

A metodologia proposta não incorpora o processo de geração dos meios porosos e fraturados. A idéia é que tais informações sejam incorporadas através da importação de dados resultantes de sistemas computacionais especiais responsáveis por tais tarefas. Mais especificamente, é usado como base o sistema apresentado por Telles [13] para geração de sistemas fraturados em meios rochosos. Esses sistemas fraturados podem ser aplicados na modelagem de simulações de fluxo e transporte em meios fraturados. A geração das fraturas pode ser feita de forma determinística (usando parâmetros explícitos) ou estocástica (parâmetros gerados randomicamente segundo distribuições probabilísticas). Os principais parâmetros considerados na geração das fraturas são a orientação, abertura, espaçamento, posição geométrica e dimensões. Essas fraturas podem, ainda, apresentar formas poligonais ou circulares, mas ambas planares. A ferramenta computacional permite ainda a geração de regiões que definem o domínio do modelo, possibilitando a atribuição

de condições de contorno e iniciais, e também regiões representando o meio poroso. A Figura 3 ilustra o sistema proposto por Telles.



Figura 3 - Geração dos sistemas de fraturas para importação pela metodologia proposta.

Neste processo de importação, uma estrutura de dados auxiliar é utilizada exatamente para armazenar dados relacionados aos meios porosos e fraturados. Essa estrutura auxiliar contém, basicamente, informações relacionadas a geometria dos planos de fraturas importados (representados pelas coordenadas dos pontos que definem o seu contorno) e às superfícies geológicas do modelo (representadas por triangulações arbitrárias). Além disso, a estrutura armazena também as informações topológicas relacionadas às superfícies que delimitam as regiões representativas dos meios porosos, juntamente com os atributos da simulação. Do ponto de vista computacional, essa estrutura é extremamente leve, o que justifica a sua utilização como uma ferramenta para armazenar temporariamente os dados iniciais necessários para a modelagem e geração de malhas dos meios porosos e fraturados.

3.2. Geração dos planos de fraturas, superfícies geológicas e regiões

Os esquemas eficientes para representação de dados relacionados a modelagem geométrica devem tratar dois importantes aspectos relacionados à simulação tridimensional de problemas de engenharia usando o MEF: detecção automática de múltiplas regiões fechadas e interseção de superfícies. Dentro do contexto do presente trabalho, esses aspectos são incorporados a estratégia apresentada a partir da utilização da estrutura de dados CGC, descrita anteriormente, para a representação dos dados relacionados a modelagem geométrica dos meios porosos e fraturados.

A construção da representação CGC é baseada na conversão individual dos planos de fraturas importados em faces planares dentro do contexto da CGC, onde o conjunto de planos é representado por uma subdivisão espacial. Essa transformação é unívoca. Ou seja, uma face

planar representa exatamente uma única fratura, como pode ser visto esquematicamente na Figura 4.



Figura 4 - Relação esquemática entre planos de fraturas e faces poligonais na CGC.

Em linhas gerais, essas faces planares são descritas basicamente pela arestas que as delimitam. Por sua vez, tais arestas são representadas pelos vértices adjacentes cujas informações mais importantes são as coordenadas cartesianas do ponto correspondente. A Figura 5 exemplifica esta conversão. Nesse exemplo, o plano de fratura M_1 é convertido na face F_1 da representação CGC. Essa face é limitada pelas arestas E_1 , E_2 e E_3 , que também são criadas durante o processo de conversão. A aresta E_1 é formada pelos vértices V_3 e V_1 , a aresta E_2 pelos vértices V_1 e V_2 e a aresta E_3 pelos vértices V_2 e V_3 . Esses vértices possuem as mesmas coordenadas dos pontos N_1 , N_2 , e N_3 que delimitam o plano da fratura, respectivamente. Todos os vértices também são criados automaticamente a medida que as faces correspondentes são criadas.



Figura 5 - Criação de faces na representação CGC a partir de planos de fraturas.

Deve-se observar que não existe duplicidade de informações na CGC. Coordenadas dos planos de fraturas compartilhados por planos adjacentes não indicam a criação de novos vértices. Nestes casos, buscas internas são realizadas na CGC para identificar os vértices já inseridos anteriormente. A realização dessas buscas é feita utilizando-se estruturas especiais cujo objetivo é diminuir o tempo necessário para execução do procedimento. A mesma idéia também é utilizada para o casos dos lados dos planos de fraturas e das correspondentes arestas.

A decomposição espacial é atualizada a medida que cada uma das faces planares associada aos

planos de fraturas é inserida na representação CGC. Neste procedimento, faces que se interceptam são tratadas apropriadamente, como será mostrado mais adiante.

Internamente, a inserção de uma face S na subdivisão espacial requer uma ordenação dos ciclos externos no sentido horário. Então, para a inclusão de S é necessário determinar quais vértices e arestas da subdivisão espacial serão ligadas ao bordo de S e para cada aresta, qual face deve suceder S no ciclo ordenado de faces ao redor da aresta. Os detalhes referentes a essa inserção podem ser encontrados em [11].

De forma semelhante, cada triângulo formador de uma superfície geológica é transformado em uma face planar na CGC. Isto significa que, no contexto da CGC, uma superfície geológica é um conjunto de faces planares representantes da triangulação original. Analogamente, cada meio poroso é representado na CGC por uma região que é delimitada por um conjunto de faces planares.

As entidades topológicas criadas na CGC guardam referências paras as entidades originais provenientes da importação dos meios porosos e fraturados. Ou seja, uma face planar na CGC armazena a identificação do plano de fratura que a originou. Da mesma forma, as faces planares associadas aos triângulos de uma superfície geológica armazenam identificações dessa superfície. Esses conceitos também são aplicados para as relações entre regiões na CGC e meios porosos.

Simultaneamente ao processo de conversão dos dados iniciais em representações topológicas das entidades correspondentes na CGC, são realizados procedimentos automáticos para identificação das interseções entre as faces planares e o reconhecimento das várias regiões associadas ao modelo. Dentre outras vantagens, esses procedimentos permitem que o modelo geométrico seja representado de forma consistente, facilitando o processo de geração de malhas de elementos finitos locais em cada face e em cada região do modelo. Esses procedimentos permitem também que as partes excedentes das fraturas geradas do lado externo da região representativa do problema sejam removidas do modelo geométrico final, conforme pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 - Remoção de partes excedentes do modelo geométrico.

Os procedimentos de interseção de faces planares e reconhecimento de regiões conforme descrito acima justificam a utilização de uma estrutura de dados especial para o armazenamento dos dados relacionados a modelagem geométrica dos meios porosos e fraturados.

3.3. Interseção de superfícies

Quando duas ou mais superfícies geológicas e/ou planos de fraturas (ambos representados por faces planares na CGC) se cruzam, é necessário realizar a interseção entre elas. A rigor, como essa operação é executada repetidamente para cada par de faces que se interceptam, a eficiência desta avaliação pode ser crítica. No entanto, a representação CGC utilizada incorpora um algoritmo computacional usado para calcular a interseção de faces planas que se interceptam. Como a geometria das entidades envolvidas nas subdivisões são planares e retilíneas, os algoritmos geométricos envolvidos neste processo de interseção são relativamente simples.

A idéia principal é inserir cada face planar de uma subdivisão espacial na outra. Assim, dadas duas faces A e B, o objetivo é determinar quais vértices devem ser criados em A e B e entre que pares de vértices devem ser criadas novas arestas, de forma a compatibilizar as faces.

Supondo, a princípio, que as duas faces não estão contidas em um mesmo plano, então todos os pontos de interseção estão contidos na reta A.suporte \cap B.suporte, denotada por L. O primeiro passo é encontrar um plano P, que contém L, para projetar ambas as faces e montar a matriz de transformação que muda o sistema de coordenadas para um sistema ortogonal de eixos com o eixo x coincidindo com L, o eixo y contido em P e o eixo z perpendicular a P. Neste novo sistema de coordenadas, todas as interseções ocorrem no eixo x.

Aplicando o algoritmo descrito por Cavalcanti [11] para resolver esse problema simplificado, determina-se para cada face dois conjuntos de informações. O primeiro contém todas as coordenadas de cada novo vértice que deve ser criado na face e, havendo necessidade de criar um vértice sobre uma aresta, qual a aresta correspondente. O segundo conjunto de informações especifica os pares de vértices que determinam as arestas a serem criadas. Os vértices são especificados como vértices já existentes ou como índices do conjunto anterior.

Quando as duas faces estão contidas em um mesmo plano, a interseção não mais ocorre sobre uma reta. Neste caso, interessa apenas criar vértices e arestas no interior de cada face, nos pontos de interseção.

Essas informações resultantes da interseção são utilizadas na atualização das faces planares da subdivisão espacial. Ou seja, após o processo de interseção, novos vértices, arestas e faces são incorporados a subdivisão espacial, gerando duas malhas consistentes topologicamente entre si. Detalhes desse algoritmo para interseção de faces planares usando a representação CGC podem ser visto em [11].

3.4. Geração de malhas locais

Após a identificação das novas faces planares, resultantes da interseção e que representam o modelo geométrico juntamente com as regiões, é necessário utilizar procedimentos numéricos para geração das malhas de elementos finitos. Essas malhas são geradas sobre as faces planares, resultando na criação de elementos finitos bidimensionais, e sobre as regiões representativas dos meios porosos, fornecendo elementos finitos volumétricos. Esse processo é realizado individualmente para cada face e região, gerando malhas locais associadas a essas entidades.

Os procedimentos adotados neste trabalho geram elementos finitos triangulares e tetraédricos para os casos de geração sobre faces e regiões, respectivamente. Deve-se observar ainda que para o tipo de modelagem geométrica proposta, é possível a geração de faces planares com arestas soltas no seu interior. Neste caso, o procedimento utilizado para geração de malhas é capaz de considerar restrições internas associadas a cada uma das faces. Da mesma forma, as regiões obtidas podem possuir em seu interior faces soltas representando restrições internas. O procedimento para geração de malhas volumétricas também considera esta situação.

No esquema proposto, procedimentos baseados no critério de Delaunay com restrição para geração de malhas triangulares sobre faces planares e malhas tetraédricas sobre regiões fechadas são utilizados. Além da boa qualidade na forma geométrica dos elementos, esses procedimentos são adequados porque permitem a geração dos elementos em um tempo de processamento relativamente bom. A Figura 7 mostra as malhas locais de elementos finitos triangulares associadas às faces planares de um modelo. A Figura 8 mostra uma malha local de elementos finitos tetraédricos associada a uma região representativa do meio poroso.



Figura 7 – Malhas locais de elementos finitos triangulares.



Figura 8 – Malha local de elementos finitos tetraédricos.

3.5. Malha final de elementos finitos

Após a geração das malhas locais de elementos finitos associadas às faces planares e às regiões do modelo, é necessário fazer uma compatibilização dessas malhas para a determinação de uma representação única de elementos finitos necessária para a realização de análises numéricas. O processo para alcançar essa malha final de elementos finitos utiliza a mesma estrutura de dados CGC usada para manutenção das entidades geométricas do modelo.

A idéia é fazer com que as faces e regiões utilizadas para geração das malhas locais sejam decompostas exatamente nos elementos finitos obtidos sobre elas. Em um primeiro instante, todas as faces planares deixam de existir, sendo subdivididas em tantas faces quanto forem os elementos triangulares gerados sobre elas. Cada nova face criada possui as mesmas informações que estavam contidas na face original (Figura 9).



Figura 9 – Atualização da representação CGC após a geração das malhas locais de elementos finitos: a) antes da geração local de malhas; b) após a geração local de malhas.

Na seqüência, as regiões fechadas do modelo tam deixam de existir, sendo substituídas pelos respectivos elementos tetraédricos gerados sobre elas. Cada nova região possui as mesmas informações que estavam contidas na região original.

Assim, após o processo de triangulação das faces e regiões, a estrutura de dados CGC é atualizada e suas entidades topológicas (vértices, arestas, faces e regiões) estabelecem uma representação única de uma malha de elementos finitos.

4. EXEMPLOS

Para validar as idéias apresentadas e verificar a robustez e eficiência da metodologia proposta para a modelagem geométrica e geração de malhas para simulações de fluxo em meios porosos e fraturados, a estratégia foi implementada em um protótipo de modelador geométrico. Esta seção apresenta dois exemplos de modelagem, focando no procedimento proposto.

O primeiro exemplo corresponde a um modelo representativo de uma região fraturada, onde meios porosos não são considerados. A Figura 10-a mostra os planos de fraturas resultantes da utilização de um gerador de fraturas e importadas usando a técnica descrita neste trabalho. O processo de interseção das faces planares é realizado para garantir a consistência topológica do modelo, conforme pode ser visto na Figura 10-b. Essa interseção também é realizada com as faces que definem a região considerada, permitindo que as partes excedentes das fraturas localizadas na parte externa da região sejam removidas, conforme indicado na Figura 11-a. A Figura 11-b mostra a malha de elementos finitos triangulares associada a cada um dos planos de fraturas. A composição dessas malhas localizadas em cada fratura gera uma representação única de triângulos que definem a malha de elementos finitos final.



Figura 10 – a) planos de fraturas importados; b) interseção de faces planares.



Figura 11 – a) remoção das partes excedentes; b) malha final de elementos finitos.

O segundo exemplo corresponde a um modelo representativo de meios porosos e rochosos fraturados, onde falhas geológicas estão imersas na região rochosa estudada. A Figura 12-a mostra os planos de fraturas, as superfícies geológicas e os meios porosos importados pelo protótipo apresentado. Após a realização da interseção entre faces planares (Figura 12-b), as partes excedentes são removidas, conforme mostrado na Figura 13-a. Também são removidas as regiões que não estão associadas aos meios porosos (Figura 13-b). A Figura 14 mostra a malha final de elementos finitos triangulares associada aos planos de fraturas e ao meio poroso.



Figura 12 – a) planos de fraturas, superfícies geológicas e meios porosos importados; b) interseção de faces planares.



Figura 13 – a) remoção das partes excedentes; b) remoção das regiões não porosas.



Figura 14 - Exemplo 2: malha de elementos finitos associada aos planos de fraturas e ao meio poroso.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe uma estratégia para modelagem geométrica e geração de malhas de elementos finitos usadas em simulações tridimensionais de fluxo em meios porosos e fraturados. Essa estratégia envolve a integração de várias tecnologias que se tornam necessárias devido à presença de falhas geológicas, consideradas internamente como restrições, que geralmente não são triviais de serem tratadas, mas que estão presentes em problemas que envolvem os meios porosos e fraturados.

A metodologia proposta consiste na utilização de uma estrutura de dados topológica especial

fundamentada na *Radial-Edge* e é baseada no uso de vários procedimentos avançados para modelagem geométrica e geração de malhas de meios porosos e fraturados. Um modelo constituído de objetos geométricos que formam o meio poroso e fraturado é importado. Esses objetos caracterizam as fraturas (representadas por polígonos planos), as superfícies das camadas geológicas e as falhas (ambas representadas por triangulações arbitrárias) e as regiões (definidas por um conjunto de superfícies que delimitam o meio poroso e/ou fraturado). Caso haja o cruzamento entre objetos, realizam-se interseções entre eles, forçando a compatibilidade topológica do modelo importado.

Essas interseções geram um conjunto de sub-superfícies e sub-planos, resultantes das entidades originais, que são tratadas internamente pela estrutura de dados como faces planares. Da mesma forma, novas sub-regiões são obtidas a partir da subdivisão das regiões originais.

Utilizando o princípio de Delaunay para triangulação, são realizadas discretizações em cada face e em cada região, gerando malhas triangulares e tetraédricas, respectivamente. A partir dessas malhas locais, é obtida uma representação única de uma malha de elementos finitos contendo elementos triangulares e tetraédricos. Apesar da boa qualidade na forma geométrica dos elementos gerados pelos procedimentos baseados no critério de Delaunay para geração de malhas triangulares e tetraédricas, o processo de interseção entre faces planares pode gerar pontos muitos próximos entre si, em contradição a outros pontos que podem estar bem distantes. Inevitavelmente, tal fator deve focar a geração de elementos finitos indesejáveis para análises numéricas. Neste sentido, novas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de minimizar tais problemas, por exemplo, utilizando alguma técnica de suavização entre os pontos nodais obtidos.

A estratégia proposta é implementada em um protótipo para modelagem geométrica e geração de malhas de problemas envolvendo meios porosos e fraturados. Exemplos numéricos são apresentados com o objetivo de validar a estratégia proposta. Os resultados obtidos são satisfatórios, visto que os objetivos propostos foram alcançados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao convênio Tecgraf-PUC-Rio e Cenpes/PETROBRAS, detentores do projeto no qual este trabalho está inserido.

REFERÊNCIAS

- [1] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., & Zhu, J.Z., 2005. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Elsevier.
- [2] Mäntylä, M., 1988. An Introduction to Solid Modeling, Computer Science Press.
- [3] Hoffmann, C.M., 1989. *Geometric and Solid Modeling: An Introduction*, Morgan Kaufmann.
- [4] Gocad, 2006. *Gocad*, www.gocad.org.

- [5] W.W.M. Lira, A.C.O. Miranda, I.A. Telles & L.F. Martha, 2006. Uma Metodologia para Modelagem Geológica Tridimensional por Elementos Finitos, *Proceedings of XXVII Cilamce - Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering*, In CD-ROM.
- [6] W.W.M. Lira, P.R. Cavalcanti, L.C.G. Coelho & L.F. Martha, 2002. Modeling Methodology for Finite Element Mesh Generation of Multi-Region Models with Parametric Surfaces, *Computers & Graphics*, vol. 26, n. 6, pp. 907-918.
- [7] A.C.O. Miranda & L.F. Martha, 2002. Mesh Generation on High-Curvature Surfaces based on a Background Quadtree Structure, *Proceedings of 11th International Meshing Roundtable*, pp. 333-341.
- [8] W.W.M. Lira, L.C.G. Coelho & L.F. Martha, 2002. Multiple Intersections of Finite-Element Surface Meshes, *Proceedings of 11th International Meshing Roundtable*, pp 355-363.
- [9] K. Weiler, 1986. Topological Structures for Geometric Modeling, *Geometric Modeling* for Product Engineering, PhD Thesis, Rensselear Polytechnic Institute.
- [10] J.R. Rossignac & M.A. O'Connor, 1990. A Dimensional-independent Model for Point sets with Internal Structures and Incomplete Boundaries, *Geometric Modeling for Product Engineering*, pp 145-180.
- [11] P.R. Cavalcanti, 1992. *Criação e Manutenção de Subdivisões do Espaço*, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-RJ.
- [12] P.R. Cavalcanti, P.C.P. Carvalho & L.F. Martha, 1997. Non-manifold Modeling: An Approach Based on Spatial Subdivision, *Computer-Aided Design*, vol. 29, n. 3, pp 209-220.
- [13] I.A. Telles, 2006. Um sistema Integrado para Modelagem de Fluxo e Transporte em Meios Porosos e Fraturados, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ.