

## 4 Procedimento para a modelagem

O sistema desenvolvido para o modelamento de fluxo em meios porosos fraturados consiste de várias etapas de trabalho. Como primeira etapa é necessário determinar as características intrínsecas do próprio meio, isto é, definir e modelar espacialmente as fraturas dentro de um volume estabelecido como domínio físico do problema. Os passos seguintes compreendem em determinar as propriedades hidráulicas do meio poroso e das fraturas, identificar as condições iniciais e de contorno do problema, discretizar o domínio com uma metodologia de métodos numéricos, que para este trabalho será a metodologia de elementos finitos, e resolver as equações governantes de fluxo determinadas para cada problema em particular dentro do domínio. Como último passo, calcular as soluções e visualizar os resultados graficamente.

Telles (2006) sugere uma sequência de etapas para proceder com a modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados, as etapas são apresentadas na Figura 4.1

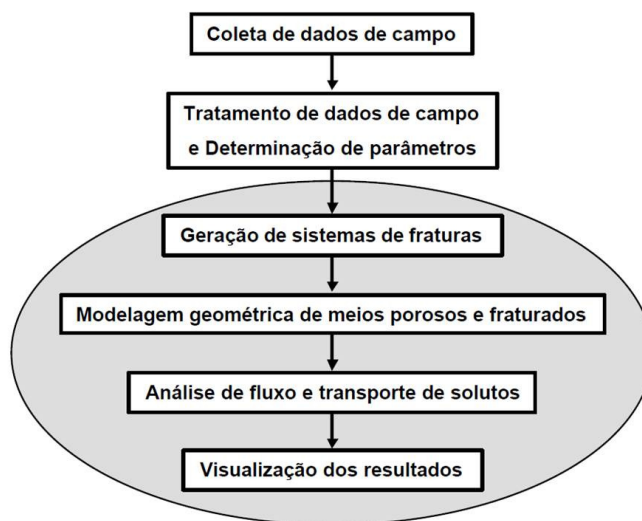


Figura 4.1: Etapas para modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados, Telles (2006).

Neste capítulo descreve-se brevemente as etapas que estão sendo seguidas, a partir da metodologia recomendada por Telles (2006), a serem aplicadas nesta modelagem. Estas etapas compreendem a geração de fraturas, posteriormente, a discretização do domínio e do tempo, a solução numérica e a visualização dos resultados.

#### **4.1. Geração do domínio e das fraturas**

Em capítulos anteriores propôs-se como modelo conceitual de fluxo a usar, um modelo de fraturas discretas inseridas em um meio poroso, nesse sentido a determinação das particularidades geométricas é essencial. Nesta etapa a geração da geometria do domínio do problema vem sucedida da identificação da área em estudo, logo é feita uma coleta de informação das características das fraturas consideradas para a escala definida, onde o volume de problema a considerar seja o suficiente para modelar com uma boa aproximação o comportamento hidráulico do maciço rochoso, deixando de lado pequenas fissuras que não sejam significativas para o problema. Além disso, é necessário que este volume não seja muito pequeno, onde famílias de fraturas sejam consideradas e o gasto computacional seja alto.

Uma vez determinada a geometria do espaço de interesse e suas dimensões, identificam-se as famílias de fraturas que influem no comportamento hidráulico. A geração de fraturas seguirá dois tratamentos, um determinístico que implica ter as características das fraturas que são determinadas in-situ, e outro aleatório para fraturas que não são fáceis de serem determinadas in-situ, esta geração de fraturas seguirem distribuições probabilísticas.

##### **4.1.1. Geração de fraturas - FracGen 3D**

Nesta fase de trabalho a geração das fraturas será feita com o programa FracGen 3D (Three-dimensional Fracture Generator), desenvolvido por Telles (2006) na linguagem C++. Este programa tem um entorno gráfico-iterativo com diferentes características e funcionalidades, das quais podem-se destacar:

- Geração de regiões
- Geração de poços
- Importação de geometria de poços
- Importação de dados de campo relacionado a poços
- Importação de superfícies
- Aplicação de condições de contorno de fluxo e transporte de soluto
- Aplicação de condições iniciais de fluxo e transporte de soluto
- Definição das propriedades do fluido
- Definição dos dados para análise numérica.

O FracGen permite gerar fraturas tridimensionais nos modos determinísticos e probabilísticos. A geração determinística da fratura (single fracture – SF) é condicionada pela entrada de dados iniciais relacionadas à fratura como:

- Coordenadas do centro da fratura
- Direção de mergulho
- Mergulho
- Abertura
- Tamanho
- Número de lados.

Na Figura 4.2 pode se verificar 2 regiões simples em forma de paralelepípedo, nelas foram geradas 4 fraturas determinísticas, 3 delas de similares características.

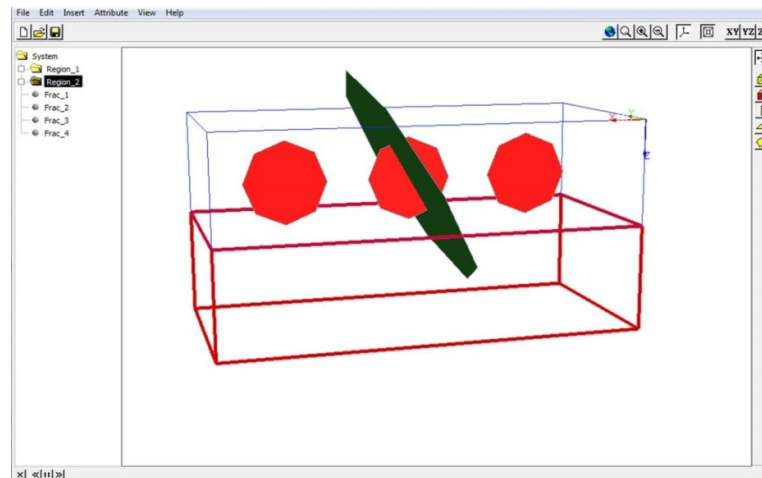


Figura 4.2: Fraturas geradas no FracGen 3D de forma determinística.

Na geração de fraturas estatísticas (*multi-fracture* – MF) duas metodologias foram implementadas no programa FracGen3D, denominadas de “Metodologia 1” e “Metodologia 2”. Na metodologia 1, as fraturas são geradas ao longo de uma direção cujo ponto inicial é gerado aleatoriamente dentro dos limites da região, enquanto que na metodologia 2, o número de fraturas geradas na região é definido pela frequência e a localização dos centros, geradas aleatoriamente dentro dos limites da região. Na Figura 4.3 pode ser visto uma região cúbica e nela foi gerada 8 famílias de fraturas, 5 delas com a metodologia 1 e 3 delas com a metodologia 2. No total tem-se 78 fraturas.

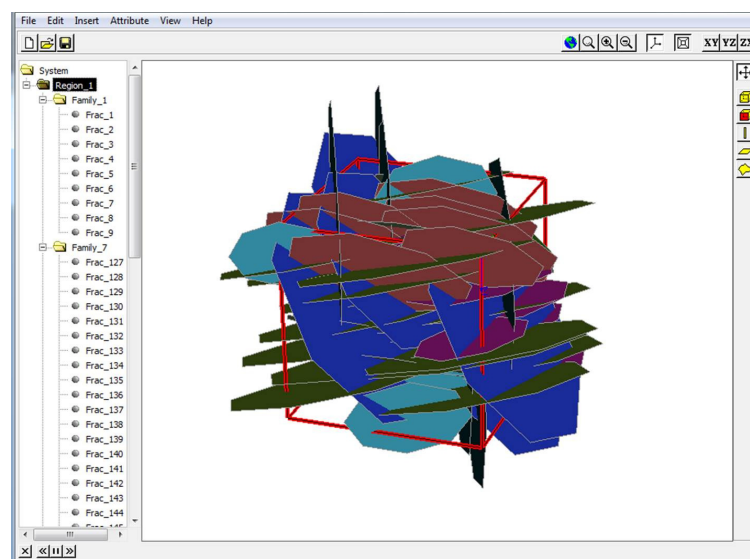


Figura 4.3: Famílias de fratura geradas no FracGen 3D de forma estatística.

Telles (2006) avaliou a capacidade do FracGen 3D em gerar fraturas, gerando 60 famílias de fraturas em uma região com dimensões 500 x 500 x 500 m. No total foram geradas 2738 fraturas (Figura 4.4), concluindo-se que o gerador não apresenta limitações em relação ao número de fraturas obtidas. Uma descrição mais detalhada das vantagens deste programa pode ser encontrada em Telles (2006).

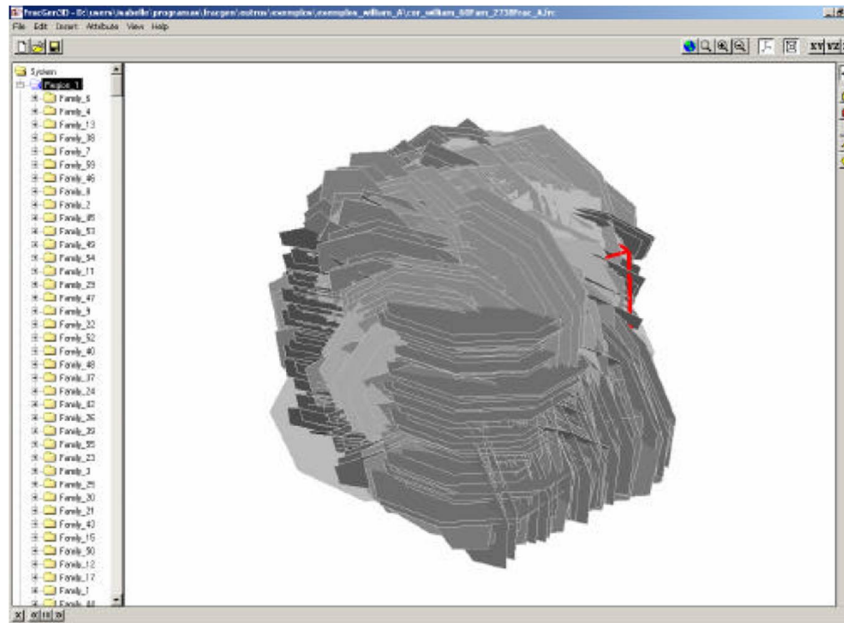


Figura 4.4: Distribuição espacial com 2738 fraturas geradas aleatoriamente, Telles (2006).

#### 4.1.2. Procedimento

A geometria do domínio do problema é gerada no FracGen, nesta geração cria-se superfícies e contornos. O FracGen permite a importação de superfícies criadas no programa Gocad, programa editor de superfícies, de extensões (\*.ts). O próximo passo é a geração das famílias de fraturas, de modo determinístico ou probabilístico, segundo a particularidade do problema. Posterior à geração de fraturas dentro do volume fechado do domínio, o FracGen cria um arquivo com extensões (\*.frc) onde se armazena as informações das fraturas, informações de nome da família que pertence, numeração da fratura, coordenadas dos vértices das fraturas, etc. Do nosso interesse são as coordenadas dos vértices das fraturas. Esta

informação de coordenadas serão usadas para esquematizar as fraturas no programa ICEM CFD v.14, programa que será usado para discretizar o domínio mediante malhas de elementos finitos. Esta etapa conclui com a correta geração do arquivo de extensão (\*.frc). Na Figura 4.5 pode ser visto o entorno FracGen com a geração de famílias de fraturas de modo probabilístico.

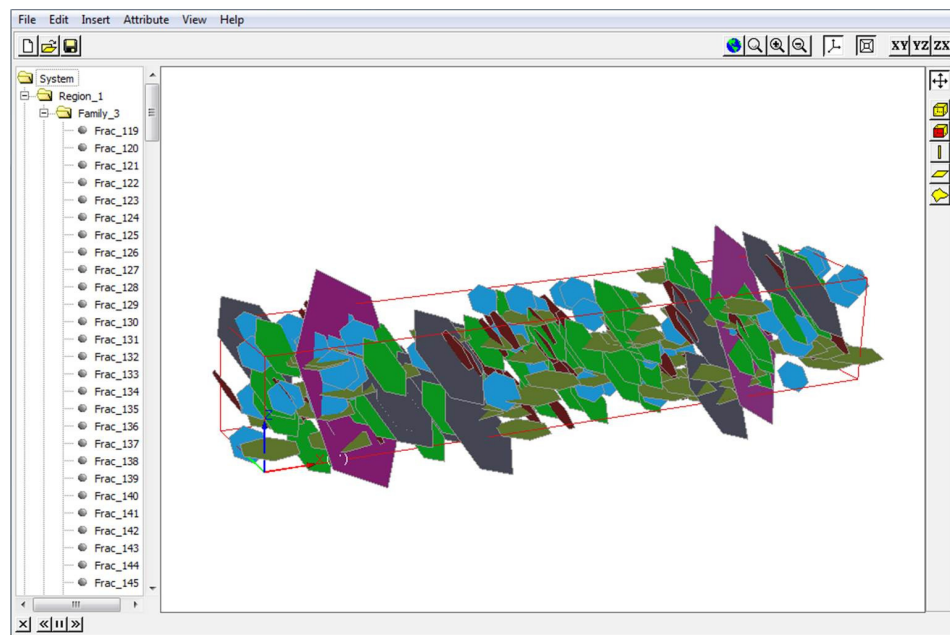


Figura 4.5: Fraturas geradas com FracGen 3D.

## 4.2. Discretização do domínio

No método dos elementos finitos o domínio é dividido em pequenos subdomínios que se denominam elementos finitos, na qual as equações diferenciais propostas são supostas válidas em cada elemento, as variáveis de estado (ex. carga total) são resolvidas em um conjunto de pontos denominado pontos nodais, que são os pontos vértices dos elementos finitos, e as variáveis de estado dentro do elemento são calculadas usando funções de interpolação.

A geração destes elementos finitos (malha de elementos finitos) é umas das etapas mais importantes da modelagem. Uma boa discretização do domínio garante uma melhor aproximação do fenômeno físico de fluxo, esta malha representa o domínio contínuo de nosso problema de uma maneira discreta, esta

discretização permite que as equações governantes possam ser resolvidas numericamente.

Existem dois tipos de malhas, a estruturada e a não estruturada. A malha estruturada refere uma malha na qual os elementos tem igual número de elementos vizinhos. Esta é implementada geralmente pelo método das diferenças finitas e apresenta-se muito conveniente para geometrias de domínio simples, além de requerer um gasto computacional aceitável. Na malha não estruturada não necessariamente cada elemento apresenta igual número de elementos vizinhos, geralmente está é implementada pelo método de elementos finitos. Esta última apresenta vantagens como flexibilidade para contornos irregulares de geometrias complexas, mas sua solução requer um gasto computacional maior em comparação com o da malha estruturada.

O método dos elementos finitos é empregado neste trabalho para discretizar o domínio do espaço com elementos não estruturados, que para o caso de geometrias planas (fraturas e contorno), serão discretizadas com elementos triangulares, e para o espaço tridimensional (meio poroso e meio intensamente fraturado), serão discretizados com elementos tetraédricos. Esta discretização gera uma malha compatível, na qual os nós dos elementos planos (fraturas) são coincidentes com os nós dos elementos de volume (ex. meio poroso), ver Figura 4.6. Desta forma os nós apesar de que pertençam a elementos diferentes, compartilham as mesmas coordenadas e numeração, garantindo uma continuidade da carga hidráulica na interface entre os dois meios, Telles (2006).

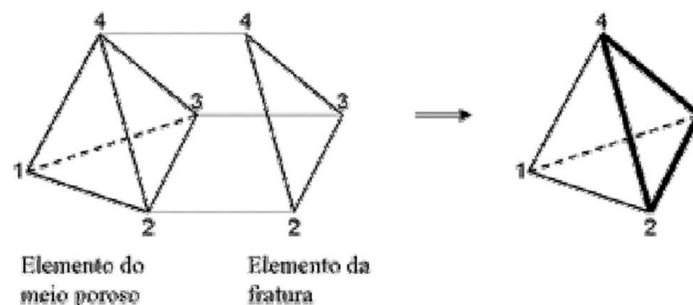


Figura 4.6: Compatibilidade dos nós dos elementos representativos do meio poroso e dos elementos representativos das fraturas, Telles (2006).

#### 4.2.1. Geração da malha–ICEM CFD v. 14

Para a geração da malha é usado o programa ICEM CFD v.14, com este é gerado uma malha não estruturada que se compõe de elementos volumétricos tetraédricos e de superfícies triangulares (tetra/mixed). O ICEM tem como vantagem ter uma geração de malha automática, muito adequada para geometrias complexas. No entanto, requer-se de um processo de edição intenso para eliminar os erros que se produzem e assim garantir uma melhor aproximação à geometria do problema.

O ICEM permite importar geometrias em diversas extensões além de permitir a importação de arquivos de dados de pontos que conformam alguma geometria. Complementarmente apresenta uma geração eficiente da malha, um diagnóstico e edição com ferramentas interativas, um entorno gráfico (ver Figura 4.7) que facilita a manipulação do programa e uma grande variedade de saídas para diversos solvers e formatos neutros. Para maiores detalhes revisar ANSYS ICEM CFD v. 12.0 (2009).

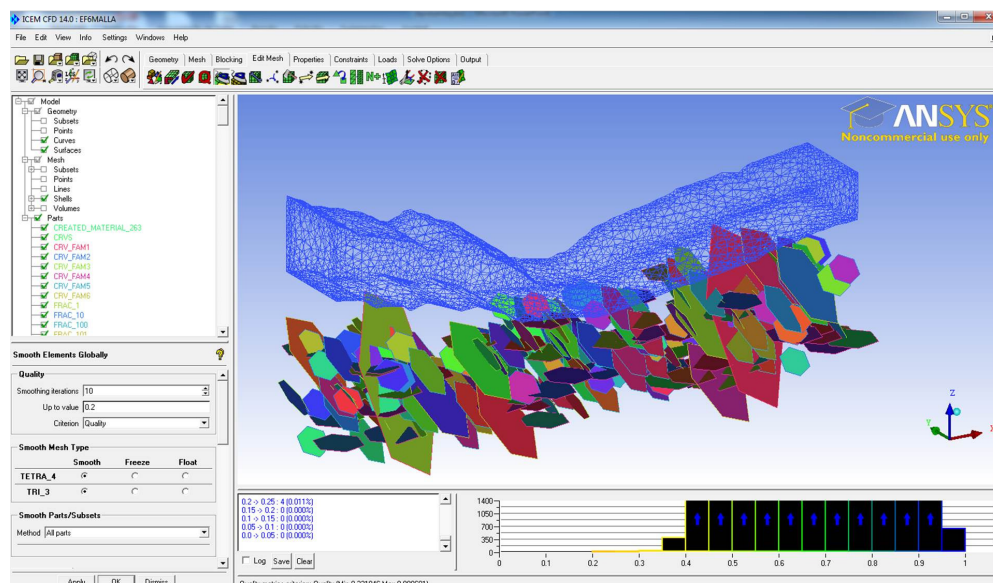


Figura 4.7: Entorno gráfico ICEM CFD v.14



#### 4.2.2. Procedimento

Nesta etapa descreve-se brevemente alguns passos e sugestões para gerar as geometrias do problema e sua posterior malha na interface do programa ICEM. Esta etapa é requerida para gerar arquivos de saída com dados da malha que serão usadas na seguinte fase.

O programa FracGen 3D gera um arquivo de saída de extensão (\*.frc) com as características geométricas das fraturas. Para unir os dois programas, FracGen e ICEM, faz-se necessário implementar um código de programação para a criação de um script (\*.rpl) que permite a geração automática de fraturas no ICEM a partir do arquivo (\*.frc) do FracGen. Esta rotina em linguagem C++ foi feita como parte desta dissertação, com o intuito de gerar as geometrias das fraturas no ICEM. (Figura 4.8).

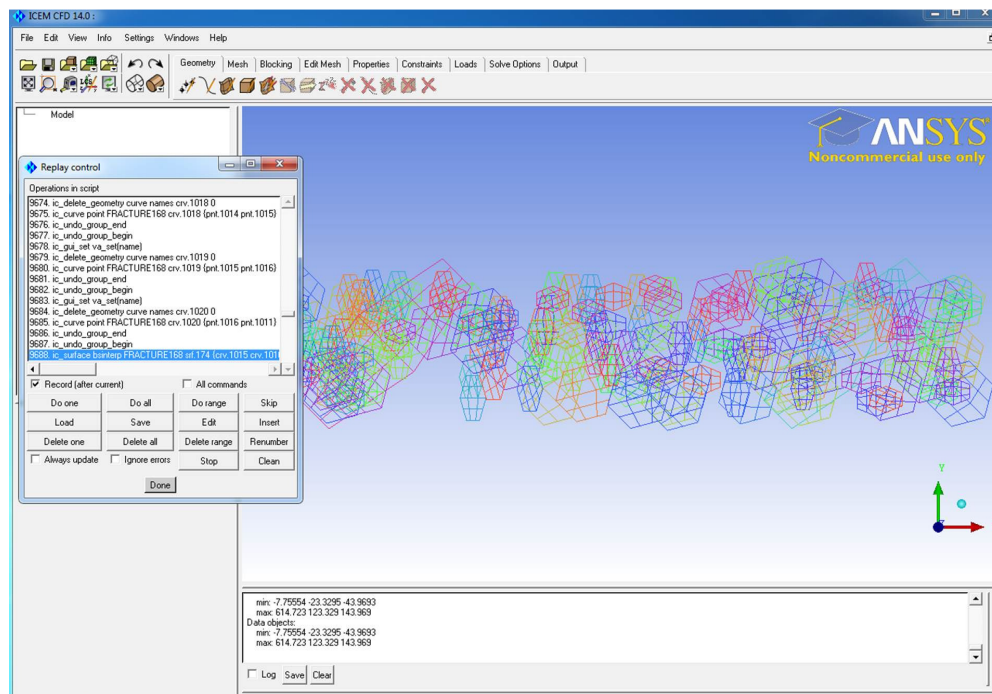


Figura 4.8: Geração das fraturas a partir do script.

Após de terem sido geradas as fraturas no ICEM, se terá de fazer uma edição na geometria das fraturas segundo a particularidade do problema. Aqui no programa existem ferramentas disponíveis para a mencionada edição. Nas figuras

4.9 e 4.10, podemos ver a geometria inicial e a geometria depois da edição, respectivamente.

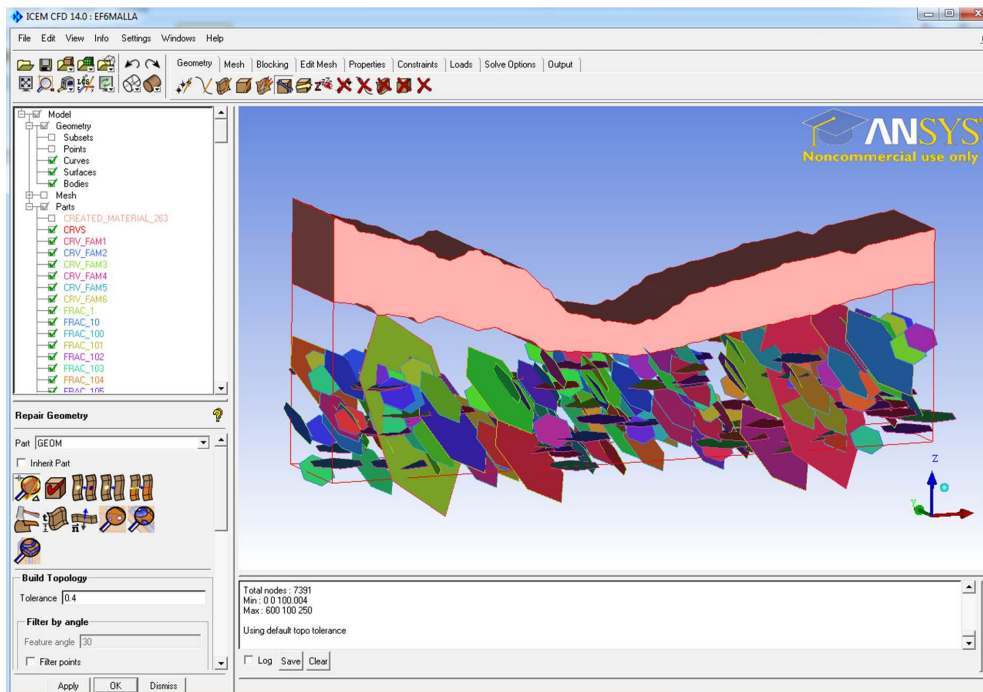


Figura 4.9: Geometria inicial das fraturas.

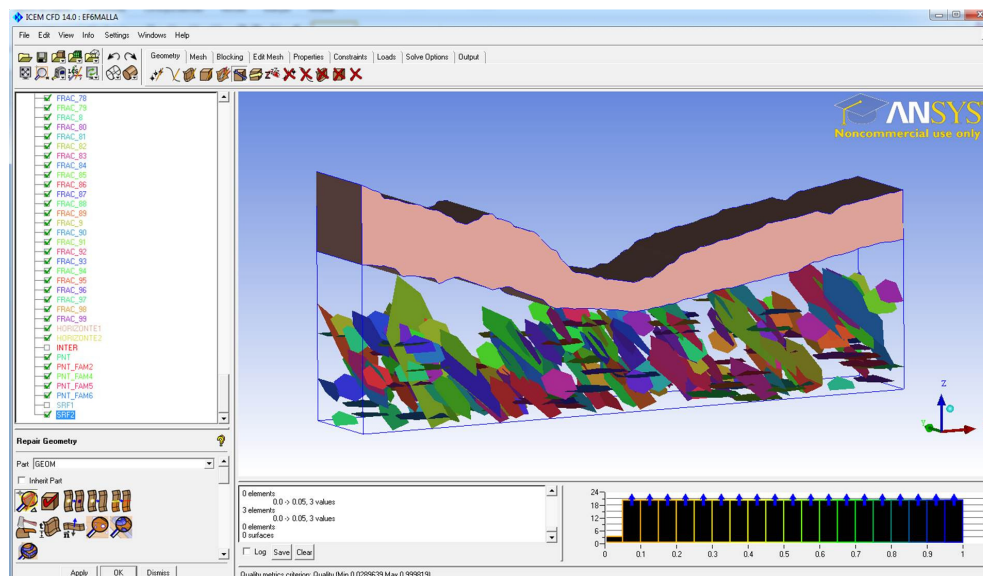


Figura 4.10: Geometria após edição das fraturas.

Nesta etapa continua-se com a geração da malha de elementos finitos. No ICEM tem-se um critério de desenho com respeito às entidades, respeita-se as

hierarquias, isto é, primeiro se define os pontos, depois as curvas, áreas e volumes. O programa só gera malha em geometrias definidas e volumes fechados, nesse sentido devera-se definir as geometrias antes de começar este processo sob a prévia escolha do tamanho dos elementos. O tamanho dos elementos não é fácil de especificar e só se poderia avaliar posteriormente na etapa de validação de resultados. Neste trabalho não se avaliarão os tamanhos dos elementos.

A partir da malha criada deve-se eliminar os erros provocados pela geração automática dos elementos. Para esta fase existem ferramentas no ICEM que permitem a edição dos elementos. Uma vez feita as correções se verificará a qualidade da malha. O programa tem um verificador de qualidade e um suavizador de elementos.

A qualidade da malha tem um impacto considerável na análise computacional da solução e no tempo que se requer para resolver. Existem vários critérios para avaliar a qualidade da malha de elementos triangulares e tetraédricos, como a de razão de aspecto e avaliação dos ângulos mínimos e máximos, entre outros. A avaliação da razão de aspecto vem de dividir duas razões, o raio inscrito do elemento pelo raio circunscrito do elemento, este quociente é um indicador da qualidade do elemento. O ICEM normaliza este quociente assim:  $\frac{(R_{inscrito}/R_{circunscrito})_{atual}}{(R_{inscrito}/R_{circunscrito})_{ideal}}$ , na qual o quociente ideal corresponde a um triangulo equilátero. Para elementos tetraédricos se tem as mesmas considerações de raio inscrito e circunscrito. Assim os valores do indicador de qualidade normalizado ficaram entre 0 – 1. Idealmente os valores da razão deveriam de estar acima de 0.2, mas em geometrias complexas é aceitável uma razão acima de 0.15. Com relação à qualidade dos ângulos interiores dos elementos, estes deveriam ficar entre valores de 15° e 165° graus sexagesimais para assumir que os elementos da malha sejam de boa qualidade. Mas em casos de geometrias complexas se poderia considerar a faixa entre 10° e 170° graus sexagesimais. Na Figura 4.11 podemos ver uma verificação da qualidade feita com o ICEM.

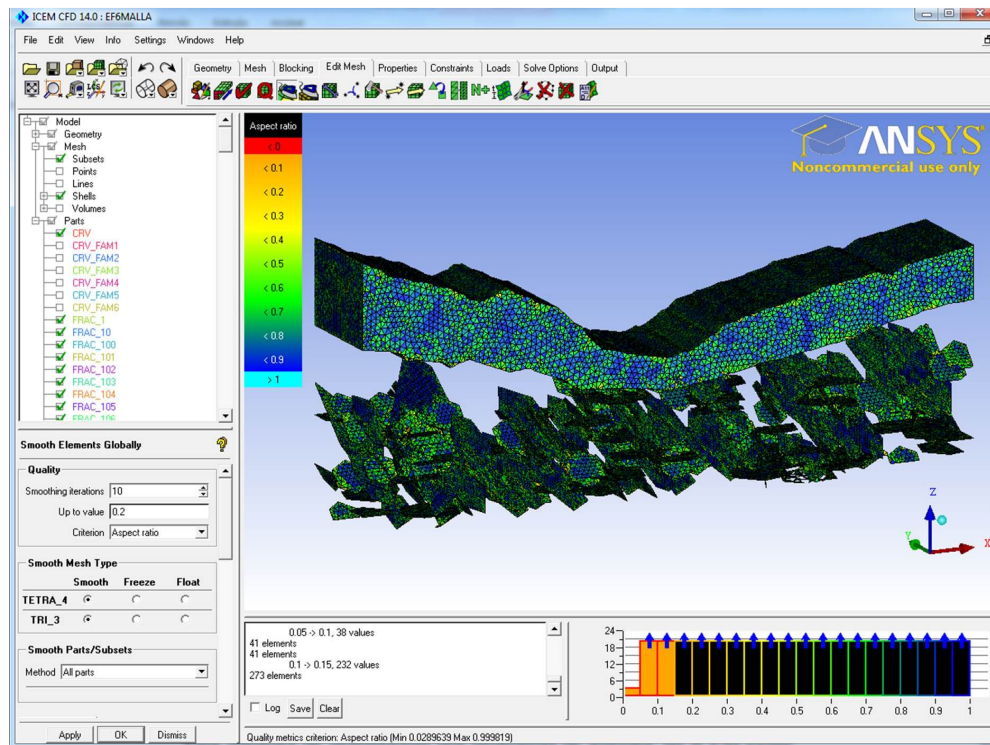


Figura 4.11: Verificação da qualidade da malha gerada no ICEM

Em termos de desempenho nos programas de análise, o ICEM dispõe uma opção para otimizar a numeração dos nós uma vez feita a malha e terminada sua edição. Esta renumeração é importante para ter uma largura de banda de acordo com um bom desempenho do modelo numérico, conseguindo, desta maneira, otimizar o tempo de cálculo, produzindo um menor gasto computacional.

Após a verificação e correção da malha de elementos finitos e a posterior otimização da largura de banda, identificam-se os nós dos elementos que apresentarem condições de contorno e se identificarão também as fraturas. O passo seguinte é a exportação de dois arquivos de saída necessários para a seguinte etapa. Um deles é um arquivo com extensão (\*.dat) envolvido na conectividade dos elementos planos triangulares de fratura e elementos tetraédricos do meio poroso. Este arquivo (\*.dat) também identifica os nós que tem condições de contorno e a qual elementos estes pertencem. O outro arquivo de saída de extensão (\*.exp) está envolvido na entrada de coordenadas dos nós dos elementos. Esta etapa conclui com a correta exportação dos arquivos referidos.

As figuras apresentadas neste item como parte ilustrativa foi feito especificamente para explicar este procedimento. A análise deste modelo não foi desenvolvida por conter mais de 500,000 elementos finitos, superando a capacidade computacional disponível para este trabalho.

### **4.3.**

#### **Solução numérica e visualização de resultados**

O programa de análise usado para esta etapa foi o FTPF-3D (Simulating Flow and Solute Transport in Porous and Fractured Media – Three-dimensional) desenvolvido por Telles (2006). Este programa resolve análise de fluxo, transporte de soluto e trajetória de partículas em meios porosos e fraturados, usando como código fonte o programa SWMS3D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Three-Dimensional variably- Saturated Media (Šimůnek et al.,1995) desenvolvido na linguagem Fortran 77.

Este programa usa o método de elementos finitos para resolver as equações de fluxo em regimes transiente e permanente em condições saturadas e não saturadas. Os métodos de Picard e BFGS são empregados para resolver a não linearidade das equações. Para resolver o sistema de equações usa o método de eliminação de Gauss para problemas com largura de banda menor a 20 ou com um numero menor de 500 nós. Para os outros casos usa o método de gradiente conjugado pré-condicionado com matriz simétrica. Para maiores alcances das vantagens deste código revisar Šimůnek et al. (1995).

A validação dos resultados das análises feita pelo programa FTPF-3D éverificado em Telles (2006).

Para a visualização dos resultados usou-se o programa Pos3D - A Generic Three-Dimensional Postprocessor (1991-2005) desenvolvido pelo TeCGraf-PUC/RIO – CENPES/PETROBRAS Convention.

#### **4.3.1.**

##### **Procedimento**

Na etapa de geração de malha com o programa ICEM obteve-se dois arquivos: com extensões (\*.dat) e (\*.ex). Com estes arquivos gera um arquivo neutral file (\*.nf) que contém informação da malha, condições iniciais e de

contorno assim como informação das propriedades hidráulicas do meios físicos. Além disso, este arquivo neutral file contém os valores das propriedades do fluido, tolerâncias de análise e o tipo de análise (transiente ou permanente). Para obter este arquivo neutral file se usou um código de programação na linguagem C++ que foi desenvolvido por Castagnoli em 2010. Este código foi ligeiramente modificado nesta dissertação com algumas considerações adicionais para diversificar as aplicações.

O programa de análise FTPF-3D para resolver as equações governantes de fluxo usa como arquivo de entrada de dados o arquivo neutral file (\*.nf), e como resultado da análise se obtém-se um arquivo de saída (\*.pos). Este arquivo de saída contém os resultados de cargas de pressão, cargas totais e vetores de velocidades. Estas poderão ser visualizadas graficamente usando o programa POSD3D.