

## **6.**

### **Modelagem numérica com o programa Abaqus**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a modelagem numérica, realizada com o programa Abaqus em duas (2D) e três (3D) dimensões. Estes resultados se referem às condições dos poços localizados na área em estudo, descrita nos capítulos anteriores. O capítulo mostra também exercícios de simulação numérica dos ensaios de cilindros de paredes espessas

#### **6.1.**

##### **Modelo de erosão 2D e 3D**

##### **6.1.1.**

###### **Modelagem numérica em 2D**

O modelo 2D representa um poço que em termos de completação define-se como “poço aberto”, ou seja, o intervalo de produção não possui revestimento.

As características do análise são: poço vertical, com a representação de somente 25% do domínio e considerando um estado plano de deformação. A geometria tem 10,2 m (401,5 polegadas) de largura do domínio e o diâmetro do furo é de 0,3176 m (12,5 polegadas)

Os valores de carregamento no contorno e o *drawdown* aplicado estão baseados em dados reais de campo. A rocha é considerada um meio poroso, contínuo e isotrópico. A figura 42 mostra a representação esquemática do carregamento aplicado.

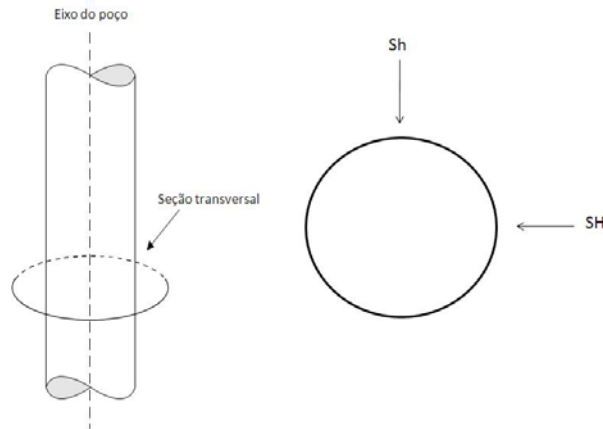


Figura 42.- Representação do carregamento aplicado

A modelagem foi feita com elementos tipo CPE4P (*Abaqus Analysis User's Manual*), quatro (4) nós, com forma quadrilateral. A malha é mostrada nas figuras 41 e 42, a mesma possui 2087 nós e 1993 elementos. O processo de simulação é desenvolvido em três estágios

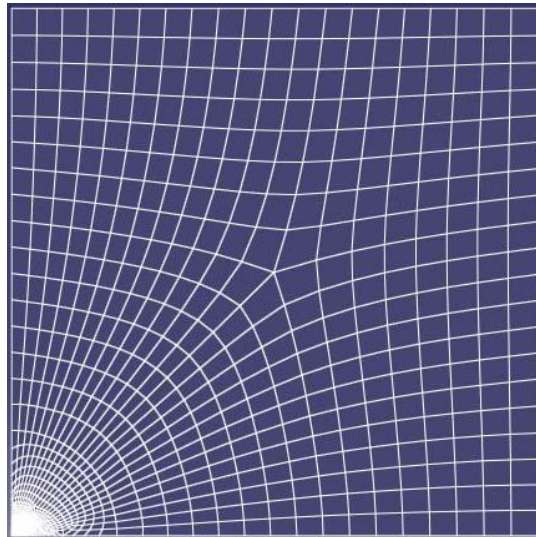


Figura 43.- Malha para a modelagem em duas dimensões

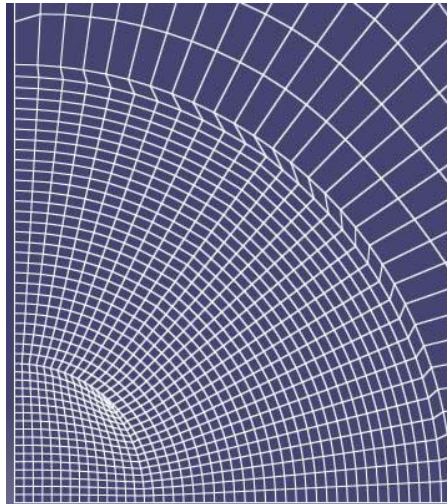


Figura 44.- Detalhe da malha (na zona do poço)

O primeiro passo, definido como a etapa geostática, é feito com o objetivo de alcançar o equilíbrio logo após de colocar as condições iniciais de tensão e poro pressão (Ver figura 45).

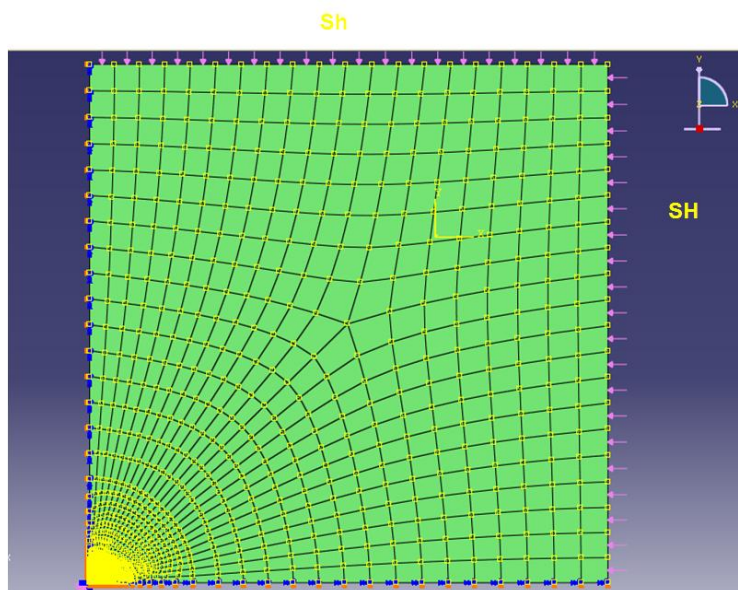


Figura 45.- Condições iniciais, de contorno e carregamento no modelo 2D

Na etapa de perfuração, são removidos os elementos que representam o poço. É colocada uma força distribuída ao redor dele, a qual representa o fluido de perfuração, sendo que, é considerado um fluido não penetrante, portanto, não afetara a resistência mecânica da rocha.

Na etapa de erosão, o terceiro passo, as condições de contorno mudam para aplicar a pressão de poro na parede do poço e começar o processo de

erosão. Neste trabalho as simulações foram feitas para tempos de 30 e 60 horas. Todas as etapas antes do processo de erosão são em regime permanente, o processo de erosão é transiente.

### 6.1.2.

#### Modelagem numérica 3D

O domínio do problema considera uma fatia circular de rocha de 0,20 (m) / 8 (polegadas) de espessura, o qual é atravessado por o poço e o túnel canhoneado na sua seção axial e transversal respectivamente. O domínio tem um diâmetro de 10 (m) / 400 (polegadas) o poço de 0,15 (m) / 6,25 (polegadas) e o túnel de 0,043 (m) / 1,7 (polegadas) com 0,508 (m) / 20 (polegadas) de comprimento. Na modelagem é considerada a tubulação de revestimento e cimento. A rocha é modelada com elementos tipo C3D8P, e o revestimento com M3D4. A malha tem um total de 15496 elementos.

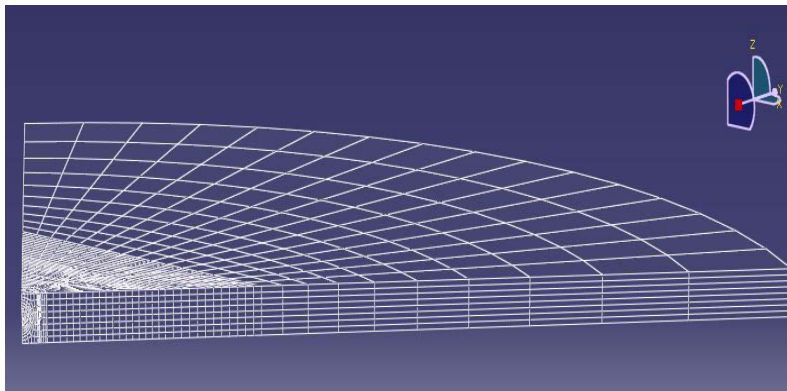


Figura 46 Malha do modelo 3D

O processo é realizado em cinco (5) passos:

1. Geoestático, utilizado para equilibrar em relação as tensões iniciais, poro pressão e o carregamento distribuído o qual representa a rocha acima do túnel perfurado (figura 47)

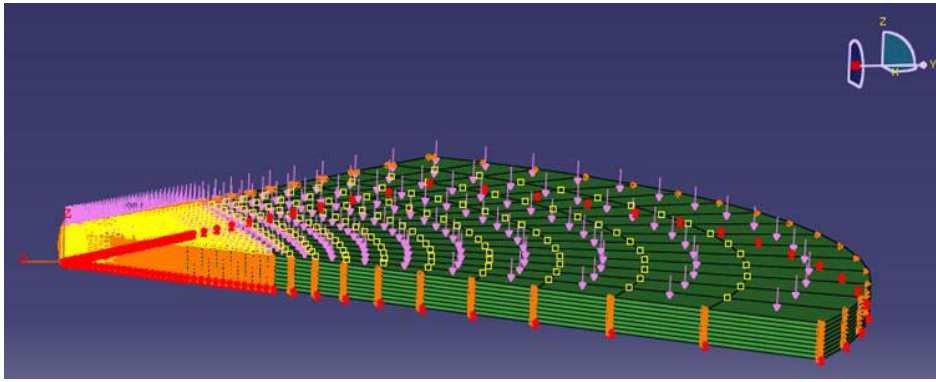


Figura 47 Condições iniciais, de contorno e carregamento aplicado

2. Perfuração: representa as operações de remoção dos elementos do poço e o túnel canhoneado (figura 48)

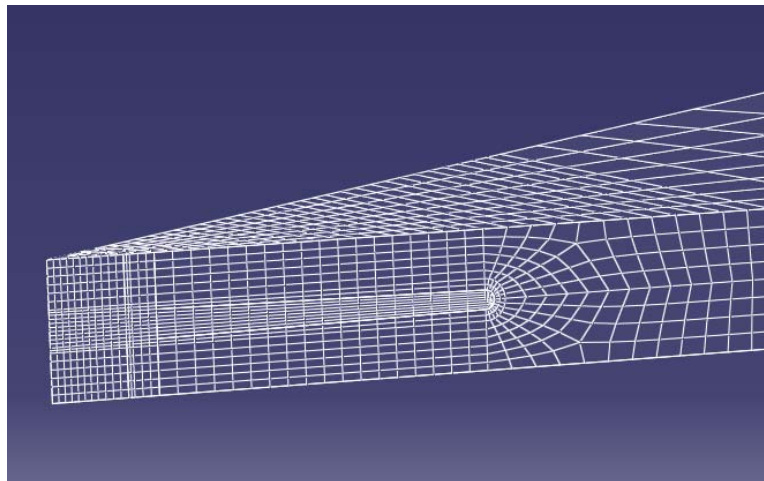


Figura 48 Detalhe da malha 3D. Túnel canhoneado

3. Aplicação da pressão de fluido na face do túnel canhoneado (figura 49)

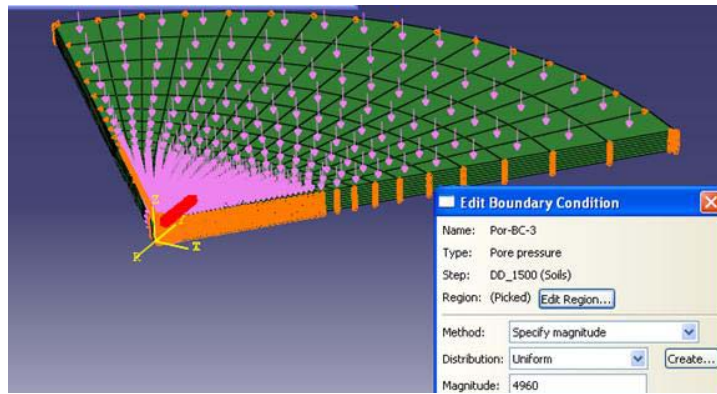


Figura 49 Aplicação da pressão de fluido nas faces do túnel canhoneado

4. No quarto passo (figura 50) é aplicada a pressão de *drawdown* desejada com análise permanente (*steady-state*).

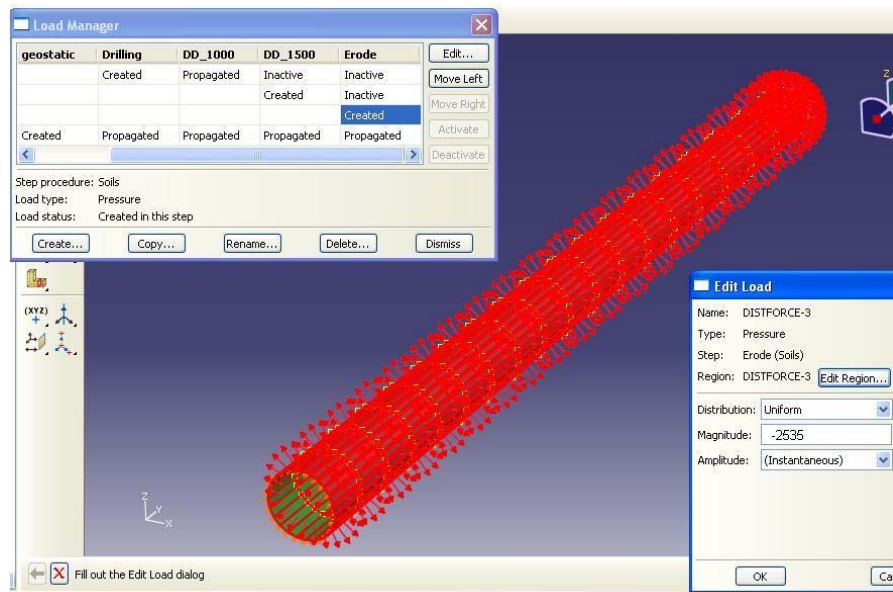


Figura 50.- Aplicação do diferencial de pressão no túnel canhoneado

5. O ultimo passo corresponde à análise transiente do processo de erosão.



## 6.2.

### Modelagem numérica do ensaio de cilindro de paredes espessas

O objetivo deste modelo foi de analisar as tensões ao longo do raio do cilindro para diferentes relações de diâmetro, entre 3:1 e 2:1 (ver figura 35). Esta modelagem considerou estado de deformação plana e devido à simetria somente 25% do domínio total. A malha foi feita, para ambos casos, com elementos tipo CPE4R e o numero de elementos foi de 975 e 792 para as geometrias 3:1 e 2:1 respectivamente (ver figura 51) .

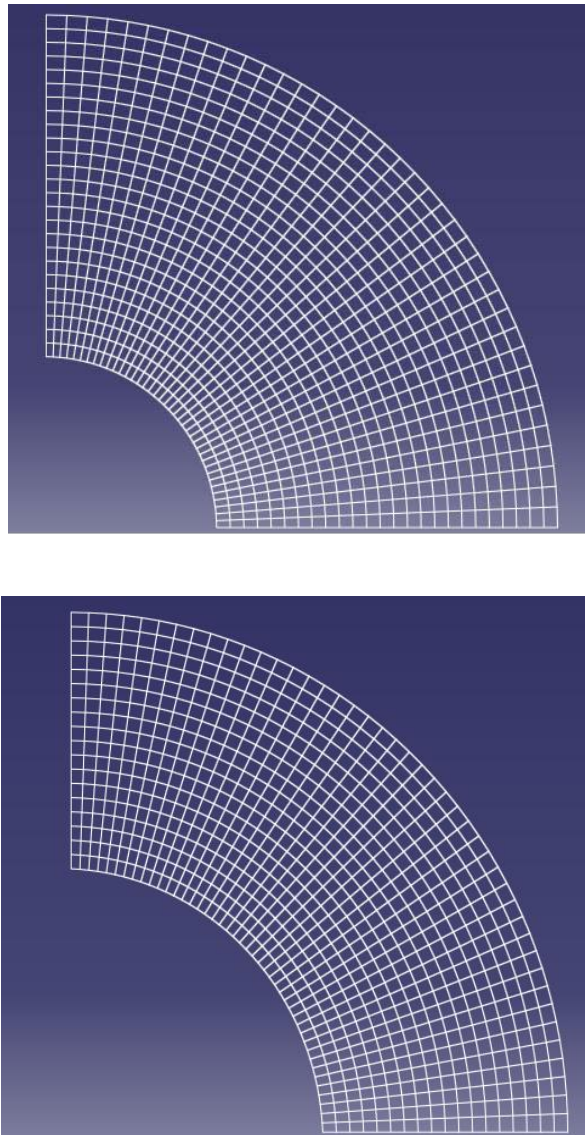


Figura 51 Malhas utilizadas para a modelagem do ensaio de cilindro oco.

Relação de diâmetros 3:1 (a) e 2:1 (b)

Da mesma forma como o ensaio experimental, a carga foi imposta até o valor máximo alcançado pela máquina no laboratório (80 (Mpa)/12000 psi). A figura 52 apresenta as condições de contorno e a carga aplicada para o caso da geometria 2:1

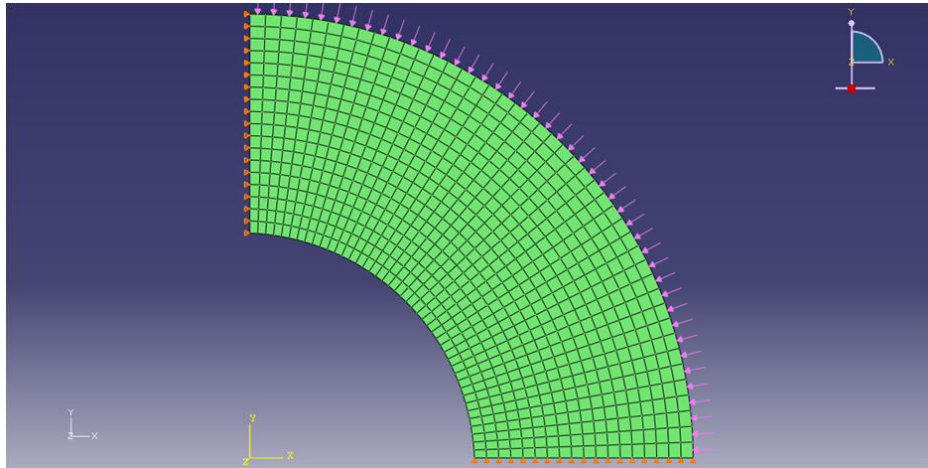


Figura 52.- Condições iniciais e de carga na modelagem

### 6.3.

#### Sub-rotina de erosão do programa Abaqus

O programa Abaqus oferece ao usuário uma rotina escrita na linguagem Fortran para análise dos processos de produção de sólidos em poços de petróleo. Esta rotina é baseada no trabalho de E. Papamichos e M. Stavropoulou (1998), na qual se considera a erosão na superfície do meio poroso. No item seguinte será descrito o modelo matemático correspondente, assim como as considerações assumidas.

Do ponto de vista da modelagem, a produção de areia em poços de petróleo esta relacionada aos dois seguintes mecanismos:

- Instabilidade mecânica e falhas localizadas da rocha nas vizinhanças do poço devido à concentração de tensões.
- Instabilidades hidro-mecânica devido à erosão interna e da superfície, as quais se manifestam na transferência de partículas pela ação das forças de percolação

Portanto, o modelo de erosão foi desenvolvido no marco da instabilidade hidro-mecânica e as teorias de infiltração de Einstein.



### 6.3.1.

#### Definições do modelo matemático

Considera-se um volume elementar  $dV$  de um meio poroso, granular e totalmente saturado. O volume possui três constituintes: uma fase fluida (ff), uma fase sólida (s) e as partículas sólidas fluidizadas (fs) com as massas  $dM_{ff}$ ,  $dM_{fs}$ ,  $dM_s$  e volumes  $dV_{ff}$ ,  $dV_{fs}$ ,  $dV_s$  respectivamente. A figura 53 representa esquematicamente os componentes do modelo. O símbolo  $dV_v$  representa o volume dos poros interconectados qual se encontra ocupado pelo fluido e os sólidos fluidizados.

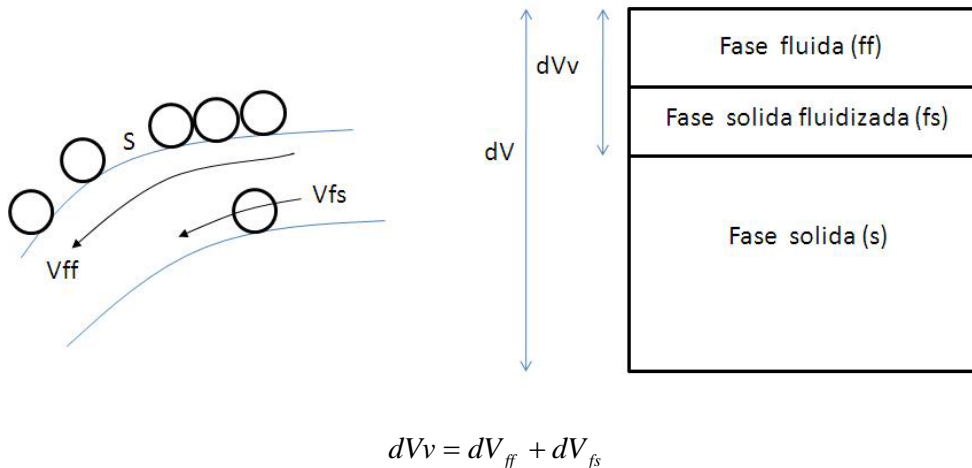


Figura 53.- Representação dos componentes que considera o modelo matemático

Onde  $dV_{fs}$  são aquelas partículas em suspensão que se movimentam com o fluido. Qualquer outra partícula que fica dentro dos espaços vazios é visto como fase sólida.

### 6.3.1.1.

#### Considerações do modelo

O fluido e as partículas fluidizadas possuem a mesma velocidade. Os sólidos têm velocidade zero.

$$\begin{aligned} V_i^{fs} &= V_i^{ff} = \bar{V}_i \\ V_i^s &= 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

A porosidade é definida por

$$\phi = \frac{dV_v}{dV_T} \quad (6.2)$$

A concentração de transporte dos sólidos fluidizados, C e definida por

$$C = \frac{dV_{fs}}{dV_v} \quad (6.3)$$

As densidades da fase fluida  $\rho_{ff}$  e as partículas fluidizadas  $\rho_{fs}$  coincidem com as densidades totais dos constituintes correspondentes

$$\rho_{fs} = \frac{dM_{fs}}{dV_{fs}} = \frac{dM_s}{dV_s} = \rho_s \quad (6.4)$$

$$\rho_{ff} = \frac{dM_{ff}}{dV_{ff}} = \rho_f \quad (6.5)$$

Define-se a densidade parcial da mescla como

$$\bar{\rho} = \frac{dM_{ff} + dM_{fs}}{dV_{ff} + dV_{fs}} \quad (6.6)$$

Substituindo a concentração de transporte, e as densidades parciais na equação anterior, tem-se que

$$\bar{\rho} = (1 - C)\rho_f + C\rho_s \quad (6.7)$$

Por outro lado, a velocidade da mistura é definida pela relação

$$\bar{q}_i = \frac{d\bar{V}}{dS_i dt} \quad (6.8)$$

E a taxa de transferência de massa da mistura é definida por

$$\dot{m}_i = \frac{d\bar{M}}{dSdt} = \frac{\bar{\rho}d\bar{V}}{dSdt} = \bar{\rho}q_i = (1-C)\rho_f \bar{q}_i + C\rho_s \bar{q}_i \quad (6.9)$$

$$m_i = m_i^{ff} + m_i^{fs} \quad (6.10)$$

ou seja

$$m_i^{ff} = (1-C)\rho_f \bar{q}_i \quad (6.11)$$

$$m_i^{fs} = C\rho_s \bar{q}_i \quad (6.12)$$

### 6.3.2.

#### Lei Constitutiva da geração de massa

Estudos teóricos e experimentais em relação à filtração das partículas não-coloidais em meios porosos foram feitos nos anos 60' por H.A Einstein na Califórnia (Stavropoulou, 1998). Einstein propôs a seguinte forma para a taxa da massa erodida

$$\dot{m}_{er} = \lambda' \|m_i^{fs}\| \quad (6.13)$$

Onde,  $\dot{m}_{er}$  é a taxa de massa erodida,  $m_i^{fs}$  a taxa de transferência de massa das partículas fluidizadas e  $\lambda'$  o coeficiente de produção de areia na superfície

Substituindo a definição de  $m_i^{fs}$  dada pela equação 6.12 na equação 6.13, tem-se que

$$\dot{m}_{er} = \lambda\rho_s C\bar{q}_i \quad (6.14)$$

o que significa que a erosão é função da descarga das partículas fluidizadas  $C\bar{q}_i$

Espera-se que o processo de erosão seja mais intenso nas regiões intactas as quais são caracterizadas por pequenos canais de poros, por isto assume-se que

$$\lambda' = \lambda(1 - \phi) \quad (6.15)$$

Onde  $\lambda$  é definido como coeficiente de produção de areia. Quando o processo de erosão é acoplado com as deformações do material rochoso,  $\lambda$  é função das deformações plásticas. Na rotina do programa Abaqus, a função que define o comportamento do coeficiente é:

$$\lambda(g^p) = \begin{cases} \lambda_1(g^p - g_{peak}^p) & \text{if } g^p > g_{peak}^p \\ \lambda_2 & \text{if } g^p > \lambda_2 \end{cases} \quad (6.16)$$

Sendo  $g^p$ , a deformação plástica equivalente,  $g_{peak}^p$  a deformação plástica máxima.  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  devem ser determinados experimentalmente, na sub-rotina forem definidos valores de  $\lambda_1 = 4$  e  $\lambda_2 = 0,01$ .

Substituindo o valor de  $\lambda'$  dado pela equação 6.15

$$\dot{m}_{er} = \lambda(1 - \phi)\rho_s C \bar{q}_i \quad (6.17)$$

$$\frac{\dot{m}_{er}}{\rho_s} = \lambda(1 - \phi) C \bar{q}_i \quad (6.18)$$

Na equação 6.18 o termo do lado esquerdo é definido como “velocidade de erosão”. Onde,  $\lambda$ , como mencionado anteriormente, é o coeficiente de produção de areia e depende das deformações plásticas do material.  $(1-n)$  é a porosidade,  $C$  é a concentração de transporte dos sólidos fluidizados e  $v_w$  a velocidade do fluido.

#### 6.4.

##### Uso das malhas adaptativas no modelo de erosão

O programa Abaqus utiliza malhas adaptativas para análise do processo de erosão. As características básicas dos procedimentos utilizados são

- Manter uma malha topologicamente similar
- É usada para resolver problemas de tipo Lagrangiano, ou seja, nenhum material deixa a malha, e para modelar efeitos de redução de volume, no qual o material é erodido da superfície.
- Restrições de malha Lagrangiana no nó são usadas para indicar que a suavização da malha não deve ser aplicada, quer dizer, o nó deve seguir o material.
- A suavização da malha é definida como parte da definição do passo; a malha adaptativa usa um método na qual cada incremento consiste numa fase lagrangiana seguida por uma fase euliana. A fase lagrangiana é a típica solução do programa onde nenhuma suavização ocorre. Uma vez que as equações de equilíbrio tenham convergido é feito a suavização da malha.
- A suavização da malha é feita logo que as equações de equilíbrio estrutural tenham convergido. As equações de suavização da malha são resolvidas explicitamente varrendo iterativamente no domínio da malha adaptativa. Durante cada varredura da malha, nós do domínio são realocados baseados na posição de nós vizinhos obtidos durante uma análise previa para reduzir a distorção do elemento. A nova posição  $X_{i+1}$  de um nó é obtida através de

$$X_{i+1} = X + u_{i+1} = N^N \times x_i^N \quad (6.20)$$

Onde  $X$  é a posição original do nó,  $u_{i+1}$  é o deslocamento nodal  $x_i^N$  são as posições nodais das vizinhanças obtidas durante varredura previa de malha e  $N^N$  são funções de peso. Os deslocamentos aplicados durante as varreduras não estão associadas com o comportamento mecânico