

4. Modelo Numérico

Grande parte dos problemas de engenharia pode ser formulada através dos princípios gerais da Mecânica do Contínuo. Os princípios da física são descritos sob a forma de equações diferenciais, onde os efeitos da constituição do material somente são levados em conta de forma macroscópica, por meio de equações constitutivas do material.

A necessidade da solução de problemas de engenharia desta natureza levou ao desenvolvimento de modelos matemáticos (métodos numéricos) que possibilitam a discretização dos meios contínuos e a resolução de equações diferenciais supramencionados. Para resolver estes problemas existe os Métodos das Diferenças Finitas, os Métodos dos Elementos Finitos (MEF), os Métodos dos Elementos de Contorno, etc.

O MEF consiste na divisão do meio contínuo em um número finito de elementos com comportamento especificado por um número finito de parâmetros, resolvendo o mesmo número de equações governantes em cada elemento iterativamente até a convergência segundo um critério pré-estabelecido (Santos, 2007).

Este capítulo apresenta, de maneira breve e sucinta, a solução de problemas não lineares, bem como alguns conceitos e características, levando em conta principalmente, particularidades adotadas pelo programa Abaqus, ferramenta de trabalho utilizada nesta tese. Caso seja necessário um maior aprofundamento, podem-se consultar os seguintes autores: Desai (1979); Bathe; (1982); Fish (2007) e Frind (1993).

4.1. Solução de Problemas Não Lineares

A discretização de equações dá origem a um sistema de equações algébricas não lineares. Muitos são os métodos de linearização para solução de tais problemas.

Uma análise linear só é válida quando a estrutura sofre apenas pequenas deformações e deslocamentos e seu material tem comportamento elástico linear,

obedecendo a Lei de Hooke. Quando os deslocamentos e deformações aumentam ou o comportamento do material apresenta fenômenos como plasticidade e fissuração, os efeitos não lineares ganham importância.

No caso mais geral, tanto a não linearidade geométrica (devido aos grandes deslocamentos) como a não linearidade física (causada pelo comportamento mecânico do material) precisam ser considerados.

No presente trabalho, dados os altos níveis de tensão e a possibilidade de plastificação do material, optou-se por considerar o arenito, o *gravel* e o latão como materiais de comportamento elastoplástico (não linearidade física). No entanto, os modelos na condição de tela centralizada e tela encostada que foram analisados por Chavez (2011), não apresentaram plastificação no latão.

Em uma análise não linear, a solução não pode ser obtida com a resolução de um único sistema de equações, como em problemas lineares. Por isso, para a utilização do método implícito, torna-se necessário a solução de métodos iterativos como, por exemplo, o Método de Newton-Raphson (*default* no Abaqus Standard). Em contrapartida, com a utilização do método explícito, a iteração não é necessária, visto que a solução é realizada explicitamente. Porém, o custo computacional é muito maior devido ao menor passo do incremento.

4.1.1. Solução Implícita - Não Linearidade Segundo Abaqus

Em problemas de não linearidade geométrica, a análise pode ser realizada partindo da configuração inicial da estrutura e determinando os deslocamentos, tensões e esforços à medida que a carga é aumentada.

Em razão da não linearidade da resposta é necessário utilizar um procedimento iterativo onde incrementos interativos de carga são aplicados, a fim de definir o caminho de equilíbrio do modelo (figuras 26 e 28). Nesse processo, em cada passo da busca pela solução, incrementos de força são aplicados e os respectivos deslocamentos são calculados pelas relações descritas a partir das equações de equilíbrio.

Para um corpo estar em equilíbrio, a força resultante em cada nó deve ser zero. E para isso acontecer, deve haver um equilíbrio entre a força externa (P) e a força interna (I), de acordo com a equação abaixo:

$$P - I = 0 \quad (4.1)$$

A resposta não linear de uma estrutura a um pequeno incremento, ΔP , é apresentada na **Figura 26** que utiliza a tangente da curva (K_0) no ponto u_0 , para

determinar o valor de correção do deslocamento (c_a). O valor de c_a é obtido utilizando o incremento de força (ΔP) e o ponto "a" na figura 26. Com isso, o Abaqus calcula as forças internas (I) e obtém o valor do resíduo (R_a) que, em uma análise não linear, nunca será zero (Abaqus, 2010).

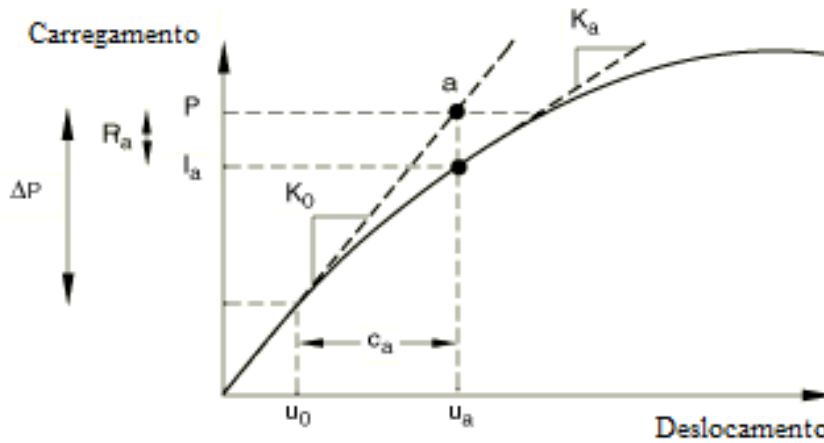


Figura 26 - Primeira interação com o incremento (adaptado do Abaqus, 2010).

Logo após a primeira iteração, o Abaqus determina o critério de convergência atualizando seus valores com o acréscimo dos incrementos e calcula a força residual (R_a) para a iteração de acordo com a seguinte equação:

$$R_a = P - I_a \tag{4.2}$$

Onde:

R_a = força residual ou força desbalanceada

P = força externa (figura 27)

I_a = força interna (força atuante em um nó)

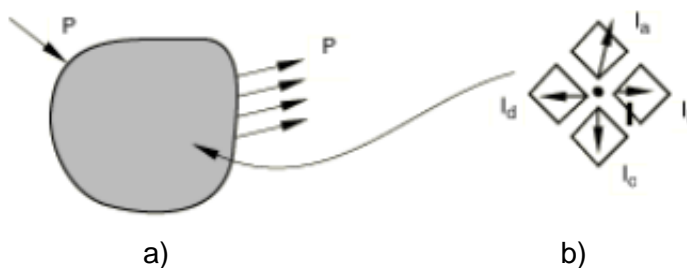


Figura 27 – a) Força externa P em uma simulação b) Força interna atuando em um nó (Abaqus, 2010).

A força externa P representa a força aplicada em uma determinada região do modelo e a força interna I representa a força atuante em um único nó. Essa força interna está relacionada à tensão sofrida no elemento e repassada para o

nó pertencente a este elemento. A força atuante em um nó pode ser decomposta em l_a , l_b , l_c e l_d como especificado na figura 27-b.

Com isso, o valor obtido da força residual é comparado com o valor de tolerância (0.5% da força média). Caso o valor de R_a esteja abaixo do valor de tolerância, P e l_a estão em equilíbrio. Contudo, antes que o Abaqus Standard aceite a solução, é avaliado um novo critério de convergência onde o valor de correção do deslocamento (c_a – figura 26) é comparado com a seguinte equação:

$$\Delta u_a = u_a - u_0 \quad (4.3)$$

Sendo:

u_a e u_0 os deslocamentos devido ao carregamento;

Δu_a o incremento do deslocamento.

Caso c_a seja maior que 1% do incremento do deslocamento, é realizada uma nova iteração. Para que ocorra a convergência, os dois critérios devem ser satisfeitos. Enquanto isto não ocorrer, uma nova iteração será realizada para que a equação R_b (força residual) e o valor de c_b (correção do deslocamento - **Figura 28**) sejam satisfeitas até que o sistema esteja em equilíbrio.

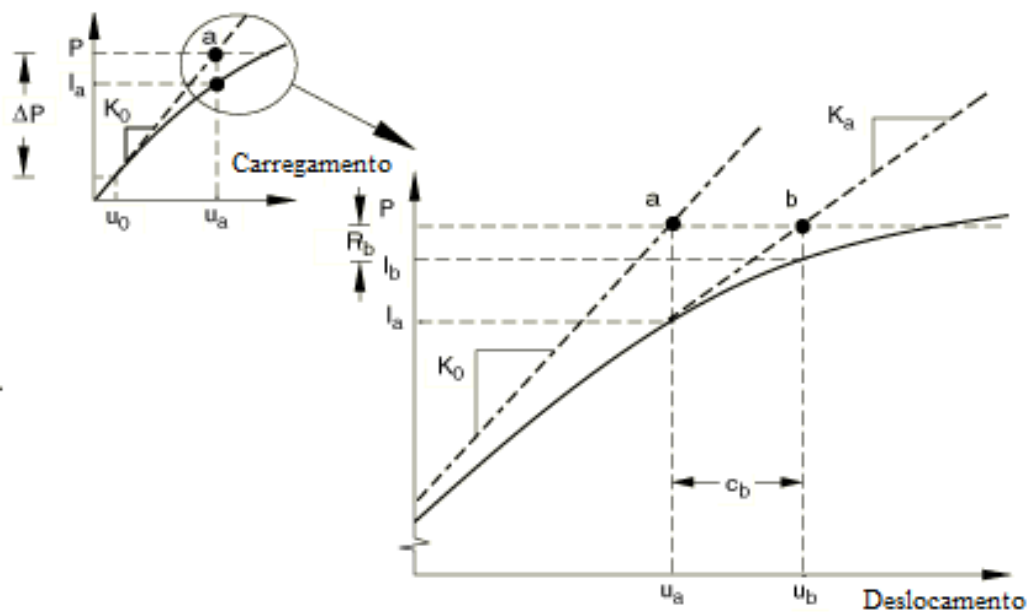


Figura 28 - Segunda iteração com o incremento (adaptado do Abaqus, 2010).

Para cada iteração da análise não linear é calculada a matriz de rigidez do modelo e solucionado o sistema de equações. Isso significa que o custo computacional da solução de cada iteração é equivalente ao custo computacional de uma análise linear.

4.1.2. Solução Explícita

A utilização do método explícito facilita a convergência em alguns casos de não linearidade, visto que sua solução é realizada explicitamente, eliminando a necessidade de processos iterativos.

A solução explícita foi utilizada para o modelo *stand alone*, que será detalhado no item 4.3.3, devido à plastificação e às grandes deformações observadas por Chavez (2011). Além disso, foram feitas algumas tentativas na utilização do *solver* implícito do Abaqus, mas por causa das grandes deformações o modelo não convergia (chegava a 50% da análise). Por isso, foi adotado para este modelo o *solver* explícito do Abaqus.

Para o modelo explícito foi utilizado uma análise quase-estática, isto é, um modelo dinâmico com fator de amortecimento usado para estabilizar as forças internas e externas a cada incremento, como apresentado na seguinte equação:

$$M\ddot{u} + I - P = 0 \quad (4.4)$$

Sendo:

M – massa da estrutura

\ddot{u} – aceleração da estrutura

I – Força Interna

P – Força Externa

A inclusão da força de inércia ($M\ddot{u}$) na equação de equilíbrio é a maior diferença entre a análise estática e a dinâmica.

Para o modelo quase-estático, o amortecimento é aplicado em cada passo, logo, é de suma importância cuidar da velocidade do carregamento (forças externas). Se a velocidade desse carregamento for muito alta, o modelo não ficará próximo ao estático, originando grandes oscilações.

Para melhor reproduzir o modelo estático, é analisada a frequência natural do sistema. Essa análise é realizada no Abaqus utilizando o *step *frequency*. Com esse resultado, é possível verificar o melhor tempo de aplicação do carregamento para que o modelo consiga equilibrar suas forças internas e externas e eliminar a energia cinética originada pelo carregamento.

4.1.3. Grandes Deformações

Em análises com elevado grau de não linearidade geométrica, por exemplo, é comum observarmos grandes distorções na malha devido às

deformações sofridas durante a análise. Os problemas de grande deformações podem ser resolvidos de várias maneiras. No item anterior, controlou-se o problema de grandes deformações utilizando um modelo explícito quase-estático. Por *default*, o Abaqus/Explicit checa a velocidade relativa das grandes deformações em cada elemento, já que dependendo da velocidade isso pode acabar acarretando em uma deformação fora da realidade ou em um resultado irreal. Quando a razão da velocidade de deformação e da velocidade da onda ultrapassa 0.3, o Abaqus entende que a relação constitutiva do material, que é puramente mecânica, não é mais válida e é utilizada a equação do estado termomecânico. Tudo isso pode ser mais aprofundado no item 6.3.3 do Manual do Abaqus – Analysis (*Explicit dynamic analysis*), onde é explicada a teoria de grandes deformações utilizada pelo Abaqus.

Outra técnica não utilizada, mas que também poderia resolver o problema de grandes deformações, seria o mapeamento da malha (figura 29) que está limitada ao Abaqus/Standard. Com essa técnica é possível controlar a distorção dos elementos, refazendo a malha para continuação da análise.

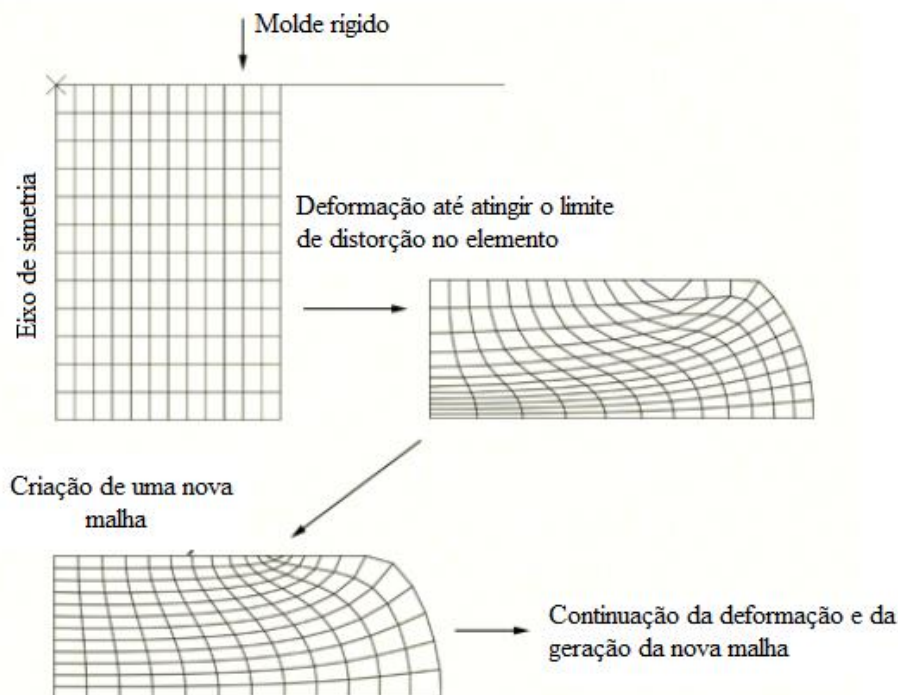


Figura 29 – Mapeamento da malha (adaptado do Abaqus, 2010).

4.1.4. Contato

Por *default*, o Abaqus utiliza um algoritmo de contato onde se declara uma superfície principal (*Master Surface*) e uma superfície solidária (*Slave Surface*).

Para o algoritmo, o contato é realizado no nó de cada superfície, ou seja, o espaço entre dois nós da superfície solidária pode ser penetrado pela superfície principal, como apresentado na figura abaixo.

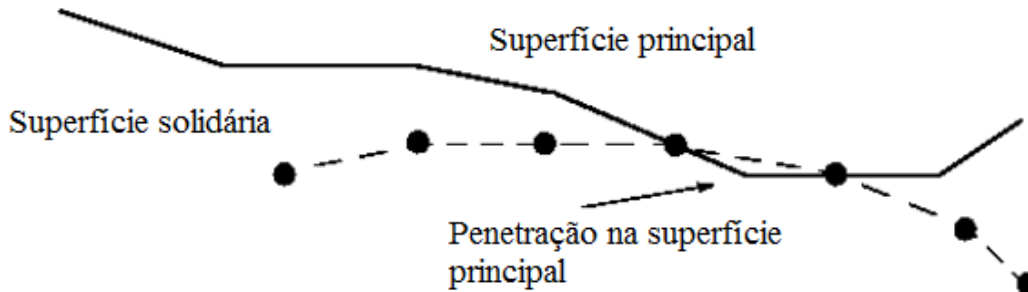


Figura 30 – Contato entre superfícies (adaptado do Abaqus, 2010).

A interação mais simples entre superfícies que pode ser criada no Abaqus é a que considera todo o movimento rotacional e translacional transmitido entre as superfícies em contato, ligadas entre si como se estivessem coladas. O fluxograma na figura 31 apresenta o processo iterativo para a convergência de um modelo com contato.

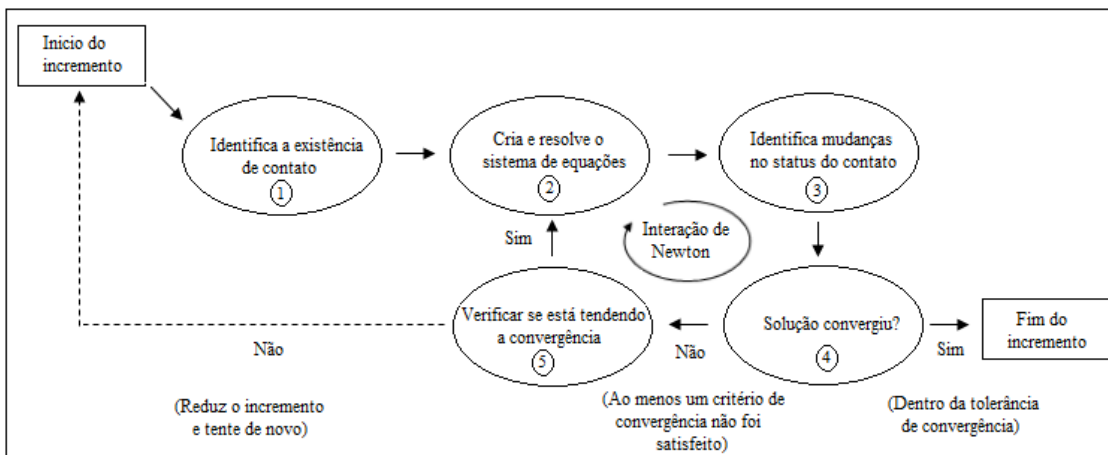


Figura 31 – Fluxograma de contato utilizado no Abaqus.

Visando a simplificação do modelo, para o contato formação-gravel-tela foram consideradas somente forças normais, desprezando as forças tangenciais (atrito), pois seriam mais um dado a ser arbitrado para o modelo. Em simulações futuras, esse parâmetro pode ser modificado para introduzir a influência do atrito.

4.2. Validação do Programa Abaqus

A validação dos resultados obtidos pelo programa Abaqus será feita através da avaliação de tensões as quais está submetido um poço vertical, em condição de tensões hidrostáticas.

4.2.1. Poço Vertical – Solução Analítica (Kirsch)

Nesta seção, é apresentada uma solução analítica do estado de tensões atuante na parede do poço e a metodologia adotada. Para isso foi utilizado o pacote de computação algébrica comercial Matlab. Nele, foi implementada a solução de Kirsch (1898).

A solução clássica de Kirsch para o estado de tensões ao redor do poço, na forma de uma circunferência de raio a , de um meio elástico infinito regido por um estado de deformações planas e submetido a um estado de tensões principais, pode ser representada pela figura 32 e pelas seguintes equações:

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[(1+k) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-k) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left[(1+k) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-k) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (4.6)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} \left[-(1-k) \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \quad (4.7)$$

Onde:

σ_r é o componente normal de tensão na direção radial

σ_θ é o componente normal de tensão na direção circunferencial

$\tau_{r\theta}$ é o componente de tensão cisalhante

θ é o ângulo medido no sentido anti-horário no plano xy e a partir da direção y

r é a distância radial a partir do eixo do poço

p é a pressão

a é o raio do poço

k é a razão entre tensão horizontal maior e menor

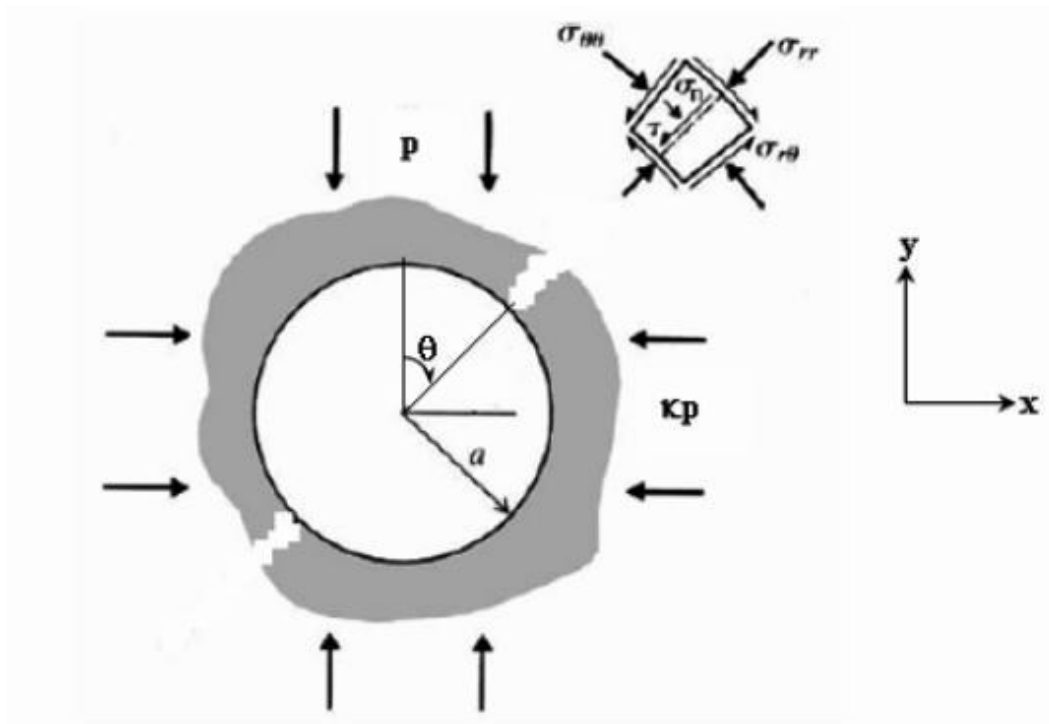


Figura 32 - Tensões ao redor de um poço (Brady & Brown, 2005).

Foi considerado um caso simples da indústria de petróleo em que, em compatibilidade com o modelo a ser utilizado, as seguintes hipóteses foram adotadas:

- Estado de tensões hidrostático;
- Poço vertical;
- Comportamento linear-elástico da rocha de formação;
- Meio homogêneo, isotrópico e contínuo.

Aplicando as hipóteses simplificadoras do problema, as soluções para tensão radial e tangencial ficam da seguinte forma:

$$\sigma_r = p \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \tag{4.8}$$

$$\sigma_\theta = p \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \tag{4.9}$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \tag{4.10}$$

Os dados utilizados, bem como a geometria do problema, podem ser observados na figura 33.

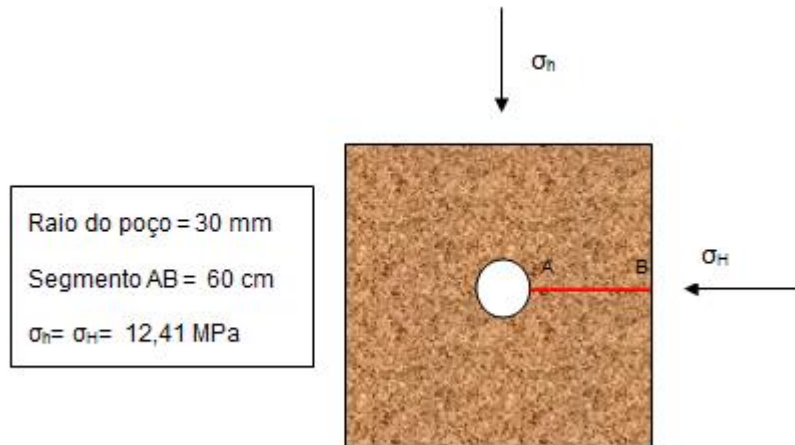


Figura 33 - Esquema de tensões em um poço vertical para o problema estudado.

A variação da tensão radial e tangencial em função do raio em uma seção AB de um poço vertical em uma formação homogênea, isotrópica com comportamento linear elástico e com $\sigma_H = \sigma_h$ obtida nas simulações é apresentada na figura 34. Pode-se observar que tanto as tensões tangenciais quanto as radiais chegam ao seu extremo próximo à parede do poço e tendem ao valor de carregamento aplicado após 4 a 5 vezes o comprimento do raio do poço.

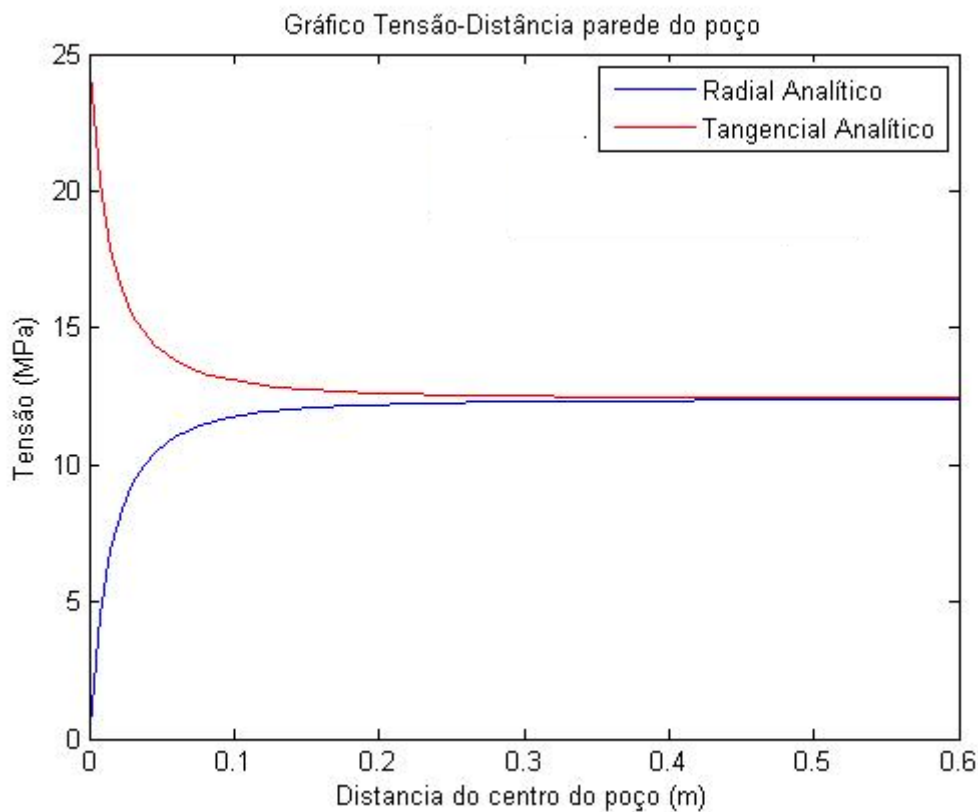


Figura 34 - Variação das tensões principais ao longo da parede do poço para solução analítica de Kirsch.

4.2.2. Poço Vertical – Análise Numérica (Kirsch)

O mesmo problema do item anterior foi solucionado através do pacote de elementos finitos Abaqus. Devido à simetria do problema foi considerado somente $\frac{1}{4}$ do poço.

Nos itens (a) e (b) da figura 35, é possível observar uma malha com 4366 elementos quadriláteros e condições de contorno necessárias para validação do problema. Para as condições de contorno, tanto a base no eixo x quanto a lateral esquerda no eixo y tiveram o deslocamento restringido nas direções y e x, respectivamente (condições de simetria). Da mesma forma, as setas indicam a aplicação das tensões ao redor do poço.

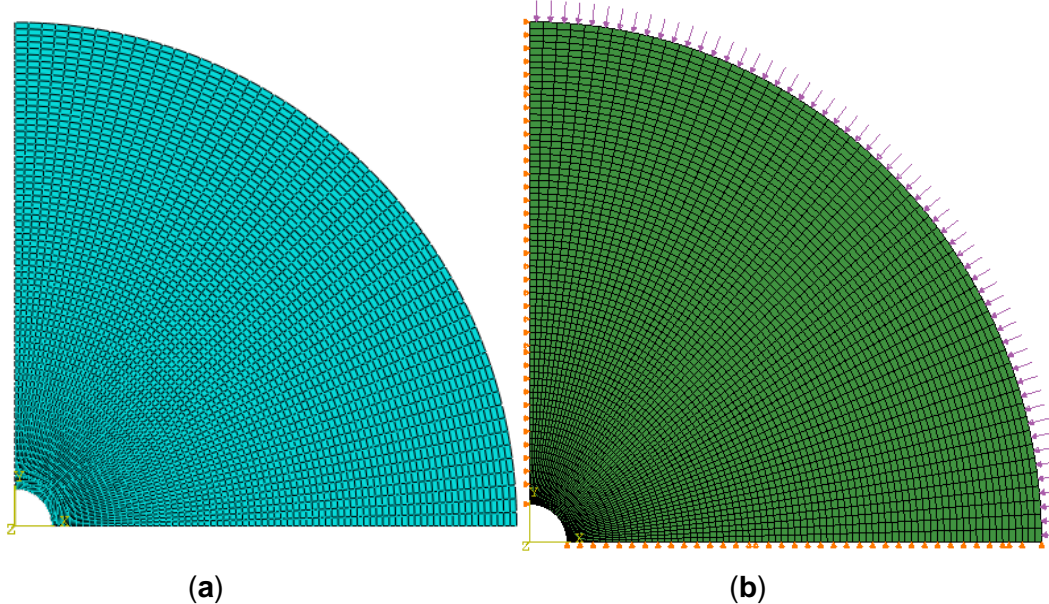


Figura 35 – (a) Malha com 4366 elementos quadrilíneos e (b) Condições de contorno do modelo.

A tabela 2 apresenta os dados de entrada (parâmetros elásticos e pressão aplicada) utilizados no programa bem como a geometria aplicada.

Tabela 2 - Dados de entrada e geometria do problema.

Dados de entrada (Abaqus)	Valores	Geometria	Valores
E	2.4 GPa	Comprimento	60 cm
ν	0.3	Raio	30 mm
Pressão	12,41 MPa	Diâmetro	60 mm

Os resultados obtidos podem ser observados nas figura 36 a 39. Nota-se que as tensões tangenciais e tensões radiais tendem a um valor próximo após 4 a 5 vezes o comprimento do raio do poço, como analisado anteriormente pela solução analítica. Da mesma forma, percebe-se o efeito de concentrações de tensões próximas à parede do poço.

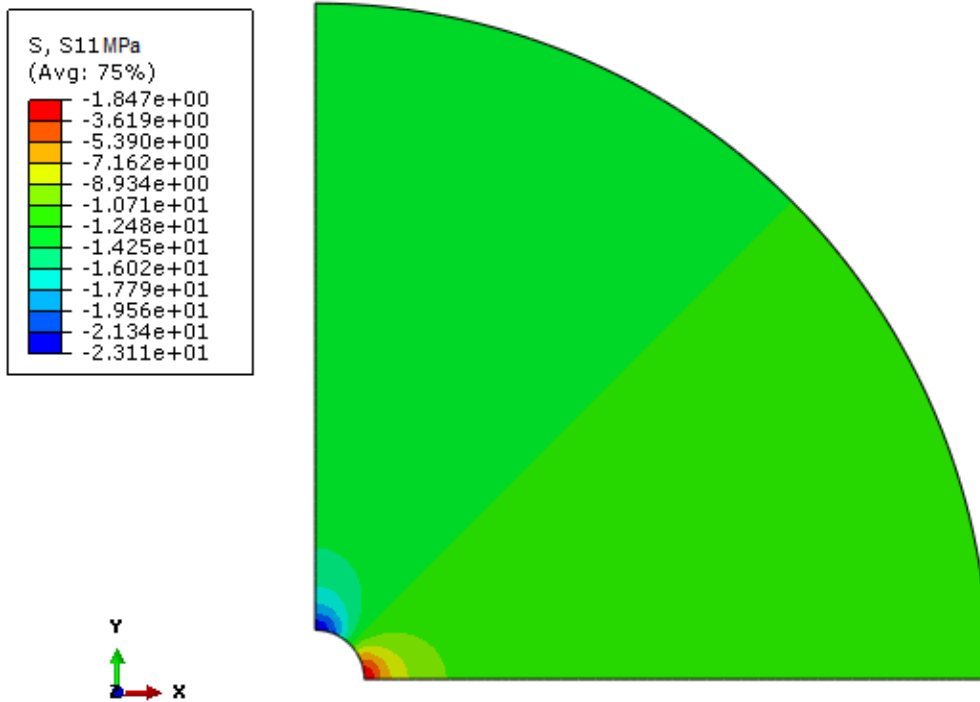


Figura 36 - Distribuições de tensões horizontais do modelo numérico.

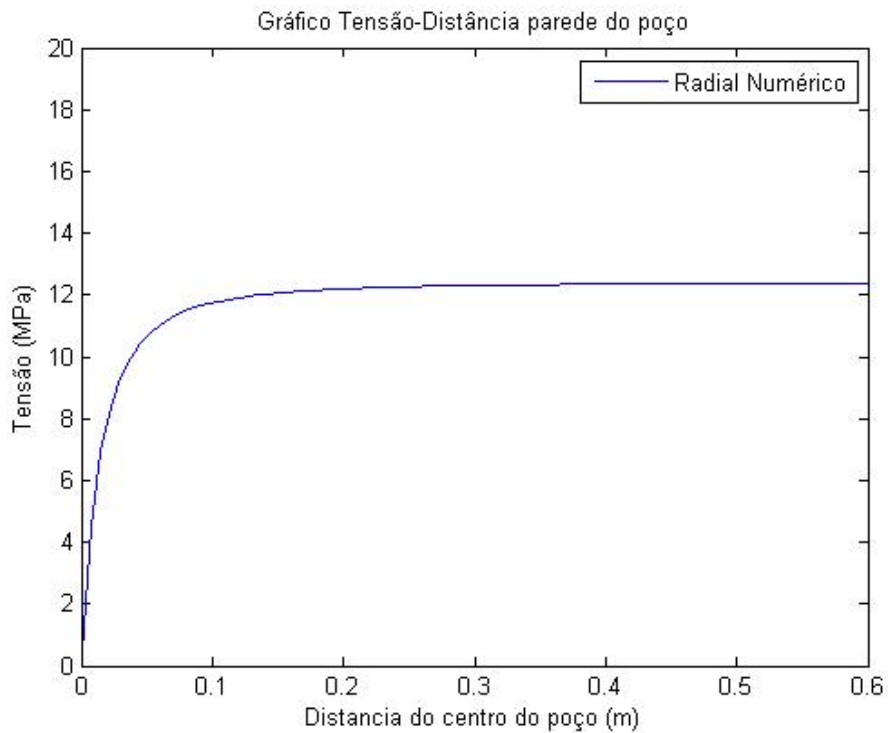


Figura 37 - Variação de tensão radial ao redor da parede do poço para o modelo numérico.

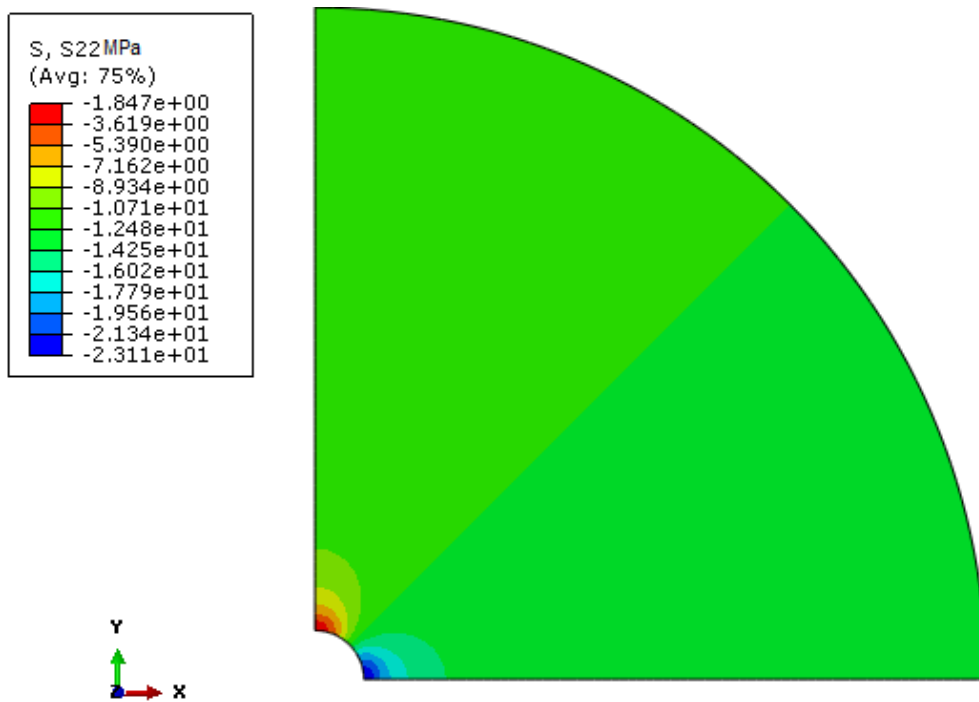


Figura 38 - Distribuições de tensões verticais do modelo numérico.

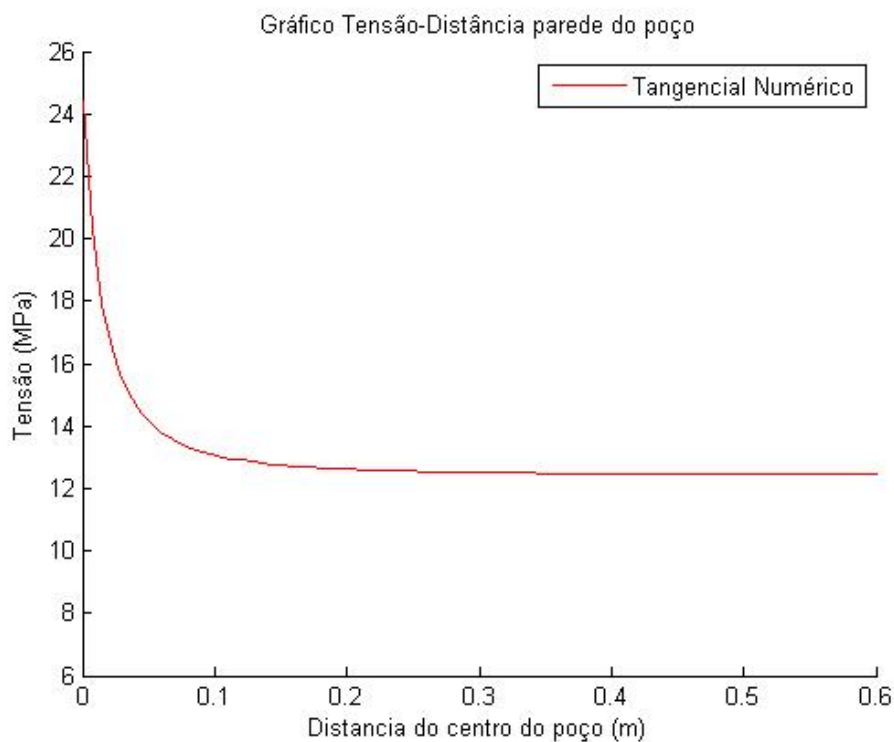


Figura 39 – Variação de tensão tangencial ao redor da parede do poço para o modelo numérico.

Os gráficos da solução numérica foram superpostos aos da solução analítica (figura 34) com a finalidade de apresentar de uma maneira mais clara a comparação entre as duas soluções. Nesse, observa-se uma coincidência

positiva entre os resultados alcançados através das duas soluções (numérica e analítica).

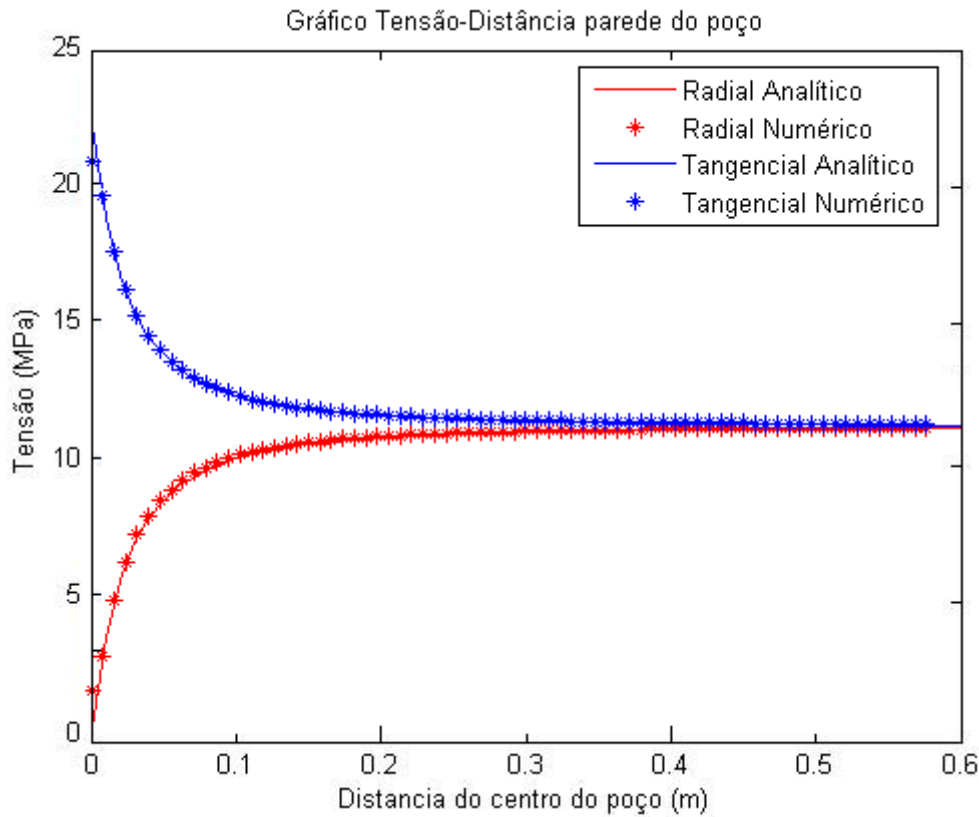


Figura 40 – Comparação dos resultados numéricos (Abaqus) X analíticos (Kirsch) para tensão radial e tangencial ao redor da parede do poço.

4.2.3.

Poço Vertical – Solução Analítica (Ruptura em Rocha)

Neste item, é apresentada uma solução analítica para ruptura do maciço rochoso em um campo hidrostático de tensões. Esta solução possibilita a consideração da elastoplasticidade e sua comparação com o modelo numérico utilizado no Abaqus. A solução foi implementada no pacote de computação algébrica comercial Matlab.

O critério de ruptura pode ser dividido inicialmente em dois itens:

- 1) Critério de Ruptura de rocha intacta

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) \sigma_r + \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (4.11)$$

- 2) Critério de Ruptura de rocha fraturada (não tem coesão)

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \right) \sigma_r \tag{4.12}$$

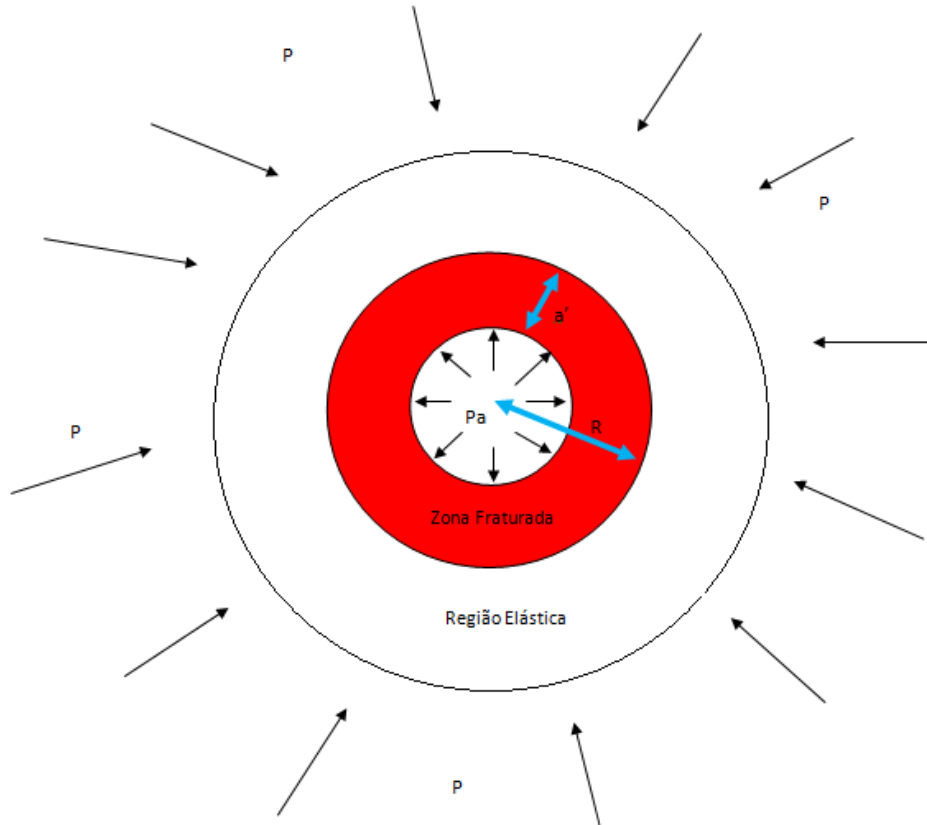


Figura 41 – Campo hidrostático de tensões de um Maciço Rochoso.

Sabendo que a equação de equilíbrio em coordenadas polares pode ser escrita como:

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \partial r \right) (r + \partial r) \partial \theta - \sigma_r r \partial \theta = 2 \sigma_{\theta} \partial r \text{sen} \left(\frac{\partial \theta}{2} \right) \tag{4.13}$$

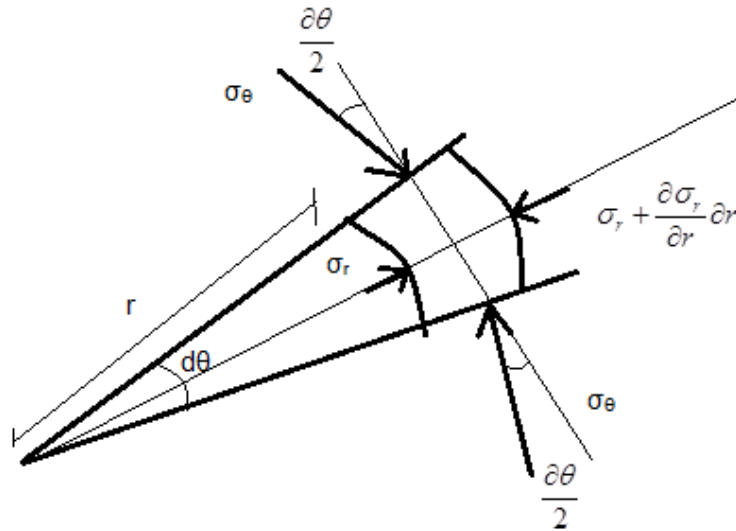


Figura 42 – Tensões em um elemento infinitesimal considerando coordenadas polares.

Logo, a equação fica:

$$\frac{\sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \tag{4.14}$$

Como $\frac{\sigma_r}{\partial r} > 0$, $\sigma_\theta > \sigma_r$ e assim deduz-se que $\sigma_\theta = \sigma_1$.

Substituindo (4.12) em (4.14):

$$\int \frac{\partial \sigma_r}{\sigma_r} = \int \left(\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} - 1 \right) \frac{\partial r}{r} \tag{4.15}$$

$$\sigma_r = Cr^{\left(\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} - 1 \right)} \tag{4.16}$$

onde C é uma constant oriunda da integral.

Em uma condição onde $r=a'$, $\sigma_r = p_a$ e assim:

$$C = \frac{P_a}{a'^{\left(\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} - 1 \right)}} \tag{4.17}$$

Dividindo (4.16) por (4.17), temos para o regime plástico:

$$\sigma_r = p_a \left(\frac{r}{a'} \right)^{\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} - 1} \tag{4.18}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} p_a \left(\frac{r}{a'} \right)^{\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} - 1} \tag{4.19}$$

Em uma condição onde $r=R$, $\sigma_r = p_r$ e assim:

$$p_r = p_a \left(\frac{R}{a'} \right)^{\frac{1+\text{sen}\phi}{1-\text{sen}\phi}-1} \tag{4.20}$$

Sendo:

$p_r \rightarrow$ pressão radial

$R \rightarrow$ raio até a região elástica

$a' \rightarrow$ espessura da região plástica

Para o regime elástico:

$$\sigma_\theta = p \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - p_r \frac{R^2}{r^2} \tag{4.21}$$

$$\sigma_r = p \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + p_r \frac{R^2}{r^2} \tag{4.22}$$

Como $r=R$, temos que:

$$\sigma_r = p_r \tag{4.23}$$

$$\sigma_\theta = 2p - p_r \tag{4.24}$$

Substituindo (4.24) em (4.11):

$$p_r = \frac{2p - \left(\frac{2c \cos \phi}{1 - \text{sen}\phi} \right)}{\left(\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \right) + 1} \tag{4.25}$$

Os dados utilizados e a geometria do problema podem ser vistos na **Figura 43**.

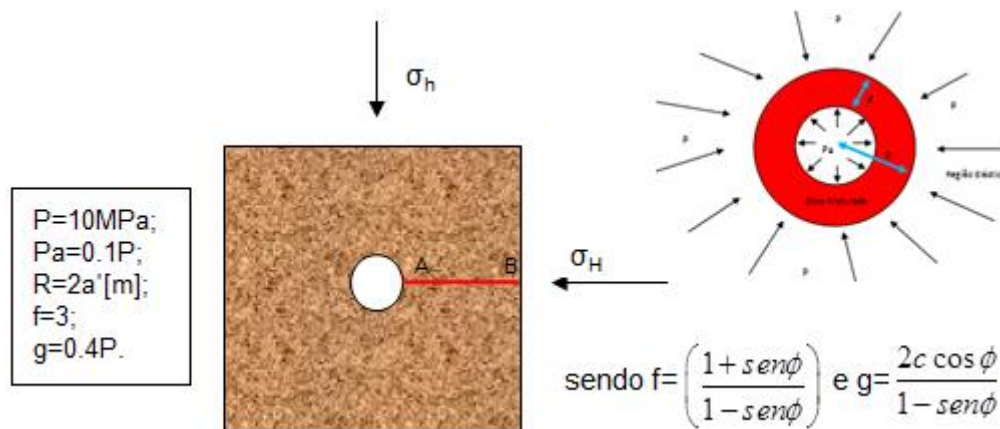


Figura 43 – Esquema e dados para o problema estudado.

A figura 44 traz a variação da tensão radial e tangencial em função do raio em uma seção AB de um poço vertical em uma formação homogênea, isotrópica com comportamento elasto-plástico e com $\sigma_H = \sigma_h$ obtida nas simulações.

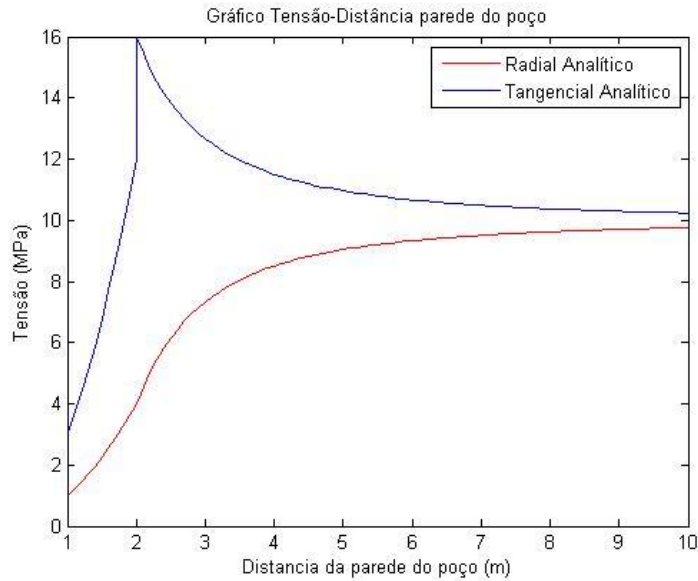


Figura 44 – Variação das tensões principais ao longo do poço (solução analítica para ruptura em rocha).

Pode-se observar que tanto as tensões tangenciais quanto as radiais aumentam de forma distinta quando próximas da parede do poço (região plástica) e tendem a um valor comum na região elástica da rocha. Observa-se também que a tensão tangencial pula de 12MPa para 16MPa na transição do regime plástico para o elástico, o que pode ser justificado pelas diferentes equações utilizadas em cada regime, pois no regime elástico existe o acréscimo do efeito da coesão do material.

4.2.4. Poço Vertical – Análise Numérica (Ruptura em Rocha)

Da mesma forma, foi realizada uma simulação utilizando as condições da solução analítica para rocha fraturada, como apresentado no item anterior. Para tanto, foi usado o pacote de elementos finitos do Abaqus.

A simulação seguiu o mesmo princípio utilizado no item 4.2.2 onde foi considerado $\frac{1}{4}$ do poço e condições de simetria no eixo x (base do modelo) e y (lateral esquerda). O raio do poço e a condição hidrostática de tensão foram mostrados na figura 43.

Na sequência, são apresentados os resultados do modelo numérico para ruptura do maciço rochoso em um campo hidrostático de tensões. A figura 45 apresenta, em vermelho, a zona fraturada que possui espessura de 1m (na solução analítica $a'=1m$). A parte em azul representa região elástica, isto é, a região que não apresentou plastificação.

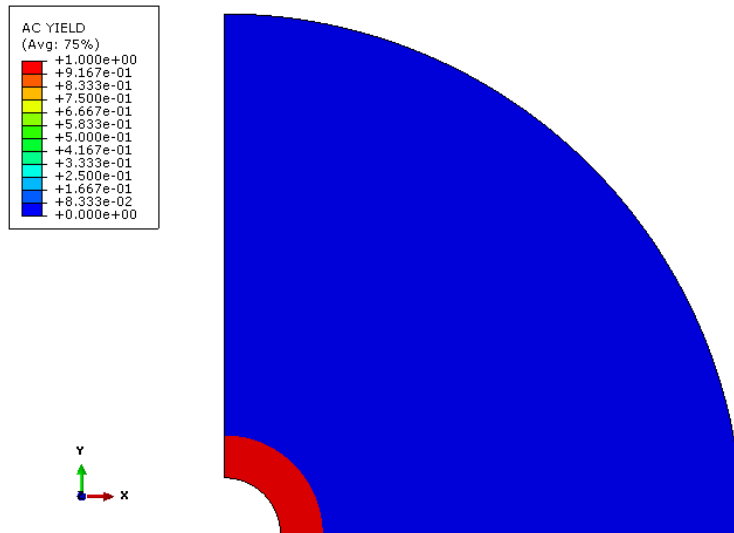


Figura 45 – Região da zona fraturada.

Os resultados das distribuições das tensões podem ser percebidos nas figuras 46 e 47. Nelas, notam-se os efeitos das concentrações de tensões próximas à parede do poço.

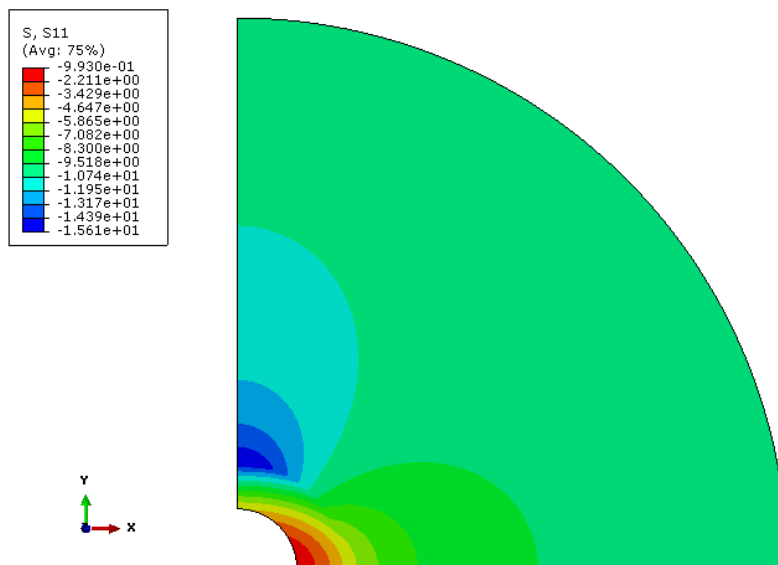


Figura 46 – Distribuição de tensões horizontais para o modelo numérico de ruptura em rocha.

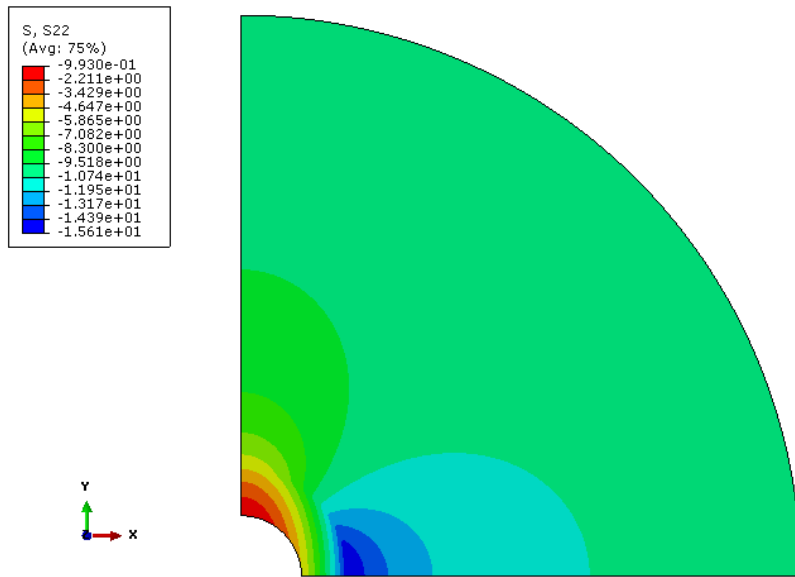


Figura 47 – Distribuição de tensões verticais para o modelo numérico de ruptura em rocha.

A figura 48 apresenta a comparação entre os resultados obtidos numericamente e analiticamente no item anterior. É possível notar que o Abaqus consegue reproduzir bons resultados mesmo para um problema que inclua um material com comportamento elastoplástico.

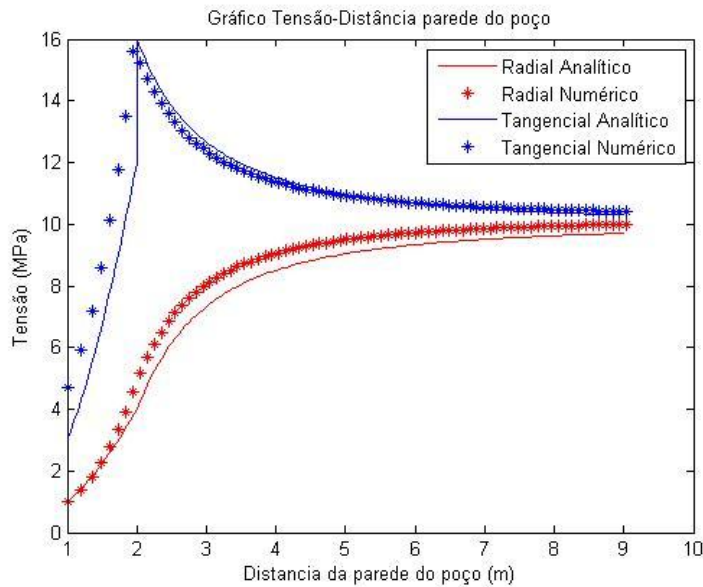


Figura 48 – Comparação dos resultados numéricos x analíticos para rocha fraturada.

4.3. Procedimento Experimental

Neste item, são apresentados os procedimentos dos ensaios realizados por Chavez (2011) para condição de tela centralizada, tela enconstada e *stand alone*. Para os ensaios com a tela centralizada e tela enconstada, o espaço anular rocha-tela foi preenchido com um material granular conhecido como *gravel pack*.

Este experimento foi realizado utilizando uma câmera poliaxial no CENPES (PETROBRAS) e teve como objetivo medir os deslocamentos e as deformações no interior da tela, através de transdutores de deslocamento e *strain gages*.

O presente estudo tem como um dos objetivos a simulação numérica dos três ensaios supramencionados, que serão descritos brevemente a seguir. Caso haja necessidade de um maior aprofundamento, basta consultar o capítulo 5 de Chavez (2011).

4.3.1. Ensaio na Condição de Tela Centralizada

Este ensaio teve como finalidade estudar as deformações transmitidas à tela e o comportamento do *gravel pack* na mesma formação, sob condições anisotrópicas de tensão. Neste ensaio, a tela está centralizada em relação à formação e o espaço anular entre a formação e a tela foi preenchido pelo *gravel pack* como pode ser observado na figura 49.

Para medir as deformações em cada ensaio, foi colocado um transdutor de deslocamentos dentro do tubo, além de sensores de deformação no interior do mesmo. Vale salientar que o ensaio ocorre com a porta da câmara poliaxial fechada, ou seja, em estado plano de deformações.



Figura 49 – Ensaio com a tela centralizada (cortesia Chavez, 2011).

O ensaio tem início com aplicação de tensão confinante ($\sigma_v = \sigma_h$), no qual o acréscimo só é realizado quando a variação do deslocamento mensurado na tela estabilizar. A aplicação da tensão confinante chega até 4,13 MPa. A partir desse nível de tensão, o eixo onde é aplicada a tensão horizontal é fixado, ou seja, não há deslocamento no eixo x e tem início o acréscimo na aplicação de tensão vertical, chegando ao total de 11,03 MPa, como segue na figura 50.

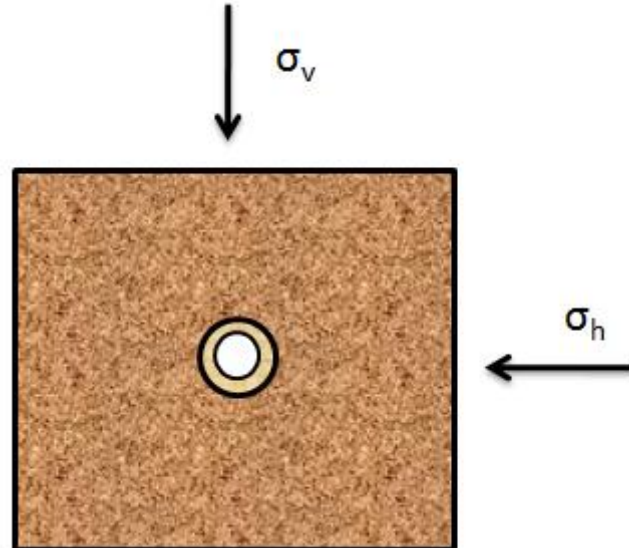


Figura 50 – Esquema de aplicação de tensão com a tela centralizada.

4.3.2. Ensaio na Condição de Tela Encostada

Este ensaio teve a mesma finalidade e seguiu os mesmos passos do anterior (tela centralizada), porém, com uma geometria diferente, isto é, tendo a tela encostada na formação como nas figura 51 e 52 abaixo.



Figura 51 – Ensaio com a tela encostada (cortesia Chavez, 2011).

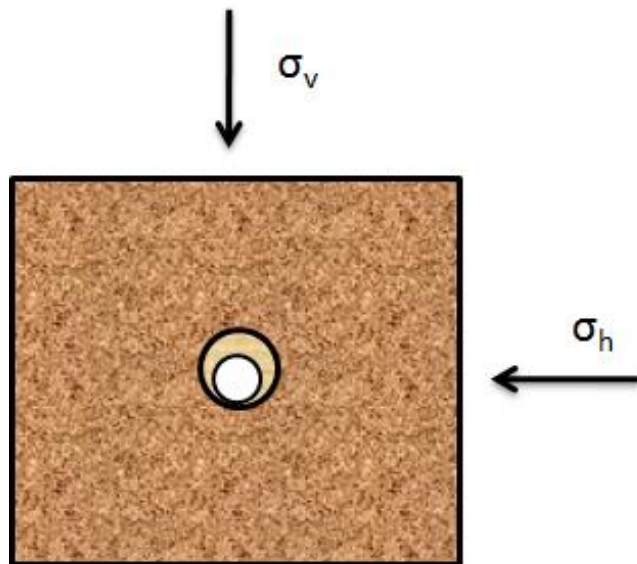


Figura 52 – Esquema de aplicação de tensão para tela encostada.

4.3.3. Ensaio na Condição *Stand Alone*

Segundo Chavez (2011), este ensaio teve como finalidade observar os processos da produção de sólidos no espaço anular da formação e da tela que fica encostada na parede do poço sem a presença do *gravel*, de maneira a avaliar as deformações transmitidas à tela, sob condições anisotrópicas de tensão. Este ensaio difere dos demais devido aos maiores carregamentos aplicados. Durante a etapa de confinamento, as tensões aplicadas foram de 6,8

MPa, enquanto na segunda etapa (fase de acréscimo de tensão vertical) o valor final da tensão vertical foi de 48,3 MPa.



Figura 53 – Ensaio para o caso *stand alone* (cortesia Rafael Chavez, 2011).

4.4. Modelagem Numérica

Neste sub item é apresentada a modelagem dos casos estudados. Para as simulações dos modelos nas condições de tela centralizada e tela encostada, foi utilizado o Abaqus Standard enquanto para as simulações do modelo *stand alone*, devido a sua alta não linearidade, utilizou-se o Abaqus Explicit.

4.4.1. Descrição do Modelo Numérico

4.4.1.1. Geometria Analisada

Foram utilizados modelos 2D para representar o experimento, uma vez que o ensaio na câmara poliaxial foi realizado com a porta fechada, ou seja, estado plano de deformação. Os modelos contam com um plano de simetria que permite utilizar a metade do poço para os casos de tela encostada e *stand alone* e $\frac{1}{4}$ do poço para o modelo na condição de tela centralizada. Dessa forma, o

número de equações a serem calculadas e, conseqüentemente, o tempo computacional requerido foram reduzidos.

A geometria do poço, detalhada na figura 54, foi criada como um corpo do tipo deformável e possui as dimensões apresentadas na tabela 3:

Tabela 3 – Geometria dos modelos.

Diâmetro do Poço	6 cm
Altura Formação	30 cm
Comprimento Formação	30 cm
Espessura Tela	0.52 mm
Diâmetro Tela	38 mm

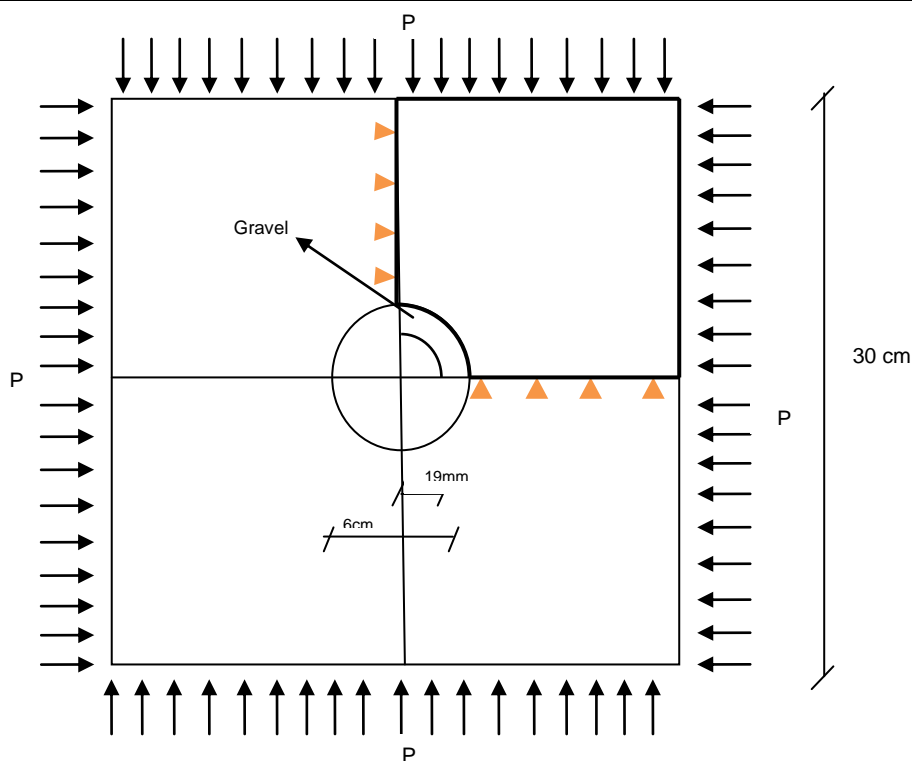


Figura 54 – Esquema de aplicação de tensão para o modelo com a tela centralizada.

4.4.1.1. Malhas Utilizadas

Os elementos utilizados para a geração da malha são contínuos bidimensionais, lineares, quadrilaterais do tipo CPE4R (estado plano de deformação) e com número fixo de nós (quatro). Como a região de concentração de tensões fica ao redor da parede do poço, foi realizado um refinamento da malha neste local.

Durante as análises, foi feita uma análise de sensibilidade, na qual observou-se que a utilização de elementos quadráticos apresentavam os

mesmos resultados dos elementos lineares, porém com um custo computacional mais elevado.

Nos modelos de tela centralizada, encostada e *stand alone* foram utilizados 2520, 4080 e 3720 elementos, respectivamente. Detalhes da malha do poço podem ser vistos na figura 55.

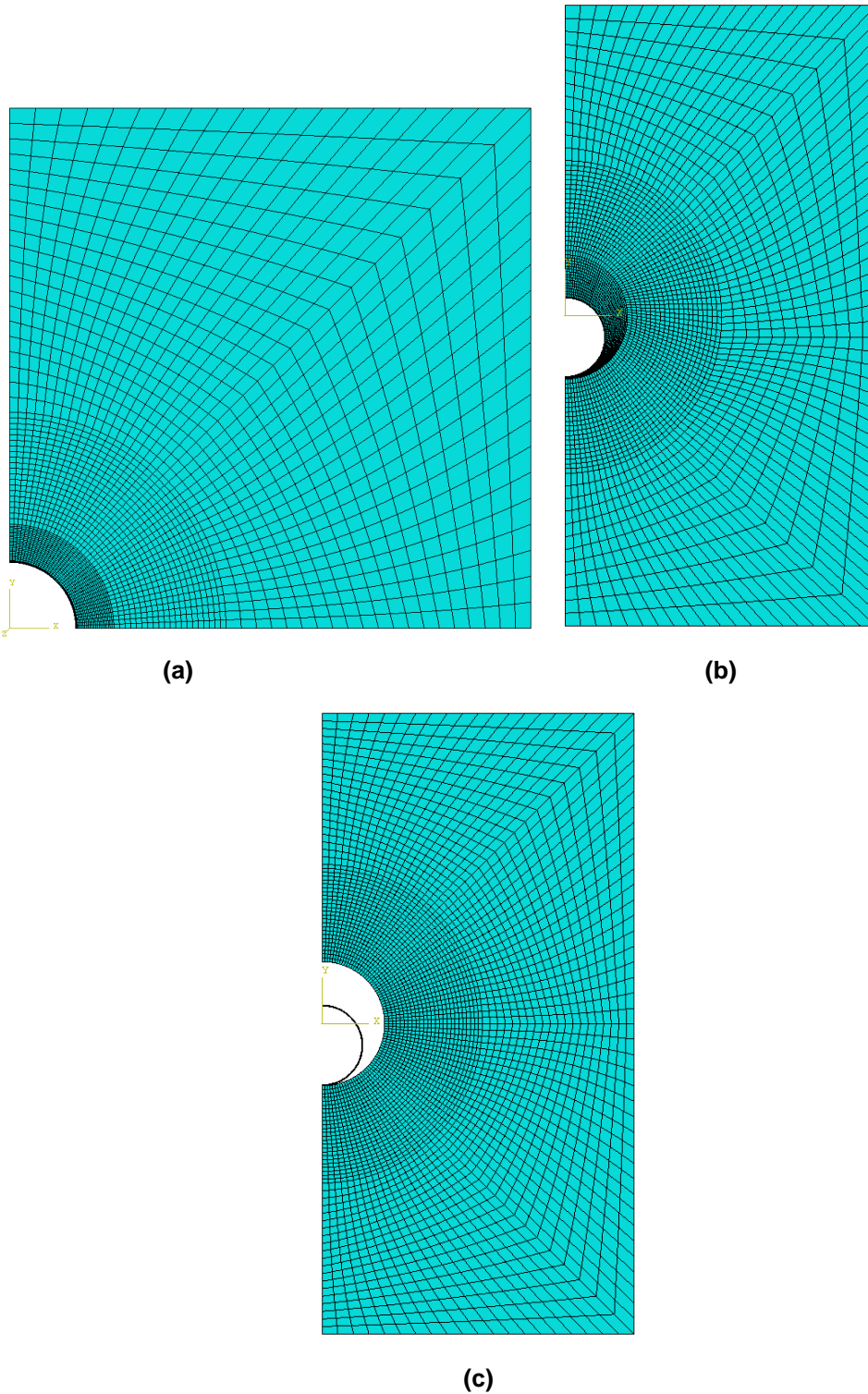


Figura 55 – Malha do modelo 2D: (a) Tela Centralizada; (b) Tela Encosada; (c) *stand alone*.

4.4.1.2. Propriedades dos Materiais

Para a simulação do modelo de elementos finitos é necessário o conhecimento de propriedades do material constituinte da formação, do *gravel* e da tela. A formação e a tela foram consideradas como materiais de comportamento elasto-plástico, devido às deformações plásticas observadas por Chavez (2011) para o ensaio *stand alone*.

Em razão da dificuldade de se realizar um ensaio para obtenção de parâmetros do *gravel*, já que se faz necessária a aplicação de tensão na ordem de MPa, só foi possível obter as propriedades da formação e da tela. Na falta de referências mais precisas e considerando que o *gravel* possui as mesmas características da areia, foram arbitrados, de acordo com a literatura, valores para o ângulo de atrito, para coesão e para o coeficiente de *poisson*.

Feito isso, foram realizadas algumas análises e essas foram comparadas com os ensaios de tela centralizada e encostada. Observou-se, então, que, para um determinado valor do módulo de elasticidade, o *gravel* gerava bons resultados para um dos ensaios, mas para o outro ensaio era necessário utilizar um módulo de elasticidade diferente. Dessa forma, foi possível concluir que o *gravel* tem um comportamento elástico não linear.

Assim, durante as simulações e comparações com os resultados experimentais, foi possível obter diferentes valores do módulo de elasticidade para o *gravel* até encontrar uma faixa de valores compatíveis com os resultados dos ensaios alcançados por Chavez (2011). Com isso, foi desenvolvida uma sub-rotina no Abaqus que faz o ajuste entre a variação do módulo de elasticidade e o carregamento aplicado. A figura 56 apresenta o funcionamento da sub-rotina para um ensaio triaxial.

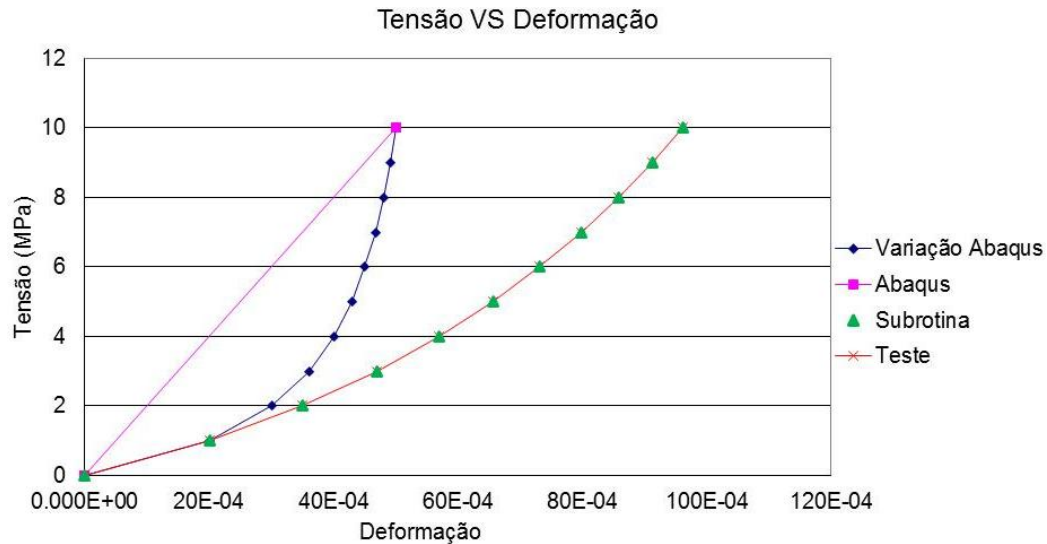


Figura 56 – Ajuste da variação do módulo de elasticidade do *gravel* com o carregamento aplicado em um ensaio triaxial (Abaqus).

Pelo gráfico, observa-se que a variação do módulo de elasticidade no Abaqus não considera o incremento da deformação do passo anterior. Ou seja, o valor da tensão final determina o valor da deformação final (linhas azul e rosa). A subrotina usa a variação do módulo de elasticidade somando o valor da deformação anterior.

A partir dessa subrotina, foi possível simular um ensaio de compressão uniaxial para obter as curvas de Tensão (MPa) X Deformação e Deformação Volumétrica X Deformação Axial do *gravel* (figura 57), comprovando a não linearidade do *gravel*.

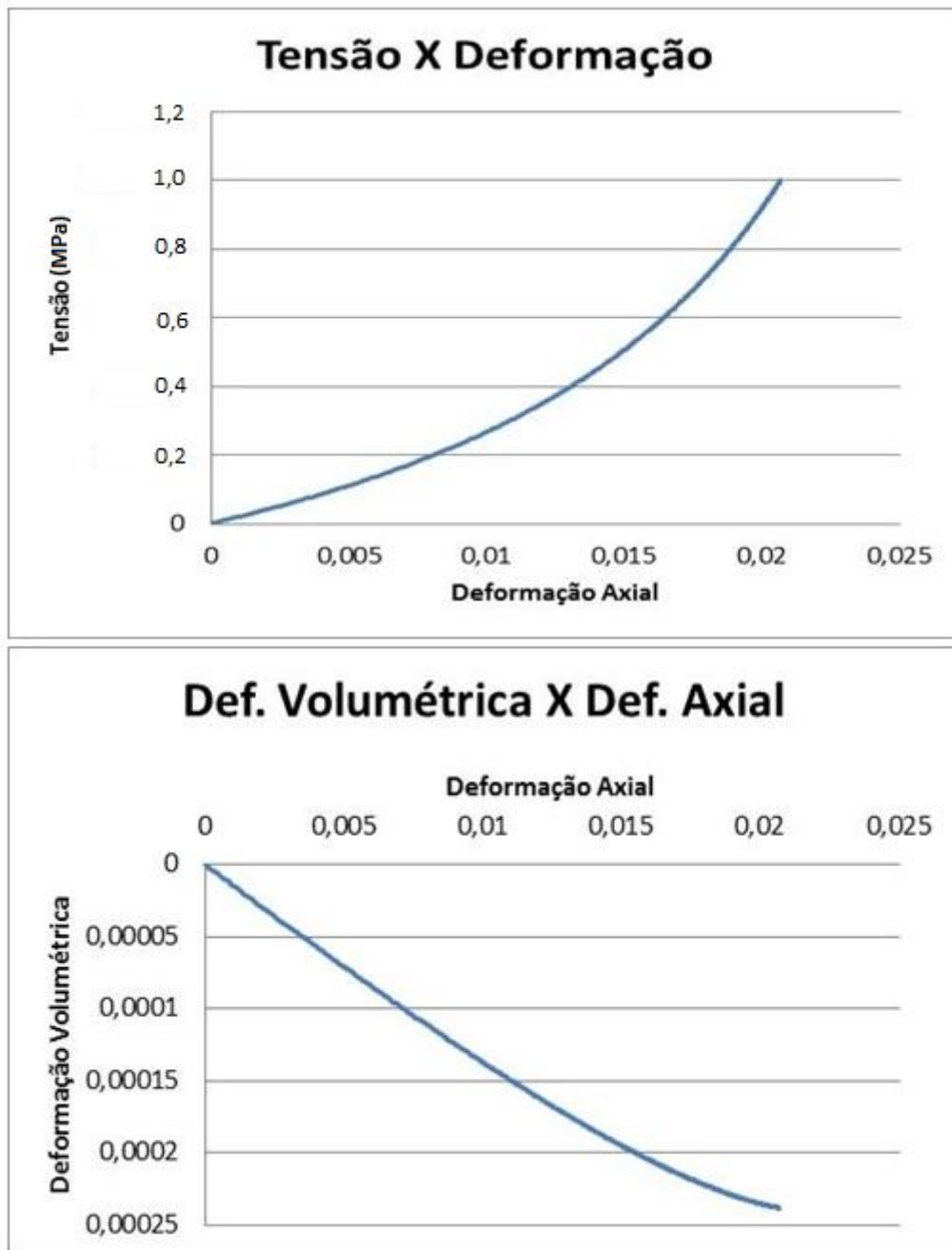


Figura 57 – Comportamento do *gravel*.

Os valores utilizados para os diferentes materiais do modelo estão especificados na tabela 4 e seguem os valores obtidos nas análises de Chavez (2011) e Villarroel (2009).

Tabela 4 – Propriedades dos materiais.

Propriedades	Formação	Gravel	Tela
Módulo de Elasticidade (E)	2,7GPa	0,9 – 200 MPa	90,64GPa
Coef. Poisson (nu)	0,27	0,34 - 0,35	0,32
Coesão (c) – Mohr Coulomb	5,51	0	-
Ângulo de Atrito (Mohr Coulomb)	28°	32°	-
Tensão de Escoamento	-	-	484 MPa
Diâmetro do Poço		6 cm	
Altura Formação		30 cm	
Comprimento Formação		30 cm	

Como no ensaio *stand alone* ocorreu o *breakout*, torna-se necessário conhecer o comportamento do material após seu ponto de escoamento (pós-pico). Como esses dados não foram obtidos experimentalmente foi preciso estimá-los. Verificou-se que a formação sofre amolecimento após a plastificação da mesma.

4.4.1.3. Carregamento, Condições de Contorno

Com o objetivo de reproduzir os testes experimentais, algumas condições de contorno específicas foram utilizadas. Por *default*, o Abaqus considera uma etapa inicial para atribuição das condições de contorno iniciais, sem aplicação de carregamento (figura 58 - a). Com isso, durante o primeiro passo (figura 58 - b), foi aplicada uma pressão de confinamento nas direções X e Y. Após esta etapa de confinamento, a extremidade direita da formação, onde houve a aplicação da pressão na direção X, foi restringida de movimentar-se na direção X. Assim, começa a aumentar a pressão na direção Y (etapa de acréscimo). As etapas podem ser observadas na figura 58.

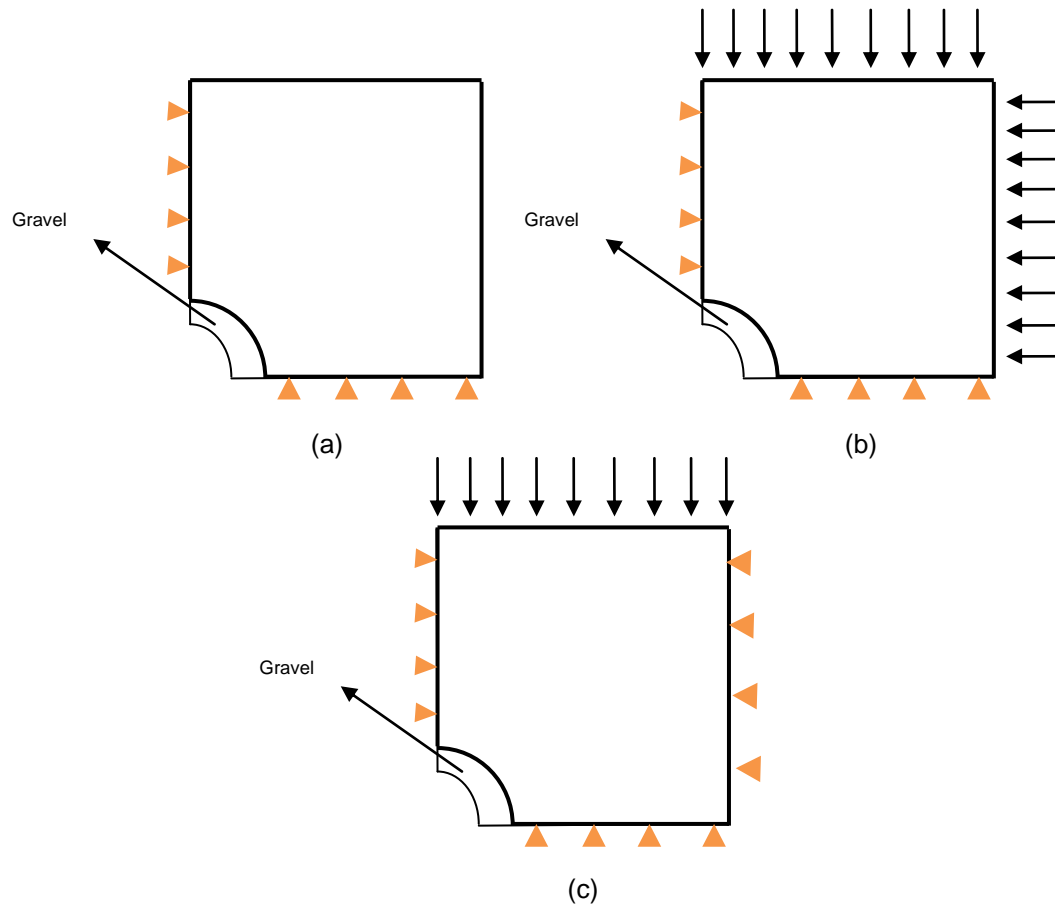


Figura 58 – Malha do modelo 2D: (a) Etapa inicial (condição inicial); (b) Etapa confinamento – aplicação das tensões de confinamento; (c) Etapa de Acréscimo – aumento da tensão na direção Y.

Além disso, para a condição de contorno do modelo *stand alone*, foi necessário garantir que a tela estivesse colada à formação, caso contrário qualquer perturbação faria com que a tela mudasse de posição (lembrando que nesse modelo foi simulado metade do poço). Com isso, foi utilizado no Abaqus uma restrição do tipo *Tie* no contato tela-formação na base do anular, garantindo que os nós que estão no contato da tela com a formação não se separariam durante a análise.