4
Validação do uso do programa ABAQUS

Os resultados de simulações do programa numérico de elementos finitos ABAQUS foram verificados por meio de três exercícios de simulação numérica de casos da literatura.

O primeiro exercício é a verificação da simulação de uma escavação de um poço de petróleo em estado de deformação plana num material elástico. Neste exercício procura-se comparar as magnitudes das tensões radial e tangencial, após a perfuração, obtidas da solução numérica do ABAQUS com as da solução analítica de Kirsch (1898) para um meio elástico. A comparação destes resultados amostra uma boa relação quantitativa.

O segundo exercício é a simulação das tensões *in situ* de uma esfera de sal disposta num meio contínuo elástico que representa a formação rochosa. Os resultados das tensões horizontal, vertical e de von Mises, do programa ABAQUS são comparados com os resultados numéricos de um programa de elementos finitos elaborado no laboratório Sandia, (Fredrich et al., 2003). Esta comparação mostra a capacidade do ABAQUS de gerar resultados qualitativos apropriados o que quer dizer que a ferramenta foi bem usada.

O terceiro exercício trata-se da simulação de uma escavação de um poço com revestimento elástico num meio visco-elástico num estado de deformação plana. Os resultados da solução numérica do ABAQUS são comparados com os resultados da solução analítica, apresentada por Gnirk & Johnson (1964). É importante especificar que se trata de dois diferentes materiais, porém a solução mostra a mesma sequência ao longo do tempo na resposta da tensão tangencial e radial no poço e no revestimento.

4.1. Primeiro exercício de validação: resposta elástica do poço

Este exercício corresponde à simulação de uma escavação de um poço de petróleo em estado de deformação plana num material elástico. São comparadas as magnitudes das tensões radiais e tangenciais, após a perfuração, obtidas da solução numérica do ABAQUS com as obtidas pela solução analítica de Kirsch (1898) para um meio elástico.

Assim foi estudada a perfuração de um poço de petróleo de 0,216 m (8½") de diâmetro em uma seção de ¼ de poço como apresentado na Figura 4.1.

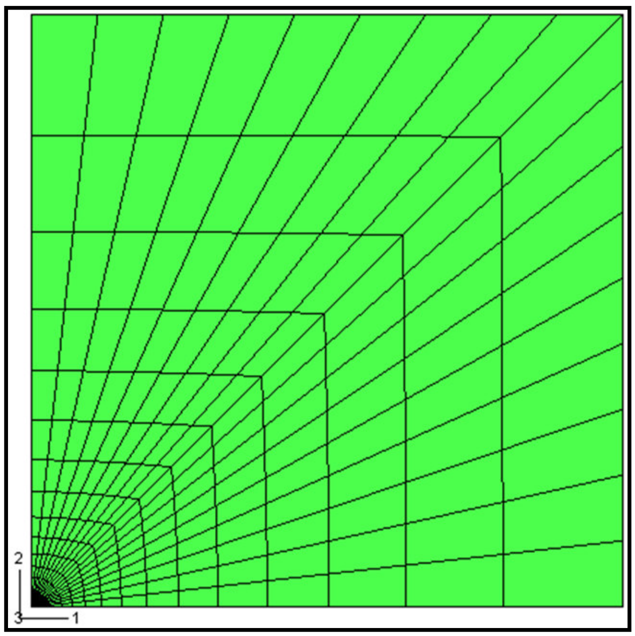


Figura 4.1: Malha de elementos finitos representando um quarto de poço.

A Figura 4.1 trata-se de uma seção de poço, especificamente um quarto de poço, localizado numa camada de sal. O propósito de usar uma seção de um quarto de poço é a redução do tamanho da malha e do trabalho computacional. A disposição da malha também permite estudar o comportamento estrutural em deformação plana, isto é, deformações nulas e tensões não são nulas na direção perpendicular com o plano formado pelos eixos 1 e 2.

A construção da malha de elementos finitos tem a principal característica de representar um quarto do poço do petróleo, o tamanho da malha é 20 vezes o raio do poço, isto porque nesta distância após a perfuração as tensões se normalizam e são iguais as tensões in situ. Isto foi testado e verificado no programa Abaqus, permitindo a adoção do tamanho definitivo da malha.

Considerando que o raio é 0,108 m (4¼”), 20 vezes o raio seria equivalente a 2,16 m. Desta forma as dimensões da malha são 2,16 m x 2,16 m. Esta malha tem 18 elementos finitos triangulares de 3 nós (CPE3) e 276 elementos finitos quadrilaterais de deformação plana (CPE4) e um total de 248 nós na malha inteira.

A Figura 4.2 ilustra o detalhe da malha mostrada na Figura 4.1.

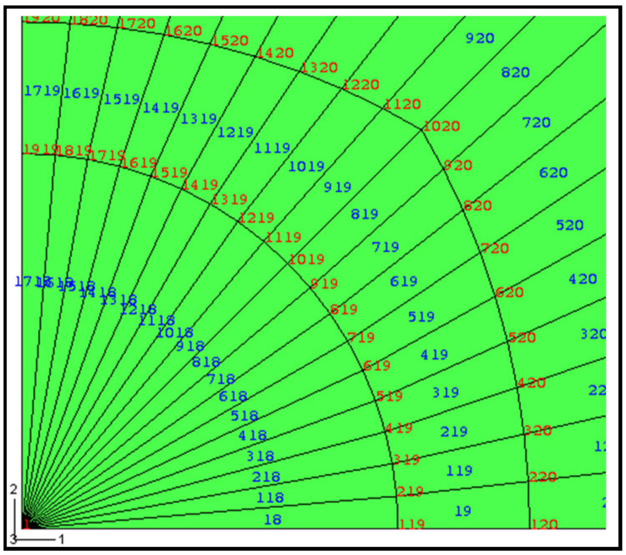


Figura 4.2. Zoom da malha de elementos finitos.

A profundidade de estudo é de 2700 m (8858,3’) abaixo do nível do mar. As principais características, do problema são apresentadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Principais características do primeiro caso de validação.

Material	Densidade	Profundidade
Água do mar	1027 Kg/m^3 (64,11 lb/ft^3)	0 a -500 m (0 a -1640,4 pés)
Outros sedimentos	1 psi/ft = 2306,66 Kg/m^3 (144 lb/ft^3)	-500 a -2500 m (-1640,4 a -8202,1 pés)
Camada de Sal	2160 Kg/m^3 (134,84 lb/ft^3)	-2500 a -2700 m (-8202,1 a -8858,27 pés)

A transferência de todo o carregamento para a seção em estudo, localizada a 2700 m (8858,27 pés) abaixo do nível do mar (-2700 m), é realizada considerando as tensões em três áreas (água do mar, outros sedimentos e a camada de sal).

A primeira área é a água de mar representada pelo peso da água de mar. A segunda área são os outros sedimentos representados pelas camadas de rocha, localizadas entre a água do mar e a camada de sal, estas camadas de rocha, tem a densidade de 2306,66 kg/m^3 (1 psi/ft). Este valor é considerado ideal para simular a sobrecarga da formação rochosa na indústria de petróleo.

Finalmente, a camada de sal que representa a rocha de sal foi escolhida em função ao principal tipo de sal que é a halita, cujo peso específico é 2160 Kg/m^3, segundo Medeiros (1999). Nesta simulação, só foi usada a fase elástica do programa Abaqus, pois pretendia acompanhar o comportamento elástico e assim comparar com os resultados das equações de Kirsch. Os elementos finitos analisados são aqueles localizados na parte inferior ao longo do eixo 1 apresentados na Figura 4.1.

Das Figuras 4.1 e 4.2 pode-se observar que existem dois tipos de elementos finitos usados para simular a seção de camada de sal, explicitamente ao que se refere do poço e do resto da seção. Dentro da parte circular ou seja o poço propriamente dito estão mostrados elementos triangulares de três nós e no resto da malha estão apresentados elementos quadrilaterais.

Os eixos representados pelos números 1, 2 e 3 correspondem aos eixos x, y e z. No primeiro passo de simulação foram ditados os impedimentos nos deslocamentos de certos nós isto é os nós localizados nas ordenadas da parte extrema esquerda da malha e os nós localizados na parte inferior nas abscissas da Figura 4.1 foram impedidos de deslocamento nas direções perpendiculares aos eixos, simulando assim a continuidade do poço.

Depois no seguinte passo foi realizado o carregamento das tensões repassadas em toda a malha e também as tensões dos empuxos laterais isto é, nos elementos da lateral direita e nos elementos da parte superior extrema, foi adotado um coeficiente de empuxo igual a 1 (K_o=1), $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y$, e finalmente foi simulada a perfuração do poço. Depois de simulada a resposta do poço devido à perfuração, os resultados foram comparados aos da formulação de Kirsch apresentada por Bradley (1979) nas Equações 4.1 e 4.2.

O primeiro caso de validação baseia-se na solução de Kirsch (1898), citada por Bradley (1979) e expressa por:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}\right)\cdot\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\left(\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\right)\cdot\left(1+\frac{3\cdot a^4}{r^4}-\frac{4\cdot a^2}{r^2}\right)\cdot\cos(2\theta)+\tau_{xy}\cdot\left(1+\frac{3\cdot a^4}{r^4}-\frac{4\cdot a^2}{r^2}\right)\cdot \sin(2\theta)+p_w\cdot\frac{a^2}{r^2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}\right)\cdot\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\left(\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\right)\cdot\left(1+\frac{3\cdot a^4}{r^4}\right)\cdot\cos(2\theta)-\tau_{xy}\cdot\left(1+\frac{3\cdot a^4}{r^4}\right)\cdot\sin(2\theta)-p_w\cdot\frac{a^2}{r^2} \quad (4.2)$$

Onde σ_r é a tensão normal efetiva na direção radial, σ_x é a tensão *in situ* na direção x, σ_y é a tensão *in situ* na direção y, a é o raio do poço, r é a distância radial a partir do eixo do poço, θ é o ângulo medido no sentido anti-horário, no plano x-y, a partir do eixo x, σ_θ é a tensão normal efetiva na direção tangencial e p_w é a tensão equivalente devido à pressão do peso de fluido de perfuração.

Estes resultados são apresentados na Figura 4.3. Nesta figura pode-se observar que as tensões radiais e tangenciais em regime elástico obtidas do programa comercial e da solução de Kirsch apresentam os mesmos valores, representando por tanto a primeira validação.

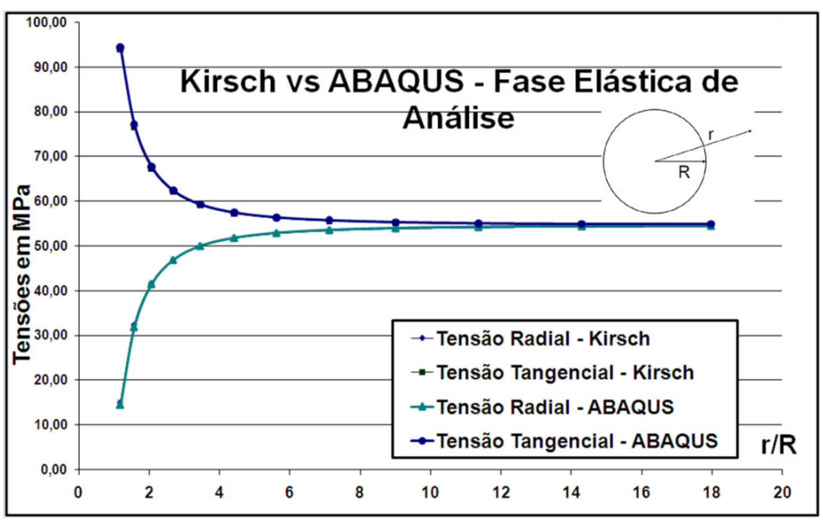


Figura 4.3: Validação elástica, resposta elástica do Abaqus e formulação de Kirsch (1898).

4.2. Segundo exercício de validação: simulação de tensões in-situ em corpos de sal

Para a segunda validação foi escolhida uma simulação numérica que reproduz as tensões *in situ* de uma esfera de sal em um meio homogêneo elástico que representa a formação rochosa (Figuras 4a e b). Os resultados das tensões vertical, horizontal e de von Mises, do programa ABAQUS foram comparados com os resultados numéricos de um programa de elementos finitos elaborado no laboratório Sandia, (Frederich et al., 2003). Esta comparação mostra que a ferramenta ABAQUS foi bem usada.

Também foram estudadas as feições em camada e diápiro de sal (Figuras 4c e d), cujos resultados convergem no mesmo critério de semelhança que o corpo de sal esférico. Mas por questões de foco no trabalho não foram comentados nesta tese.

As tensões: vertical, horizontal e de von Mises, especificadas nas Figuras 4.6-4.8 respectivamente, representam os resultados do ABAQUS e foram identificadas como S33, S11 e SM respectivamente.

Na Figura 4.4 pode se observar o trabalho original realizado por Frederich et al. (2003), nesta figura esta apresentada a quarta parte: de uma esfera de sal, de uma camada de sal e de um diápiro de sal, respectivamente de esquerda a direita. O objetivo de usar só uma quarta parte de cada volume geométrico se deve ao critério de economizar o uso da malha de elementos finitos e, portanto redução no tempo de computação dos resultados.

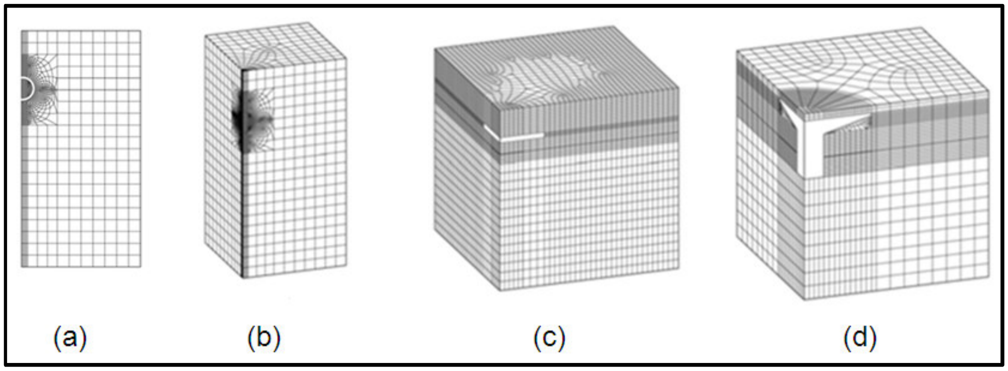


Figura 4.4: Corpos de sal na formação rochosa, de esquerda para direita: (a) vista lateral da esfera (b) quarta parte de uma esfera de sal e da formação, (c) camada de sal e (d) diápiro de sal (Modificado de Frederich et al., 2003).

A partir do trabalho de Frederich et al. (2003), tenta se reproduzir os mesmos corpos geométricos no Abaqus. Estes corpos de sal foram repetidos no programa comercial com as mesmas condições de carregamento e condições de contorno. Como dito anteriormente neste subitem trata-se somente a esfera de sal.

Na Figura 4.5, estão apresentados os três corpos de sal e o meio contínuo que representa a formação rochosa elaborados no Abaqus. Nota-se no centro em cor azul o corpo de sal propriamente dito e ao redor em diferentes cores o material que equivale à formação rochosa. Foram usados as mesmas propriedades do exercício anterior (Mackay et al., 2008).

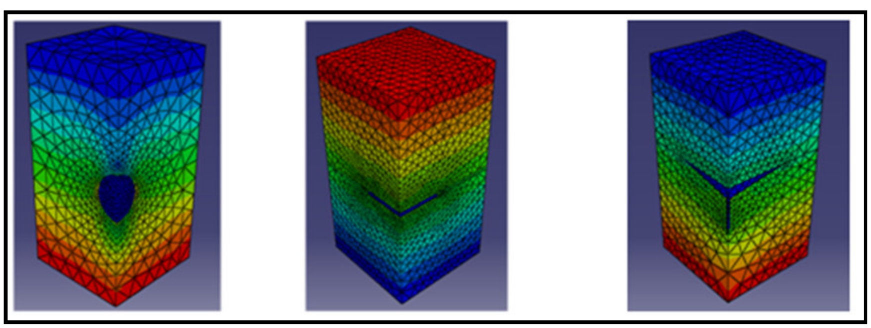


Figura 4.5: Simulação numérica de corpos de sal no Abaqus. De esquerda a direita: (i) corte de uma esfera de sal, (ii) camada de sal e (iii) diapiro de sal. (Modificado de Mackay et al., 2008).

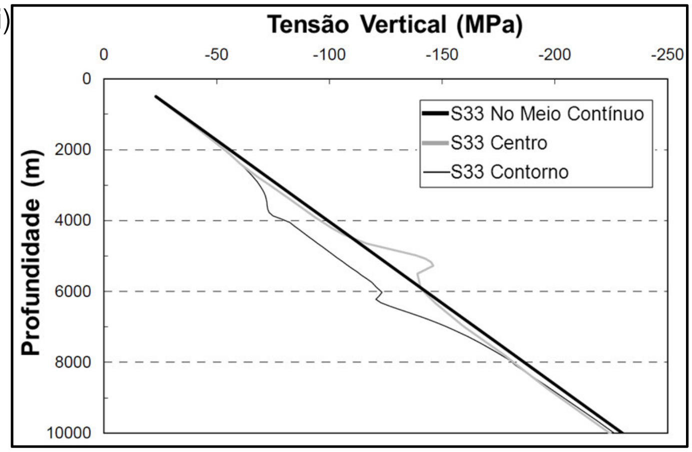
Depois de realizar as simulações no programa comercial os resultados do programa Abaqus são similares aos das simulações realizadas por Frederich et al. (2003). Um exemplo destas validações é a simulação de uma esfera de sal de 2000 m, a profundidade do topo da esfera esta a 4000 m de profundidade e a base da esfera esta a 6000 m de profundidade.

A malha de elementos finitos deste exemplo é a esfera de sal representada por um quarto de esfera e o resto representa a formação rochoso. Esta malha está exposta na parte esquerda da Figura 4.5 como (i) corte de uma esfera de sal, conta com 4625 nós e 24119 elementos finitos (tetraedro de 4 nós). As dimensões da malha são de 5000 m x 5000 m x 10000 m. As condições de contorno deste exercício são que na parte inferior é dizer nos nós localizados na base da malha os deslocamentos perpendiculares são impedidos, é dizer são iguais a 0, na parte interna é dizer os nós localizados nas duas faces que estão em evidencia na figura os deslocamentos perpendiculares ao plano das faces são iguais a 0. Nas faces que estão atrás da malha a pressão equivalente da sobrecarga é acionada. Também é levado em conta o peso próprio dos estratos, para que no inicio toda a estrutura esteja em equilíbrio.

As Figuras 4.6 a 4.8 ilustram os resultados obtidos da simulação da esfera de sal por Frederich et al. (2003) para a tensão vertical (Figura 4.6), tensão horizontal (Figura 4.7) e tensão de von Mises (Figura 4.8).

As simulação realizada com a esfera de sal fornece a trajetória das tensões vertical, horizontal e de von Mises. Por dentro do corpo de sal especificado como “Centro”, na interface do corpo do sal com a formação especificado como “Contorno” e no meio contínuo longe das perturbações causadas pelos corpos de sal especificado como “No meio continuo” respectivamente nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8. e apresentam os resultados obtidos do Abaqus, os quais são comparados aos resultados do trabalho de Frederich et al., 2003.

i)



ii)

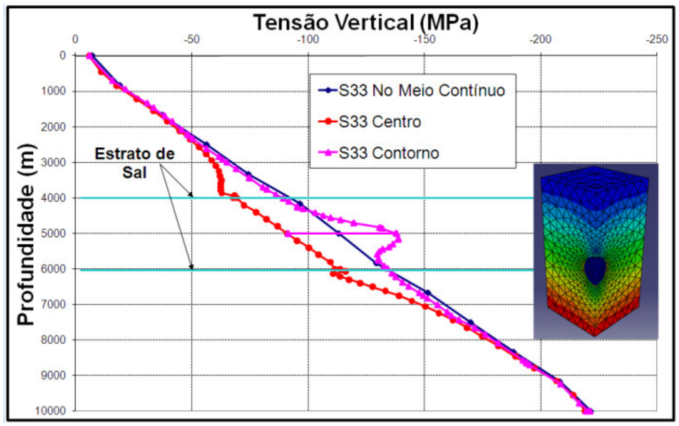


Figura 4.6: Tensões verticais para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde S33 é a tensão vertical.

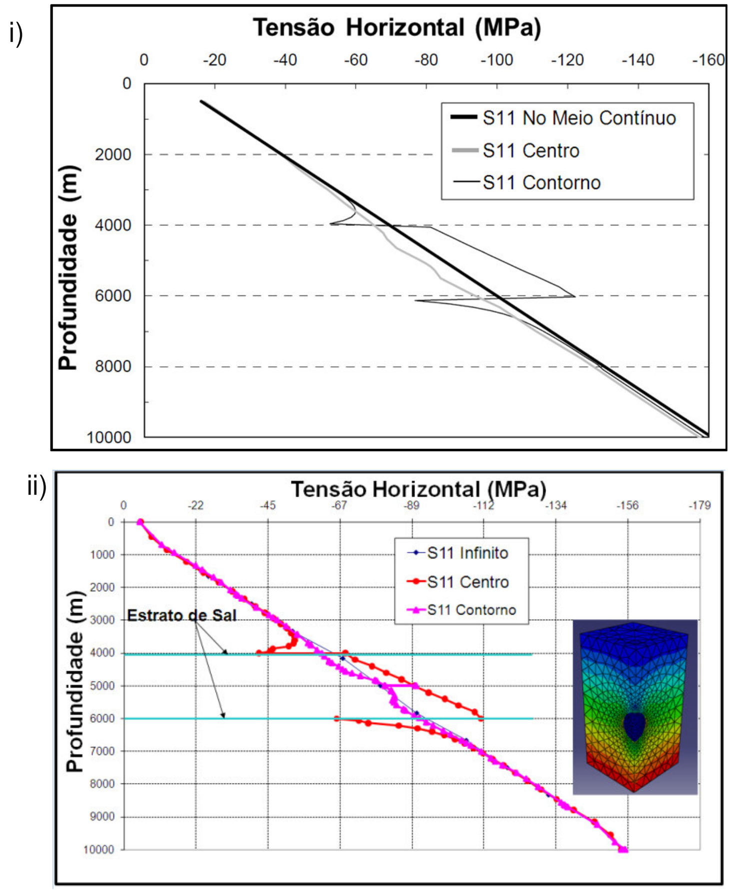


Figura 4.7: Tensões horizontais para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde S11 é a tensão horizontal.

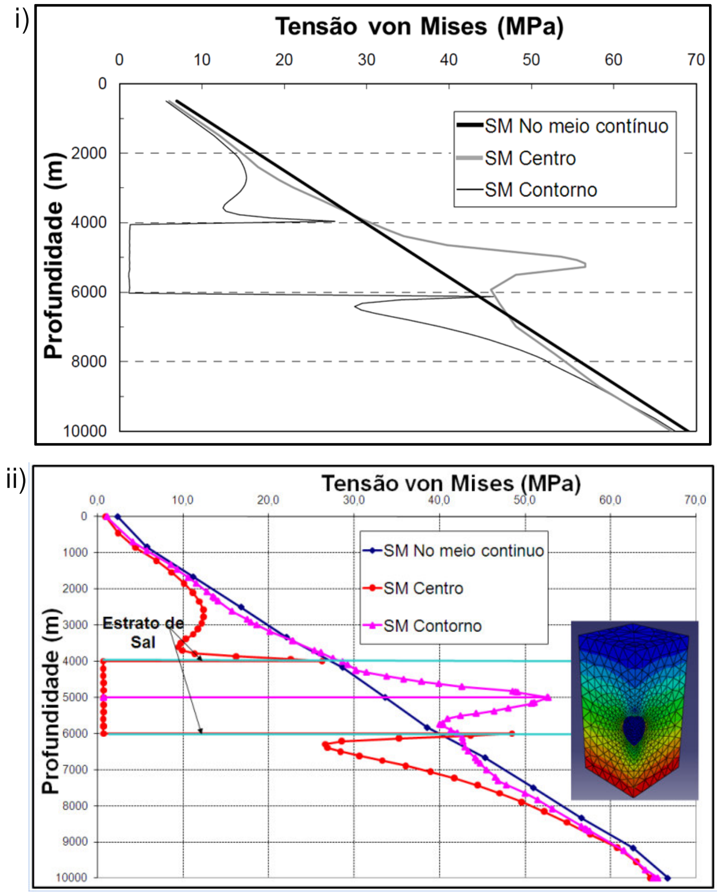


Figura 4.8: Tensões de von Mises para uma esfera de sal: i) segundo Frederich et al. (2003) ii) exercício de simulação realizado no ABAQUS. Onde SM é a tensão de von Mises.

Estas comparações permitem concluir que os resultados do programa comercial coincidem com os de Frederich et al. (2003).

Além da semelhança de resultados entre as duas soluções observa-se que as tensões horizontais, verticais e de von Mises no centro e na fronteira do corpo de sal podem ser consideravelmente diferentes das tensões horizontais, verticais e de von Mises no meio contínuo. Observa-se também que as tensões principais nem sempre correspondem às tensões vertical e horizontal, visto que a tensão vertical nem sempre será a tensão principal máxima.

4.3. Terceiro exercício de validação: simulação de um poço com revestimento elástico num meio visco-elástico

Trata-se da comparação de duas soluções: (i) uma solução analítica que apresenta as equações das tensões tangencial e radial dependentes do tempo para um poço com revestimento elástico num meio visco-elástico e (ii) de uma solução numérica no programa ABAQUS para um poço com as mesmas características geométricas.

Deve-se especificar e salientar que estas duas soluções tratam do mesmo problema. Porém, os materiais são diferentes para cada solução. A solução analítica é apresentada por Gnirk & Johnson (1964) e é baseada nos modelos reológicos. Para este caso de estudo, adotou-se o modelo de Burgers. A solução numérica está especificada para um material regido pela lei constitutiva de fluência de duplo mecanismo de deformação apresentado no Capítulo 5.

Neste exercício, o revestimento é representado pelo concreto e o meio visco-elástico é representado pelo sal. A Figura 4.9 apresenta as características geométricas do poço.

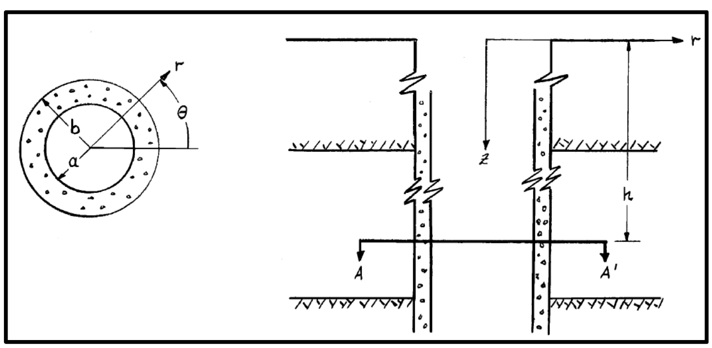


Figura 4.9: Geometria do poço (modificado – Gnirk & Johnson, 1964).

Segundo a solução analítica de Gnirk & Johnson (1964), a relação tensão-deformação para o modelo de Burgers é:

$$c_2\ddot{\sigma}(t) + c_1\dot{\sigma}(t) + c_0\sigma(t) = \ddot{\varepsilon}(t) + d_1\dot{\varepsilon}(t) \quad (4.3)$$

Onde c_0, c_1, c_2 e d_1 são:

$$c_0 = \frac{E_2}{\mu_1 \cdot \mu_2} \quad (4.4)$$

$$c_1 = \frac{E_2}{E_1 \cdot \mu_2} + \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \tag{4.5}$$

$$c_2 = \frac{1}{E_1} \tag{4.6}$$

$$d_1 = \frac{E_2}{\mu_2} \tag{4.7}$$

Onde E_1, E_2, μ_1, μ_2 são os módulos de elasticidade e de Poisson respectivamente para o modelo de Burgers apresentado no subitem de modelos reológicos (3.2.1) desta tese.

A partir da Equação 4.3 e através da solução por transformadas de Laplace pode se definir as seguintes equações:

$$P(t)_b = P_o \left[\frac{c_0}{m_1 \cdot m_2} + \frac{e^{m_1 \cdot t}}{m_1(m_1 - m_2)}(c_0 + c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_1^2) - \frac{e^{m_2 \cdot t}}{m_2(m_1 - m_2)}(c_0 + c_1 \cdot m_2 + c_2 \cdot m_2^2)\right]\left[\frac{1}{c_2 + M}\right] \tag{4.8}$$

Onde $P(t)_b$ é a tensão aplicada dependente do tempo e P_o a tensão aplicada respeito a pressão litostática.

Onde m_1 e m_2 são as raízes s de :

$$(c_2 + M) \cdot s^2 + (c_1 + M \cdot d_1) \cdot s + c_0 = 0 \tag{4.9}$$

Onde M é:

$$M = \left[\frac{b^2}{(b^2 - a^2)}\right]\left[C \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + D\right] \tag{4.10}$$

Onde C e D:

$$C = \frac{1 + \nu'}{E'} \tag{4.11}$$

$$D = \frac{1 - \nu' - 2 \cdot \nu'^2}{E'} \tag{4.12}$$

Onde ν' e E' são o módulo de Poisson e o módulo de elasticidade respectivamente, para o revestimento representado por um material elástico.

Assim a tensão radial e tangencial no concreto elástico é:

$$\sigma'_r = P_b\left[\frac{b^2}{(b^2-a^2)}\right]\left[1-\left(\frac{a}{r}\right)^2\right] \quad (4.13)$$

$$\sigma'_\theta = P_b\left[\frac{b^2}{(b^2-a^2)}\right]\left[1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right] \quad (4.14)$$

Onde σ'_r é a tensão radial no concreto elástico e σ'_θ a tensão tangencial no concreto elástico.

A tensão radial e tangencial no meio visco-elástico:

$$\sigma_r = P_b\left(\frac{b}{r}\right)^2 + P_o\left[1-\left(\frac{b}{r}\right)^2\right] \quad (4.15)$$

$$\sigma_\theta = -P_b\left(\frac{b}{r}\right)^2 + P_o\left[1+\left(\frac{b}{r}\right)^2\right] \quad (4.16)$$

Os valores de entrada da solução numérica e da própria formulação são apresentados no Capítulo 5.

Os dados de entrada da solução analítica são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados de entrada do problema.

E1	20400 MPa	**E'**	200000 MPa
E2	2040 MPa	**v'**	0,3
N1	23611111 MPa*day	**a**	0,105 m
N2	236111,1 MPa*day	**b**	0,18071 m
Po	53,87 MPa		

Nas Figuras 4.10 e 4.11 pode-se observar os resultados da solução analítica e da solução numérica.

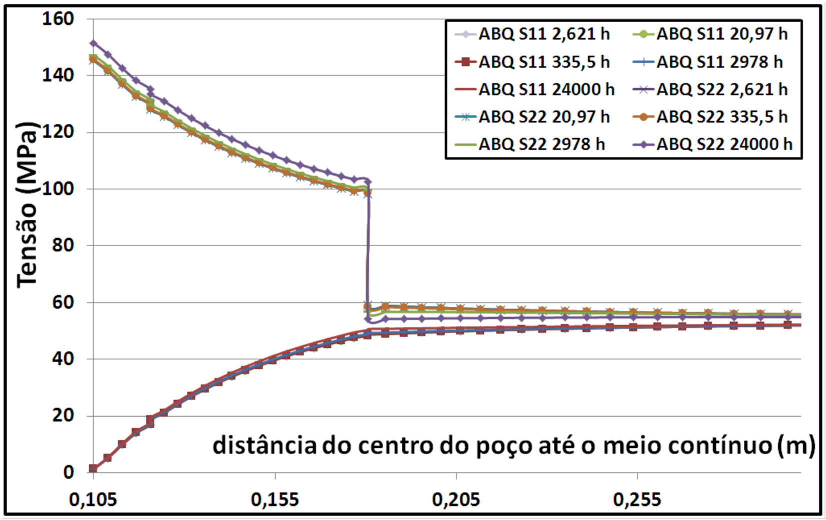


Figura 4.10: Resultados da simulação numérica através do programa comercial ABAQUS. Onde S11 é a tensão radial e S22 é a tensão tangencial.

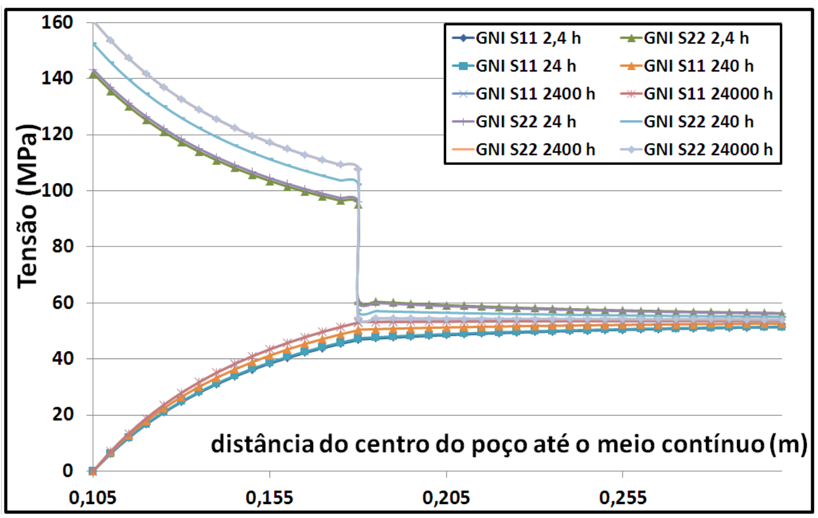


Figura 4.11: Resultados da tensão radial e tangencial obtidos pela solução analítica apresentada por Gnirk & Johnson (1964). Onde S11 é a tensão radial e S22 é a tensão tangencial.

No exercício de validação são analisadas as tensões radial e tangencial para um tempo máximo de 1000 dias. Para este tempo final, as tensões radiais e tangenciais no meio visco-elástico tendem a se igualar com as tensões radiais e tangenciais do meio contínuo.

Observa-se também das Figuras 4.10 e 4.11 que as tensões radiais e tangenciais no revestimento elástico, que estão num estado de compressão, aumentam consideravelmente ao longo do tempo, podendo comprometer a resistência do material. A tensão tangencial, na medida em que o tempo passa, aumenta significativamente. A tensão radial no revestimento elástico também aumenta, porém de forma menos significativa quando comparada à tensão tangencial.