3 Modelagem Numérico-Analítica de Estabilidade de Poços Empregando Técnicas de Transferência de Tensões

Os cenários geológicos com presença de estruturas de sal podem criar problemas de instabilidade de poços, tais como o fechamento da parede do poço pela fluência do sal, a mudança em magnitude e a rotação das tensões principais em torno dessas estruturas salinas, e as perdas de circulação de fluido de perfuração pela redução abrupta do gradiente de fratura nas interfaces do sal com as rochas adjacentes. No caso da determinação da janela operacional de um determinado poço de petróleo, esta pode ser determinada através de uma modelagem *numérico-analítica* acoplando os resultados de tensões *in-situ* fornecidos pela modelagem numérica realizada em um modelo global com as equações elásticas que descrevem a distribuição de tensões atuantes ao redor de um poço (Fjaer *et al., 2008*), uma vez que as tensões sejam estabelecidas nos pontos que compõem a trajetória do poço (Luo *et al., 2012a*; Koupriantchik *et al., 2005*).

Neste capítulo pretende-se realizar tal modelagem, onde a análise de estabilidade de poço utiliza uma *subestrutura* dentro de um determinado modelo global. O termo *subestrutura* é entendido neste trabalho como uma linha curva no espaço composta por um conjunto de pontos, se assemelhando a uma seção ou a trajetória completa de um poço de petróleo, como apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Exemplos de Subestruturas.

3.1. Técnicas de Transferência de Tensões

As técnicas de transferência de tensões utilizadas nesta dissertação para transferir tensões de um modelo global dado para uma determinada *subestrutura* correspondem às técnicas do *Inverso Ponderado da Distância* (IDP) e do *Gradiente de Tensões* (GT). Salienta-se que numa malha de elementos finitos a informação fica armazenada nos nós e nos pontos de Gauss (ou pontos de integração) dos elementos que a compõem. Portanto, numa malha de elementos finitos existem variáveis nodais (aquelas que são calculadas nos nós da malha, como os deslocamentos e as forças de reação) e variáveis calculadas nos pontos de Gauss (como as componentes do tensor de tensões e os invariantes de tensões). Nesta dissertação, a informação de interesse a ser transferida do modelo global para uma determinada *subestrutura*, corresponde ao estado de tensões *in situ* armazenadas nos pontos de Gauss do modelo global, utilizando as duas técnicas de transferência de informação mencionadas anteriormente, as quais serão detalhadas a seguir.

a) Técnica do Inverso Ponderado da Distância (IPD)

A técnica do *Inverso Ponderado da Distância (IPD)* (ou *Inverse Distance Weighting, em inglés*) consiste em uma técnica de interpolação. Esta técnica interpola o valor de uma variável de acordo com a formulação proposta por Lloyd (2011), descrita na equação (3.1):

$$\widehat{z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{z(S_i)}{d_{i0}^R}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_{i0}^R}}$$
(3.1)

Onde:

 $\widehat{z}(S_0)$: Estimativa do valor no ponto S_0 ;

n: Número de pontos vizinhos amostrados S_i (i = 1, 2, ...n) em torno do ponto S_o ; $z(S_i)$: Valor da variável no ponto S_i ;

R: Expoente que depende do peso atribuído a cada uma das observações; e

 d_{i0} : Distância de separação entre o ponto S_0 e o ponto S_i .

A transferência de tensões do modelo global para os pontos que compõem uma *subestrutura* consiste em interpolar as tensões armazenadas nos pontos de Gauss dos elementos do modelo global para os pontos que compõem a *subestrutura* de interesse. Nesta dissertação foi desenvolvida a seguinte metodologia para realizar tal transferência de tensões:

a) Em torno de cada ponto da *subestrutura* (neste caso equivalente ao parâmetro S_0 da equação 3.1), deve-se dividir o espaço total ocupado pelo modelo global em oito quadrantes, como apresentado esquematicamente na Figura 3.2.

b) Em cada um desses oito quadrantes deve-se encontrar o ponto de Gauss do modelo global (neste caso equivalente ao parâmetro S_i) mais próximo ao ponto da *subestrutura* (S_o), de tal modo que no final, em cada um desses quadrantes, vai haver um ponto de Gauss do modelo global (S_i) localizado a certa distância d_i do ponto da *subestrutura* (S_o). Nota se que o valor do parâmetro *n* da equação (3.1) é igual a oito.

c) Os valores de $\hat{z}(S_0)$ a serem interpolados em cada ponto da *subestrutura* correspondem a cada uma das componentes do tensor de tensões nesse ponto (ou seja, as componentes S11, S22, S33, S12, S13 e S23).

d) O valor adotado nesta dissertação para o parâmetro R é igual a 1. Desse modo, a estimativa do valor no ponto S_0 é realizada utilizando a distância real entre esse ponto e os oito pontos de Gauss ao seu redor. Todavia, pode ser adotado outro valor de R diferente, de acordo com Lloyd (2011).

Na Figura 3.2 é apresentado o esquema básico de interpolação em torno de cada ponto de uma determinada *subestrutura*.



Figura 3.2 – O modelo global é dividido em oito quadrantes em torno de cada ponto da *subestrutura* para a realização da interpolação de tensões a partir da técnica do *IPD*.

Foi desenvolvido um algoritmo na linguagem de programação Fortran para interpolar as tensões dos pontos de Gauss que pertencem aos elementos da malha do modelo global, para os pontos que fazem parte de uma determinada *subestrutura*. A Figura 3.3 apresenta o aspecto do programa desenvolvido em Fortran.



Figura 3.3 – Aspecto do programa desenvolvido em Fortran utilizando a técnica do *IPD*.

b) Técnica do Gradiente de Tensões (GT)

Foi desenvolvida nesta dissertação uma técnica de transferência de informação denominada a *técnica do Gradiente de Tensões (GT)*, a qual consiste no seguinte:

Suponha-se que é conhecido o estado de tensões *in-situ em* dois pontos A e B do modelo global, denominados $[\sigma_A]$ e $[\sigma_B]$, respectivamente (Figura 3.4). Suponha-se adicionalmente que existe um ponto entre os anteriores pontos A e B (por exemplo, um ponto de uma *subestrutura*). Portanto, é possível estabelecer um gradiente de tensões entre esses dois pontos A e B, e a partir do estado de tensões *in situ* do ponto A ou do ponto B e utilizando o gradiente de tensões no ponto localizado entre esses pontos A e B anteriormente mencionados.



Figura 3.4 – Representação esquemática da técnica do GT.

3.2. Modelagem Analítica de Estabilidade de Poços

De acordo com GTEP (2010), na modelagem tradicional de estabilidade de poços, considera-se que o poço está sujeito a um campo de tensões horizontais anisotrópico. Sendo assim, as tensões principais (tensões *in situ*), que atuam na formação, são as tensões vertical, σ_v , horizontal maior, σ_H , e horizontal menor, σ_h .

A fim de analisar o campo de tensões no entorno do poço, é conveniente expressar as tensões e deformações ao redor do poço em coordenadas cilíndricas. Portanto, as tensões em um ponto P, identificadas pelas coordenadas cilíndricas $r, \theta \in z$ (Figura 3.5) são denotadas σ_r , σ_{θ} , σ_z , $\tau_{r\theta}$, $\tau_{rz} \in \tau_{\theta z}$, onde σ_r é a tensão radial, σ_{θ} é a tensão tangencial e σ_z é a tensão axial.



Figura 3.5 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer et al., 2008).

De modo a obter uma solução geral em relação à inclinação e ao azimute do eixo do poço, faz-se necessário definir o estado de tensões *in situ* não mais pelas tensões σ_V , σ_H e σ_h , mas pelas tensões associadas a três outros eixos perpendiculares entre si, escolhidos convenientemente. Neste novo sistema de eixos (X - Y - Z) o eixo Z aponta na direção axial do poço, o eixo Y é horizontal e perpendicular ao eixo Z, e o eixo X obedece à condição de ortogonalidade com os eixos Y e Z (Figura 3.6 e Figura 3.7).



Figura 3.6 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer *et al*, 2008): (a) campo de tensões *in situ* no sistema de eixos (X' - Y' - Z'); (b) sistema de eixos do poço ($X^- Y^- Z$), onde o eixo do poço está alinhado com o eixo Z.



Figura 3.7 – A geometria de transformação: a_w corresponde ao azimute do poço com relação à tensão horizontal máxima σ_H , enquanto que i_w corresponde à inclinação do poço com respeito ao eixo Z' (Pasic *et al.*, 2007).

Cabe destacar que, de acordo com Zoback (2007), uma vez conhecido o tensor de tensões em um determinado sistema de coordenadas, é possível obter as tensões em qualquer outro sistema de coordenadas por meio da transformação de tensões utilizando os cossenos diretores. Portanto, o estado de tensões *in situ* no sistema de eixos do poço (X - Y - Z) da Figura 3.6 (b) pode ser expresso como (GTEP, 2010):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{y} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \sigma_{H} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{h} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}$$
(3.2)

Onde [A] corresponde à matriz dos cossenos diretores, a qual é descrita pela seguinte expressão:

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\beta_p & -\sin\psi & \cos\psi \sin\beta_p \\ \sin\psi \cos\beta_p & \cos\psi & \sin\psi \sin\beta_p \\ -\sin\beta_p & 0 & \cos\beta_p \end{bmatrix}$$
(3.3)

O parâmetro ψ corresponde ao azimute do poço medido a partir do eixo X' da Figura 3.6 (a), enquanto que o parâmetro β_p corresponde à inclinação do poço com respeito ao eixo Z', como apresentado esquematicamente na Figura 3.8 a seguir.



Figura 3.8 - Tensões em coordenadas cilíndricas (Adaptado de GTEP, 2010).

Cabe destacar que em trajetórias de poço, tradicionalmente o azimute do poço informado se refere ao norte geográfico verdadeiro, conforme Rocha *et al.* (2011). A Figura 3.8 apresenta um exemplo no qual o sistema (X' - Y' - Z') é referenciado com respeito ao Norte. Nota-se que a Figura 3.8 apresenta uma possível forma de calcular o valor do parâmetro ψ a partir do norte e dos parâmetros α_a e α_p , onde o parâmetro ψ está dado pela seguinte expressão (GTEP, 2010): $\psi = 90^o + \alpha_a - \alpha_p$.

3.3. Modelagem *Numérico - Analítica* de Estabilidade de Poços

Em virtude de fenômenos geológicos como o *diapirismo*, ocorre a rotação de tensões *in situ* no subsolo, fazendo com que uma das tensões principais na crosta terrestre não seja mais necessariamente considerada atuando na direção vertical, se fazendo necessário, portanto, definir um novo estado de tensões *in situ* no sistema de eixos (X' - Y' - Z') da Figura 3.6 (a), dado pelas tensões $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$, $\sigma_{z'}$, $\tau_{x'y'}$, $\tau_{x'z'}$ e $\tau_{y'z'}$ e não mais pelas tensões σ_v , σ_H e σ_h como assumido convencionalmente.

Adicionalmente, a fim de se obter uma solução geral em relação à inclinação e ao azimute do eixo de um poço de petróleo, se faz necessário definir o estado de tensões *in situ* não mais pelas tensões $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$, $\sigma_{z'}$, $\tau_{x'y'}$, $\tau_{x'z'}$ e $\tau_{y'z'}$ do anterior sistema de eixos (X' - Y' - Z'), mas pelas tensões associadas ao sistema de eixos do poço ($X^- Y - Z$) da Figura 3.6 (b).

Portanto, o novo estado de tensões *in situ* no sistema de eixos do poço pode ser expresso como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} & \tau_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}$$
(3.4)

Onde a matriz [*A*] continua sendo definida pela equação (3.3). Cabe destacar que tanto o sistema (X' - Y' - Z') quanto o sistema (X - Y - Z) apresentados na Figura 3.6, correspondem sistemas de eixos positivos.

A análise *numérico-analitica* de estabilidade de poços proposta nesta dissertação pode ser resumida a seguir:

a) Inicialmente, as tensões *in situ* no sistema (X' - Y' - Z') do modelo global são fornecidas pela modelagem numérica em elementos finitos. Salientase que nesta dissertação o sistema de eixos da malha do modelo global foi assumido como coincidente com o sistema de eixos (X' - Y' - Z') da Figura 3.6 (a), tal como apresentado esquematicamente na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Sistema de eixos (positivo) adotado no Abaqus para o modelo global.

b) Posteriormente, essas tensões *in situ* são transferidas a cada ponto da subestrutura de interesse a través de um determinado mecanismo de transferência de tensões, como por exemplo, através das técnicas do *IPD* e do *GT* apresentadas nesta dissertação.

c) Uma vez estabelecidas as tensões *in-situ* em cada ponto da trajetória, é definido o estado de tensões *in situ* no sistema de eixos do poço através da equação (3.4).

d) Finalmente, são calculadas as tensões em coordenadas cilíndricas na parede do poço através das equações elásticas que descrevem a distribuição de tensões atuantes ao redor de um poço (Fjaer *et al.*, 2008) e determinados os limites de colapso inferior e fratura superior. Salienta-se que além desses dois limites mencionados anteriormente, pode ser calculada a tensão principal mínima como um limite adicional de fratura na janela operacional do poço.

Para realizar a análise de estabilidade de poços, foi modificado e utilizado posteriormente o *Modulo de Calculadora Pontual* do programa SEST (Produto tecnológico, parceria Petrobras & Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleos, GTEP), apresentada na Figura 3.10. Nota-se na Figura 3.10 na seção de tensões *in situ*, que o tensor de tensões pode ser ingressado completamente.

Prof. Vertical		acca in oird (ini d)		Gradionicos	
	m 511	S12	C 13	Colores Infector	
		C 22		Colapso Intentor	PP9
	— . 1	3]		Eratura Inferior	ppg
Azimute			S**		ppg
Diametro	poi Azi	n. Eixo Y		Fratura Supenor	ppg
•	Pre	ssão de Poros	psi		
				Pressões	_
psi Coeficiente de l	Biot			Colapso Inferior	psi
DSi	,			Colapso Superior	psi
				Fratura Inferior	psi
				Fratura Superior	psi
				. ,	
	Inclinação Azimute Diâmetro psi psi r	Inclinação Azimute Diâmetro pol Pre psi Coeficiente de Biot si	Inclinação Azimute Diâmetro pol Azim. Exc Y Pressão de Poros psi Coeficiente de Biot psi *	Inclinação Azim. Eixo Y Pressão de Poros psi	Inclinação Azimute Diâmetro pol Azimute S ²² S ²³ Fratura Inferior Pressão de Poros psi Pressões Colapso Superior Fratura Superior Pressões Colapso Superior Fratura Inferior Pressões Colapso Superior Fratura Inferior Fratura Inferior Fratura Inferior Fratura Inferior Fratura Superior Fratura Superior Fratura Superior

Figura 3.10 – Aspecto da nova versão da calculadora pontual do programa SEST, onde pode ser ingressado o tensor de tensões completo.

O Abaqus é um programa de elementos finitos que se encontra baseado na mecânica de sólidos tradicional (Chandra, 2012; Schorderet *et al.*, 2011). É importante ressaltar que a convenção de sinais utilizada pelo programa Abaqus para as tensões normais e cisalhantes corresponde à convenção de tensões adotada na mecânica de meios contínuos tradicional, tal como apresentado na Figura 3.11:



Figura 3.11 – Convenção de sinais para tensões na mecânica de meios contínuos tradicional, onde tração é positiva (Adaptado de Desai & Christian, 1977).

Em relação à Figura 3.11, Desai & Christian (1977) afirmam o seguinte:

"Cada componente do tensor de tensões na Figura 3.11 representa uma força atuando numa direção de coordenadas específica sobre uma área unitária orientada de uma determinada maneira. Assim, σ_{yx} representa a força na direção positiva do eixo X que atua sobre uma área unitária cuja normal aponta na direção positiva do eixo Y. Os termos σ_{xx} , σ_{yy} , e σ_{zz} são as tensões normais, e as outras são tensões cisalhantes. A convenção de sinais da Figura 3.11 corresponde à convenção usualmente utilizada para a mecânica dos meios contínuos, onde as tensões são positivas quando os sentidos da força e da normal à face na qual a força atua são ambos positivos ou ambos negativos. Isto faz com que a tração seja positiva. No entanto, dado que a condição de compressão é mais comum do que a condição de tração em problemas geotécnicos, a convenção geotécnica usual é utilizar compressão como positiva. Se essa convenção é adotada, faz sentido inverter o anterior sistema (Desai & Christian, 1977), tal como apresentado na Figura 3.12..." (Adaptado de Desai & Christian, 1977).



Figura 3.12 – Convenção de sinais para tensões onde compressão é positiva (Adaptado de Desai & Christian, 1977).

A fim de complementar a informação anterior, Rocha e Azevedo (2009) afirmam o seguinte:

"De acordo com a Mecânica das Rochas, as componentes de tensão são representadas com a seguinte convenção de sinais: na face negativa, todas as tensões que atuam nas direções negativas das coordenadas são consideradas negativas, e na face positiva todas as tensões que atuam nas direções positivas das coordenadas são consideradas negativas. Com esta convenção, temos que as tensões normais de tração são negativas e as de compressão são positivas."

Cabe destacar que o software SEST utiliza a convenção de sinais de tensões para problemas geotécnicos, tradicionalmente adotada na área da mecânica de rochas. Portanto, é necessário levar em consideração a convenção de sinais das componentes do tensor de tensões fornecidas pelo programa Abaqus para posteriormente serem utilizadas no programa SEST.

Uma vez ingressadas as tensões *in situ* na calculadora do SEST, o programa permite definir a geometria do poço (profundidade, azimute, inclinação e diâmetro) o modelo de análise (elástico ou poroelástico), o critério de ruptura da rocha (Mohr Coulomb, Lade-Ewy, Drucker-Prager interno, Drucker-Prager centrado e Drucker-Prager externo), entre outras informações. A calculadora do SEST fornece para cada estado de tensões *in situ* os gradientes de colapso inferior e superior, assim como também os gradientes de fratura inferior e superior.

3.4.

Análise de Estabilidade de Poços através de Técnicas de Transferência de Tensões

Construção de um Modelo Global

Os passos básicos para a criação de um modelo global são apresentados a seguir:

- Estabelecimento da geometria do modelo;
- Definição das propriedades dos materiais;
- Aplicação das condições de contorno;

- Geração da malha de elementos finitos;
- Estabelecimento das cargas iniciais do sistema (tensões in situ).

Para a realização da análise de estabilidade de poços empregando técnicas de transferência de tensões, foi criado um modelo global, denominado *Modelo Global A*, o qual possui no seu topo uma lâmina de água constituída por um plano inclinado de 2,9 graus com respeito ao plano horizontal, o qual representa no modelo o fundo do mar em um ambiente de perfuração *offshore*.

A Figura 3.13 apresenta a geometria desse modelo, assim como a posição da origem do sistema de coordenadas localizada na base do modelo global, o qual corresponde a um sistema de eixos positivo.



Figura 3.13 – Características geométricas do Modelo Global A.

Na Figura 3.13, a zona de *Folhelho* está localizada entre o topo do modelo global (fundo do mar) e o topo da zona de *Sal*; a zona de *Sal* localiza-se entre a zona de *Folhelho* e a zona do *Arenito*, enquanto que o *Arenito* localiza-se entre a base da zona de *Sal* e a base do modelo global.

As zonas do *Folhelho* e do *Arenito* são consideradas como elásticas, homogêneas, e isotrópicas, enquanto que a zona do *Sal* é considerada como um material visco-elástico, não linear, e que possui um modelo empírico potencial de fluência primaria, tal como discutido mais adiante.

As propriedades mecânicas dos materiais de cada uma dessas zonas são apresentadas na Tabela 3.1.

Zona	Módulo de Young (E), GPa	Coeficiente de Poisson (v)	Peso Específico (Saturado) (kN/m ³)	Peso Específico (Seco) (kN/m ³)	Massa Especifica Seca (kg/m ³)
Folhelho	21,87	0,38	22,0		
Sal	20,4	0,36		21,17	2160
Arenito	22,73	0,28	26,0		

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos materiais do Modelo Global A.

No caso do Arenito e do Folhelho, os valores das propriedades de Módulo de Young e Coeficiente de Poisson foram extraídos a partir de dados típicos de estudos de laboratório publicados por Lama & Vutukuri (1978), enquanto que os dados de Peso Específico Saturado foram extraídos a partir de valores típicos de laboratório publicados por Hoek & Bray (1981).

Modelagem Numérica do Creep no Sal

De acordo com Botelho (2008), O Abaqus possui um modelo de fluência pré-estabelecido denominado "*Power-Law Model*", o qual corresponde a um modelo empírico potencial de fluência primaria. O modelo anterior é caracterizado por ser um modelo relativamente simples, o qual possui uma gama de aplicações limitada. O modelo "*Power-Law Model*" está apresentado no Abaqus em duas versões:

- "Time-Hardening Theory"
- "Strain-Hardening Theory"

Botelho (2008) afirma que a versão "*Time-Hardening*" é mais apropriada no caso em que estado de tensão permanece essencialmente constante, enquanto que a versão "*Strain-Hardening*" é mais apropriada no caso em que estado de tensões varia durante as análises. Cabe destacar que além do modelo potencial, o Abaqus possui o modelo "*Hiperbolic-sine Law Model*", o qual utiliza a lei seno-hiperbólica. Adicionalmente, o Abaqus permite também ao usuário o ingresso de outros modelos de fluência diferentes aos modelos pré-estabelecidos no

programa. Nesta dissertação optou-se por simular o processo do *creep* utilizando um modelo de fluência *Power-Law Model / Strain Hardening* do Abaqus.

De acordo com Botelho (2008), o modelo de endurecimento por deformação ou "*Strain Hardening*" do Abaqus, se encontra representado pela seguinte expressão:

$$\overset{f}{\varepsilon} = \left(A \widetilde{q}^n \left[(m+1) \, \varepsilon \right]^m \right)^{\frac{1}{m+1}}$$
(3.5)

Em que $\dot{\hat{\epsilon}}$ corresponde à deformação equivalente de fluência.

O valor dos parâmetros "A", "n" e "m" adotados para o anterior modelo (equação 3.5) são apresentados a seguir: A = 2,3937 E-26, n = 3,0, m = -0,7 (Botelho, 2008).

Maiores detalhes conceituais, tanto do modelo anterior quanto da modelagem numérica do *creep* no sal, podem ser encontrados no trabalho de Botelho (2008).

Condições de Contorno

Em relação às condições de contorno adotadas no modelo global, observase na Figura 3.14 que os nós da base do modelo têm seu movimento restrito nas três direções *X*, *Y* e *Z*, enquanto que as faces laterais desse modelo podem ser deslocar apenas na direção Z.



Figura 3.14 – Condições de contorno do *Modelo Global A*: (a) faces laterais perpendiculares ao eixo X, com movimento restrito na direção X; (b) faces laterais perpendiculares ao eixo Y, com movimento restrito na direção Y; (c) base do modelo global com movimento restrito em todas as direções.

Construção da Malha de Elementos Finitos

A Figura 3.15 (a) mostra a malha de elementos finitos utilizada no modelo global. Esta malha está composta por 17550 nós e 15600 elementos hexaédricos de oito nós (tipo C3D8, segundo a notação do programa Abaqus, Figura 3.15 (b)).



Figura 3.15 – (a) malha adotada no *Modelo Global A*; (b) elemento empregado na malha (Abaqus, 2009).

Para definir o estado de tensões *in situ* no modelo global, foi necessário estudar a convenção de sinais que o programa Abaqus utiliza para as tensões de compressão e de tração. De acordo com o manual do Abaqus (seção *Extended Drucker-Prager Models*), a convenção de sinais para as tensões de compressão e de tração é a seguinte:

- As tensões de compressão possuem sinal negativo; e
- As tensões de tração possuem sinal positivo.

No caso da convenção de sinais para as tensões principais, o Abaqus apresenta um exemplo para ilustrar a convenção adotada pelo programa para definir a tensão principal máxima, intermediária e mínima.

O esquema do ensaio em questão é apresentado na Figura 3.16 a seguir (*Abaqus Manual / Matching Mohr-Coulomb parameters to the Drucker-Prager model*).



Figura 3.16 – Representação das tensões principais máxima e mínima no modelo de *Mohr Coulomb* de acordo com a convenção do programa Abaqus (Adaptado de Abaqus, 2009).

Na Figura 3.16, σ é negativo em compressão, e as tensões σ_1 e σ_3 correspondem às tensões principais máxima e mínima, respectivamente. Em conclusão, a convenção para as tensões principais adotada pelo programa Abaqus, de acordo com a mecânica de sólidos tradicional, é a seguinte:

- Tensão Principal Máxima: corresponde à tensão compressiva mínima.
- Tensão Principal Mínima: corresponde à tensão compressiva máxima.

A fim de complementar a informação anterior, cabe ressaltar que na literatura pesquisadores na indústria do petróleo têm feito referência à convenção de sinais de tensões adotada pelo programa Abaqus tanto para as tensões de compressão e de tração, quanto para as tensões principais (Shen *et al.* 2010a e 2011a).

Estado Inicial de Tensões In Situ no Modelo Global A

O estado de tensões inicias no *Modelo Global A* foi estabelecido a partir das premissas estabelecidas por Fredrich *et al.* (2003). Fredrich apresenta um processo de inicialização de tensões *in situ* para processos de fluência de estruturas de sal no subsolo, o qual consta dos seguintes passos:

a) Para cada elemento do modelo global é calculada a tensão vertical σ_V , a qual corresponde ao peso gravitacional do material que se encontra verticalmente acima do elemento em questão. Inicialmente, esta tensão vertical é assumida como a tensão principal máxima.

b) Posteriormente são calculadas as tensões principais $\sigma_H e \sigma_h$ localizadas no plano horizontal a partir do valor da tensão vertical calculada previamente, e baseado na relação entre as tensões principais longe da estrutura de sal onde não existe a perturbação de tensões devido à presença da estrutura de sal (conhecido usualmente na literatura como "*far-field stress*", em inglês).

c) Posteriormente, é iniciado o processo de creep no sal até o seu equilíbrio, ou seja, até atingir no sal um estado de tensões *in-situ* isotrópico. As simulações são realizadas por um período de tempo dado, a partir do qual a tensão de Von Mises no sal seja considerada como suficientemente próxima de zero.

Portanto, o estado de tensões iniciais estabelecido no *Modelo Global A* foi adotado a partir da premissa de que é conhecido um estado de tensões *in situ* longe da estrutura do sal dado pelas tensões principais totais σ_v , $\sigma_h \in \sigma_H$. Também é assumido que no *Modelo Global A* existe um regime de tensões normal. Cabe destacar que, segundo Dusseault *et al.* (2004b), em um regime de falhamento normal ativo, o gradiente de tensão lateral geralmente apresenta um valor da ordem de 20-30% menor em comparação com o gradiente de tensão vertical. Portanto, foi assumida para as tensões horizontais a seguinte condição: $\sigma_h = \sigma_H = 0.78 \sigma_v$.

Adicionalmente, assume-se que os eixos do *Modelo Global A* estão alinhados com a orientação das tensões principais regionais σ_v , $\sigma_h e \sigma_H$ longe da estrutura do sal, de tal modo que eixo *Z* fica alinhado com a tensão vertical σ_v , e por sua vez os eixos *X* e *Y* ficam alinhados com as tensões horizontais $\sigma_H e \sigma_h$, respectivamente, como apresentado anteriormente na Figura 3.13. Cabe ressaltar que existem estudos similares na literatura sobre modelagem de tensões *in situ* em torno de estruturas de sal onde foi adotado o uso de um sistema de eixos do modelo global alinhado com a direção das tensões principais, tal como no caso do trabalho realizado por Koupriantchik *et al.* (2005).

Para estabelecer o estado inicial de tensões no *Modelo Global A*, foi necessário criar uma sub-rotina na linguagem de programação Fortran, a qual é lida e processada pelo programa Abaqus. Esta sub-rotina precisa das equações dos dois planos que limitam a zona do *Sal* no espaço, bem como da equação do plano que representa o fundo do mar no modelo. Uma vez definidos esses planos, a sub-rotina consegue distinguir as três regiões que compõem o modelo global. A Figura 3.17 mostra as equações e o posicionamento desses planos no modelo global proposto.

114





O estado de tensões *in situ* do modelo global é apresentado esquematicamente na Tabela 3.2, de acordo com a convenção estabelecida na Figura 3.17.

Tabela 3.2 – Equações usadas para o cálculo das tensões *in situ* iniciais no *Modelo Global A*, correspondente a um regime de falhamento normal.

	Tensões In Situ						
Zona	Tonção Vortical	Tensão	Tensões				
	Tensao venicai	Horizontal	Cisalhantes				
Folhelho	$S_{33} = -[H_0 \gamma_{Agua} + (10000 - H_0 - Z)\gamma_{Folhelho}]$	$S_{11} = S_{22}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23}$				
		$= 0,78 S_{33}$	= 0				
Sal	$S_{33} = -[H_0 \gamma_{\text{A}gua} + H_1 \gamma_{Folhelho} + (H_2 + H_3)]$	$S_{11} = S_{22}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23}$				
	$-Z$) γ_{Sal}]	$= 0,78 S_{33}$	= 0				
Arenito	$S_{33} = - \left[H_0 \gamma_{\text{A}gua} + H_1 \gamma_{Folhelho} + H_2 \gamma_{Sal} \right]$	$S_{11} = S_{22}$	$S_{12} = S_{13} = S_{23}$				
	$+ (H_3 - Z)\gamma_{Arenito}]$	$= 0,78 S_{33}$	= 0				

Na tabela Tabela 3.2, $\gamma_{Folhelho}$, γ_{Sal} e $\gamma_{Arenito}$ correspondem aos pesos específicos do *Folhelho*, do Sal e do *Arenito*, respectivamente (dados em unidades de força sobre volume), enquanto que o parâmetro *Z* corresponde à altura do ponto com respeito à base do modelo global. Nota-se que as tensões *in situ* iniciais σ_v , σ_h e σ_H correspondem a tensões principais, e assim, as componentes de cisalhamento iniciais são iguais a zero.

As tensões *in situ* são carregadas para os pontos de Gauss de cada um dos elementos que compõem a malha do modelo global, dependendo da região em que esteja localizado cada um desses pontos e de acordo com as definições da Figura 3.17 e da Tabela 3.2.

Para a leitura das tensões nas sub-rotinas do Abaqus, o programa não utiliza a notação (X-Y-Z), e sim uma notação equivalente (1-2-3), de acordo com a convenção apresentada na Figura 3.18 (*Abaqus Manual / Element output / Threedimensional Solid Element Library / Stress, strain and other tensor components*). Cabe destacar que esta mesma notação de tensões é utilizada pelo programa Abaqus para reportar os resultados após a realização de cálculos.



Figura 3.18 – Convenção usada pelo Abaqus para a leitura de tensões através de sub-rotinas.

De acordo com a convenção a anterior:

S11: Equivalente à tensão normal SXX.

S22: Equivalente à tensão normal SYY.

S33: Equivalente à tensão normal SZZ.

S12: Equivalente à tensão de cisalhamento SXY.

S13: Equivalente à tensão de cisalhamento SXZ.

S23: Equivalente à tensão de cisalhamento SYZ.

Além da aplicação do estado inicial de tensões anisotrópico a fim de promover o *creep* no sal, foi necessário evitar deslocamentos iniciais nos nós, dado que, uma vez impostas as tensões iniciais ao sistema, elas tendem a deformar a malha do modelo global. A seguinte metodologia foi utilizada para a aplicação do estado inicial de tensões (Adaptado de Righetto, 2012):

a) Os deslocamentos nas direções X, Y e Z foram impedidos em todos os nós do modelo global.

 b) As tensões iniciais litostáticas foram aplicadas em todos os elementos do modelo global (de acordo com as definições apresentadas na Tabela 3.2).

 c) O programa Abaqus foi rodado com as condições de contorno impostas no item (a) e as condições iniciais impostas no item (b).

 d) Como resposta, o programa Abaqus calculou as reações de apoio em todos os nós impedidos de se deslocar.

e) Para que o modelo iniciasse a análise do *creep* com o estado de tensões correto, foi necessário aplicar as reações de apoio calculadas no item
(d) como forças nodais, para equilibrar o modelo e produzir deslocamentos e deformações nulas nos pontos nodais e elementos, respectivamente.

Os resultados obtidos após aplicação da metodologia são apresentados na Figura 3.19 e Figura 3.20 a seguir:



Figura 3.19 – Aplicação de reações de apoio no *Modelo Global A:* (a) estado Inicial da malha; (b) deslocamentos resultantes (metros) na malha do modelo global após a aplicação das tensões iniciais litostáticas.



Figura 3.20 – Distribuição de tensões *in situ* iniciais no *Modelo Global A*: (a) tensões *In situ* antes da aplicação das reações de apoio (tensão de Von Mises); (b) tensões *in situ* resultantes após a aplicação das reações de apoio (tensão de Von Mises).

Observa-se na Figura 3.20 que a distribuição de tensões *in situ* no modelo global permaneceu invariável após terem sido impedidos os deslocamentos iniciais da malha do modelo global.

Modelos Não Acoplados Vs. Modelos Acoplados com Poropressão

De acordo com Luo *et al.* (2012b), as tensões e a distribuição de poropressão em torno de estruturas de sal podem estar altamente perturbadas com relação aos seus valores regionais longe dessas estruturas. Luo menciona adicionalmente que para a modelagem de tensões e poropressão ao redor de estruturas salinas são utilizados tradicionalmente dois tipos de modelos:

 A) Modelos não acoplados com poropressão, os quais não consideram o fluxo de fluido ou interações entre o fluido e a matriz sólida rochosa; e

B) Modelos acoplados com poropressão (Nikolinakou et al., 2012), os quais consideram explicitamente o fluxo de fluido em torno do sal por meio de um modelo que acopla totalmente as mudanças no estado de tensões ao redor de estruturas de sal com as mudanças de pressão de poros.

Dentro dos modelos não acoplados, Luo cita dois tipos de modelos tradicionalmente aplicados na modelagem numérica de tensões em torno de estruturas de sal:

 a) Modelos elásticos ou elastoplásticos, onde a modelagem numérica é realizada através das *tensões totais* e ignorando a pressão de poros.
 Posteriormente, essa distribuição de poropressão é subtraída do campo de tensões totais final para calcular o campo de tensões efetivas; e

b) Modelos elásticos ou elastoplásticos, onde a modelagem numérica é realizada através das tensões efetivas, subtraindo da tensão total a distribuição de poropressão. Posteriormente a tensão total é calculada somando o campo de tensão efetiva final com o campo de poropressão.

Nesta dissertação será adotado um modelo não acoplado com poropressão para simular o processo do *creep* no sal, empregando um modelo global elástico (salienta-se que um modelo elástico assume que os sedimentos são sólidos elásticos, sem poros e, portanto, sem poropressão, conforme Luo *et al.*, 2012b). Cabe destacar que esta aproximação é comumente utilizada na modelagem de tensões entorno de estruturas de sal através de elementos finitos (Luo *et al.*, 2012a). Adicionalmente, será assumida uma determinada distribuição

de poropressão no final dos cálculos, a qual será descontada das tensões totais finais para produzir um resultado em termos de tensões efetivas nas zonas fora do sal. Nota-se que neste caso a poropressão é assumida, não calculada.

Subestrutura A

A Subestrutura A consiste em uma seção da trajetória de um poço de petróleo, localizada entre os pontos de coordenadas (4800 m; 5769 m; 4700 m) e (4800 m, 7308 m; 2004 m), respectivamente, a qual possui uma inclinação de 29,7 graus com relação à vertical.

A anterior linha possui pontos espaçados a cada 51,7 m e abrange a faixa de profundidade entre 5300 e 7996 m a partir do nível da água do mar no *Modelo Global A*. A localização dessa subestrutura dentro do modelo global é apresentada na Figura 3.21:



Figura 3.21 – Localização da *Subestrutura A* (linha amarela) na seção transversal do *Modelo Global A*.

Nota-se na Figura 3.21 que a variável Z foi substituída por conveniência pela variável *Profundidade*. Portanto, a variável *Profundidade* para esta e para posteriores figuras, é medida a partir do topo do modelo global (nota-se que no caso do *Modelo Global A*, o topo do modelo adotado corresponde ao plano horizontal que representa o nível do mar). Neste contexto, as profundidades de 5300 e 7996 m correspondem aos valores de Z=4700 e Z=2004 m, respectivamente.

Subestrutura B

A Subestrutura B consiste em uma linha que representa a trajetória completa de um poço vertical, a qual possui pontos espaçados a cada 40 m e abrange a faixa de profundidade entre 365 e 8000 m a partir do nível da água do mar no *Modelo Global A*. A localização dessa *subestrutura* dentro do modelo global é apresentada na Figura 3.22:



Figura 3.22 – Localização da *Subestrutura B* (linha verde) no *Modelo Global A*.

Determinação da Janela Operacional no Programa SEST

Para a determinação da janela operacional no programa SEST, é necessário definir o modelo de análise (elástico ou poroelástico) a ser adotado, o critério de ruptura do material e suas propriedades hidromecânicas (resistência à tração, resistência à compressão uniaxial, ângulo de atrito, coeficiente de Poisson e coeficiente de Biot), os parâmetros geométricos do poço, as tensões *in situ*, entre outras informações. A seguir serão especificados tais parâmetros utilizados para o estudo da estabilidade de poços proposta.

- Modelo de Análise:

O modelo a ser empregado para a análise de estabilidade de poços corresponde a um modelo elástico com condição de parede não penetrante.

- Critério de Ruptura e Propriedades Hidromecânicas

As propriedades hidromecânicas a serem aplicadas nas três zonas do *Modelo Global A* são apresentadas na Tabela 3.3 e na Figura 3.23 e Figura 3.24 a seguir:

Tabela 3.3 – Propriedades e parâmetros necessários para realizar a análise de estabilidade de poços no programa SEST.

	Folhelho <i>(Overburden)</i>	Sal	Arenito (Underburden)
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Ângulo de Atrito (Ø) (Graus)	30	30	40
Coeficiente de Poisson (Adim.)	0,38	0,36	0,28
Coeficiente de Biot (Adim.)	0,97		0,97



Figura 3.23 – Correlações adotadas na zona de *Folhelho* para a definição das propriedades de *Resistência à Traçã*o e *Resistência à Compressão Uniaxial* em função da profundidade.



Figura 3.24 – Correlações adotadas na zona do Sal e do Arenito para a definição das propriedades de Resistência à Tração e Resistência à Compressão Uniaxial em função da profundidade.

Com relação aos valores apresentados na Tabela 3.3, nota-se que os valores de *Coeficiente de Poisson* correspondem aos mesmos utilizados na modelagem numérica do *Modelo Global A* para as zonas do *Folhelho*, do *Sal* e do *Arenito*. O valor do *ângulo de atrito* adotado para o sal foi extraído a partir de estudos de laboratório realizados por Arad *et al.* (2010), enquanto que os valores de *ângulo de atrito* utilizados para o *Arenito* e o *Folhelho* foram baseados em dados típicos para essas litologias, de acordo com dados de laboratório publicados por Hoek & Bray (1981). Salienta-se que os valores de *ângulo de atrito, coeficiente de Poisson* e *coeficiente de Biot*, serão assumidos como constantes para cada uma das zonas do modelo global.

Com relação à Figura 3.23, são apresentadas duas correlações para a resistência à tração e a resistência à compressão uniaxial que serão adotadas para a análise de estabilidade de poços na zona do *Folhelho*, as quais foram obtidas a partir de dados do poço PUC-1. O poço PUC-1 corresponde a um poço vertical baseado em dados reais, que é utilizado pelo software SEST como um exemplo ilustrativo. Os seis valores para cada propriedade na Figura 3.23 foram obtidos em folhelhos em seis pontos de profundidade diferentes, na faixa de 800 a 2800 m.

Similarmente, a Figura 3.24 apresenta correlações para a resistência à tração e a resistência à compressão uniaxial que serão adotadas nas zonas do *Sal* e do *Arenito*, as quais foram obtidas a partir de valores típicos dessas propriedades baseadas em resultados de laboratório publicados por Lama & Vutukuri (1978) para essas litologias. A Figura 3.24 apresenta equações obtidas a partir de regressão linear, as quais representam a variação das anteriores propriedades mecânicas com a profundidade para as zonas do *Sal* e do *Arenito*, sendo estabelecidas a partir dos valores dessas propriedades no topo e na base de cada uma dessas litologias.

- Geometria do poço

Como mencionado anteriormente, a *Subestrutura A* corresponde a uma seção de um poço de petróleo, a qual possui uma inclinação de 29,71 com relação à vertical, e possui um raio de 10 polegadas, enquanto que a Subestrutura B corresponde a um poço vertical e possui também um raio de 10 polegadas.

- Localização dos eixos do Modelo Global A com relação ao Norte

Foi adotado um valor de 90 graus para o parâmetro α_a com relação ao norte, como apresentado na Figura 3.25.



Figura 3.25 – Localização do sistema de eixos do *Modelo Global A* com relação ao Norte.