

## 5 Resultados

A seguir são apresentadas as seguintes hipóteses que aplicam tanto para os gráficos apresentados neste Capítulo quanto para os gráficos apresentados na seção Apêndice:

A) Os eixos de *Profundidade* e *Altura* para os modelos globais *A* e *B* se encontram alinhados com o eixo vertical *Z*. O eixo *Profundidade* começa a partir do topo tanto do *Modelo Global A* quanto do *Modelo Global B* até a base de cada um deles, enquanto que o eixo *Altura* começa da base desses modelos até o seu topo. Salienta-se que o topo do *Modelo Global A* será assumido a partir do nível horizontal da lâmina de água.

B) Os valores de tensões normais com sinal negativo correspondem a tensões de compressão, enquanto que valores de tensões normais com sinal positivo correspondem a tensões de tração. A convenção de sinais para as tensões de cisalhamento seguem a convenção de sinais da mecânica de sólidos tradicional apresentada anteriormente na Figura 3.11.

C) Para efeitos de apresentação de resultados neste capítulo, em todos os gráficos que envolvam tensões principais, será adotado como *Tensão Principal Máxima* e *Tensão Principal Mínima*, aquelas que possuam o maior e o menor valor de compressão, respectivamente.

D) O significado das tensões  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  e  $S_{23}$  nos gráficos de resultados apresentados neste capítulo segue a convenção adotada na Figura 3.18 descrita anteriormente no Capítulo 3, lembrada na Figura 5.1 a seguir:

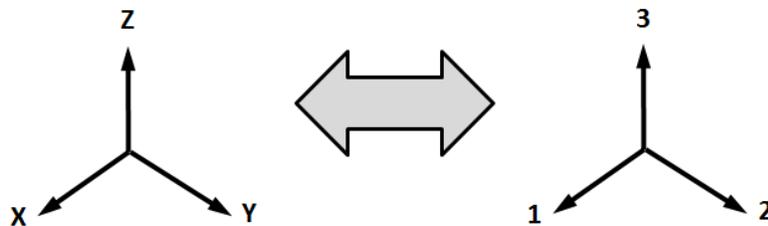


Figura 5.1 – Convenção adotada nos gráficos de resultados.

## 5.1. Distribuição de Tensões no *Modelo Global A* após o *Creep* no Sal

A Figura 5.2 mostra a distribuição de tensões no *Modelo Global A* depois de submetido ao processo de *creep* na zona de *Sal*.

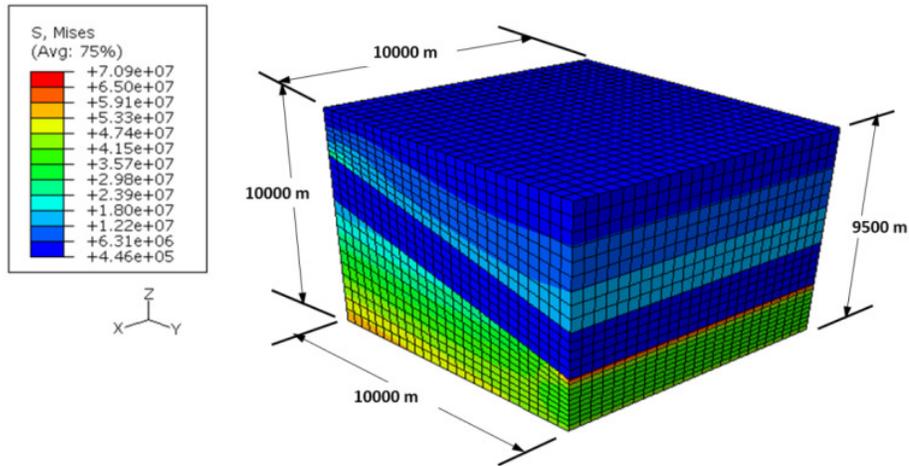


Figura 5.2 – Distribuição de tensões no *Modelo Global A* após o processo de *creep* na zona de *Sal* (Tensão de Von Mises em Pa).

Para facilitar a avaliação das tensões geradas no anterior modelo global, foi criada uma seção transversal onde foi estabelecida uma trajetória vertical delimitada pelos nós 3671 e 2262 da malha do modelo global, tal como apresentado na Figura 5.3.

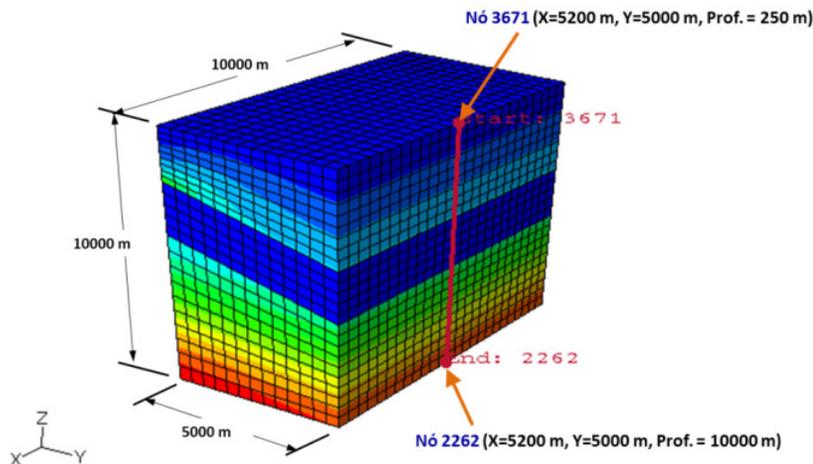


Figura 5.3 – Trajetória adotada no *Modelo Global A* para visualizar os resultados de tensões (seção transversal da malha).

Destaca-se que na literatura é tradicionalmente assumido que o equilíbrio no sal acontece após o processo de *creep* quando as tensões desviadoras são o suficientemente próximas de zero, como observado no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Critérios assumidos por alguns autores na literatura para estabelecer o equilíbrio na zona de *Sal* após o processo de *creep*.

Fredrich <i>et al.</i> (2003)	Utiliza um tempo de simulação do <i>creep</i> de 50 anos para atingir o equilíbrio do sal obtendo uma tensão residual de Von Mises próxima a zero ( $\sim 1$ MPa).
Koupriantchik <i>et al.</i> (2005)	Considerou um tempo de <i>creep</i> de 150 anos no sal para que as tensões desviadoras fossem o suficientemente próximas de zero (menos de 1 MPa).
Van der Zee <i>et al.</i> (2011)	Apresenta um estudo no qual o equilíbrio no sal foi considerado a partir do momento em que a tensão desviadora no sal foi reduzida até o valor de 2-3 MPa.
Luo <i>et al.</i> (2012a)	Luo considera que o equilíbrio do sal é atingido uma vez que as tensões desviadoras dentro dos corpos de sal decaem dos valores de tensão iniciais até menos de 0,1 MPa.

Portanto, nesta dissertação foi adotado um tempo de 10000 anos para simular o processo de *creep* na zona de *Sal*, tempo no qual foi evidenciada uma tensão de Von Mises próxima de zero ( $\sim 2$  MPa). A Figura 5.4 apresenta a variação de tensões *in situ* no modelo global antes e depois da aplicação do processo de *creep* na zona de *Sal*.

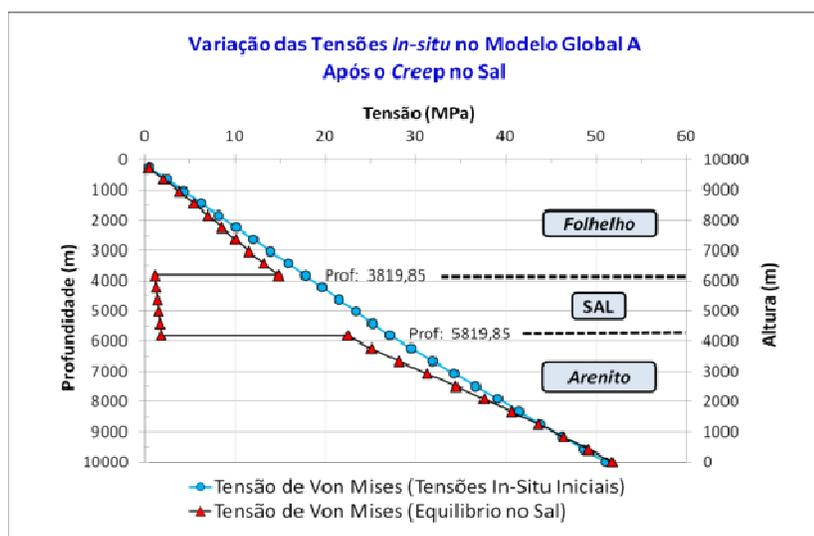


Figura 5.4 – Varição das tensões *in situ* no *Modelo Global A* após o processo de *creep* no Sal.

- Distribuição das Tensões Principais e Normais no *Modelo Global A* Após o *Creep* no Sal

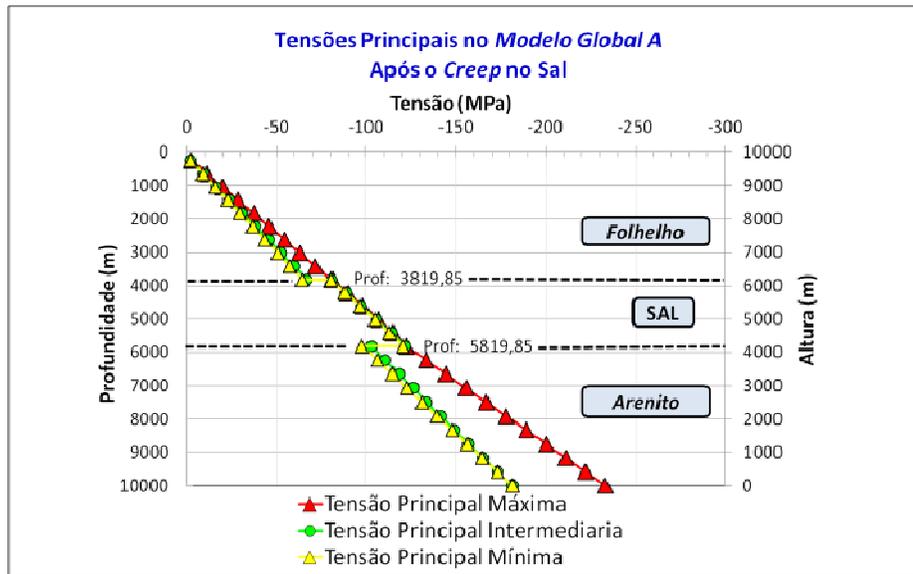


Figura 5.5 – Tensões principais máxima, intermediária e mínima no *Modelo Global A* após o processo do *creep* no Sal.

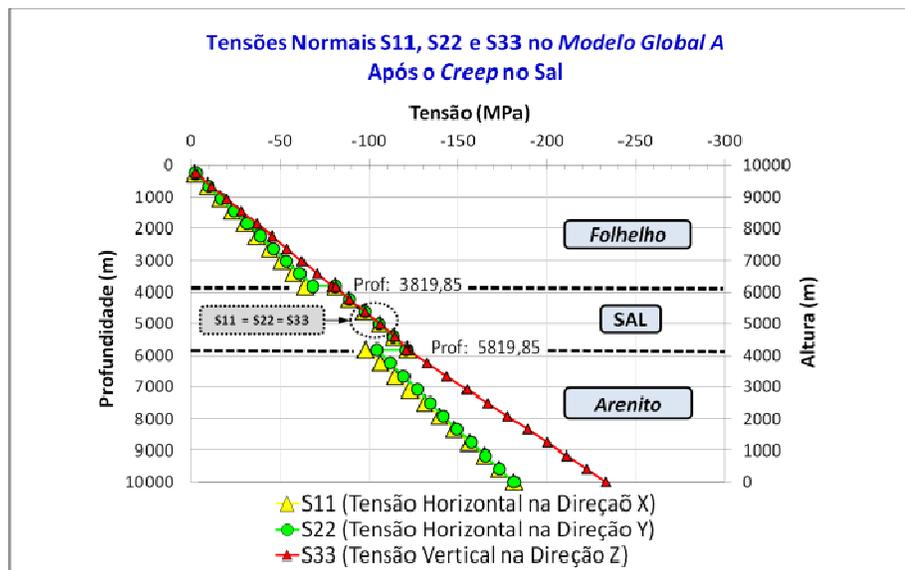


Figura 5.6 – Tensões Normais S11, S22 e S33 no *Modelo Global A* após o processo do *creep* no Sal.

- **Discussão de Resultados:** Observa-se na Figura 5.5 que dentro do sal no momento de equilíbrio acontece um estado de tensões isotrópico e litostático. Salienta-se que esse estado de tensões é um estado frequentemente encontrado em bacias com presença de estruturas de sal (Fredrich *et al*, 2003; Wilson *et al*, 2005; Rehman *et al*, 2006).

Com respeito à Figura 5.6, observa-se que existe um notável contraste nas tensões *in situ* horizontais entre a zona do *Sal* com o seu entorno. Cabe ressaltar que na Figura 5.6, não foi identificado o fenômeno do *arqueamento de tensões* (conhecido usualmente na literatura como *stress-arching effect*) na distribuição de tensões ali apresentada, o qual, segundo Fredrich *et al.* (2003), consiste no seguinte:

“... Para algumas geometrias, a tensão vertical dentro e nas zonas adjacentes ao corpo de sal não é igual ao carregamento gravitacional; ou seja, ocorre o efeito do arqueamento de tensões.” (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003).

- **Distribuição das Tensões Cisalhantes no Modelo Global A Após o Creep no Sal**

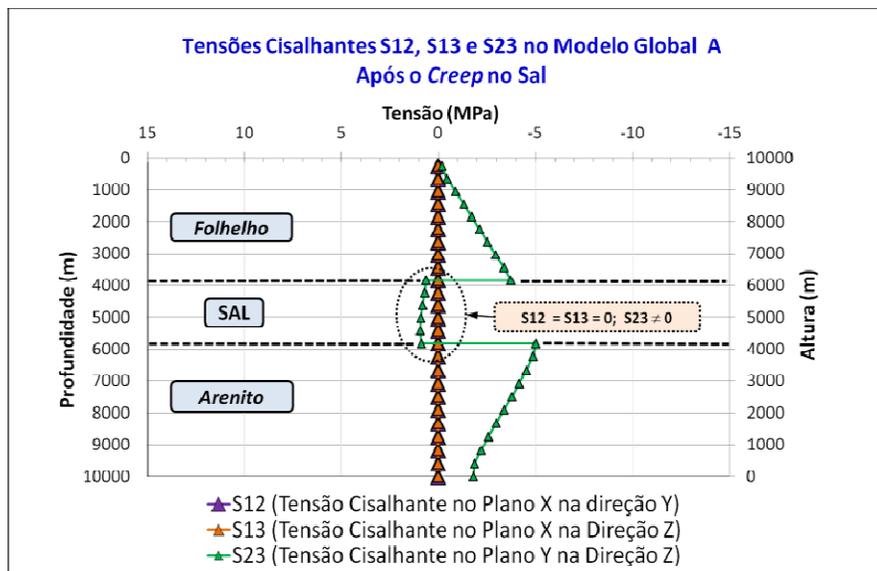


Figura 5.7 – Variação das tensões cisalhantes S12, S13 e S23 no *Modelo Global A* após o processo de *creep* no *Sal*.

- **Discussão de Resultados:** Destaca-se a partir da Figura 5.7 que foi evidenciado que o *creep* no *Sal* consegue modificar a magnitude das tensões cisalhantes em torno dessa zona. Por tanto, a depender de variáveis como a geometria da estrutura de sal, o ambiente tectônico e o contraste de densidades do sal com o seu entorno (Sanz & Dasari, 2010), é possível o eventual aparecimento de altos níveis de tensões cisalhantes no entorno das estruturas de sal.

Com relação à variação da magnitude das tensões cisalhantes em torno de estruturas de sal no subsolo, cabe ressaltar que este é um fator muito importante a ser levado em consideração durante a análise de estabilidade de poços. Em relação ao anterior, Luo *et al.* (2012) afirmam que os problemas de instabilidade de poços nas vizinhanças de estruturas salinas no subsolo tendem a ocorrer em lugares com presença de altas tensões de cisalhamento e baixa tensão principal mínima.

## 5.2.

### Transferência de Tensões do *Modelo Global A* para a *Subestruturas A e B*

- **Subestrutura A**

Inicialmente foram transferidas as tensões para a *Subestrutura A* utilizando a técnica do IPD. Para facilitar a avaliação da transferência de tensões do modelo global para a *Subestrutura A*, foi estabelecida no *Modelo Global A* uma trajetória delimitada pelos nós 16286 e 7732 (Figura 5.8), a qual fica coincidente no espaço com a *Subestrutura A*.

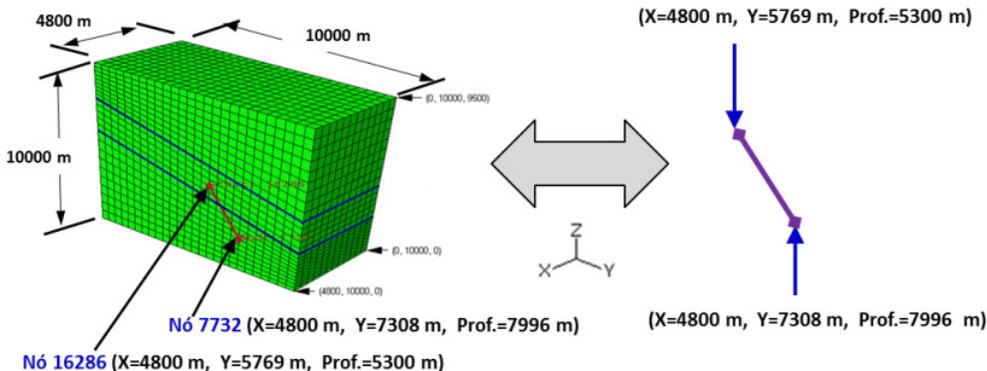


Figura 5.8 – Validação da transferência de tensões na *Subestrutura A* (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do *Modelo Global A*; direita: *Subestrutura A*)

Tal como mencionado anteriormente no Capítulo 3 e lembrado a seguir, na Figura 5.8 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. Neste contexto, as profundidades de 5300 e 7796 m correspondem aos valores de  $Z=4700$  e  $Z=2004$  m, respectivamente.

Os resultados obtidos apresentam-se a seguir (Figura 5.9).

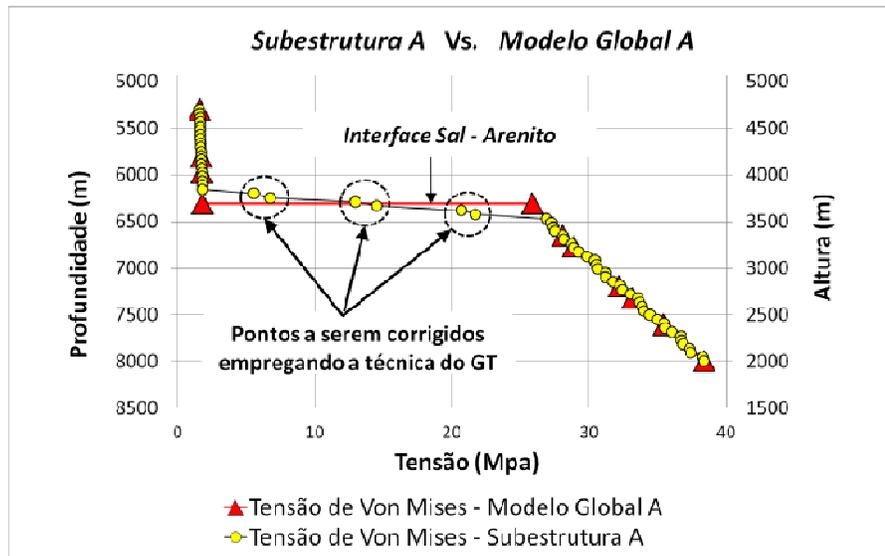


Figura 5.9 – Tensões transferidas do *Modelo Global A* para a *Subestrutura A* a partir da técnica do *IPD*.

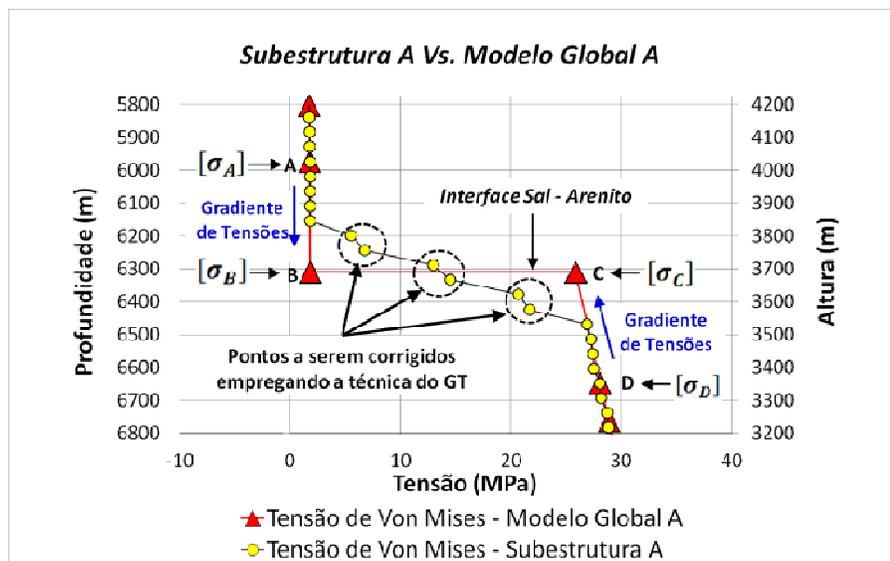


Figura 5.10 – *Subestrutura A*: Detalhe da interface Sal-Arenito.

Cabe destacar que na Figura 5.9 foi utilizada a equação de Von Mises (Equação 2.1) para representar as tensões na *subestrutura* anterior, dado que a essa equação está em função de cada uma das seis componentes do tensor de tensões. Portanto, a equação de Von Mises facilita a comparação entre a distribuição de tensões dos *Modelos Globais A* e *B* com a distribuição de tensões em cada uma das *subestruturas* e *submodelos* apresentados anteriormente nos Capítulos 3 e 4, ao invés de apresentar gráficos por separado comparando cada uma das componentes do tensor de tensões em cada um desses elementos.

Como observado anteriormente na Figura 5.9 e Figura 5.10, existem alguns pontos da *Subestrutura A* que não coincidem com as tensões do modelo global. Portanto, neste caso utiliza-se a técnica do *GT* para aprimorar os resultados nesta zona de interface, como mostrado na Figura 5.11, mantendo assim a continuidade de tensões na zona de interface do sal (Luo *et al.*, 2012b).

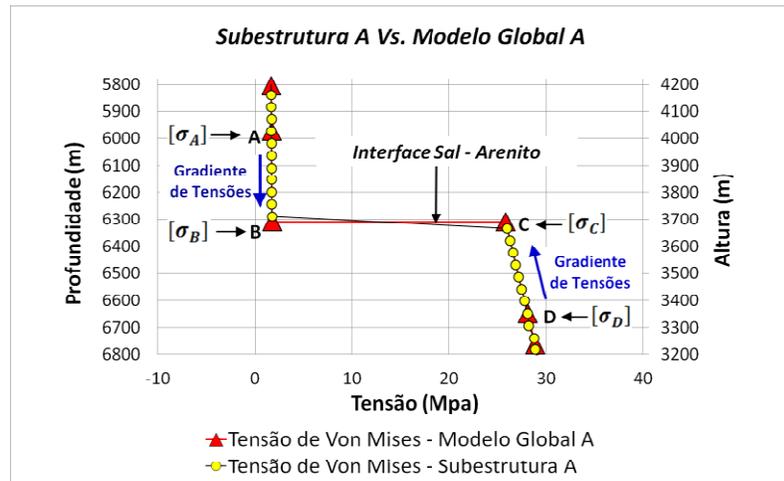


Figura 5.11 – *Subestrutura A*: Detalhe da interface Sal-Arenito e pontos corrigidos a partir da técnica do *GT*.

### • *Subestrutura B*

Para facilitar a avaliação da transferência de tensões do modelo global para a *Subestrutura B*, foi escolhida uma linha vertical no modelo global coincidente no espaço com *Subestrutura B*, como apresentado na Figura 5.12:

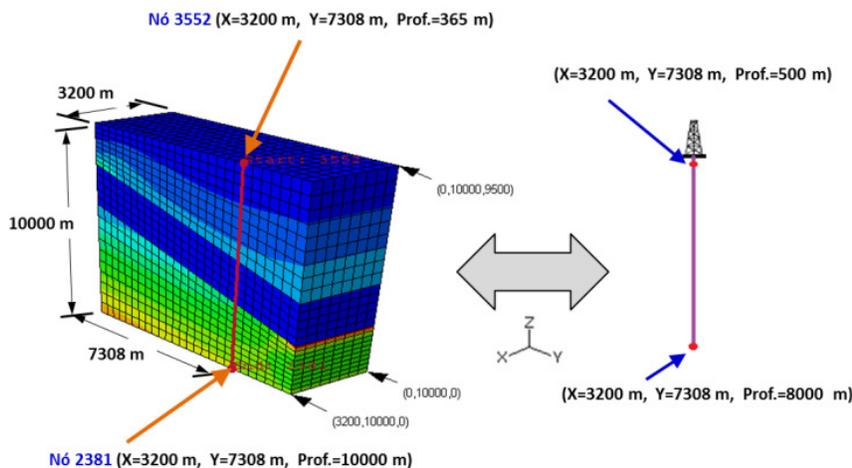


Figura 5.12 – Validação da transferência de tensões na *Subestrutura B* (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do *Modelo Global A*; direita: *Subestrutura B*)

Tal como no caso da *Subestrutura A*, na *Subestrutura B* inicialmente foram transferidas as tensões utilizando só a técnica do *IPD* e, posteriormente, foram aprimorados os resultados nas zonas de interface do sal com a rocha adjacente através da técnica do *GT*.

Os resultados obtidos com a técnica do *IPD* são apresentados a seguir na Figura 5.13.

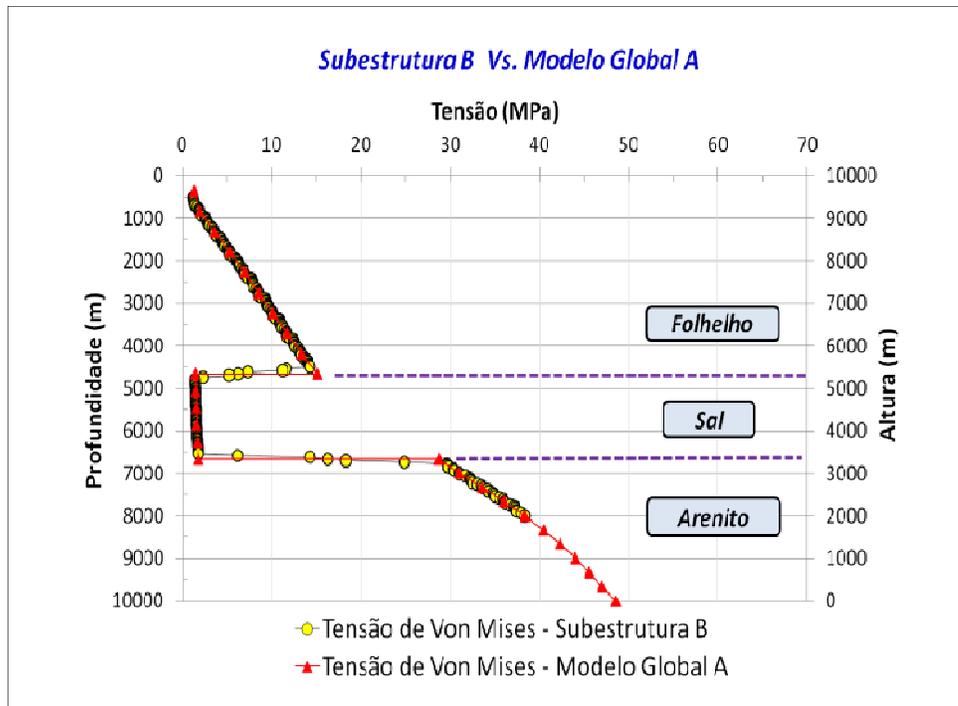


Figura 5.13 – Tensões transferidas do *Modelo Global A* para a *Subestrutura B* a partir da técnica do *IPD*.

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 a seguir se apresenta o detalhe das zonas de interface do sal com as rochas adjacentes. Nota-se que alguns pontos da *Subestrutura B* não coincidem com a distribuição de tensões do modelo global.

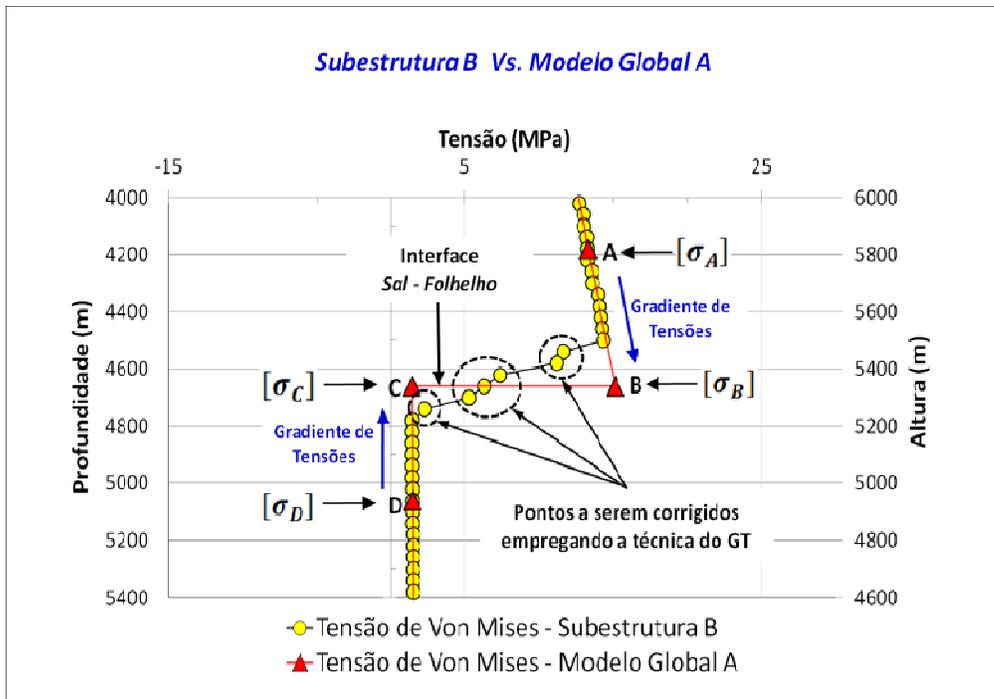


Figura 5.14 – Subestrutura B: Detalhe da interface Sal-Folhelho

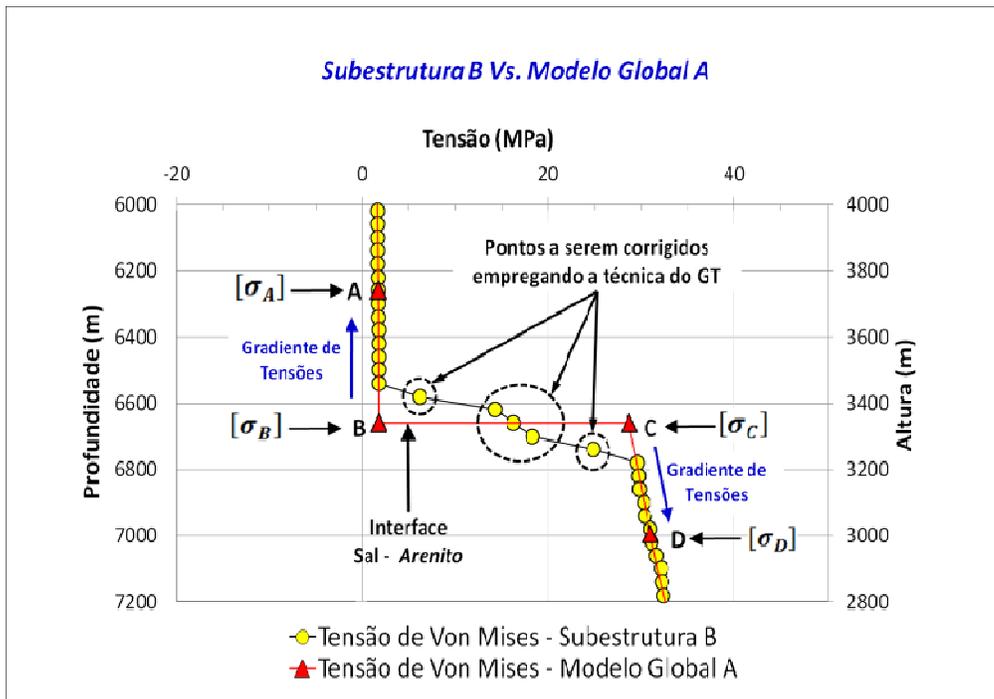


Figura 5.15 – Subestrutura B: Detalhe da interface Sal-Arenito.

Os resultados aprimorados nas zonas de interface empregando a técnica do GT são apresentados na Figura 5.16 e Figura 5.17 a seguir.

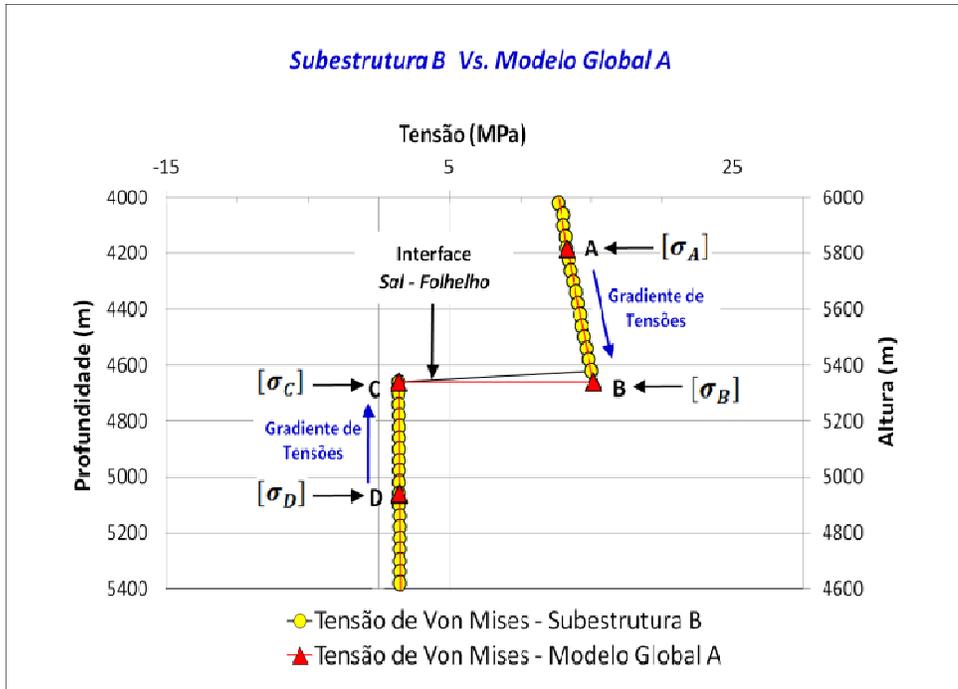


Figura 5.16 – *Subestrutura B*: Detalhe da interface Sal-Folhelho e pontos corrigidos a partir da técnica do GT.

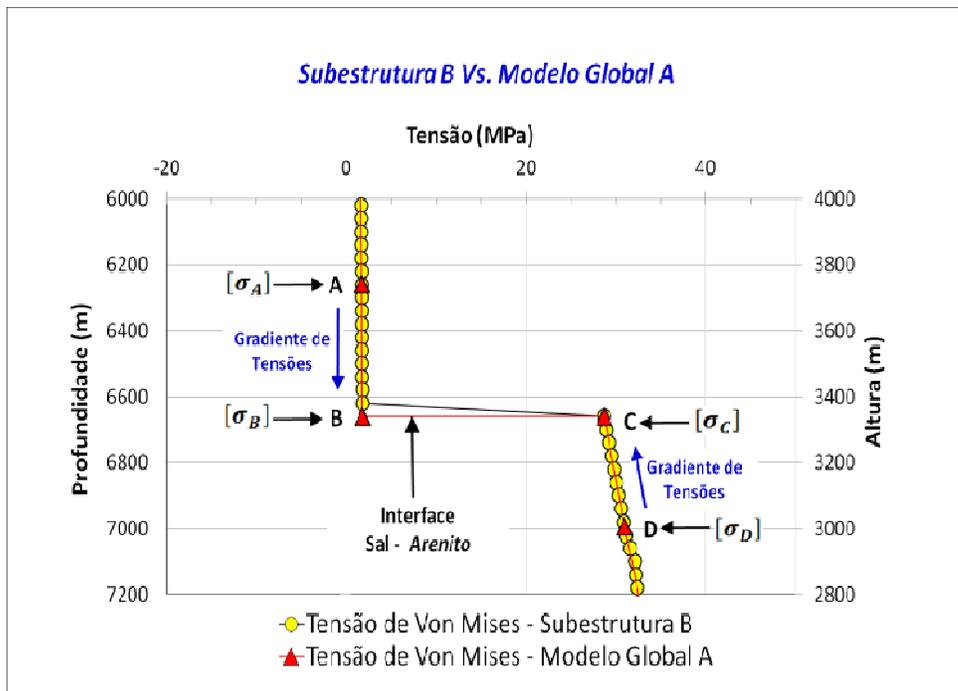


Figura 5.17 – *Subestrutura B*: Detalhe da interface Sal-Arenito e pontos corrigidos a partir da técnica do GT.

### 5.3. Resultados da Análise de Estabilidade de Poços

#### 5.3.1. Subestrutura A

Foi estabelecida uma janela operacional na *Subestrutura A*, a qual é apresentada na Figura 5.18:

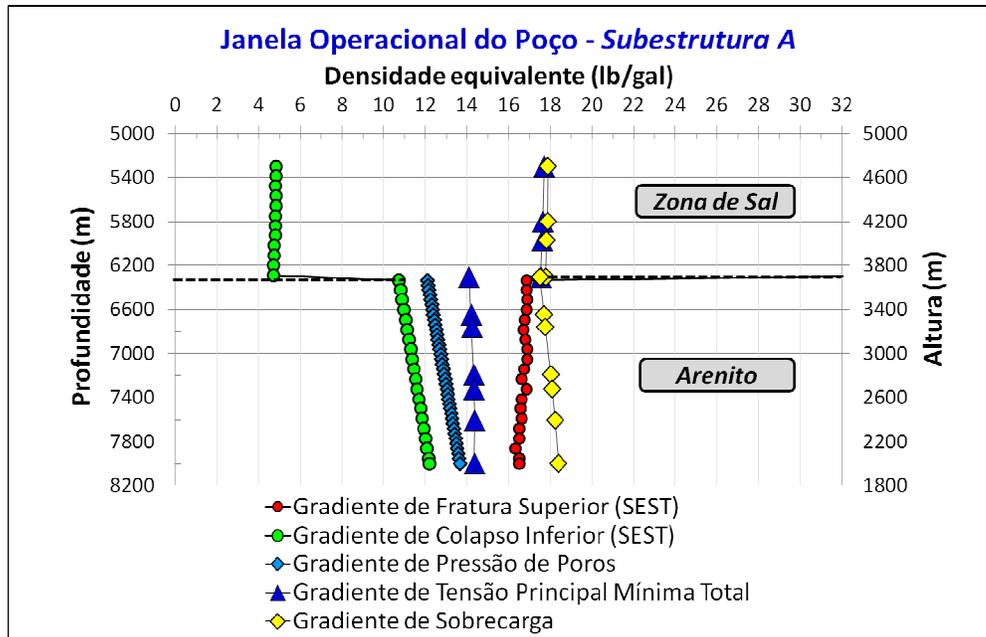


Figura 5.18 –Janela operacional do poço na *Subestrutura A*.

#### 5.3.2. Subestrutura B

Uma vez transferidas as tensões *in situ* do *Modelo Global A* para cada um dos pontos que compõem a trajetória da *Subestrutura B*, e dado o fato de que a largura de uma janela operacional de poços para certa profundidade pode estar influenciada por muitos fatores (como, por exemplo, as propriedades mecânicas, a pressão de poro, o azimute e a inclinação do poço, as tensões *in situ*, etc.), pretende-se a seguir construir várias janelas operacionais para a *Subestrutura B* com os seguintes dois objetivos:

a) Aplicar a metodologia de acoplamento de resultados de tensões *in-situ* da análise numérica em elementos finitos com a modelagem analítica no programa SEST, apresentada anteriormente no Capítulo 3.

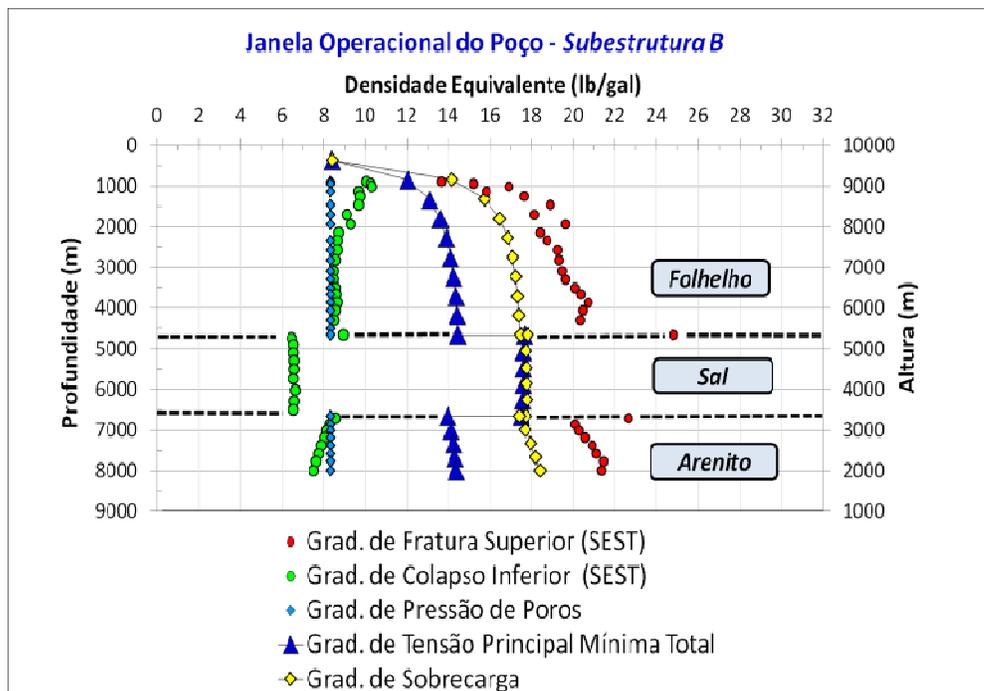
b) Analisar qualitativamente o efeito de certos parâmetros sobre a largura da janela operacional na *Subestrutura B* nos cenários apresentados no Quadro 5.2 a seguir.

Quadro 5.2 – Cenários utilizados para a criação da janela operacional na *Subestrutura B* a partir da análise qualitativa de alguns parâmetros.

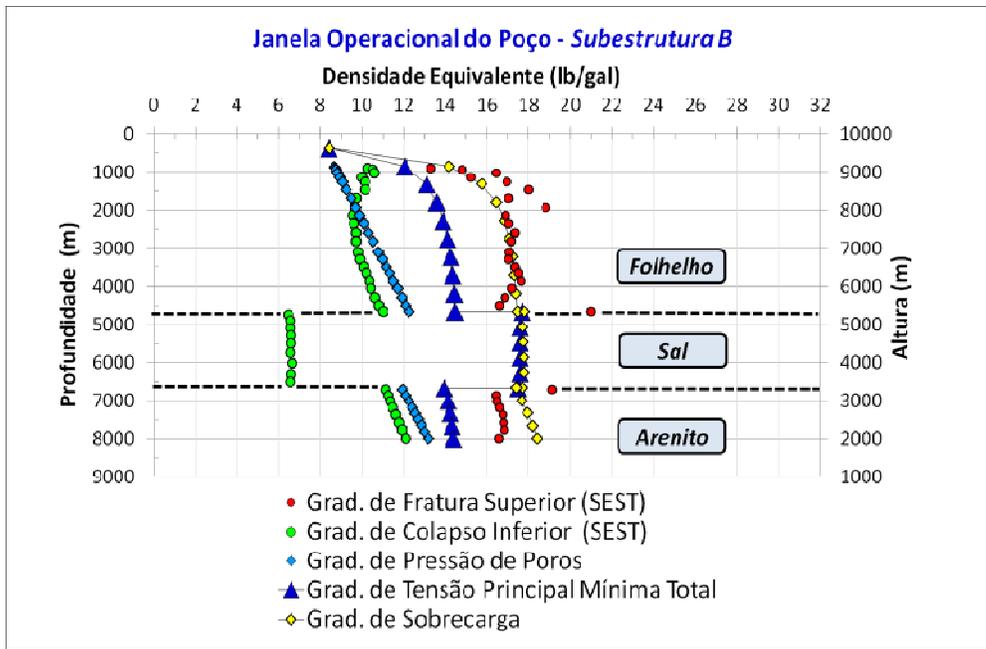
<b>Cenário 1</b>	Varição da poropressão nas zonas de <i>Folhelho</i> e de <i>Arenito</i> .
<b>Cenário 2</b>	Varição do valor das propriedades mecânicas de resistência à compressão uniaxial e de resistência à tração nas três zonas do <i>Modelo Global A</i> .
<b>Cenário 3</b>	Estudo do efeito das tensões cisalhantes sobre a largura da janela operacional do poço na zona de <i>Arenito</i> .

- **Cenário 1: Efeito da Variação da Poropressão na Largura da Janela Operacional da *Subestrutura B***

A Figura 5.19 a seguir apresenta qualitativamente o efeito da poropressão sobre a largura janela operacional na *Subestrutura B* nas zonas de *Folhelho* e de *Arenito*:



(a)



(b)

Figura 5.19 – Efeito do aumento da poropressão sobre a largura da janela operacional do poço na *Subestrutura B*: (a) Gradiente de Poropressão Hidrostático; (b) Gradiente de Poropressão maior que o Hidrostático.

Na Figura 5.19 pode ser observado que o incremento na poropressão faz com que aconteça uma redução da largura na janela operacional nas zonas do *Folhelho* e do *Arenito*.

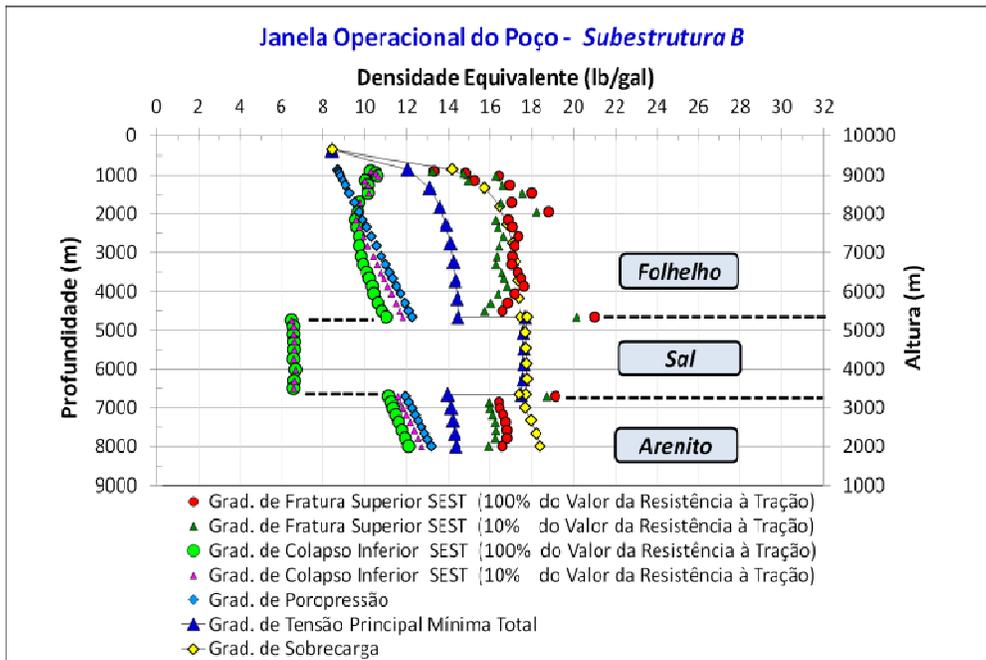
- **Cenário 2: Efeito da Variação da Magnitude das Propriedades Mecânicas na Largura da Janela Operacional na *Subestrutura B***

A fim de estudar qualitativamente o efeito da variação da magnitude das propriedades mecânicas sobre a largura da janela operacional na *Subestrutura B*, foram escolhidas as seguintes duas propriedades mecânicas para tal estudo:

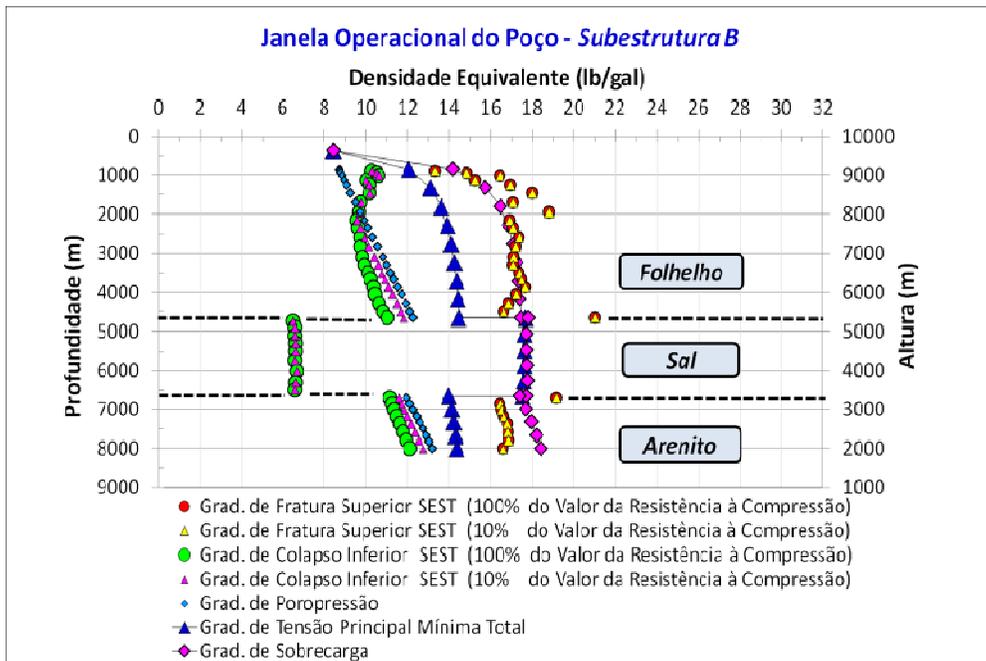
- *Resistência à Compressão Uniaxial.*
- *Resistência à Tração.*

Portanto, o valor desses dois parâmetros foi reduzido em 90% com respeito ao seu valor original a fim de realizar a comparação desses dois cenários. Salieta-se que nesta análise foi estabelecida uma condição de poropressão constante e foi, portanto, adotada a distribuição de poropressão apresentada anteriormente na Figura 5.19.

Os resultados obtidos apresentam-se abaixo, na Figura 5.20.



(a)



(b)

Figura 5.20 – Efeito da variação das propriedades mecânicas sobre a largura da Janela Operacional na *Subestrutura B*: (a) variação da *Resistência à Tração*; (b) variação da *Resistência à Compressão Uniaxial*.

**- Efeito da Redução do valor da Resistência à Tração na largura da Janela Operacional da Subestrutura B:**

A partir da Figura 5.20 (a), foi verificada uma redução do *Gradiente de Fratura Superior* nas zonas do *Folhelho* e do *Arenito*, assim como também foi observado um aumento do *Gradiente de Colapso Inferior* nessas zonas. Com relação à zona do *Sal*, não foi observada uma variação significativa do *Gradiente de Colapso Inferior*.

**- Efeito da Redução do valor da Resistência à Compressão na largura da Janela Operacional da Subestrutura B:**

A partir da Figura 5.20 (b), não foi verificada uma redução significativa do *Gradiente de Fratura Superior* nas zonas do *Folhelho* e do *Arenito*. No entanto, foi observado um aumento do *Gradiente de Colapso Inferior* nessas zonas. Com relação à zona do *Sal*, não foi observada uma variação significativa do *Gradiente de Colapso Inferior*.

Na Tabela 5.1 a seguir é apresentada a variação, em *lb/gal*, dos gradientes de *Fratura Superior* e *Colapso Inferior* em cada uma das zonas atravessadas pela *Subestrutura B*.

Tabela 5.1 – Variação, em *lb/gal*, dos gradientes de *Fratura Superior* e *Colapso Inferior* nas zonas do *Modelo Global A*.

	<b>Propriedades Mecânicas</b>			
	<b>Resistência à Tração</b>		<b>Resistência à Compressão Uniaxial</b>	
	<b>G.C.I.</b>	<b>G.F.S.</b>	<b>G.C.I.</b>	<b>G.F.S.</b>
<b>Folhelho</b>	Aumento entre 0,58-0,83 lb/gal	Redução entre 0,36-0,85 lb/gal	Aumento entre 0,39-0,84 lb/gal	Sem Variação Significativa
<b>Sal</b>	Sem Variação Significativa	-----	Sem Variação Significativa	-----
<b>Arenito</b>	Aumento entre 0,43-0,62 lb/gal	Redução entre 0,46-0,64 lb/gal	Aumento entre 0,43-0,62 lb/gal	Sem Variação Significativa

- **Cenário 3: Efeito das Tensões Cisalhantes sobre a Largura da Janela Operacional do Poço na Zona de Arenito.**

No entorno das estruturas de sal, a perturbação de tensões *in situ* faz com que aconteça a mudança na magnitude e na orientação das tensões principais (Sanz & Dasari, 2010). Como consequência dessa perturbação de tensões, podem aparecer zonas em torno do sal com tensões cisalhantes amplificadas (Fredrich *et al.*, 2003). Luo *et al.* (2012a) defendem que a instabilidade do poço no entorno de corpos de sal tende a acontecer em lugares com baixo valor da tensão principal mínima e alto valor da tensão de cisalhamento, e portanto nesses lugares a janela operacional do poço é estreita.

Nesta dissertação foram idealizados dois cenários hipotéticos, apresentados a seguir no Quadro 5.3, a fim de verificar qualitativamente o efeito das tensões cisalhantes sobre a largura da janela operacional na zona de Arenito da Subestrutura B.

Quadro 5.3 – Cenários adotados para a estudar qualitativamente o efeito da presença de tensões cisalhantes sobre a largura da Janela Operacional na Subestrutura B na zona de Arenito.

<b>Cenário A</b>	As tensões normais para cada profundidade na zona do Arenito fornecidas a partir da modelagem numérica são mantidas inalteradas, enquanto as tensões cisalhantes são completamente zeradas.
<b>Cenário B</b>	As tensões normais para cada profundidade na zona do Arenito fornecidas a partir da modelagem numérica são mantidas inalteradas, enquanto as tensões cisalhantes são impostas para cada profundidade da seguinte maneira: $S_{12} = 2 \text{ MPa}$ , $S_{13} = 4 \text{ MPa}$ e $S_{23} = 14 \text{ MPa}$ .

- **Comparação dos Cenários A e B:**

Os resultados obtidos a partir desses cenários apresentam-se abaixo, na Figura 5.21.

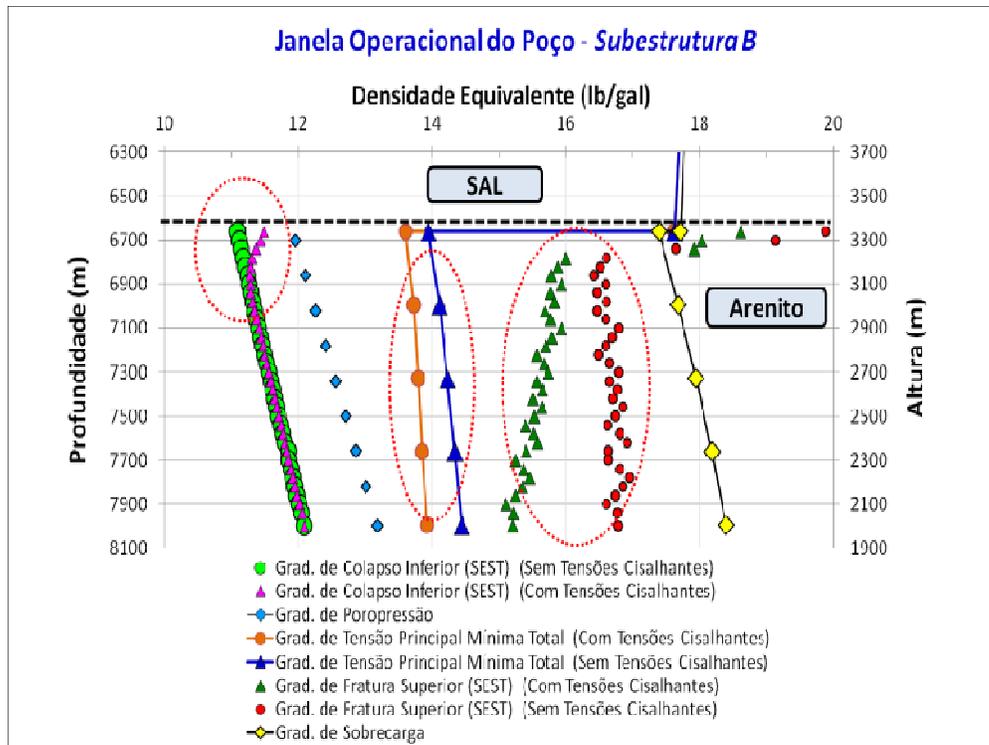


Figura 5.21 – Efeito da presença de tensões cisalhantes sobre a largura da janela operacional na zona do *Arenito* da *Subestrutura B* (Cenários A e B).

Na Figura 5.21, foi observado que tanto o *Gradiente de Fratura Superior* quanto o *Gradiente de Colapso Inferior* podem ser afetados pela presença de tensões cisalhantes amplificadas, assim como também o *Gradiente de Tensão Principal Mínima Total*. Nota-se adicionalmente que onde as componentes de tensão cisalhante são diferentes de zero, o *Gradiente de Fratura Superior* e o *Gradiente de Tensão Principal Mínima Total* diminuem com relação aos seus valores de referência de gradiente onde as componentes de tensões cisalhantes são iguais a zero. O anterior resulta em uma janela operacional mais estreita nos pontos de saída da zona de sal durante a perfuração.

Portanto, esta combinação particular e hipotética de tensões cisalhantes sugere que a presença de tensões cisalhantes em torno de estruturas de sal pode realmente afetar a largura da janela operacional de um poço de petróleo. No entanto, mais pesquisa deve ser encaminhada a fim de detalhar e entender melhor o efeito da variação da magnitude das tensões cisalhantes na largura da janela operacional de um poço.

#### 5.4.

### Transferência de Tensões do *Modelo Global B* para os *Submodelos A, B e C*

Uma vez conseguidas as tensões *in situ* finais no *Modelo Global B*, após o processo de *creep* no *Sal*, estas tensões devem ser transferidas para os três *submodelos* descritos no Capítulo 4, empregando as duas técnicas de transferência de tensões do *IPD* e do *GT*. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos com cada um desses *submodelos*.

- **Submodelo A**

Para a transferência de tensões ao *Submodelo A*, foram utilizadas tanto a técnica do *IPD* quanto a técnica do *GT*. A distribuição de tensões no *Submodelo A* após a transferência de tensões com cada uma das duas técnicas é apresentada a seguir na Figura 5.22:

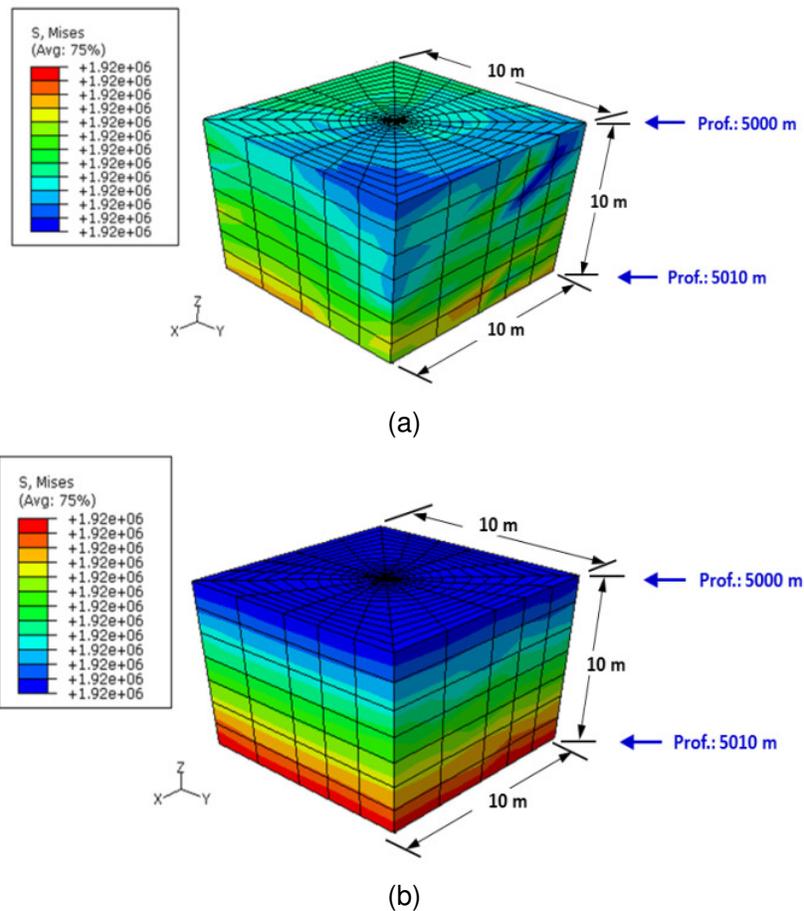


Figura 5.22 – Distribuição da tensão de Von Mises no *Submodelo A* após a transferência de tensões do *Modelo Global B* (tensão de Von Mises em Pa): (a) técnica do *IPD*; (b) técnica do *GT*.

Para facilitar a avaliação da transferência de tensões do modelo global para o *Submodelo A*, foi estabelecida nesse submodelo uma trajetória vertical delimitada pelos nós 1 e 4, a qual fica coincidente no espaço com a linha vertical adotada no *Modelo Global B* da Figura 5.23, como apresentado a seguir:

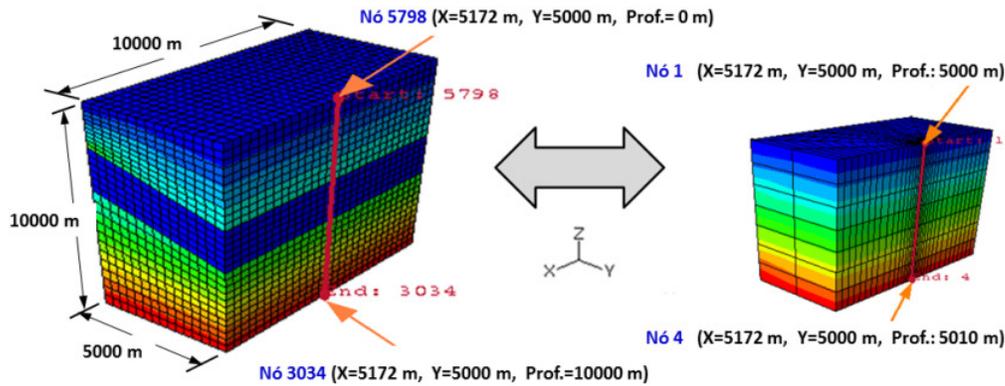


Figura 5.23 – Validação da transferência de tensões no *Submodelo A* (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do *Modelo Global B*; direita: trajetória adotada na seção transversal do *Submodelo A*)

Os resultados obtidos são apresentados a seguir (Figura 5.24 e Figura 5.25):

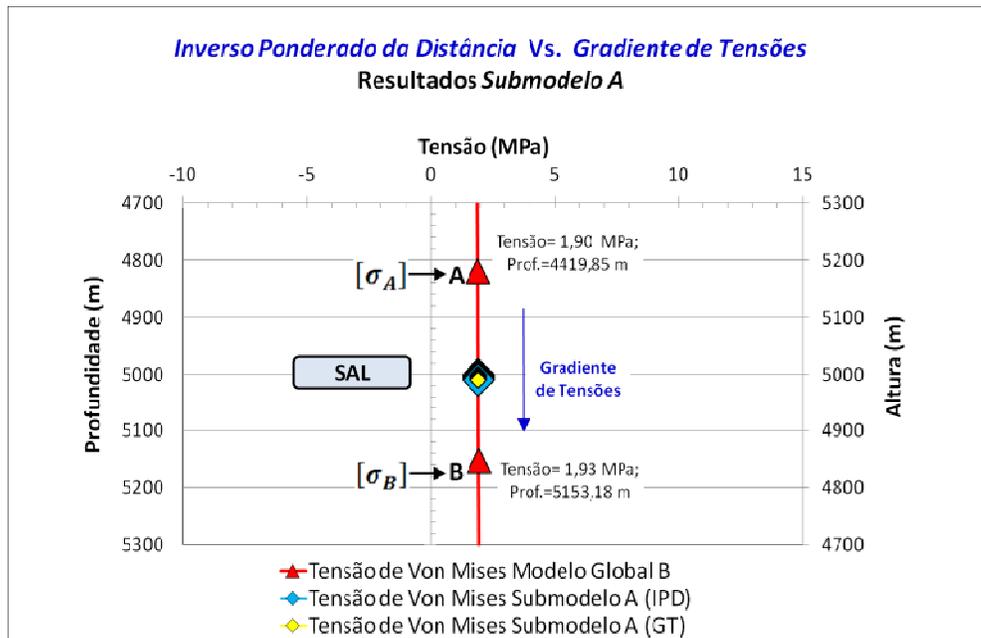


Figura 5.24 – Resultados da transferência de tensões do *Modelo Global B* para o *Submodelo A* (Tensão de Von Mises).

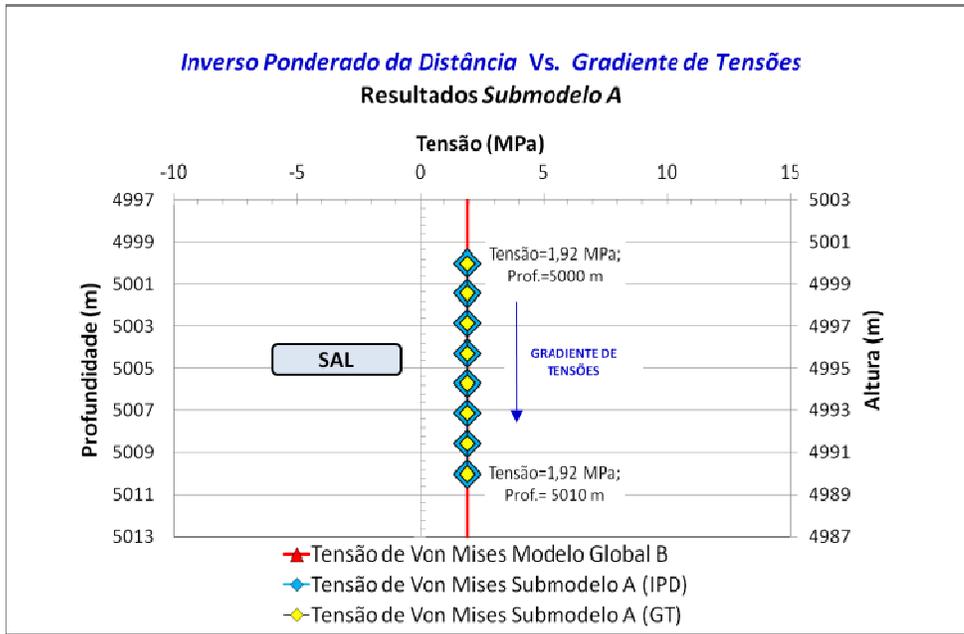
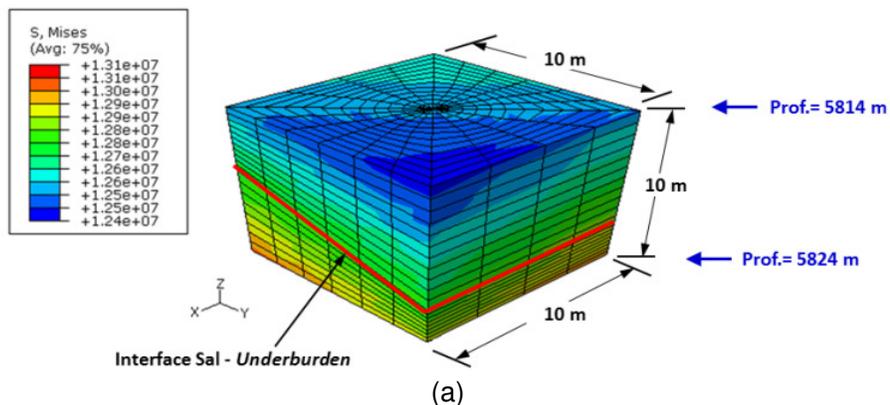


Figura 5.25 – Detalhe no *Submodelo A* (faixa de profundidade: 5000 – 5010 m).

- **Discussão de Resultados:** De acordo a Figura 5.24 e Figura 5.25, foram obtidos resultados satisfatórios no *Submodelo A* na zona de *Sal* tanto com a técnica do *IPD* quanto com a técnica do *GT*, dado que os valores de tensão nesse *submodelo* coincidem com os valores de tensões do *Modelo Global B* nos dois casos.

### • Submodelo B

Para a transferência de tensões ao *Submodelo B*, foram também utilizadas tanto a técnica do *IPD* quanto a técnica do *GT*. A distribuição de tensões no *Submodelo B*, após a transferência de tensões com cada uma dessas técnicas, é apresentada a seguir na Figura 5.26:



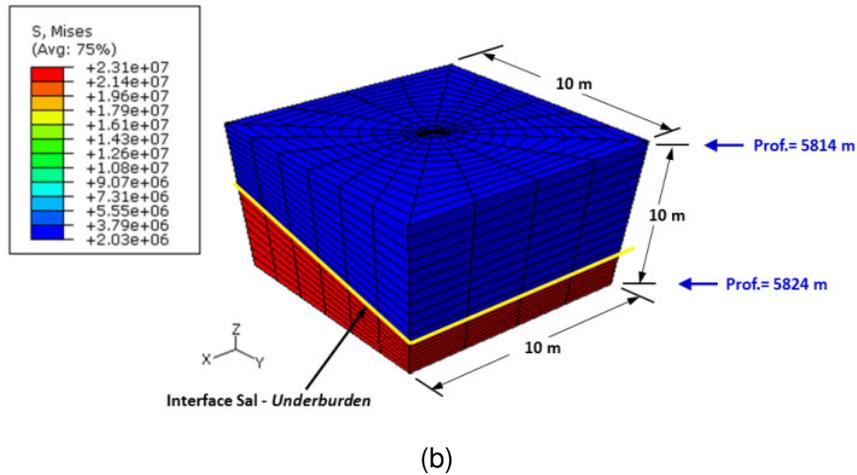


Figura 5.26 – Distribuição de tensões no *Submodelo B* após a transferência de tensões do *Modelo Global B* (tensão de Von Mises em Pa): (a) técnica do IPD; (b) técnica do GT.

Para facilitar a avaliação da transferência de tensões do modelo global para o *Submodelo B*, foi estabelecida nesse submodelo uma trajetória vertical delimitada pelos nós 37 e 3, a qual fica coincidente no espaço com a linha vertical adotada no *Modelo Global B* da Figura 5.27, como apresentado a seguir:

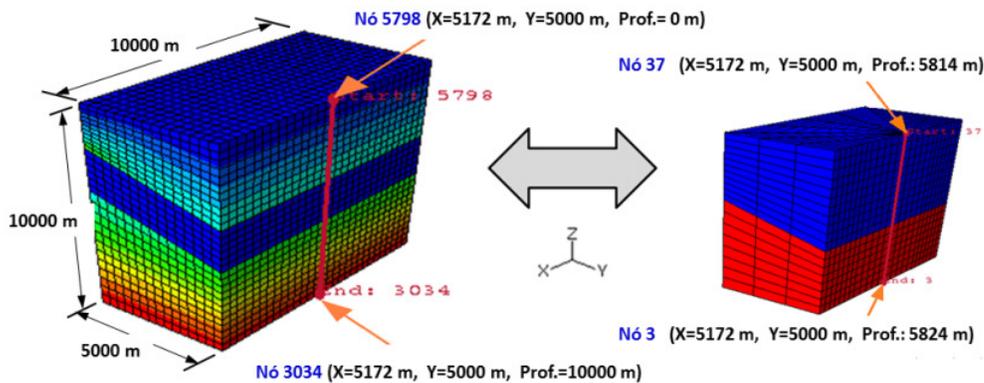


Figura 5.27 – Validação da transferência de tensões no *Submodelo B* (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do *Modelo Global B*; direita: trajetória adotada na seção transversal do *Submodelo B*)

Salienta-se que neste caso em particular, quando foi utilizada a técnica do *GT*, foi necessário transferir dois gradientes verticais diferentes no *Submodelo B*, ou seja, um acima da interface (na zona do Sal) e outro abaixo da interface (na zona do *Underburden*). A sub-rotina criada em Fortran, que é lida e processada

pele programa Abaqus para carregar as tensões nesse submodelo, precisa neste caso da equação do plano da interface *Sal-Underburden* para conseguir diferenciar entre as duas regiões e posteriormente carregar as tensões *in situ* para os pontos de Gauss de cada um dos elementos que compõem a malha do *submodelo* (nota-se que a equação desse plano foi apresentada anteriormente na Figura 4.9). Os resultados obtidos utilizando as duas técnicas propostas, são apresentados a seguir (Figura 5.28 e Figura 5.29).

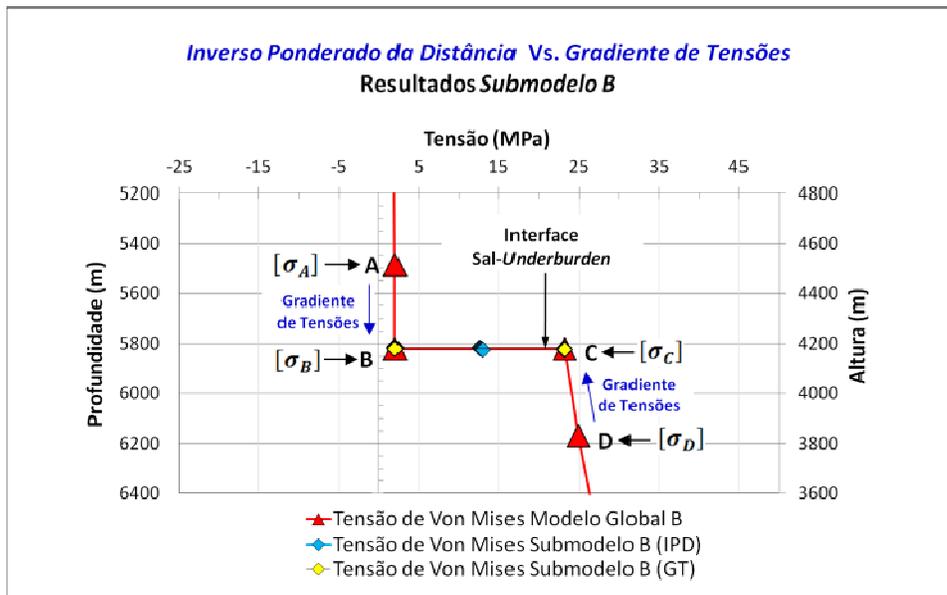


Figura 5.28 – Resultados da transferência de tensões do *Modelo Global B* para o *Submodelo B* (Tensão de Von Mises).

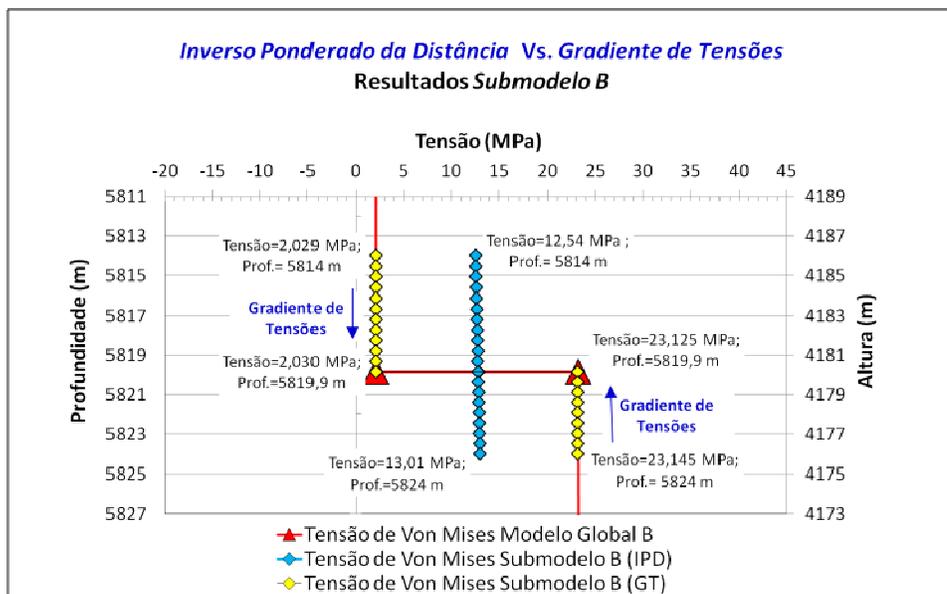


Figura 5.29 – *Submodelo B*: Detalhe da interface *Sal-Underburden* (Faixa de profundidade: 5814 – 5824 m).

- **Discussão de Resultados:** Como observado na Figura 5.28 e Figura 5.29, foram obtidos resultados satisfatórios no *Submodelo B* na zona de interface *Sal-Underburden* através do uso da técnica do *GT*, dado que os valores de tensão nesse *submodelo* coincidem com os valores de tensão do *Modelo Global B*. No entanto, os resultados obtidos empregando a técnica do *IPD* não foram satisfatórios nessa zona de interface do *Sal* como os seus arredores.

- **Evidência de Presença de Tensões Principais Perpendiculares na Interface *Sal-Underburden* do *Submodelo B***

Na interface *Sal-Underburden* do *Submodelo B*, foi obtida a seguinte orientação das tensões principais máxima, intermediária e mínima (Figura 5.30 (a) e (b)):

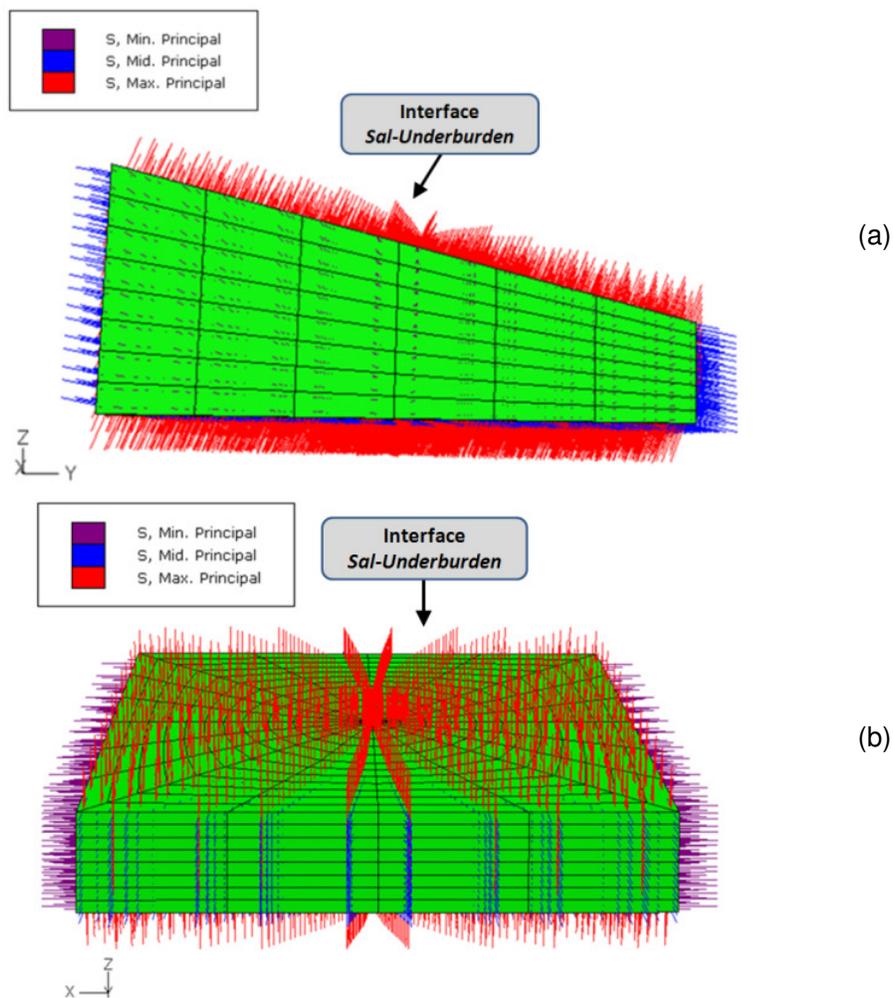


Figura 5.30 – Orientação das tensões principais máxima, intermediária e mínima na interface *Sal-Underburden* do *Submodelo B*: (a) vista Y-Z; (b) vista X-Z.

- **Discussão de Resultados:** Na Figura 5.30 (a) e (b), foi constatado que a tensão principal máxima (entendida neste capítulo como aquela que possui o maior valor de compressão) fica perpendicular ao plano *Sal-Underburden*, enquanto que as tensões principais mínima e intermediária ficam paralelas nessa interface. O fenômeno anterior é coerente com as observações de pesquisadores na indústria do petróleo, em relação ao fato de que uma das tensões principais na zona de interface do *Sal* com a rocha adjacente deve ser perpendicular nessa superfície (Zoback, 2007; Sanz & Dasari, 2010; e Van der Zee *et al.*, 2011). Cabe destacar que a continuidade de tensões na zona de interface do sal com as rochas adjacentes garante que uma das tensões principais seja sempre perpendicular nessa zona de interface (Luo *et al.*, 2012b).

### • Submodelo C

Para a transferência de tensões ao *Submodelo C*, foi utilizada neste caso só a técnica do *IPD*. A distribuição de tensões no *Submodelo C* após a transferência de tensões é apresentada na Figura 5.31:

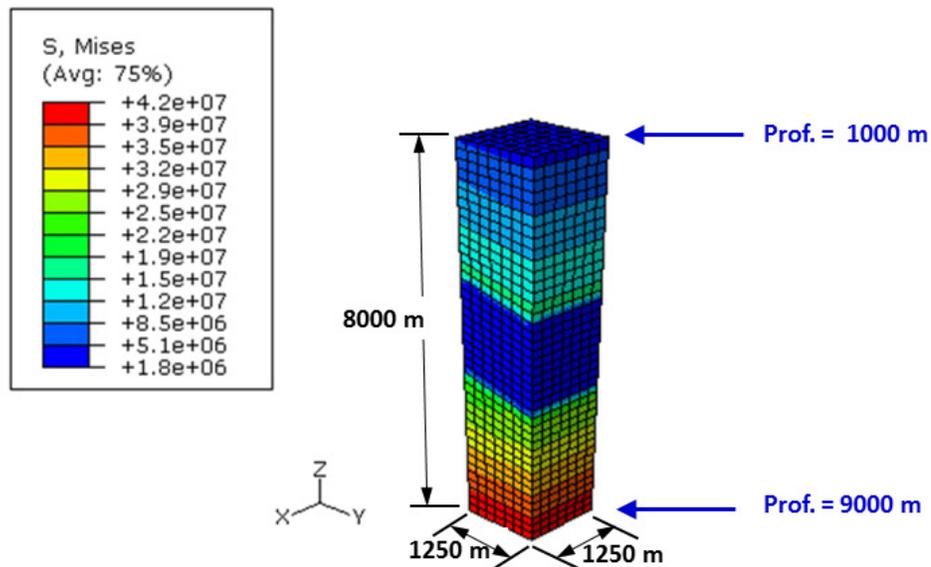


Figura 5.31 – Distribuição de tensões no *Submodelo C* após a transferência de tensões a partir do *Modelo Global B* (Tensão de Von Mises em Pa).

Para facilitar a avaliação da transferência de tensões do modelo global para o *Submodelo C*, foi estabelecida nesse submodelo uma trajetória vertical delimitada pelos nós 1051 e 289, a qual fica muito próxima no espaço à linha vertical adotada no *Modelo Global B* da Figura 5.32, como apresentado a seguir:

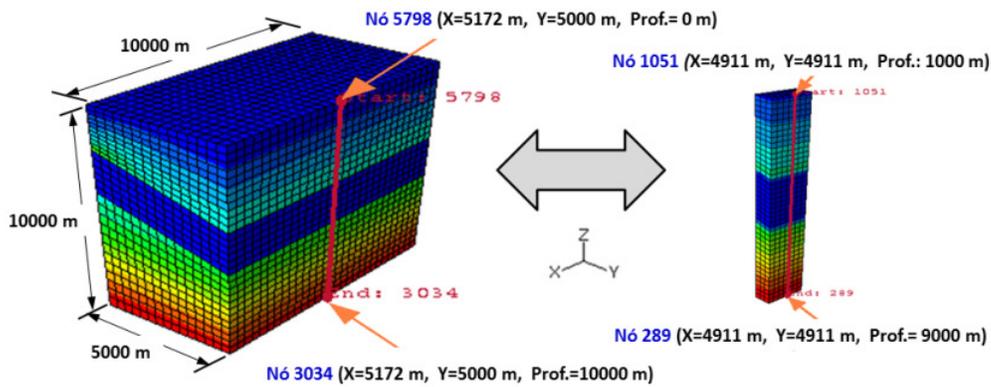


Figura 5.32 – Validação da transferência de tensões no *Submodelo C* (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do *Modelo Global B*; direita: trajetória adotada na seção transversal do *Submodelo C*)

Os resultados obtidos são apresentados a seguir (Figura 5.33)

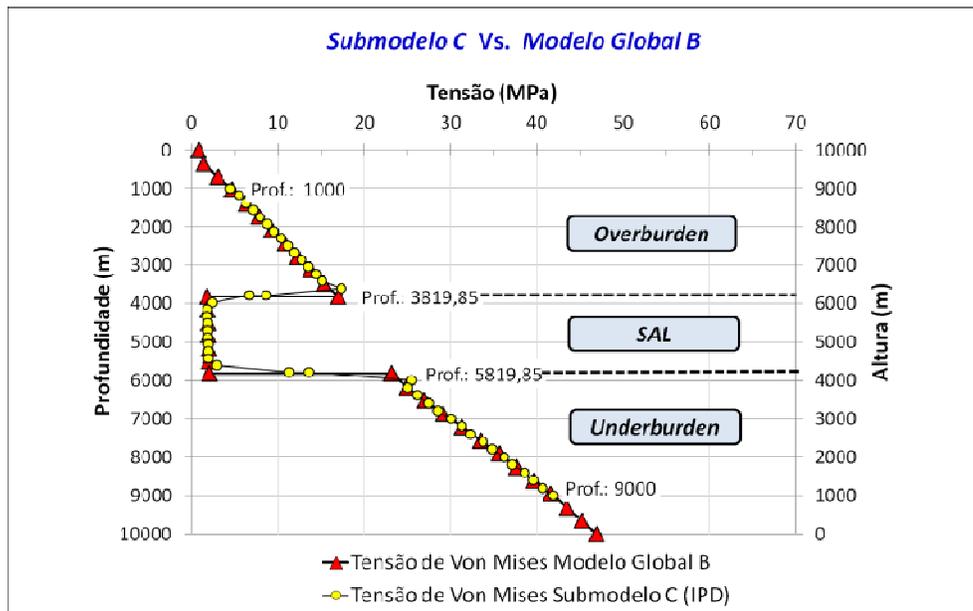


Figura 5.33 – Resultados da transferência de tensões do *Modelo Global B* para o *Submodelo C* (tensão de Von Mises)

A seguir na Figura 5.34, apresenta-se o detalhe das interfaces *Sal-Overburden* e *Sal-Underburden*:

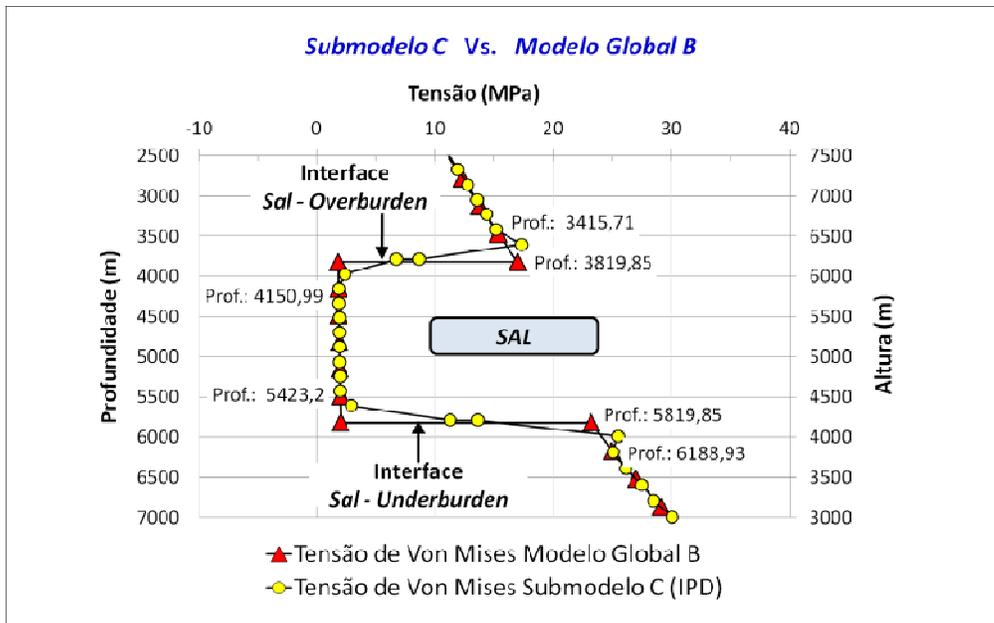


Figura 5.34 – Detalhe das interfaces *Sal-Overburden* e *Sal-Underburden*.

- **Discussão de Resultados:** A partir da Figura 5.33 e Figura 5.34 pode ser observado que a técnica do *IPD* consegue transferir satisfatoriamente as tensões nas regiões do *Overburden*, do *Sal* e do *Underburden*. Entretanto, nas interfaces *Sal-Overburden* e *Sal-Underburden* os resultados não foram satisfatórios, uma vez que não coincidem com as tensões do modelo global, particularmente nas faixas de profundidade de 3415,71–4150,99 e 5423,2–6188,93 metros.

- **Efeito do Nível de Refinamento da Malha do Modelo Global sobre os resultados da técnica do *IPD* nas Zonas de Interface do Sal**

Com o objetivo de verificar o efeito do nível de refinamento da malha do modelo global sobre a qualidade dos dados interpolados na zona de interface do *Sal* com o seu entorno, foi criada uma malha mais refinada no *Modelo Global B* com respeito à malha inicialmente utilizada nesse modelo no Capítulo 4 (Figura 4.3).

Na Figura 5.35 é apresentada a nova malha adotada no *Modelo Global B* para realizar esse estudo, a qual possui um nível de refinamento maior.

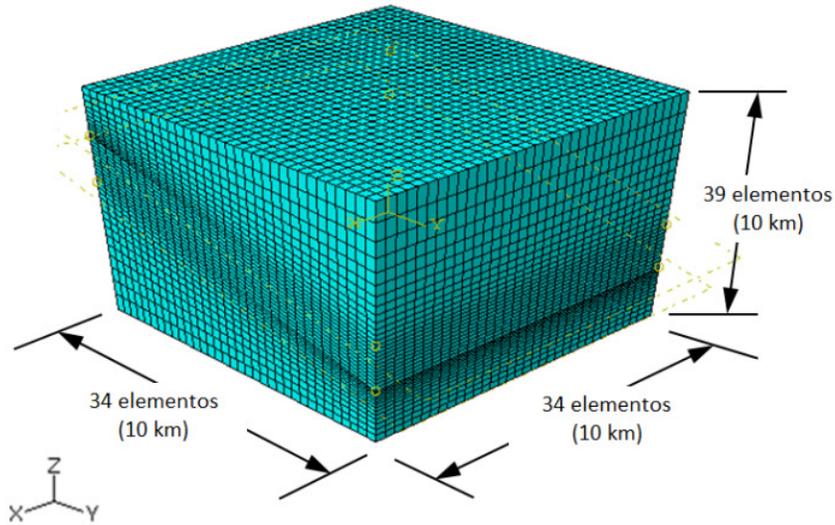


Figura 5.35 – Aspecto da nova malha criada no *Modelo Global B* com um nível de refinamento maior.

Na Tabela 5.2 a seguir, apresenta-se uma comparação entre a malha originalmente utilizada no *Modelo Global B* e a nova malha construída.

Tabela 5.2 – Comparação entre os níveis de refinamento da malha inicial no *Modelo Global B* versus a nova malha construída.

	Dimensão média do elemento na direção X.	Dimensão média do elemento na direção Y.	Dimensão média do elemento na direção Z.
Malha original no <i>Modelo Global B</i>	345 m	334 m	334 m
Malha mais refinada no <i>Modelo Global B</i>	294 m	294 m	256 m

Na Figura 5.36 apresentam-se os resultados obtidos:

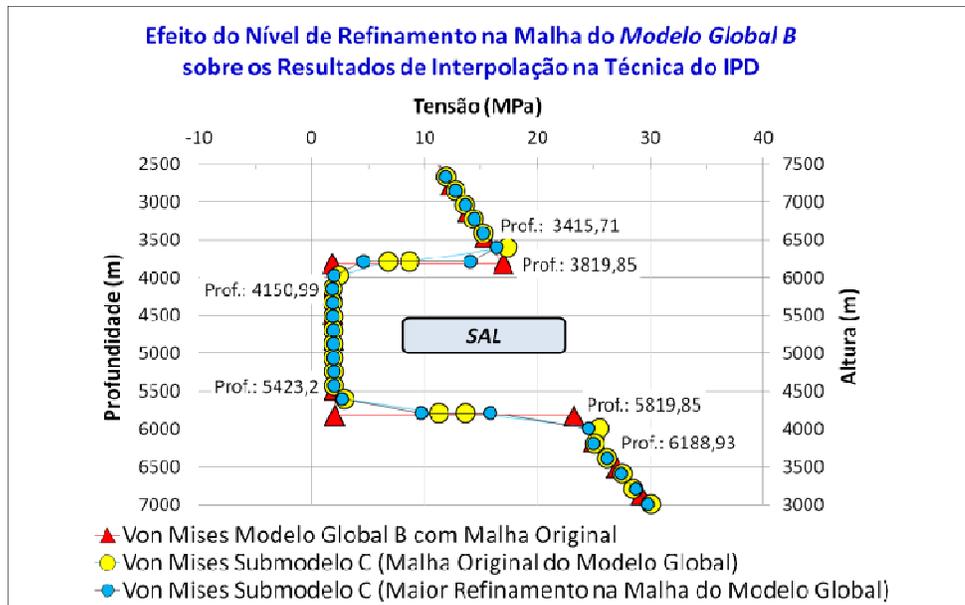


Figura 5.36 – Efeito do nível de refinamento na malha do *Modelo Global B* sobre a qualidade/exatidão dos resultados obtidos nas interfaces do *Sal* com os seus arredores.

- **Discussão de Resultados:** Observa-se na Figura 5.36, nas faixas de profundidade entre 3415,71–4150,99 e 5423,2-6188,93 metros que, evidentemente, existe um efeito do nível de refinamento da malha do modelo global sobre os resultados de interpolação obtidos nas zonas de interface do sal com o seu entorno. Foi observado que quanto maior fosse o nível de refinamento da malha do modelo global, mais próxima estará a curva do *submodelo* analisado da curva do modelo global nas zonas de interface entre o sal com o seu entorno.