4 Resultados

4.1. Introdução

Para um correto estudo e analise do problema, os resultados obtidos nesta dissertação serão organizados da seguinte maneira visando um melhor entendimento do que foi realizado ao longo do trabalho.

Serão usadas como *benchmarks* as respostas de um problema com acoplamento total empregado por muitos autores como referencia, apresentada inicialmente no trabalho de (Gutierrez & Lewis, 1998). Posteriormente, este problema foi utilizado por (Dean, *et al.*, 2003) e (Samier & De Gennaro, 2007) para validar seus acoplamentos parciais.

Com base nesses resultados serão comparadas as respostas do simulador STARS para o mesmo exemplo e assim mostrar como é avaliado o problema pelo simulador com módulo geomecânico (Computer Modelling Group STARS, 2009).

Conjuntamente com STARS serão validados os esquemas implementados (Fontoura & Inoue, 2009) comparando-os com os *benchmarks*, para assim determinar sua aproximação e precisão com a resposta obtida pelo acoplamento total.

Uma vez que estes sejam validados, serão analisados outros parâmetros para melhorar a precisão e o tempo de processamento que têm cada um, mostrando gráficos de tempos empregados.

Para uma completa analise do problema no estudo serão incluídos gráficos para mostrar as variações das tensões e deslocamentos, que há entre os esquemas empregados com referencia aos resultados do acoplamento total.

4.2. Validação dos esquemas

O problema é um reservatório produtor de baixa rigidez contido dentro de uma região de elevada rigidez. O problema exibe um efeito geomecânico no contorno do reservatório, que não pode ser visto na simulação de reservatório que não inclui cálculos geotécnicos. Para este problema, os efeitos geomecânicos são ocasionados pelo aumento nas pressões de fluido no limite do reservatório durante as fases iniciais de produção (Dean, *et al.*, 2003).

Para a elaboração do grid de simulação tem-se 21 células no eixo X, 21 no eixo Y, e 12 células no eixo Z, que discretizara o reservatório e as rochas adjacentes. Os comprimentos das células na direção x são 1219,20 m (4000 ft) para as cinco primeiras células de 609,6 m (2000 ft) as próximas 11 células e 1219,20 m (4000 ft) para as cinco últimas células. Os comprimentos das células na direção x são 200 ft) para as cinco últimas células. Os comprimentos das células na direção x.

O topo do grid está na profundidade de 0 m, e as espessuras na direção vertical z são 1219,20 *m*, 914,40 *m*, 609,60 *m*, 243,84 *m* e 60,96 *m* (4000, 3000, 2000, 800 e 200 *ft*) para as cinco primeiras camadas que representam o *overburden*. As próximas cinco camadas têm espessuras de 15,24 *m* (50 *ft*) e representam o reservatório. As duas últimas camadas têm espessuras de 30,48 *m* (100 *ft*) e representam o *underburden*.

Como dados de entrada (condições iniciais) têm uma tensão total vertical inicial de 0 *psi* no topo do grid com um gradiente de tensão vertical total de 3,23 *psi/m* (0,9860 *psi/ft*) e a tensão total horizontal inicial é a metade da tensão total vertical inicial. A pressão do fluido inicial na superfície é de 14,7 *ps*i com um gradiente hidrostático de 1,43 *psi/m* (0,437*psi/ft*). A base e os lados do grid têm deslocamentos normais impedidos e todas as faces do grid têm tensão tangencial nula.

Temos um poço vertical com raio de 0,076 *2m* (0,25 *ft*) que está completado no centro do grid, células (11, 11, 6-10). O poço produz a uma taxa de 50000 bpd durante 1200 dias. As propriedades da rocha e do fluido empregadas são dadas na Tabela 1.

Propriedades:	Valores:
Fator volume de Formação (FVF) em 14,7 psi e 60 °F	1
Viscosidade	1cp
Massa específica do fluido em 14,7 os e 60 ºF	62,4 lbm/ft ³
Compressibilidade do fluido	3 x 10 ⁻⁶ psi ⁻¹
Permeabilidade em x e y	100 md
Permeabilidade em z	10 md
Porosidade	0,25
Módulo de Young (reservatório)	1 x 10⁴psi
Módulo de Young (rochas adjacentes)	1 x 10 ⁶ psi
Coeficiente de Poisson (para todo o modelo)	0,25

Tabela 1 - Propriedades da rocha e do fluido.

A Figura 17 ilustra a representação tridimensional do reservatório e das rochas adjacentes.



Figura 17 – Perspectiva do modelo (ft).

Quanto à discretização do modelo serão considerados 605 elementos no reservatório, 11 em x, 11 em y e 5 em z. O número total de elementos com as

rochas adjacentes é 5292, tendo 6292 nós onde são realizados os cálculos com o programa ABAQUS.

A discretização do modelo e representada na Figura 18 mostrando a representação plana do reservatório (a) vista superior, (b) vista lateral, (c) vista frontal e a Figura 19 mostra a vista em 3D gerada pero simulador de tensões.



(c) Vista Frontal

Figura 18 - Representação plana do Reservatório.



Figura 19 – Vista 3D do modelo.

Como critérios empregados para mostrar os resultados usaremos os três esquemas do trabalho Fontoura & Inoue (2009,2010) além do simulador STARS:

- 1) Acoplamento Iterativo;
- 2) Acoplamento em duas vias com duas iterações;
- 3) Acoplamento em uma via;
- 4) Simulador STARS com módulo geomecânico.

O critério empregado para a convergência nas simulações está regido pela diferença das pressões medias no reservatório, este critério é empregado no trabalho (Dean, Xiuli, *et al.*, 2003).

$$\Delta p_{media}^{i+1} - \Delta p_{media}^{i} < TOL \tag{5.1}$$

Os valores da tolerância e o número de iterações máxima permitida por passo de tempo segue os critérios usados por (Fontoura & Inoue, 2009) e mostrados abaixo. Estes valores são usados para os três primeiros esquemas, para o quarto (STARS) os valores são adotados pelo simulador de maneira automática. A Tabela 2 mostra os valores empregados para cada tipo de esquema usado.

Item	Tipo de Esquema	Tolerância	Max. # Iterações
1	Acoplamento Iterativo	0.01 psi	12
2	Duas Vias com duas Iterações	Não Apresenta	2
3	Uma Via	Não Apresenta	Não Apresenta

Tabela 2 - Valores de Convergência empregados.

Como intervalos de tempo onde serão realizados os cálculos nos três primeiros esquemas têm (1 dia , 19 dias, 19 intervalos de 20 dias, 8 intervalos de 100 dias), tendo como tempo total os 1200 dias de simulação para todos os esquemas em 29 intervalos de tempo.

4.3. Resultados de Validação

Os *benchmarks* foram extraídos do trabalho (Dean, *et al.*, 2003), além de serem novamente modelados no programa ABAQUS, utilizando a funcionalidade de cálculo de adensamento em solos do *software*. O Abaqus é capaz de realizar análises acopladas (acoplamento total) de fluxo monofásico de fluido e tensão, ver referência na seção 6.7.1 *Coupled pore fluid diffusion and stress analylis* do manual (SIMULIA, 2010).

A validação será realizada comparando resultados de pressão média no reservatório, compactação no topo e no centro (plano xy) do reservatório, subsidência no topo e compactação no centro (plano xy) do *overburden* e pressão no eixo maior horizontal do reservatório. Os resultados obtidos são comparados com os *benchmarks* mencionados acima.

4.3.1. Variação da Pressão Média

A variação da pressão média no reservatório ao longo do tempo é apresentado na Figura 20, que mostra os diferentes valores dos cálculos realizados pelos três métodos implementados (Fontoura & Inoue, 2010), os resultados do simulador STARS e o acoplamento total (Dean, *et al.*, 2003).



Figura 20 - Resultados de Pressão Média x Tempo.

A pressão media do reservatório vai caindo ao longo do tempo para todos os casos. Do gráfico temos que os valores das pressões tem diminuído para o acoplamento total 242,47 *psi* do seu valor inicial chegando no tempo final com o valor de 4179,76 *psi*; no acoplamento iterativo diminuiu 266,26 *psi* chegando ao valor final de 4154,85 *psi*, no acoplamento em duas vias com duas iterações diminuiu 252,64 *psi* chegando ao valor final de 4171,47 *psi*, para uma via a diminuiu 69,26 *psi* chegando ao valor de 4354,85 *psi* e no simulador STARS diminuiu 83,51 *psi* chegando ao valor final de 4340,6 *psi*.

O esquema tanto iterativo e de duas vias com duas iterações apresentam maior queda de pressão que o acoplamento total, o esquema com valores mais pertos aos *benchmarck* estabelecidos correspondem ao acoplamento de duas vias com duas iterações com uma diferença final de 7,69 *psi* com a pressão media do acoplamento total, enquanto que para acoplamento iterativo a diferença chega aos 24,91 *psi*.

O reservatório apresentou comportamento mais compressível considerando a simulação convencional (acoplamento de uma via e com simulador geomecânico), portanto foi necessária uma menor queda de pressão média para manter a produção. No em tanto o resultado gerado pelo simulador STARS produz uma resposta melhor àquela de um simulador convencional, mas dista muito daquela do acoplamento total. A simulação convencional é fortemente influenciada pela compressibilidade dos poros, obtida do módulo de Young e do coeficiente de Poisson utilizada na análise de tensões.

A Figura 21 mostra um comparativo para o acoplamento total, acoplamento parcial iterativo (Samier & De Gennaro, 2007) simulação convencional de reservatórios considerando os efeitos geomecanicos, acoplamento parcial iterativo (Dean, *et al.*, 2003) e os acoplamentos parciais (GTEP, 2010) com referencia a pressão media do reservatório.



Figura 21 - Resultados comparativos de Pressão Média (Inoue & Fontoura, 2008).

Ao serem comparados os resultados dos esquemas com aqueles encontrados na literatura, temos uma aproximação com aquele obtido por Samier (Samier & De Gennaro, 2007).

4.3.2. Variação da Compactação

Inicialmente, a rocha matriz do reservatório e a pressão de poro estão em equilíbrio, o qual será alterado com o início da produção/injeção de fluidos no reservatório. As variações nas saturações dos fluidos dos poros da rocha irão alterar a distribuição de pressão de poro e temperatura, causando mudanças no estado de tensão no reservatório e nas rochas adjacentes. Tais mudanças no estado de tensão resultam em alterações das propriedades petrofísicas da rocha, através da variação do volume poroso e da permeabilidade (Palma, 2008).

Dessa forma, com a produção de hidrocarbonetos a pressão de poro diminui e a sobrecarga das rochas superiores é transferida para a rocha matriz, acarretando no aumento na tensão efetiva. Resultados de compactação no topo e no centro (plano xy) do reservatório (célula 11,11,6) são mostrados na Figura 22.



Figura 22 - Resultados de Compactação x Tempo.

A compactação calculada no topo da célula (11, 11,6) no tempo de 1200 dias é de 0,94 m para acoplamento total, 0,99 m para acoplamento iterativo, 0,953 m para acoplamento em duas vias com duas iterações, 0,456 m para acoplamento em uma via e 0,256 m para STARS.

Os esquemas (Fontoura & Inoue, 2009) seguem o mesmo comportamento que os *benchmarks* ao longo do tempo, o melhor resultado é aquele calculado pelo acoplamento de duas vias com duas iterações com aproximadamente 0,953 *m* gerando uma diferença de 0,01 *m* com a resposta do acoplamento total, já para o acoplamento iterativo a diferença é de 0,05 *m*.

O esquema de uma via apresenta uma diferença de 0,48 *m* quase a metade do valor final calculado no acoplamento total. O simulador STARS não apresenta o mesmo comportamento sendo quase linear. Para o tempo final tem se uma diferença de 0,69 *m* com o valor final do acoplamento total

4.3.3. Variação da Subsidência

De acordo com as propriedades das rochas superiores, o efeito da compactação do reservatório pode ser propagado para a superfície, gerando a subsidência do leito marinho (Palma, 2008). Resultados de subsidência no topo e no centro (plano xy) do *overburden* são mostrados na Figura 23. No gráfico são feitas as mesmas comparações realizadas para a compactação.



Figura 23 - Resultados de Subsidência x Tempo.

Assim a subsidência calculada no topo da célula (1,1,6) para o tempo de 1200 dias é de:

- 0,398 *m* para acoplamento total;
- 0,405 *m* para acoplamento iterativo;
- 0,385 m para acoplamento em duas vias com duas iterações;
- 0,136 *m* para acoplamento em uma via;
- 0,074 *m* para modulo geomecânico do STARS.

As diferenças entre os valores da subsidência no tempo final chegam desde 0,013 *m* para o caso do acoplamento de duas vias com duas iterações até 0,324 *m* para o simulador STARS. Os resultados de compactação e subsidência obtidos pelo acoplamento iterativo com critério de convergência são maiores do que os do acoplamento total, resultado esperado, pois a queda de pressão de

poros foi maior no esquema de acoplamento parcial ao contrario daquele de uma via cuja queda de pressão foi muito menor.

4.3.4. Variação da Pressão de Poros

A variação da pressão ao longo da maior direção horizontal do reservatório para diferentes tempos começa na célula (6, 11, 6) até a célula (16,11,6), serão plotada para diferentes tempos de simulação: 100, 500 e 1200 dias. A Figura 24 é um comparativo dos esquemas (Fontoura & Inoue, 2009) com o acoplamento total, no entanto a Figura 25 contém os resultados de variação da pressão de poros do simulador STARS e do acoplamento total.



Figura 24 - Resultados de Pressão no eixo X Tempo (A).

As pressões ao longo do eixo vão caindo em todas as células em função do tempo, tendo suas maiores variações na célula onde fica o poço que se encontra produzindo a taxa constante.

A descontinuidade no gráfico de acoplamento total deve se a que os cálculos das pressões são realizados nos nós porque o simulador trabalha com o método de elementos finitos a diferença dos outros esquemas cujos cálculos são realizados no centro das células com método de diferenças finitas, é por isso a diferente locação no eixo *X*. Os valores representativos resultantes dos cálculos serão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Variações das pressões ao longo do eixo X (A).

-	-	-	-		_								_			
100 dias	S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4454.41	S	100 dias H (Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.83		S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.83		100 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.83	
	100 dia	Pressão na célula do meio (psi)	4136.90			Pressão na célula do meio (psi)	4123.81	4123.81 322.02	100 dia	Pressão na célula do meio (psi)	4140.14			Pressão na célula do meio (psi)	4354.95	
		Queda de pressão (psi)	317.51	Q		Queda de pressão (psi)	322.02 S			Queda de pressão (psi)	305.69	/IA		Queda de pressão (psi)	90.88	
MENTO TOTAL	9	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4461.00	TERATIV	500 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4434.28	OM DU/		Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.46			Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.62	
	500 dias	Pressão na célula do meio (psi)	3958.10	IENTO I		Pressão na célula do meio (psi)	3918.69	S VIAS C	500 dias	Pressão na célula do meio (psi)	3933.77	ENTO EN	500 dias	Pressão na célula do meio (psi)	4127.62	
ACOPLA		Queda de pressão (psi)	502.90	COPLAN		Queda de pressão (psi)	515.59	TO DUAS		(Queda de pressão (psi)	511.69	OPLAME		Queda de pressão (psi)	318.00
.200 dias	S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4328.00	A		Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4294.24	LAMEN'	ACOPLAMENT 200 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4313.03	AC	S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4440.90	
	1200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3782.63		L200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3736.29	ACOP		Pressão na célula do meio (psi)	3751.76		1200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3995.80	
	ſ	Queda de pressão (psi)	545.37			Queda de pressão (psi)	557.95		7	Queda de pressão (psi)	561.27		Ţ	Queda de pressão (psi)	445.10	

Dos resultados apresentados na Tabela 3 e da Figura 24, o esquema com a maior aproximação com referencia aos valores das células do acoplamento total tanto do canto como do meio no eixo para todos os tempos é o de duas vias com duas iterações. Sendo os valores sobre-estimados na maioria dos casos dando como resposta maiores quedas de pressão que as do acoplamento total.

Para 100 dias há uma diferença das quedas das pressões com o valor do acoplamento total de +4,51 *psi* no acoplamento iterativo, de -11,82 *psi* no acoplamento de duas vias com duas iterações, e de -226,63 *psi* para acoplamento de uma via. Para 500 dias há uma diferença das quedas das pressões de +12,69 *psi* do acoplamento iterativo com o acoplamento total, para o acoplamento de duas vias a diferença é de +8,79 *psi* e para uma via de -184,90 *psi*. Para 1200 dias há uma diferença das quedas das pressões de +12,58 *psi*, para o acoplamento de duas vias a diferença das quedas das pressões de uma via de -100,27*psi*.



Figura 25 - Resultados de Pressão no eixo X (B).

Ao ser feita a comparação dos valores obtidos pelo simulador STARS com referencia ao acoplamento total tem se as diferenças apresentadas na Tabela 4.

	00 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4454.41		S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4446.64
		Pressão na célula do meio (psi)	4136.90		100 dia:	Pressão na célula do meio (psi)	4337.89
	, i	Queda de pressão (psi)	317.51	nico)		Queda de pressão (psi)	108.75
ОТОТА	S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4461.00	omecân	6	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4446.64
MENTO	MENTC 00 dias	Pressão na célula do meio (psi)	3958.10	ulo Ge	500 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3902.84
COPLA	1	Queda de pressão (psi)	502.90	S (mód	۵,	Queda de pressão (psi)	543.8
4	St	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4328.00	STAR	SE	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4446.64
200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3782.63		200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3468.11	
	T	Queda de pressão (psi)	545.37		1	Queda de pressão (psi)	978.53

Tabela 4 - Variações das pressões ao longo do eixo X (B).

No caso do simulador STARS as pressões no canto não apresentam variações ao longo do tempo, porem às pressões na célula onde esta o poço atingem valores muito maiores a do acoplamento total a partir dos 500 dias.

A diferença de valores para o tempo final na célula do meio é de 314,52 *psi*, gerando uma diferença na queda de pressão entre ambos os tipos de acoplamento de 433,16 *psi*, valores por demais sobre estimados. Com este analise o simulador STARS apresenta uma solução que poderá confundir ao engenheiro nos itens seguintes o STAR não será incluído nos resultados.

4.4. Resultados de Viabilidade

Também é importante determinar quais esquemas são viáveis em função aos tempos de processamento, pelo qual nesta seção serão mostradas gráficas dos tempos além do número de iterações empregados para resolver o mesmo problema da seção. Os esquemas que serão comparados são:

- 1) Acoplamento Iterativo;
- 2) Acoplamento em duas vias com duas iterações;
- 3) Acoplamento em uma via.

O computador empregado neste estudo segue as seguintes caraterísticas:

- Processador: Intel® Core ™ 2Quad CPU Q9400 @ 2,66GHz 2,66GHz;
- Memória instalada (RAM): 4,00 GB;
- Topo de Sistema: Sistema Operacional de 64 Bits;
- Placa Gráfica: NVIDIA GeoForce 9400 GTA.

A Figura26 mostra o número de iterações que cada esquema realiza para chegar às suas soluções.



Figura 26 - Número de iterações Tol = 0,01 psi.

O esquema de acoplamento iterativo apresenta 1072 iterações tendo 5 iterações como media por intervalo de tempo (29 intervalos), o esquema de duas vias com duas iterações faz 58 iterações com 2 iterações por intervalo e o esquema de uma via 29 iterações igual aos intervalos de tempo inicial.

A diferença do tipo iterativo com o de duas vias é de quase 13 vezes o número de iterações, as respostas são melhores no segundo tipo conforme ao mostrado na seção anterior, o que leva a acreditar que no momento de tentar chegar a cumprir o critério de tolerância empregado o primer tipo de duas vias com duas iterações faz um número maior de iterações afastando-se da resposta.

Finalmente o esquema de uma via apresenta 29 iterações. Os tempos de simulação usados em segundos são apresentados na Figura 27.



Tempos de simulação (s)

Figura 27 - Tempos de simulação Tol = 0,01 psi.

O tempo empregado para o acoplamento iterativo é de 5,5 horas, para o tipo de duas vias com duas iterações é de 30 minutos e de uma via é de 15 minutos.

O acoplamento iterativo emprega quase 19 vezes o tempo do esquema de duas vias com duas iterações sendo as respostas melhores para o segundo esquema, o que nós faz pensar que o critério de convergência pode não ser o adequado o que gera maior número de iterações, empregando maiores tempos e afastando-se da resposta. O esquema de uma via resolve o problema em tempo menor o que mostra a razão pela qual é comumente usado na indústria.

4.5. Resultados com variação de Critério de Tolerância

Além de botar uma resposta de menor precisão o tempo computacional empregado pelo acoplamento iterativo inviabiliza o esquema já que para um número maior de células na malha o gasto do tempo não permitiria o uso do esquema, pelo qual para diminuir o número de iterações e com isto o tempo computacional foi necessário tentar mudar os critérios de tolerância colocados no código inicialmente.

E por isso que nesta seção serão novamente testados os acoplamentos para um novo critério de tolerância, os resultados serão mostrados. Os dados de entrada, os intervalos de tempo e o computador serão os mesmos que na seção anterior.

Os valores da nova tolerância empregada afetaram os resultados do primeiro esquema, sendo igual para os outros restantes conforme ao mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de Convergência empregados.

ltem	Tipo de Esquema	Tolerância	Max. # Iterações
1	Acoplamento Iterativo	1 psi	12
2	Duas Vias com duas Iterações	Não Apresenta	2
3	Uma Via	Não Apresenta	Não Apresenta

4.5.1.

Variação da Pressão Média

A mudança na tolerância afetou os valores de resposta do acoplamento iterativo aproximando-se com maior exatidão ao tipo de duas vias com duas iterações e assim também ao acoplamento total mostrado na Figura 28.



Figura 28 - Resultados de Pressão media Tol= 1 psi.

Os valores com a nova tolerância para o acoplamento de duas vias com duas iterações permitiram maior exatidão com os valores anteriores ficando mais perto com os *benchmarks* estabelecidos.

A diferença da pressão media no acoplamento de duas vias com duas iterações é de 7,69 *psi* com referencia ao valor do acoplamento total, em quanto que para acoplamento iterativo a diferença chega aos 11,89 *psi* aproximando-se 13,02 *psi* do valor anterior. Para esta nova tolerância o esquema de duas vias com duas iterações ainda é o de maior exatidão.

4.5.2. Variação da Compactação

As respostas da compactação com o novo critério serão apresentadas na Figura 29.



Figura 29 - Resultados de Compactação Tol= 1 psi.

A compactação calculada é de 0,94 m para acoplamento total, 0,961 m para acoplamento iterativo, 0,953 m para acoplamento em duas vias com duas iterações e de 0,456 m para acoplamento em uma via.

Com o novo critério as respostas do acoplamento iterativo diminuíram 0,03 m e ficaram muito próximas a aquelas de duas vias, com só uma diferença de 0,01 m e de 0,02 m para o acoplamento total.

4.5.3. Variação da Subsidência

Resultados de subsidência são mostrados na Figura 30.



Figura 30 - Resultados de Subsidência Tol= 1 psi.

A subsidência calculada na célula (1,1,6) para o novo critério é de:

- 0,398 *m* para acoplamento total;
- 0,389 m para acoplamento iterativo;
- 0,385 m para acoplamento em duas vias com duas iterações;
- 0,136 *m* para acoplamento em uma via.

Os valores resultantes no acoplamento iterativo ficam quase acima da curva de acoplamento total com uma diferença no valor final de 0,016 m e de 0,004 m com o acoplamento de duas vias com duas iterações.

4.5.4. Variação da Pressão de Poros

A Figura 31 mostra os novos resultados gerados com o novo critério de tolerância para os valores da pressão de poros ao longo do eixo X.



Figura 31 - Pressão de poros Tol= 1 psi.

As quedas de pressões conforme ao esperado no acoplamento iterativo diminuíram gerando resultados cada vez mais exatos e perto de aqueles do acoplamento total conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Variações das pressões ao longo do eixo X Tol=1 psi.

	100 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi) Pressão na célula do meio (psi)	4454.41 4136.90		100 dias	Pressão na célula (6,11,6) (psi) Pressão na célula do meio (psi)	4445.83 4134.87
		Queda de pressão (psi)	317.51	0		Queda de pressão (psi)	310.96
D TOTAL	10	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4461.00	TERATING	10	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4445.32
AMENIC	500 dias	Pressão na célula do meio (psi)	3958.10		500 dias	Pressão na célula do meio (psi)	3928.45
ACOPL		Queda de pressão (psi)	502.90	ACOPLA		Queda de pressão (psi)	516.87
	S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4328.00		S	Pressão na célula (6,11,6) (psi)	4308.29
	1200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3782.63		1200 dia	Pressão na célula do meio (psi)	3748.47
		Queda de pressão (psi)	545.37			Queda de pressão (psi)	559.82

Pequenas diferenças na célula do meio são encontradas com referencia ao valor do acoplamento total, de 2,3 *psi* para 100 dias, 13,97 *p*si para 500 dias e 14,45 *psi* para 1200 dias. As respostas em todos os casos melhoraram mostrando assim que não é necessário um valor pequeno na tolerância, para este tipo de problema em particular.

4.6.

Resultados de Viabilidade

Agora serão mostrados os gráficos de viabilidade para ver se a melhora da seção anterior é refletida em função aos tempos computacionais e o número de iterações. Com a nova tolerância o número de iterações mudou dando as respostas mostradas na Figura 32.



Figura 32 - Número de iterações Tol = 1 psi.

O novo critério diminui o número de iterações do tipo iterativo em 1008, fazendo 2 iterações na maioria dos 29 intervalos de tempo com poucas exceções que chegam até 4 iterações para convergir, sendo agora só diferente do tipo de duas vias em 6 iterações.

As respostas em função ao tempo empregado pelos tipos de acoplamento são mostradas na Figura 33.



Figura 33 - Tempos de simulação Tol = 1 psi.

Com o novo critério o acoplamento iterativo diminuiu 11 vezes seu tempo computacional inicial, chegando a passar de 5,5 horas para 25 minutos.

Com a nova tolerância foram melhoradas duas coisas, a primeira é a exatidão na resposta, mostrando assim que para este tipo de problema o acoplamento não precisa fazer um número grande de iterações para poder chegar à resposta fornecida pelo acoplamento total.

A segunda coisa que melhorou foi o tempo computacional, tendo como resultado um esquema que não e tão rápido como aquele de uma via, que é amplamente usado na atualidade, mas é mais robusto no que se refere à exatidão, com um critério de tolerância aceitável.

4.7. Analise de Tensões e deslocamentos

Para realizar uma análise completa do problema em estudo é necessário mostrar a parte do comportamento em termos das tensões e deslocamentos calculados ao longo do estudo, pelo qual serão plotados gráficos da variação da tensão efetiva na direção horizontal (longitudinal) e vertical. Los valores empregados para as gráficas das curvas correspondem a aquelas respostas que usa a convergência mostrada na Tabela 7.

Item	Tipo de Esquema	Tolerância	Max. # Iterações	
1	Acoplamento Iterativo	1 psi	12	
2	Duas Vias com duas Iterações	Não Apresenta	2	
3	Uma Via	Não Apresenta	Não Apresenta	

Tabela 7 - Valores de Convergência empregados.

Os intervalos de tempo são os mesmos 29, e o tempo total será de 1200 dias.

4.7.1. Variação dos Deslocamentos

A figura 34 mostra a vista superior e lateral do problema, localizando os eixos onde foram avaliados os deslocamentos. Os eixos são formados pelas células: Eixo $h_1 = (1-21, 11, 1)$; Eixo $h_2 = (1-21, 11, 6)$.



Figura 34 - Eixos horizontais $\,h_1^{}{\rm e}\,\,h_2^{}$.

Assim, tempos de 100, 500, 800 e 1200 dias serão selecionados para o esquema iterativo e uma via, já que os intervalos de tempo no programa ABAQUS são calculados de forma automática as curvas para o acoplamento total não correspondem exatamente ao o mesmo número de dias que os outros tipos de acoplamento sendo colocadas as mais próximas encontradas sendo estas de 153, 553, 853 e 1253 dias.

As Figuras 35 e 36 mostram a variação dos deslocamentos horizontais e verticais no h_1 (topo da rocha capeadora), enquanto que a Figura 37 mostra as curvas representativas no tempo final, para os três esquemas usados e mostrados na Tabela 7.



Figura 35 - Variação do deslocamento U_x no topo do *overburden* pelo método de acoplamento total.



Figura 36 - Variação do deslocamento U_x no topo do *overburden* pelo acoplamento iterativo.

Os comportamentos apresentados para os dois esquemas seguem os mesmos padrões para todos os intervalos de tempo, sendo opostos e quase simétricos à medida que afastassem do centro (que é o lugar onde fica o poço produtor) e quase nulos nos limites do modelo.



Figura 37 - Comparativo dos métodos na variação do deslocamento U_x no topo do *overburden*.

No acoplamento total o valor máximo do deslocamento é de 0,1134 *m*, encontrado aos 6681 *e* 12189,5 *m* no eixo X. Para o acoplamento Iterativo o valor máximo é de 0,1142 *m*, encontrado aos 6681 *m* e 12189,5 *m* no eixo X. No caso do acoplamento de uma via o valor máximo é de 0,0387 *m*, encontrado aos 7315 *m* e 11582 *m* no eixo X.

Sinais contrários mostram que os deslocamentos são opostos em direção ao centro. Os valores calculados pelo esquema de uma via geram resultados que seguem o mesmo comportamento dos outros esquemas, mas com valores muito pequenos, com diferença de 0,08*m* no valor encontrado na distancia de 6681*m*.

Curvas para o deslocamento Uz no *overburden*, também conhecido como subsidência, são plotadas seguindo as mesmas indicações na Figura 38 estão os deslocamentos verticais com o acoplamento total, Figura 39 é para o esquema iterativo e Figura 40 apresenta os correspondentes comparativos com esquema de uma via para os tempos finais mencionados anteriormente.



Figura 38 - Variação do deslocamento U_z no topo do *overburden* pelo acoplamento total.



Figura 39 - Variação do deslocamento U_z no topo do *overburden* pelo acoplamento Iterativo.

Os comportamentos gerados pelos deslocamentos Uz são quase nulos nas bordas do modelo, incrementando-se de forma similar por ambos os lados até chegar à metade do modelo, onde se encontra o valor mais alto da subsidência.



Figura 40 - Comparativo da Variação do deslocamento U_z no topo do overburden.

Ao comparar as curvas, os valores para os tempos finais, encontrados na célula do meio (11,11,1) são:

- Acoplamento total: 0,398 m;
- Acoplamento Iterativo: 0,4008 m;
- Acoplamento de uma via: 0,130 m.

Diferenças de até 0,27 *m* para 1200 dias são encontradas entre o acoplamento de uma via e o total, mostrando assim como são subestimados os resultados gerados por um simulador convencional.

Para o eixo h_2 (topo de reservatório) os tempos empregados para os gráficas são os mesmos que para o eixo h_1 , sendo plotados os deslocamentos



Ux nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43 e os deslocamentos em Uz nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46.

Figura 41 - Variação do deslocamento Uz no topo do reservatório pelo acoplamento total.

Direção X (m)



Figura 42 - Variação do deslocamento U_z no topo do reservatório pelo acoplamento iterativo.

Os deslocamentos são quase nulos nas bordas para todos os tempos, incrementando-se a partir dos 4000 *m* e os 15000 *m* de forma oposta e simétrica até voltar ao seu valor inicial no centro do eixo X. A pouca suavidade das curvas apresentadas pode ser gerada pela discretização do modelo.

Os comportamentos normalizam se a partir dos 500 dias, no tempo de 100 dias existem diferenças no comportamento entre ambos os tipos de acoplamento, provavelmente pela mudança brusca de pressões que ocorre no começo de extração no poço.



Figura 43 - Comparativo da variação do deslocamento Uz no topo do reservatório.

Ao momento de comparar os resultados com aquele gerado pelo tipo de uma via, as diferenças encontradas nas curvas do tempo final não correspondem somente a exatidão, senão também ao comportamento, os valores mais elevados são calculados em outras distancias que não correspondem a aquela do acoplamento total e iterativo. Os valores mais altos apresentados são:

- No esquema Total, para distancias de 6705,6 m e 12189,5 m o deslocamento é de 0,0948 m;
- No esquema Iterativo, para as mesmas distancias o deslocamento correspondente é de 0,0955 m;
- No esquema de uma via, para distancias de 7924,8 m e 10972,8 m no eixo X o deslocamento é de 0,0421 m, quase a metade dos anteriores.



Figura 44 - Variação do deslocamento U_z no topo do reservatório pelo acoplamento total.



Figura 45 - Variação do deslocamento U_z no topo do reservatório pelo acoplamento iterativo.

Os deslocamentos Uz começam a variar a partir dos 4000 *m* e os 1500 *m* por ambos os lados de forma simétrica até chegar ao centro do topo do reservatório onde a compactação atinge o máximo valor.



Figura 46 – Comparativo da variação do deslocamento U_z no topo do reservatório.

O máximo deslocamento esta localizado entre os 9144 m e 9753,6 m no eixo x, para todos os tipos de acoplamento, sendo os valores de 0,9403 m para acoplamento total, 0,9612 m para o acoplamento iterativo e de 0,4337 m para acoplamento em uma via.

4.7.2. Variação das Tensões Efetivas

As tensões efetivas são as que realmente controlam todas as características de deformação e resistência das rochas. A variação das tensões efetivas foi estudada em três eixos horizontais $(h_1, h_2 e h_3)$ e num eixo vertical (v_1), na Figura 47 mostra a vista superior e lateral do problema, localizando os eixos que são formados pelas células:

Eixo $h_1 = (1-21, 11, 1)$; Eixo $h_2 = (1-21, 11, 3)$; Eixo $h_3 = (1-21, 11, 6)$; Eixo $v_1 = (11, 11, 1-12)$;



Figura 47 – Eixos estudados para variação das tensões efetivas.

O programa ABAQUS é uma ferramenta utilizada principalmente para cálculos estruturais, é por isso que o sinal negativo indicara para nosso casso tensões de compressão e o sinal positivo as tensões de Tração. As Figura 48, 49 e 50 mostram as variações da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo vertical v_1 , no acoplamento total para os tempos de 125, 553, 853 e 1253 dias, e a Figura 49 é feita com os resultados de acoplamento iterativo para os tempos de 100, 500, 800 e 1200 dias. A Figura 50 é um comparativo para curva do tempo final dos esquemas, total, iterativo e de uma via.





Tensão Efetiva o´xx (Pa) ao longo do eixo vertical



Figura 49 - Variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo v_1 pelo acoplamento iterativo.



A variação da tensão efetiva ocorre principalmente na profundidade onde se encontra o reservatório, sendo os valores com maiores mudanças aqueles que se encontram tanto no topo como na base do reservatório, devido provavelmente ao confinamento do selo, e uma vez que este é terminado, as variações retornam a um comportamento normal no *underburden*.



Tensão Efetiva o xx (Pa) ao longo do eixo vertical

Figura 50 – Comparativo da variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo v_1 .

O comportamento das tensões é similar para todos os tipos de acoplamento. As variações em detalhe das tensões efetivas σ'_{xx} no eixo vertical são apresentadas na Tabela 8.

	Espessura	Espessura	$\sigma_{_{\rm xx}}$ (MPa) para 1200 dias eixo vertic		
	(m)	Acumulada			Acop. Total
		(m)	Iterativo	via	
	0	0	-4,20	-3,95	-4,21
Ę	1219,2	1219,2	-7,23	-7,14	-7,23
rrde	914,4	2133,6	-12,40	-12,6	-12,4
erbı	609,6	2743,2	-15,5	-15,9	-15,5
õ	243,84	2984,04	-16,8	-17,4	-16,8
	60,96	3048	-17,1	-17,7	-17,0
		3048	-19,1	-19,0	-19,1
	15,24	3062,24	-19,2	-19,0	-19,1
ória	15,24	3078,48	-19,3	-19,1	-19,3
rvat	15,24	3093,72	-19,4	-19,2	-19,4
ese	15,24	3108,96	-19,5	-19,3	-19,5
£	15,24	3124,4	-19,5	-19,3	-19,5
		3124,2	-18,6	-18,9	-18,6
Irden	30,48	3154,68	-18,7	-19,0	-18,6
Underbı	30,48	3185,16	-18,7	-19,1	-18,7

Tabela 8 - Variações $\sigma'_{\scriptscriptstyle \mathrm{xx}}$ no eixo vertical.

As tensões efetivas σ'_{xx} , chegam a incrementos no topo do reservatório de 2,1 *MPa* para acoplamento iterativo, 01,3 *MPa* para o acoplamento de uma via e de 2,1 *MPa* para o acoplamento total. Na base do reservatório as tensões diminuem um *MPa* para acoplamento iterativo e total, 0.4 *MPa* para o acoplamento de uma via.

Gráficos da variação de tensão efetiva σ'_{zz} para o eixo vertical v_1 com o esquema total é apresentada na Figura 51, com o esquema iterativo na Figura 52 e o comparativo dos três esquemas para o tempo final na Figura 53.



Figura 51 - Variação da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo v_1 pelo acoplamento total.



Figura 52 - Variação da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo v_1 pelo acoplamento iterativo.



Figura 53 - Comparativo da Variação da tensão efetiva σ_{zz}' ao longo do eixo v_1 .

As variações em detalhe das tensões efetivas σ'_{zz} no eixo vertical são apresentadas na Tabela 9.

	Espessura (m)	Espessura Acumulada	σ_{zz} (MPa) para 1200 dias eixo vertical		
		(m)	Acop.	Acop. Uma	Acop. Total
		()	Iterativo	via	
	0	0	-7,51	-7,36	-7,15
Le Le	1219,2	1219,2	-13,4	-13,8	-13,4
nrde	914,4	2133,6	-23,6	-24,4	-23,6
'erb	609,6	2743,2	-30,1	-31,1	-30,2
õ	243,84	2984,04	-33,2	-34,3	-33,3
	60,96	3048	-34,1	-35,1	-34,2
		3048	-38,7	-38,1	-38,7
•	15,24	3062,24	-38,8	-38,2	-38,8
óric	15,24	3078,48	-38,9	-38,4	-38,9
rvat	15,24	3093,72	-39,1	-38,6	-39,1
lesel	15,24	3108,96	-39,3	-38,8	-39,3
Ш.	15,24	3124,4	-39,4	-38,9	-39,4
		3124,2	-35,4	-36,5	-35,6

Tabela 9 - Variações $\sigma_{\rm zz}$ no eixo vertical

urden	30,48	3154,68	-35,6	-36,7	-35,8
Underb	30,48	3185,16	-35,8	-36,9	-36,0

A tensão efetiva σ'_{zz} chega a incrementos no topo do reservatório de 4,6 *MPa* para acoplamento iterativo, 3 *MPa* para o acoplamento total e 4,5 *MPa* para o acoplamento em uma via.

Na base do reservatório a tensão diminui 4 *MPa* no acoplamento iterativo, 2,4 *MPa* no acoplamento em uma via e 3,8 *MPa* no acoplamento total.

O segundo eixo h_1 (horizontal), localizado no centro da primeira camada conforme mostrado na Figura 47 foi analisado com as gráficas de tensão efetiva σ'_{xx} nas Figura 54 e Figura 55 com o comparativo na Figura 56.



Tensão Efetiva $\sigma'xx$ (Pa) ao longo do overburden

Figura 54 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{\rm xx}$ ao longo do eixo $h_{\rm 1}$ pelo acoplamento total.



Figura 55 - Variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo h_1 pelo acoplamento iterativo.

A tensão efetiva σ'_{xx} , na rocha capeadora sofre um alivio nas laterais do modelo, mas a medida que vão se acercando ao lugar onde se encontra o poço produtor estas tensões incrementam, convergindo para um mesmo valor em todos os tempos nos cantos do reservatório, e posteriormente chegando a seu valor máximo no centro do eixo.



Figura 56 - Comparativo da variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo h₁.

Para o acoplamento iterativo nos 1200 dias as tensões vão desde 4,56 *MPa* nos cantos, caem 0,10 *MPa* para subir no meio 0,53 *MPa* até o valor de 5,0 *MPa*.

Para o acoplamento total no tempo de 1253 dias começa em 4,56 *MPa* no canto, sofrendo alivio de até 0,10 *MPa*, para subir no meio o valor de 0,52 *MPa* até o valor de 4,98 *MPa*.

Para o acoplamento em uma via no tempo de 1200 dias a tensão vá desde 4,58 *MPa* nos cantos, caindo 0,04 *MPa* para subir no meio 0,22 *MPa* até o valor de 4,76 *MPa*. Maiores detalhes do comportamento das tensões na Tabela 10.

Eixo X (m)	$\sigma_{_{_{XX}}}$ (MPa) para 1200 dias eixo h1					
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total			
0	-4,56	-4,58	-4,56			
1219,5	-4,55	-4,58	-4,55			
2438,4	-4,53	-4,57	-4,53			
3657,6	-4,49	-4,56	-4,49			

Tabela 10 - Variações das tensões σ'_{xx} para h_1 .

4876,8	-4,46	-4,55	-4,46
6096,0	-4,49	-4,54	-4,49
6705,6	-4,59	-4,57	-4,59
7315,1	-4,71	-4,61	-4,70
7924,8	-4,83	-4,66	-4,82
8534,4	-4,94	-4,72	-4,92
9144,0	-5,00	-4,76	-4,98
9753,6	-5,00	-4,76	-4,98
10363,2	-4,94	-4,72	-4,92
10972,9	-4,83	-4,66	-4,82
11582,5	-4,71	-4,61	-4,70
12192,0	-4,59	-4,57	-4,59
12801,6	-4,49	-4,54	-4,49
14020,8	-4,46	-4,55	-4,46
15240,0	-4,49	-4,56	-4,49
16459,2	-4,53	-4,57	-4,53
17678,4	-4,55	-4,58	-4,55
18897,6	-4,56	-4,58	-4,56

Para a tensão efetiva σ'_{zz} no eixo horizontal h_1 , os mesmos gráficos serão apresentados nas Figura 57 e Figura 58 e na Figura 59 o comparativo incluindo o esquema de uma via para os tempos finais.



Figura 57 – Variação da tensão efetiva σ_{zz} ao longo do eixo h_1 pelo acoplamento total.



Figura 58 - Variação da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo h_1 pelo acoplamento iterativo.

Tensão Efetiva σ´zz (Pa) ao longo do overburden

A tensão efetiva σ'_{zz} , na rocha capeadora aumenta a partir dos 3000 *m* e volta a cair à medida que se acerca a metade, sendo esta aliviada. O ponto onde a tensão tem o mesmo valor para todos os tempos é novamente os cantos do reservatório com o valor de 9,20 *MPa*.



Tensão Efetiva o´zz (Pa) ao longo do overburden

Figura 59 - Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma_{\rm zz}'$ ao longo do eixo ${\rm h_{1}}$.

Os valores em detalhe da tensão efetiva no eixo vertical σ'_{zz} são apresentados na Tabela 11.

Eixo X (m)	σ_{zz}^{\prime} (MPa) para 1200 dias eixo h1		
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total
0	-9,18	-9,18	-9,18
1219,5	-9,18	-9,18	-9,18
2438,4	-9,18	-9,18	-9,18
3657,6	-9,21	-9,19	-9,20

Tabela 11 - Variações das tensões σ'_{zz} para h_1

4876,8	-9,24	-9,20	-9,24
6096,0	-9,20	-9,20	-9,20
6705,6	-9,11	-9,19	-9,12
7315,1	-9,00	-9,15	-9,01
7924,8	-8,88	-9,09	-8,89
8534,4	-8,78	-9,03	-8,79
9144,0	-8,72	-8,98	-8,73
9753,6	-8,72	-8,98	-8,73
10363,2	-8,78	-9,03	-8,79
10972,9	-8,88	-9,09	-8,89
11582,5	-9,00	-9,15	-9,01
12192,0	-9,11	-9,19	-9,12
12801,6	-9,20	-9,20	-9,20
14020,8	-9,20	-9,20	-9,24
15240,0	-9,24	-9,18	-9,20
16459,2	-9,18	-9,18	-9,18
17678,4	-9,18	-9,18	-9,18
18897,6	-9,18	-9,18	-9,18

No tipo iterativo para o tempo de 1200 dias a tensão inicia com 9,18 *MPa* aumentando até 9,24 *MPa* aos 4876 *m* onde começa a cair até 0,52 *MPa* na metade do reservatório com o valor de 8,72 *MPa*. Para o acoplamento total a tensão vai desde 9,18 *MPa* aumentando até 9,24 *MPa* na distancia de 4876 *m* onde começam a cair até 0,51 *MPa* na metade do reservatório com o valor de 8,73 *MPa*.

Para o acoplamento em uma via no tempo de 1200 dias as tensões vão desde 9,18 *MPa* aumentando até 9,20 *MPa* na distancia de 6096 *m* onde começa o reservatório, caindo até 0,22 *MPa* na metade do reservatório com o valor de 8,98 *MPa*.

O segundo eixo h_2 , localizado conforme mostrado na Figura 47, será analisado mostrando as gráficas de tensões efetivas σ'_{xx} na Figura 60 e 61 com o comparativo dos esquemas na Figura 62.



Figura 60 - Variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo h_2 pelo acoplamento total.



Figura 61 - Variação da tensão efetiva $\sigma_{\rm xx}'$ ao longo do eixo h_2 pelo acoplamento iterativo.

O comportamento da tensão ao longo do eixo apresenta muitas variações, aos 500 dias estas variações mostram picos para diferentes cumprimentos, estas mudanças com pouca suavidade são bruscas provavelmente pelas mudanças nas rigidezes dos materiais (modulo de Young) entre a rocha capeadora e o reservatório.



Figura 62 – Comparativo da variação de tensão efetiva $\sigma_{\rm xx}'$ ao longo do eixo ${\rm h_2}$.

As variações em detalhe no eixo horizontal h_2 são apresentadas na Tabela 12.

Eixo X (m)	$\sigma'_{\rm xx}$ (MPa) para 1200 dias eixo h2		
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total
0	-9,83	-9,84	-9,83
1219,5	-9,83	-9,84	-9,83
2438,4	-9,83	-9,84	-9,83
3657,6	-9,85	-9,85	-9,85
4876,8	-9,82	-9,85	-9,82
6096,0	-9,78	-9,84	-9,79
6705,6	-9,83	-9,83	-9,83
7315,1	-9,81	-9,81	-9,81

Tabela 12 -	Variações	da tensão σ	🔔 para	h ₂ .
			X X	

7924,8	-9,76	-9,80	-9,77
8534,4	-9,76	-9,81	-9,77
9144,0	-9,80	-9,86	-9,80
9753,6	-9,80	-9,86	-9,80
10363,2	-9,76	-9,81	-9,77
10972,9	-9,76	-9,80	-9,77
11582,5	-9,81	-9,81	-9,81
12192,0	-9,83	-9,83	-9,83
12801,6	-9,78	-9,84	-9,79
14020,8	-9,82	-9,85	-9,82
15240,0	-9,85	-9,85	-9,85
16459,2	-9,83	-9,85	-9,83
17678,4	-9,83	-9,84	-9,83
18897,6	-9,83	-9,85	-9,83

Os valor mínimo encontrado para o acoplamento iterativo é de 9,76 MPa, para o acoplamento em uma via é de 9,80 MPa, para o acoplamento total é de 9,77 MPa. Na célula central (lugar do poço) as tensões encontradas serão de 9,76 MPa no acoplamento iterativo, 9,77 MPa para o acoplamento total e de 9,81 MPa no acoplamento de uma via. Para a tensão efetiva σ'_{zz} as mesmas gráficas serão mostradas na Figura 63, 64 e 65.



Figura 63 - Variação da tensão efetiva $\sigma_{\rm zz}'$ ao longo do eixo h_2 pelo acoplamento total.



Figura 64 - Variação da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo h_2 pelo acoplamento iterativo.



Figura 65 Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma_{zz}^{'}$ ao longo do eixo h_{2} .

Os valores da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo são apresentados na Tabela 13.

Eixo X (m)	σ'_{zz} (MPa) para 1200 dias eixo h2		
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total
0	-19,7	-19,7	-19,7
1219,5	-19,7	-19,7	-19,7
2438,4	-19,7	-19,7	-19,7
3657,6	-19,7	-19,7	-19,7
4876,8	-19,8	-19,7	-19,8
6096,0	-19,8	-19,8	-19,8
6705,6	-19,5	-19,7	-19,5
7315,1	-19,3	-19,7	-19,3
7924,8	-19,0	-19,5	-19,1
8534,4	-18,7	-19,3	-18,8

Tabela 13 - Variações das tensões $\sigma_{\rm zz}$ para h_2 .

9144,0	-18,4	-19,0	-18,5
9753,6	-18,4	-19,0	-18,5
10363,2	-18,7	-19,3	-18,8
10972,9	-19,0	-19,5	-19,1
11582,5	-19,3	-19,7	-19,3
12192,0	-19,5	-19,7	-19,5
12801,6	-19,8	-19,8	-19,8
14020,8	-19,8	-19,7	-19,8
15240,0	-19,7	-19,7	-19,7
16459,2	-19,7	-19,7	-19,7
17678,4	-19,7	-19,7	-19,7
18897,6	-19,7	-19,7	-19,7

As tensões no eixo h2 começam a subir aos 4876,81 *m* a razão de 0,1 *MPa* para o acoplamento total e iterativo, por outro lado no caso do acoplamento em uma via os valores começam a sofrer variações nos 6096,03*m* (limite do *siderburden* com o reservatório) com o mesmo valor de incremento.

Os valores das tensões vão descendo até o centro do eixo (9144,01 *m*) com valores de 18,4 *MPa* para acoplamento iterativo, 18,5 *MPa* para acoplamento total e 19,0 *MPa* no acoplamento em uma via.

O terceiro eixo horizontal h_3 , localizado conforme mostrado na Figura 47, foi analisado mostrando as gráficas de tensão efetiva σ'_{xx} nas Figura 66 e Figura 67 com o comparativo na Figura 68.



Figura 66 - Variação da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo h_3 pelo acoplamento total.



Figura 67 - Variação da tensão efetiva $\sigma_{\rm xx}'$ ao longo do eixo h_3 pelo acoplamento iterativo.

A tensão efetiva σ'_{xx} é aliviada na parte central da região analisada, após sofrer alguns incrementos até o limite do *sideburden* com o reservatório onde começam a cair.





Os valores das tensões efetivas $\sigma'_{\rm xx}$ ao longo do eixo são apresentados na Tabela 14.

Eixo X (m)	$\sigma'_{\rm xx}$ (MPa) para 1200 dias eixo h3		
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total
0	-17,2	-17,2	-17,2
1219,5	-17,2	-17,2	-17,2
2438,4	-17,2	-17,2	-17,2
3657,6	-17,3	-17,2	-17,3
4876,8	-17,4	-17,3	-17,4
6096,0	-17,3	-17,3	-17,3
6705,6	-17,5	-17,3	-17,5
7315,1	-16,9	-17,2	-16,9
7924,8	-16,6	-17,1	-16,7
8534,4	-16,2	-16,8	-16,3
9144,0	-16,1	-16,7	-16,1
9753,6	-16,1	-16,7	-16,1
10363,2	-16,2	-16,8	-16,3

Tabela 14 - Variação da tensão σ'_{xx} para h_3 .

10972,9	-16,6	-17,1	-16,7
11582,5	-16,9	-17,2	-16,9
12192,0	-17,5	-17,3	-17,5
12801,6	-17,3	-17,3	-17,3
14020,8	-17,4	-17,3	-17,4
15240,0	-17,3	-17,2	-17,3
16459,2	-17,2	-17,2	-17,2
17678,4	-17,2	-17,2	-17,2
18897,6	-17,2	-17,2	-17,2

Os valores menores encontrados nesta região são os mesmos no caso total e iterativo sendo de 16,1 *MPa* e para o acoplamento de uma via o valor de 16,7 *MPa* a partir dos 9143,99*m* até 9753,61*m* para todos os casos. Para as tensões efetivas σ'_{zz} as mesmas gráficas serão plotadas no topo de reservatório nas Figuras 69,70 e 71.



Figura 69 - Variação da tensão efetiva σ'_{zz} ao longo do eixo h_3 pelo acoplamento total.



Figura 70 - Variação da tensão efetiva σ_{zz}' ao longo do eixo h_3 pelo acoplamento iterativo.



Figura 71- Comparativo da variação da tensão efetiva σ_{zz}^{\prime} ao longo do eixo $h_{3}.$

A tensão efetiva σ'_{zz} para o tempo final sofre uma forte variação no limite de *sideburden* com o reservatório, seu comportamento é pouco suave e diminui com o tempo na parte central da região. Os valores da tensão efetiva σ'_{xx} ao longo do eixo são apresentados na Tabela 15.

Eixo X (m)	σ_{zz}' (MPa) para 1200 dias eixo h3		
	Acop. Iterativo	Acop. Uma via	Acop.Total
0	-34,5	-34,5	-34,5
1219,5	-34,4	-34,5	-34,5
2438,4	-34,5	-34,5	-34,5
3657,6	-34,5	-34,5	-34,5
4876,8	-34,7	-34,5	-34,5
6096,0	-35,1	-34,6	-35,1
6705,6	-33,7	-34,5	-33,8
7315,1	-33,7	-34,4	-33,8
7924,8	-33,3	-34,2	-33,4
8534,4	-32,7	-33,7	-32,7
9144,0	-31,6	-32,7	-31,7
9753,6	-31,6	-32,7	-31,7
10363,2	-32,7	-33,7	-32,7
10972,9	-33,3	-34,2	-33,4
11582,5	-33,7	-34,4	-33,8
12192,0	-33,7	-34,5	-33,8
12801,6	-35,1	-34,6	-35,1
14020,8	-34,7	-34,5	-34,6
15240,0	-34,5	-34,5	-34,5
16459,2	-34,5	-34,5	-34,5
17678,4	-34,4	-34,5	-34,4
18897,6	-34,5	-34,5	-34,5

Tabela 15 - Variação da tensão σ'_{zz} para h_3 .

Conforme ao esperado as tensões sofrem um incremento na medida em que vão se acercando ao reservatório, chegando a seu valor maior nesse ponto para a distância no eixo de 6096 *m* com valores de 35,1 *MPa* para o acoplamento iterativo e total, diferençando-se em 0,5 *MPa* do valor máximo do acoplamento em uma via cujo valor é 34,6 *MPa*. Dentro do reservatório começam os alívios nas tensões, chegando a diminuir 3,5 *MPa* do valor máximo atingido para o acoplamento iterativo, 3,4 *MPa* para o acoplamento total, e 1,9 *MPa* em uma via.