

## 6 Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações 3D para tubos base com diferentes furações considerando cenários extremos que poderiam levar ao colapso das telas utilizadas em sistemas de contenção de areia de poços horizontais.

Nas simulações 3D realizadas o poço foi modelado como um paralelepípedo recortado da seção horizontal e com centro do poço coincidindo com um dos seus vértices e dimensões 90 x 90 x 6 polegadas (comprimento, altura, largura). Assumiu-se também que o poço foi perfurado alinhado com o eixo de menor tensão e com as condições de simetria conforme apresentado na figura 61.

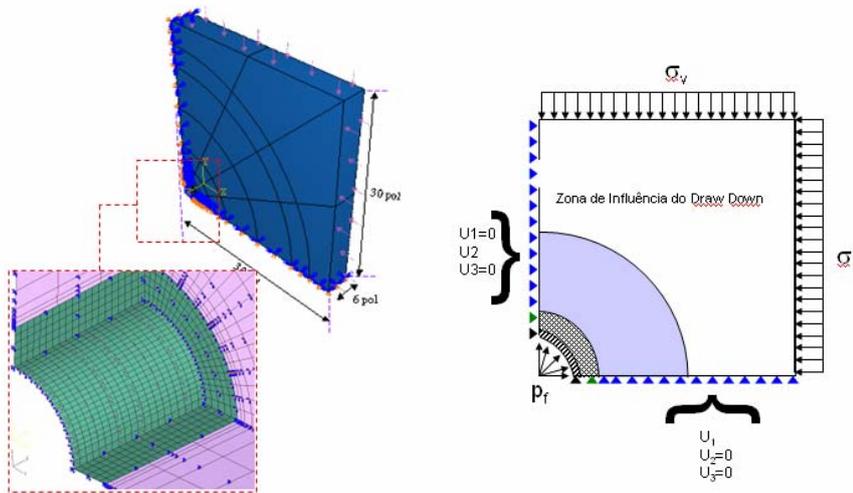


Figura 61 – Esquema dos modelos simulados

As simulações foram realizadas para 4 tipo de tubos base com densidade de 72 e 84 furos/pé e diâmetro de furos de  $\frac{3}{8}$  e  $\frac{1}{2}$  polegadas. Nestas análises, o carregamento foi considerado de duas formas: primeiro mantendo o interior do tubo vazio seguindo a recomendação da API *Bulletin 5C3* para o projeto e dimensionamento de tubos utilizados em colunas de produção e, em seguida levando em conta o drawdown de 100 psi aplicado na parede do poço..

Apesar do primeiro cenário analisado ser de ocorrência improvável, ele foi analisado para verificar o comportamento do tubo base numa condição extrema de carregamento.

Na apresentação dos resultados é feita uma comparação com as simulações realizada para o poço perfurado, ou seja, antes da instalação do granel e com a aplicação da pressão hidrostática do fluido de perfuração nas superfícies internas da parede do poço, granel ou formação variando de 0 a 4900 psi (referente a pressão fornecida pela coluna de fluido de completação com 9,0 ppg na profundidade vertical de 3200 m).

Os resultados são apresentados em forma de gráficos tensão x raio no eixo horizontal (eixo x ou 1 conforme ilustrado nas figuras deste capítulo) ou na forma de campos de tensões principais, deformações e Mohr Coulomb (definida no capítulo 3) para a formação e tensões de Mises (definida no capítulo 4) para o tubo. Na tabela 6 é apresentado um resumo das propriedades utilizadas nos modelos simulados bem como suas características principais.

Tabela 6 – **Especificação do modelo em função de cada cenário.**

Propriedades Analisadas		Valor considerado
<b>Geometria do Modelo</b>	C (pol)	30
	L (pol)	6
	A (pol)	30
<b>Propriedades Geomecânicas da Formação</b>	c (psi)	300
	$\Phi$ (graus)	30
	E (psi)	1,00E+06
	$\nu$	0.28
	$\sigma_v$ (psi)	6132
	$\sigma_h$ (psi)	5347
	$P_{\text{hidrostatico}}$ (psi)	0
<b>Propriedades Geomecânicas do Gravel</b>	c (psi)	0
	$\Phi$ (graus)	30
	E (psi)	5,00E+05
	$\nu$	0.29
<b>Propriedades mecânicas do Tubo Base</b>	E (psi)	3,00E+07
	$\nu$	0,3
	Rc (psi)	110000
	OD (pol)	5,5
	ID (pol)	4,892
	Ovalização	0,50 a 1%
	C (pol)	6
	# de furos	72 a 84 furos/pé
$d_{\text{furos}}$	$\frac{3}{8}$ e $\frac{1}{2}$ pol	
<b>Modelo de Contato</b>	G x T	Colado/Atrito
	G x F	Colado/Atrito

## 6.1 Cenário 1: Sem Pressão Interna no Tubo

Durante a instalação do sistema de contenção de areia tipo *gravel packing* e a sequência de operação de completação até a indução de surgência e produção do poço (descritas no capítulo 2), é pouco provável de ocorrer uma situação onde o interior do poço esteja vazio com pressão interna próxima à pressão atmosférica. Uma possibilidade, pouco provável e decorrente de falha operacional, seria considerar o descarregamento do anular e coluna de produção até uma válvula fechada logo acima do packer, seguida de abertura da válvula da coluna, comunicando instantaneamente todo o conjunto telado com a pressão próxima à atmosférica (conforme esquema ilustrado na figura 62). Esta situação seria decorrente de uma falha operacional ou de procedimento, uma vez que os equipamentos instalados no poço não suportariam um diferencial de pressão tão grande (próximo a 5000 psi) colocando em risco a integridade não só dos tubos mais da própria válvula de isolamento e do pacote de cerâmica.

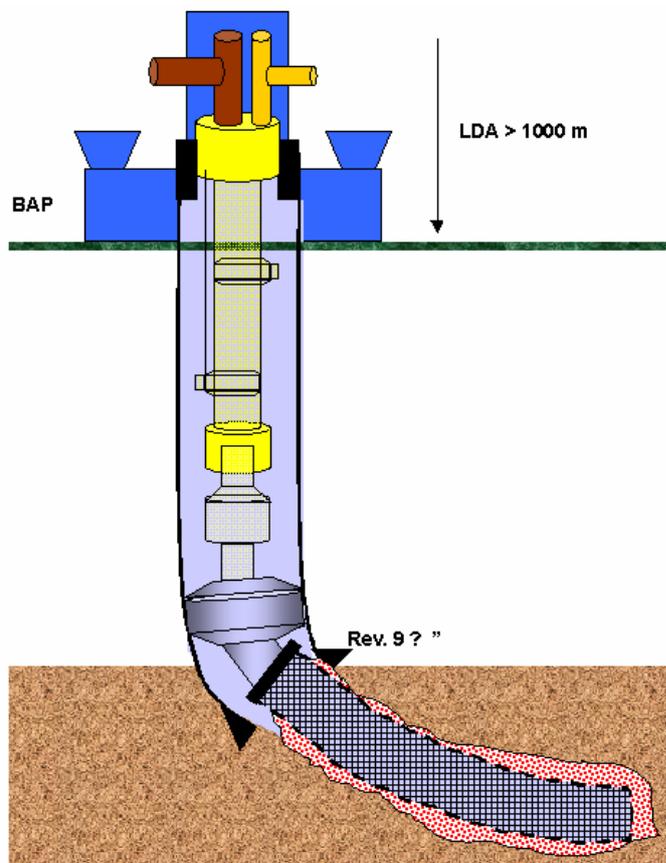


Figura 62 – Esquema de poço representado no cenário 1

A seguir os resultados para a simulação 3D para a formação considerando somente o carregamento da formação (ou seja, a pressão interna nula) que servirá como parâmetro comparativo e identificação do efeito de contenção mecânica proporcionado pelo tubo base. Na figura 63 é apresentado o campo de tensão principal (no caso  $\sigma_2$ ) para um poço de 8 ½ polegadas de diâmetro com pressão interna nula atuante em suas parede.

Pode-se observar o avanço da concentração de tensão da parede do poço para a formação, conforme os resultados apresentados no capítulo 3, evidenciando a plastificação das regiões próximas a parede do poço.

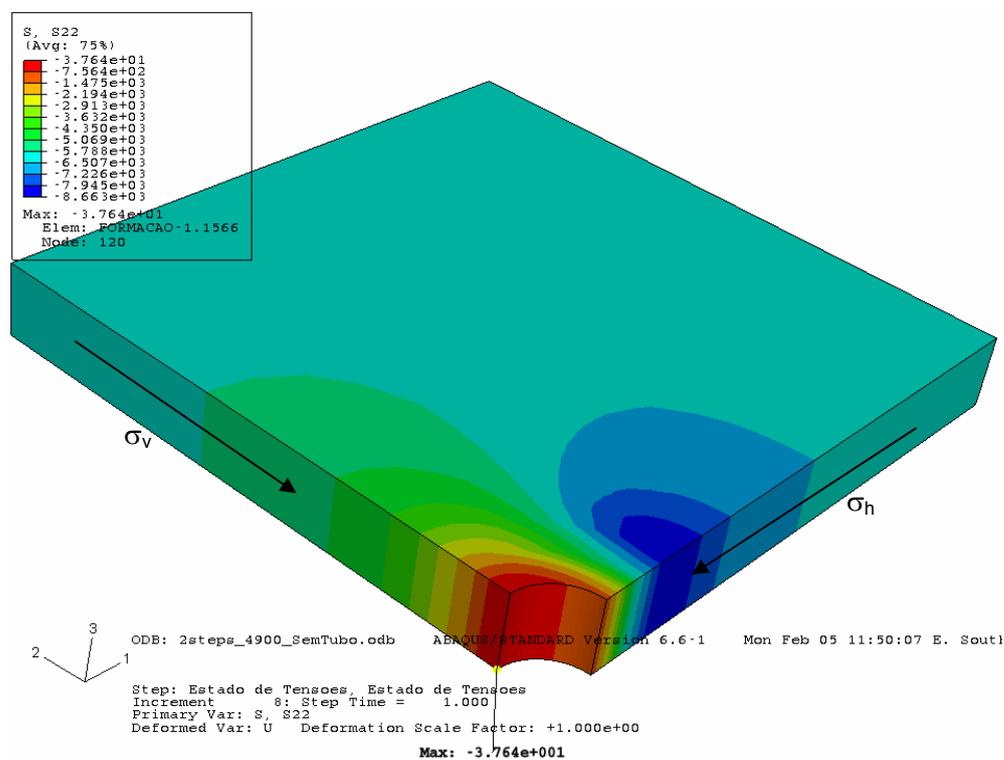


Figura 63 – Campo de tensão principal  $\sigma_{22}$  para a formação sem o tubo de acordo com as condições da tabela 6.

Na figura 64 é apresentado o campo de tensões de Mohr Coulomb para as mesmas condições descritas para a figura anterior. Pode-se observar a região de plastificação da formação na parte baixa do modelo compatível com os resultados encontrados no capítulo 3 e com a região esperada para o colapso da formação por cisalhamento (*breakout*).

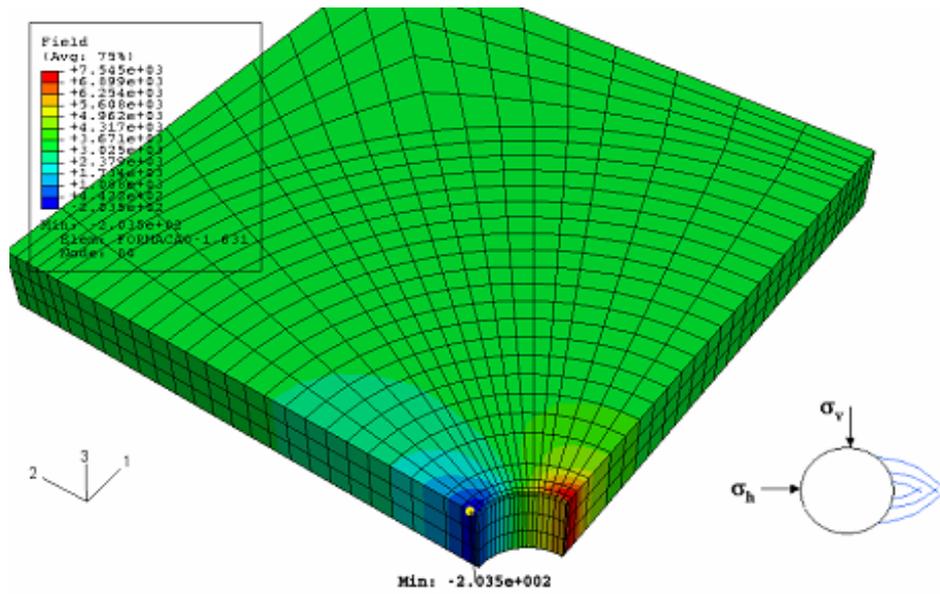


Figura 64 – Campo de tensões de Mohr Coulomb (em psi) para a formação sem o tubo de acordo com as condições da tabela 6.

A figura 65 apresenta os resultados para a variação das tensões principais ao longo do eixo horizontal do poço. Pode-se verificar a atenuação da área concentração de tensões e com o aumento da pressão interna indicando a estabilização das paredes do poço.

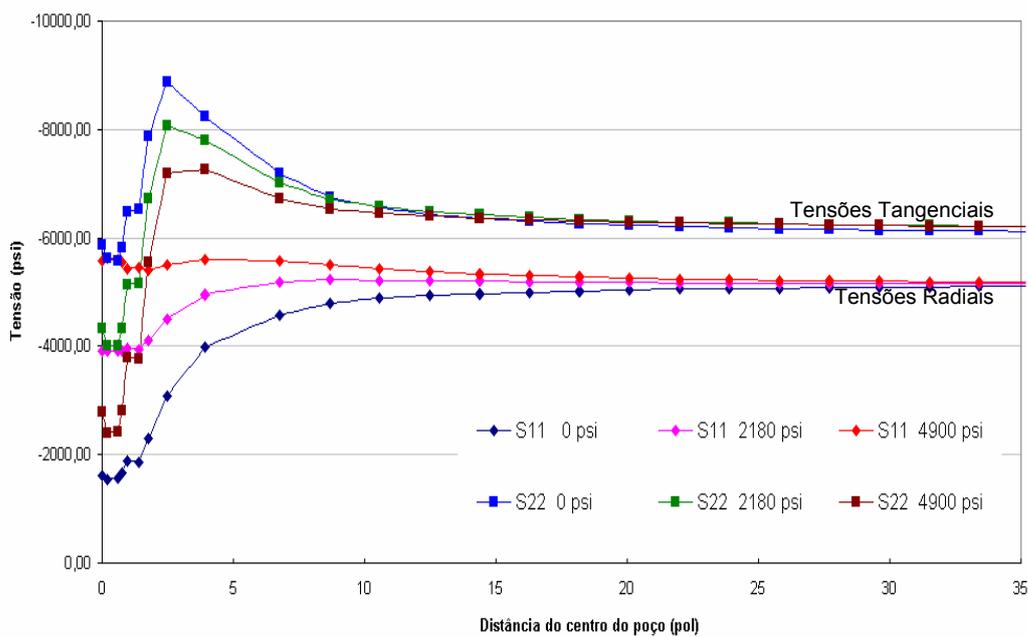


Figura 65 – Campo de tensões de Mohr Coulomb para a formação sem o tubo de acordo com as condições da tabela 6.

A figura 66 ilustra o campo de deformação plástica quando a formação esta submetida às mesmas condições simuladas para obtenção dos resultados apresentados nas figuras 63 e 64.

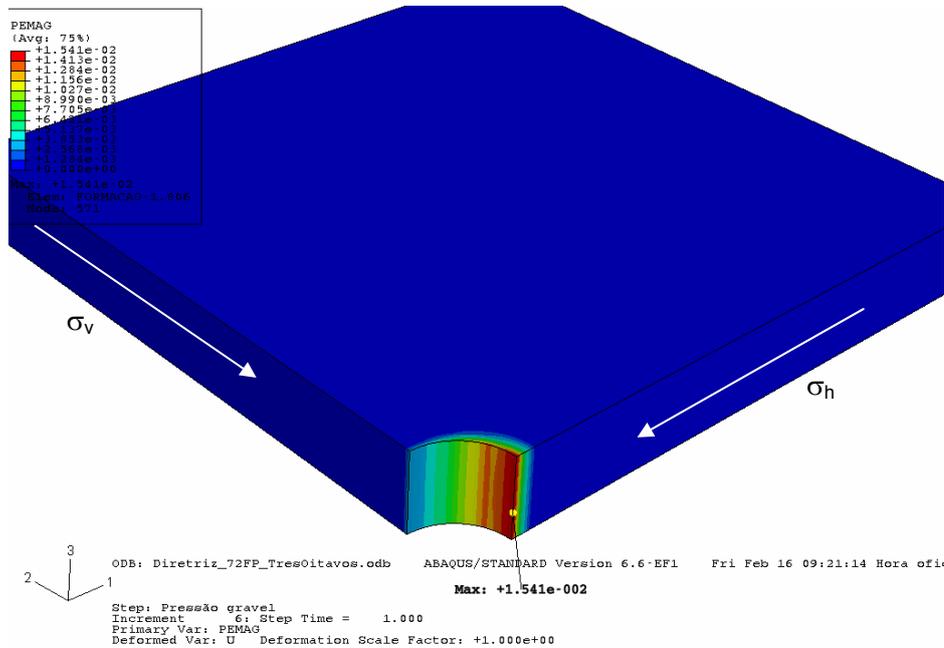


Figura 66 – Superfície de deformação plástica em polegadas na parede do poço após a perfuração

Pode-se observar a área de deformação plástica da formação quando submetida ao carregamento sem a presença do tubo base como elemento de contenção mecânica (logo após a perfuração do poço) evidenciando a possibilidade de ruptura da formação na região esperada para o colapso por cisalhamento. A grande região plastificada pode ser justificada pela simulação com pressão interna nula.

A figura 67 ilustra o campo de tensões principais na formação em um sistema acoplado formação, gravel e tubo (72 furos/pé com furos de ½ polegadas) considerando as interfaces coladas. Pode-se observar a manutenção das áreas de concentração de tensões próximas à parede do poço e a redução do avanço de deformação registrado na figura 63 (quando não foi considerado o conjunto de telas instalado) indicando o efeito de contenção mecânica proporcionado pelo conjunto gravel - tubo.

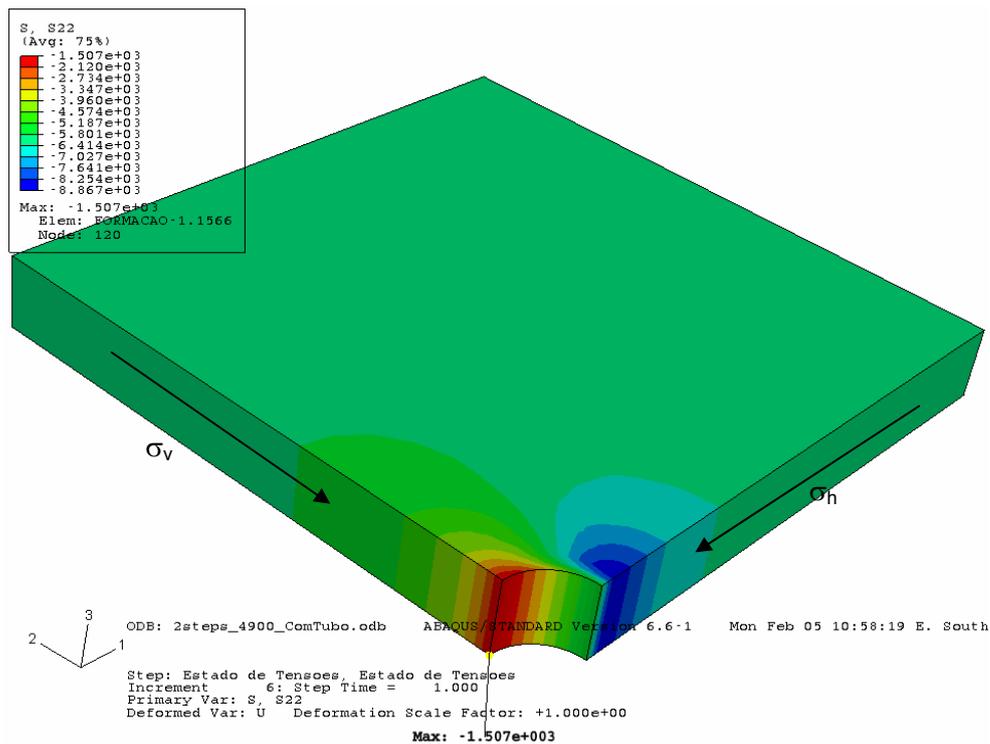


Figura 67 – Campo de tensões tangenciais (em psi) para a formação com o tubo acoplado.

A comparação entre as figuras 63 e 67 evidencia qualitativamente o efeito de contenção mecânica do tubo base evitando a propagação das tensões para a formação e reduzindo a possibilidade de ocorrer zonas de ruptura próximas a parede do poço, conforme ilustrado na figura 66.

A figura 68 apresenta a distribuição da tensão circunferencial na formação com a distância do centro do poço considerando o acoplamento gravel x formação e suas interfaces coladas. Pode-se verificar o efeito de contenção mecânica do tubo base confirmando que não ocorre avanço da concentração de tensão para a formação, mantendo os maiores fatores de concentração próximos à parede do poço.

O maior efeito de concentração de tensão nas paredes do poço é observado para os tubos com maior abertura (72 furos/pé com  $\frac{1}{2}$  polegada e 84 furos/pé com  $\frac{3}{8}$  polegadas). Isto pode ser justificado pela maior deformação do tubo base em função da concentração de tensões ao redor do furos, conforme pode ser observado na figura 69, o que levaria ao maior deslocamento da formação.

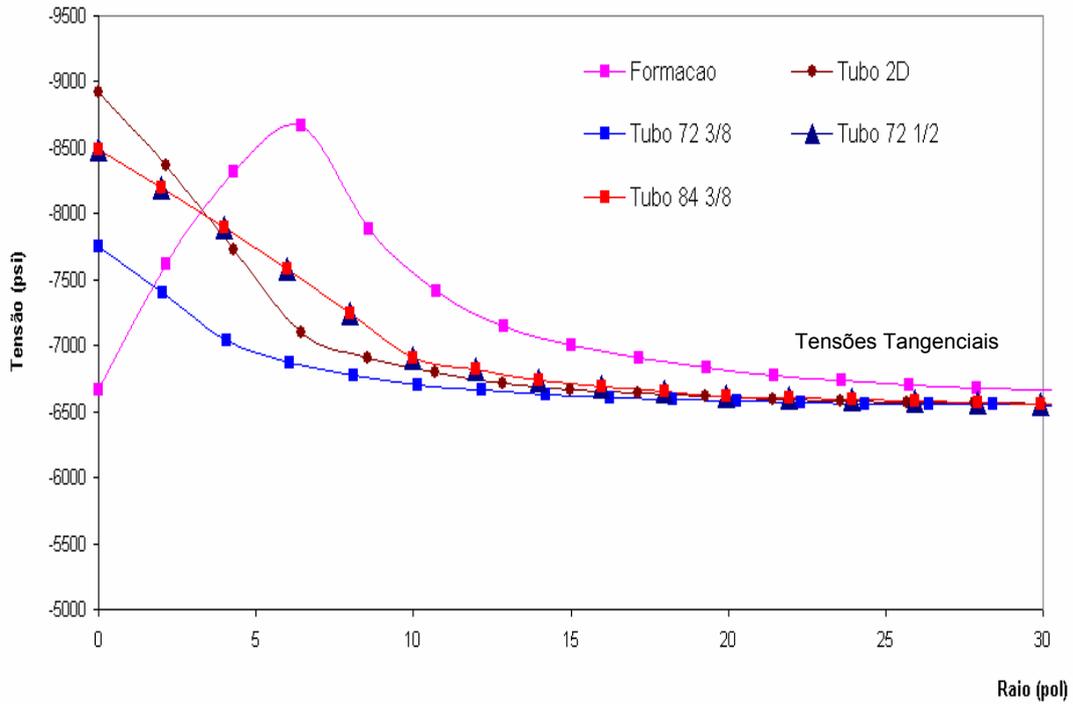


Figura 68 – Variação da tensão tangencial na formação em função do raio do poço.

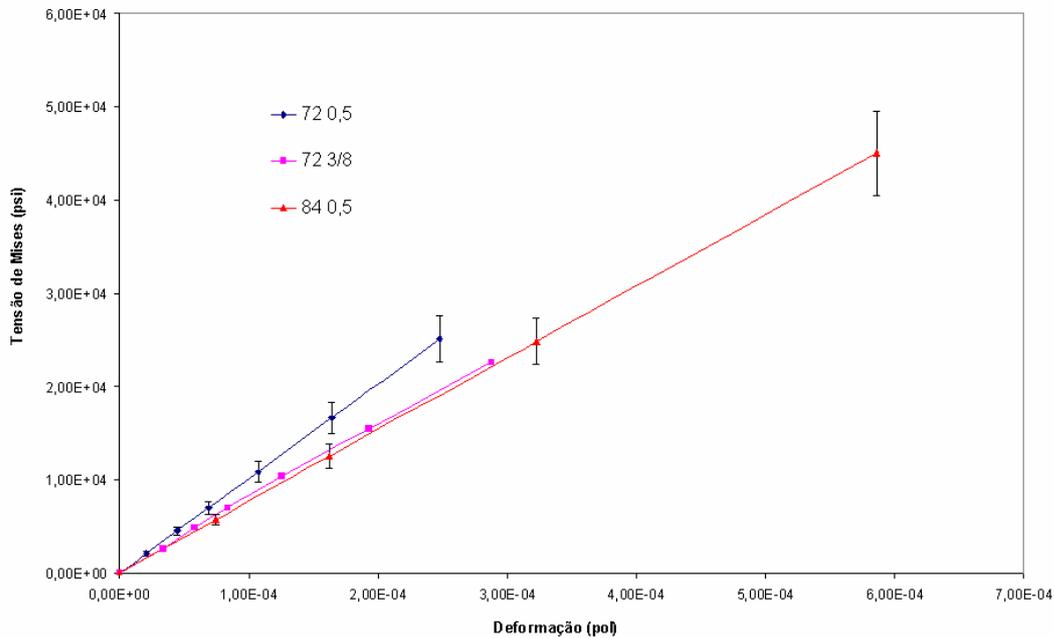


Figura 69 – Variação da Tensão de Mises com a deformação.

Nas figuras 70 a 72 são apresentados os resultados para a distribuição das tensões de Mises nos modelos 3D para o tubo base nas condições descritas na tabela 6.

Os resultados encontrados são compatíveis com os obtidos para as simulações de modelos 2D. No entanto, os modelos permitem verificar o efeito de concentração de tensões ao redor dos furos do tubo base justificando a análise 3D do tubo para a otimização do tipo de furação. Em nenhuma simulação realizada foram verificadas regiões onde a tensão de Mises ultrapassou o limite de escoamento nos tubos 72 ou 84 furos/pé, 17 lb/pé fabricados com grau de aço P110.

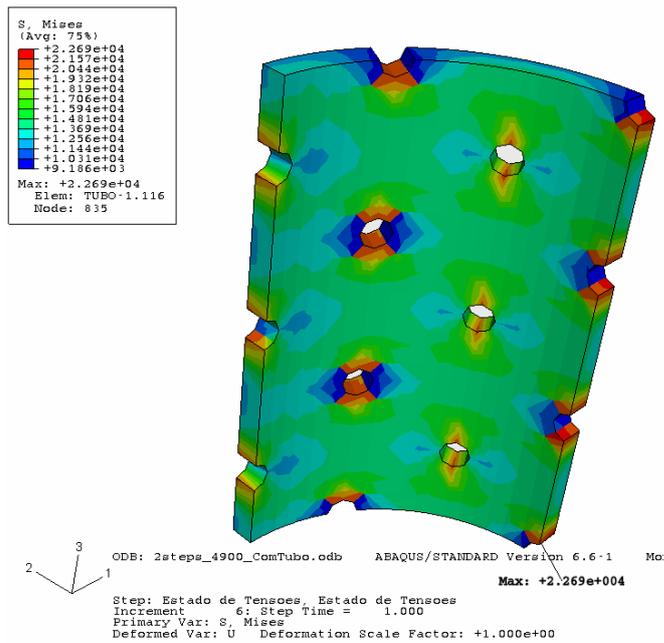


Figura 70 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 72 furos/pé e furos de 3/8 polegadas.

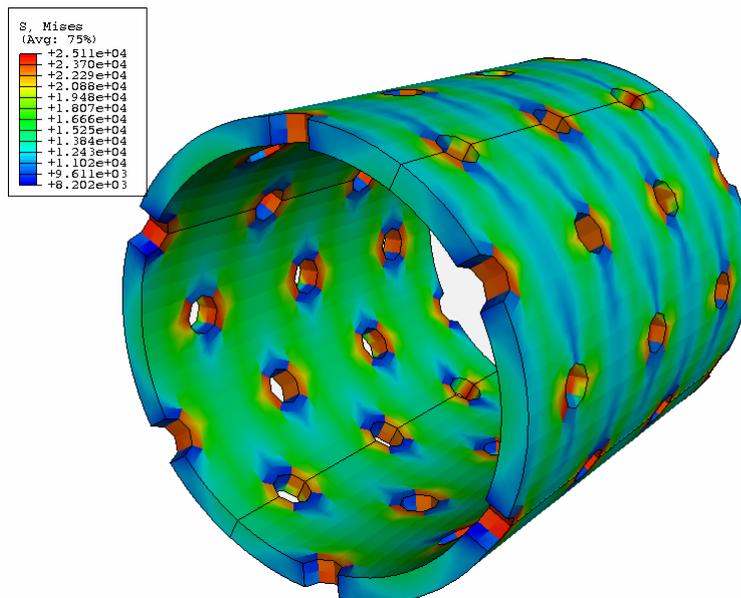
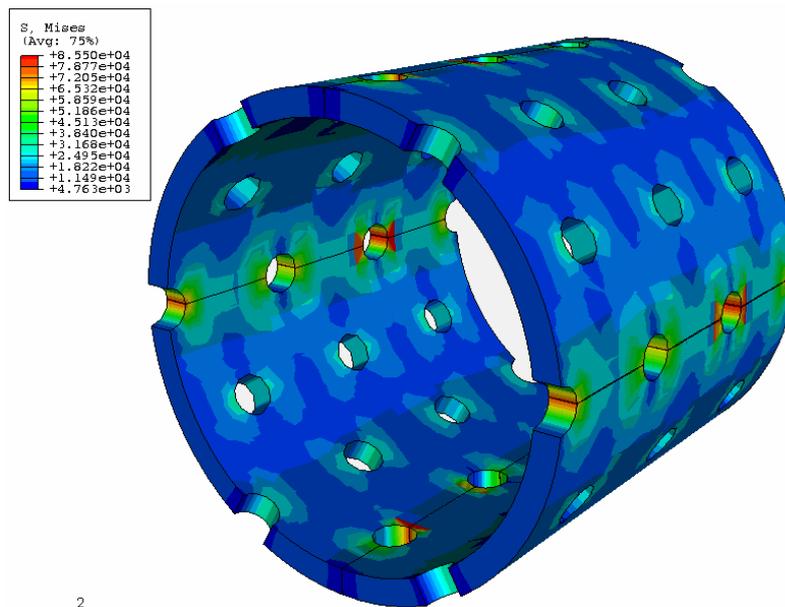


Figura 71 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 72 furos/pé e furos de 1/2 polegadas.



2

Figura 72 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 84 furos/pé e furos de ½ polegadas.

Na figura 73 é apresentada a variação da máxima tensão de Mises em função da área aberta ao fluxo e do número de furos do tubo base para os modelos 3D com 0,5% de ovalização. Pode-se observar um aumento significativo do máximo valor da tensão de Mises para os tubos com 84 furos de ½ polegadas por pé. Isto é um indício da influência do tipo de furação na distribuição de tensões no corpo do tubo. Em nenhum dos casos, os valores máximo da tensão de Mises ultrapassaram o limite de escoamento para os tubos com furação de ⅜ de polegada.

O tubo com 72 furos/pé e diâmetro de furos ½ polegadas também não apresentou valores de tensão de Mises que ultrapassassem o limite de escoamento do material. Nestes 3 casos, considerando uma ovalização do tubo de 0,5 %, o grau do aço poderia ser reduzido para N80 considerando tubo 5,5 polegadas 17 lb/pé.

Apesar das simulações para o tubo de 84 furos de ½ polegada indicarem valores máximo de tensão de Mises superior ao limite de escoamento para um aço com grau N80, as simulações foram realizadas em um cenário extremo de operação, com baixa probabilidade de ocorrer ao longo da vida produtiva do poço. Assim, a alternativa de utilizar tubos com 84 furos/pé e

diâmetro de furo de  $\frac{1}{2}$  polegada com grau de aço N80 não acarretaria em risco operacional para o poço no que diz respeito ao colapso.

Tensão Máxima de Mises (psi)

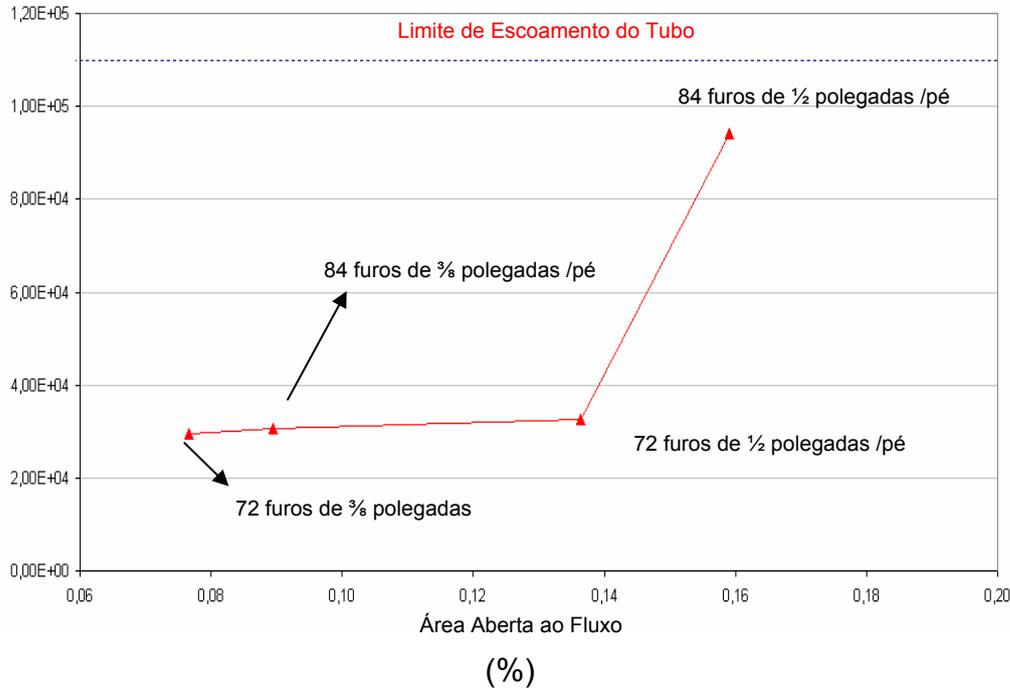


Figura 73 – Variação da Tensão de Mises com a área aberta ao fluxo.

A seguir são apresentadas as simulações para o caso de um modelo de contato considerando atrito na interface gravel x tubo e força normal atuante na interface gravel x formação e draw down de 100 psi.

## 6.2 Cenário 2: Pressão Interna e Draw Down

O cenário analisado na seção anterior é pouco provável de ocorrer e submete o tubo base à uma sollicitação muito superior ao carregamento previsto durante a vida produtiva do poço. Nesta seção será avaliado o carregamento submetido ao conjunto telado quando do início da produção do poço num cenário mais realista. Nas simulações realizadas, o draw down, ou seja, a diferença entre a poropressão e a pressão de fluxo é aplicada na parede do poço (superfície interna da formação) e o efeito sobre a tela é determinado considerando o contato entre as superfícies gravel x tubo e gravel x formação

descritos de acordo com os valores apresentados na tabela 5 e os modelos apresentados no capítulo anterior. A figura 74 ilustra um corte na seção transversal do poço e as condições de contorno consideradas nesta seção.

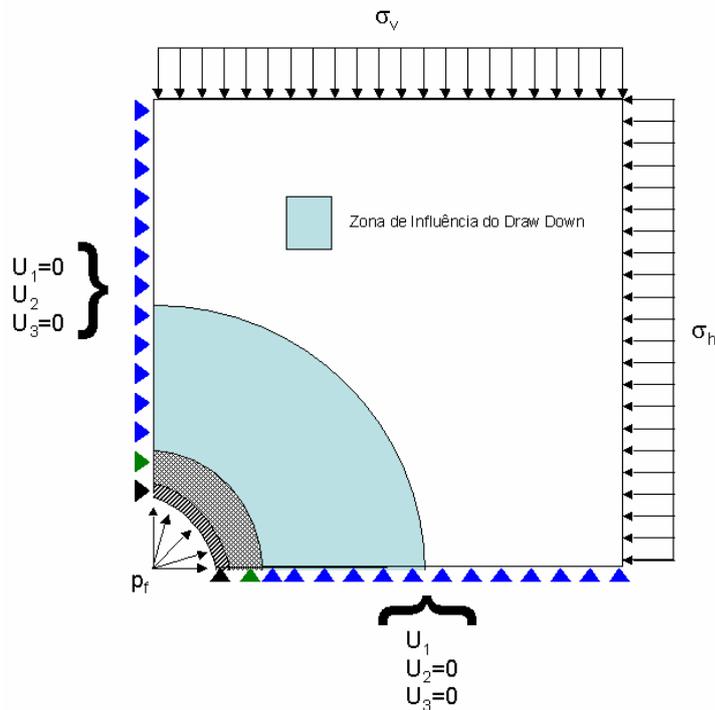


Figura 74 – Condições de contorno consideradas na simulação do draw down.

As simulações foram realizadas em três etapas: na primeira inicia-se a sollicitação da formação com as tensões verticais e horizontais, em seguida introduz-se a pressão do fluido de completação aplicada na superfície interna da parede do poço (neste momento a pressão de hidrostática está atuando na parede do poço) e na terceira etapa reduz-se a pressão hidrostática até a pressão de fluxo e aplica-se a pressão de draw down na superfície externa do gravel.

Em função das etapas consideradas e da aplicação de pressões na superfície do gravel e do tubo, o modelo de contato não foi considerado como superfícies coladas evitando o efeito de uma sollicitação extra sobre o tubo em função do deslocamento da superfície do gravel e da conseqüente tração sobre o tubo.

A figura 75 ilustra o efeito do carregamento adicional sobre na parede do tubo em função do deslocamento do gravel quando do carregamento hidrostático de 3500 e 4900 psi aplicado na superfície da formação. A tração

exercida na parede do tubo deve-se ao deslocamento do gravel no sentido da formação, puxando o tubo na mesma direção por estarem com as superfícies coladas.

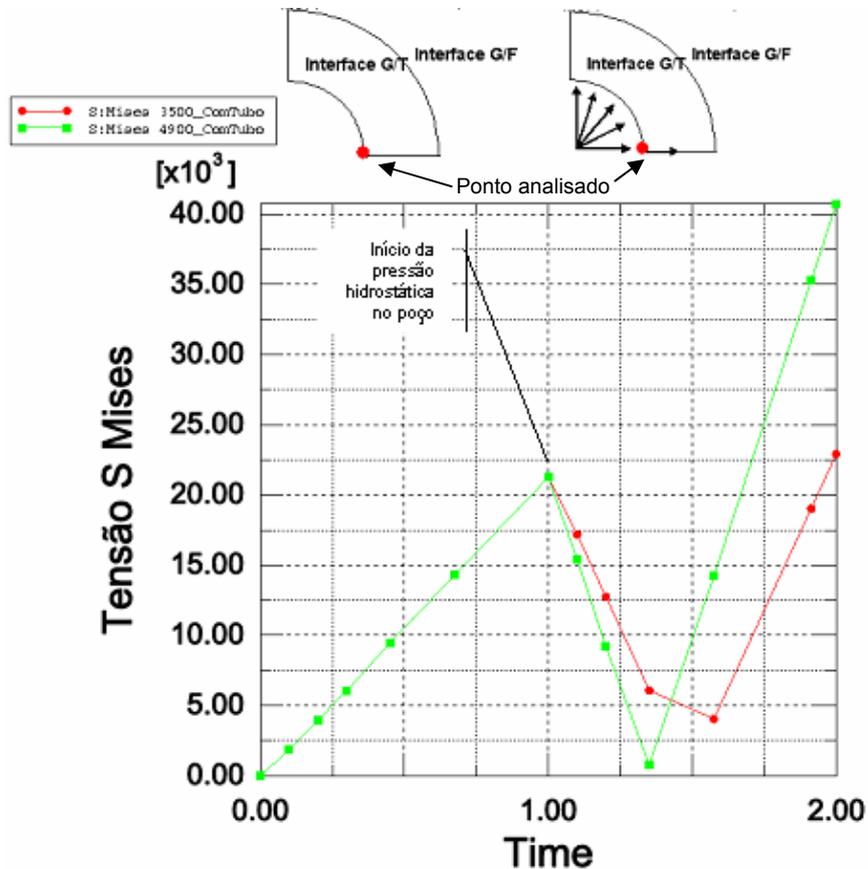


Figura 75 – Evolução da Tensão de Mises em cada etapa da simulação.

Pode-se observar que o tubo é mais solicitado quando a pressão hidrostática do fluido é de 4900 psi, fato que não deveria ocorrer em função da estabilização das paredes do poço proporcionada pelo fluido indicada nas simulações realizadas nos capítulos 3 e 5. As solicitações verificadas indicam que as superfícies gravel x formação e gravel x tubo coladas acarretam na tração do tubo base quando da deformação da parede do poço no sentido da formação (em função do aumento da pressão interna do poço), conforme indicado na figura 80. Este efeito não foi observado quando da utilização do modelo de atrito entra as superfícies gravel x tubo e gravel x formação.

A figura 76 ilustra o carregamento sobre a parede do tubo em cada etapa da simulação do drawdown num tubo de 5 ½ polegadas 0,5% de

ovalização com 72 furos/ft de  $\frac{3}{8}$  polegadas. Pode-se observar a diminuição da sollicitação nas paredes do tubo quando da aplicação da pressão hidrostática atuante na parede do poço (reduzindo assim o carregamento sobre o tubo) no ponto de máxima tensão de Mises.

Foi considerado um atrito entre a superfície externa do tubo e interna do granel com coeficiente de 0,25. O atrito granel x formação foi considerado com coeficiente de 0,05. A figura 82 ilustra a distribuição da tensão de Mises para o tubo de 5  $\frac{1}{2}$  pol com 72 furos/pé de  $\frac{3}{8}$  de polegadas submetido ao carregamento apresentado na tabela 6.

Verifica-se, novamente, que não existem regiões onde a tensão de Mises superou a tensão limite de escoamento do material.

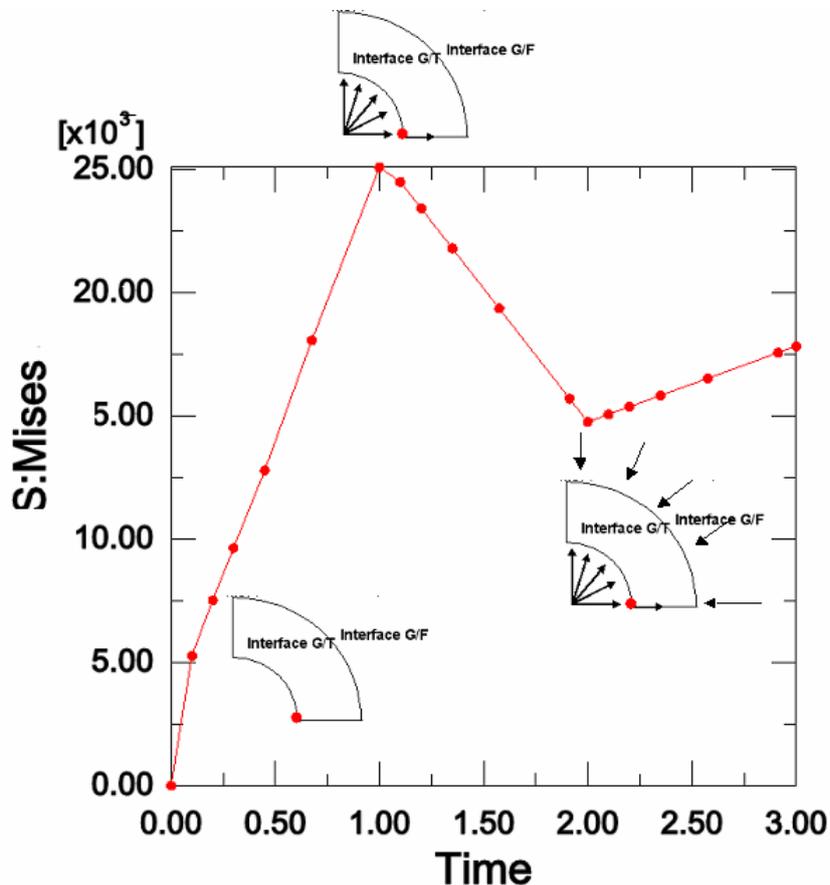


Figura 76 – Evolução da Tensão de Mises em cada etapa da simulação.

Conforme apresentado nos gráficos das figuras 78, em nenhuma situação onde o drawdown de 100 psi foi simulado, verificou-se a existência de regiões onde a tensão de Mises superou o limite de escoamento do material. Este resultado está de acordo com a simulação anterior (cenário mais severo

visto que o tubo base foi considerado vazio) quando não foram encontradas regiões fora do limite de estabilidade elástica.

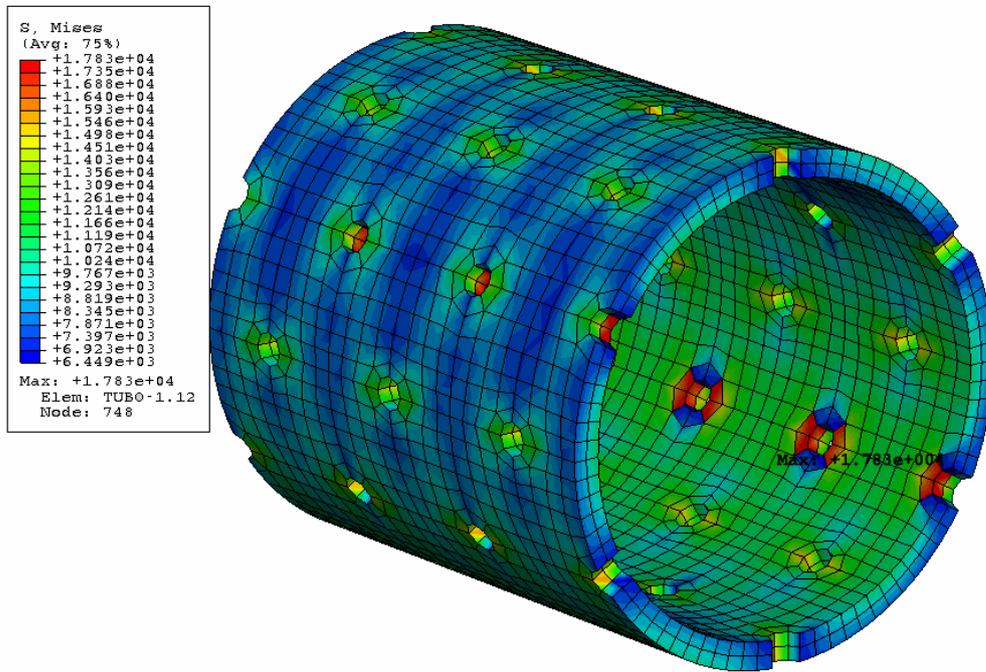


Figura 77 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 72 furos/pé e furos de 3/8 polegadas.

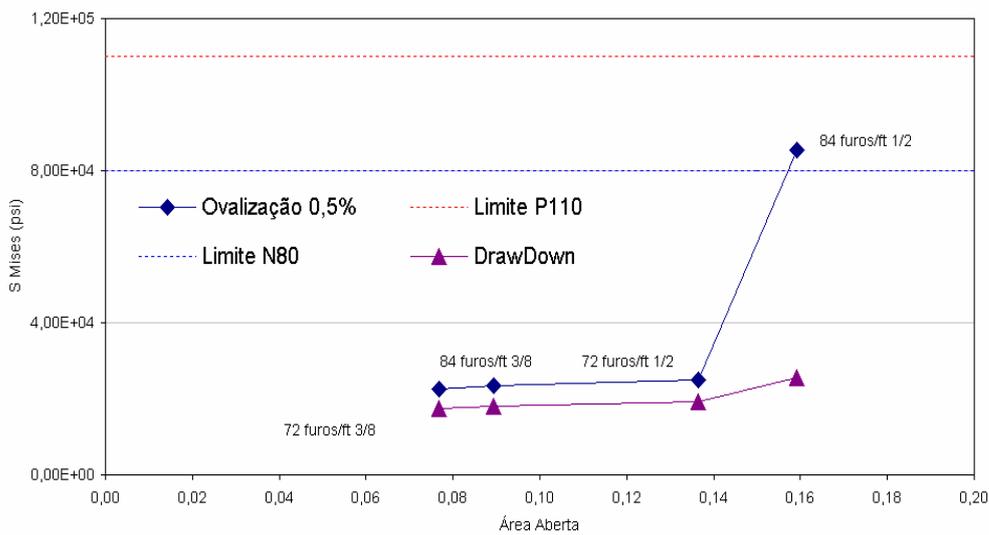


Figura 78 – Variação da Tensão de Mises (psi) com a área aberta ao fluxo.