

## 4 Modelos para Análise do Colapso de Tubos Utilizados na Completação

A avaliação do estado de tensões e de deformações em corpos com geometria cilíndrica é um problema bastante conhecido e bem descrito na literatura em função do grande número de aplicações práticas e industriais. A obtenção das expressões para cálculo de tensões desenvolvidas em tubos com paredes espessas é atribuída à Lamé em sua obra publicada em 1852 “*Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*”. A combinação das equações que descrevem o comportamento tensão-deformação com teorias de resistência de materiais é utilizada para o dimensionamento adequado de tubos, em geral, em termos de sua espessura e propriedades do material que o constitui (Groehs, 2002).

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição da metodologia utilizada para análise do colapso de tubos utilizados em poços de petróleo, em especial para tubos que constituem as telas Premium considerando: a norma API Bulletin 5C3, um modelo simplificado para análise de tubos de produção (Abassian, 1995) e uma modelagem numérica considerando o comportamento do aço perfeitamente plástico. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com o trabalho de Abassian (1995), com os limites de colapso determinados experimentalmente por fabricantes usuais de conjunto de telas e com os resultados obtidos através da norma API Bulletin 5C3. A coincidência entre os resultados obtidos pelas diferentes metodologias foi considerada boa, com variação inferior à 8%.

O limite para dimensionamento do tubo base em função do colapso para sistemas de contenção de areia horizontais foi determinado considerando que o tubo não deveria alcançar o regime plástico (permanecendo inclusive abaixo do limite de estabilidade elástica).

Foram avaliadas algumas geometrias de interesse da indústria de petróleo, variando a densidade e o diâmetro dos furos no tubo base, a fim de

avaliar a influência do aumento da área aberta ao fluxo no desempenho do conjunto telado no que diz respeito ao colapso. Ao final do capítulo foi definido o tubo de 5 1/2" com densidade e diâmetro de furos mais adequados para o posterior acoplamento e simulação numérica para avaliação do conjunto formação x tela x gravel.

#### 4.1 Análise do Colapso em Tubulações de Poços

O colapso é o esforço que ocorre em tubulações quando a diferença entre a pressão externa e interna é maior que o limite estabelecido em função de tensão de escoamento, de parâmetros geométricos (diâmetros, espessura, furos e geometria do furo quando de tubos furados) e da tensão axial que o tubo está submetido e é calculado de acordo com o regime de deformação do tubo e da sua relação diâmetro-espessura. A resistência ao colapso ( $R_c$ ), conforme descrita no API *Bulletin* 5C3, é dada a partir de diferentes regimes de colapso que são apresentados na figura 32 em função do diâmetro externo (OD) e da espessura (t).

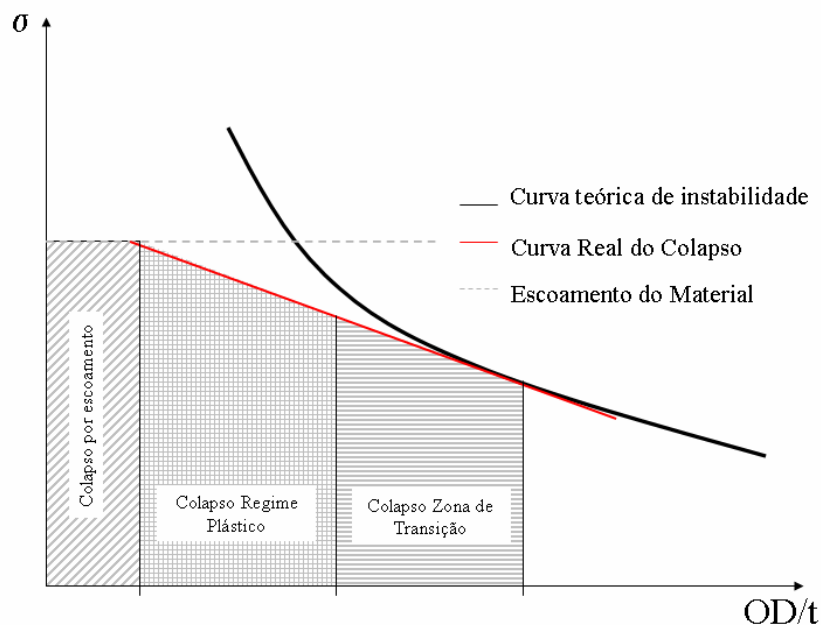


Figura 32 – Resistência ao Colapso em função da relação OD/t (API Bulletin 5C3).

Em função dos riscos associados no caso da falha da coluna de produção ou do conjunto de telas, os critérios adotados para o dimensionamento de tubulações instaladas em poços de petróleo são, em geral, bastante conservadores. A norma API, recomenda o dimensionamento do tubo quanto ao colapso considerando o interior da coluna de produção (ou injeção) vazia com fator de segurança 1 para tubos novos e 1,125 para tubos usados. Este é um critério bastante conservador por considerar uma condição operacional não usual para poços produtores de óleo ou injetores de água (a coluna descer vazia, sem equalização entre pressões externas e internas).

O modo de ruptura mais comum para elementos de coluna de produção (incluindo tubos base de telas *premium*) é o colapso por regime plástico ou de transição (API Bulletin 5C3). Segundo a norma API Bulletin 5C3, no caso do colapso por regime plástico, a equação para determinar a resistência a este esforço foi obtida empiricamente a partir de 2488 testes realizados em tubos sem costura fabricados com aço de grau K-55, N-80 e P-110 e é dado pela equação 4.1.

$$R_c = S_y \left[ \left( \frac{A}{OD/t} \right) - B \right] - C \quad (4.1)$$

Onde  $R_c$  é a resistência ao colapso do tubo,  $S_y$  é o limite de escoamento do tubo, A, B e C são parâmetros obtidos experimentalmente, OD é o diâmetro externo e h a espessura do tubo.

Para os tubos fabricados com aço de grau P110 (onde o limite de escoamento é 110 ksi), também utilizados em tubos base de sistema de contenção de areia, onde a relação diâmetro / espessura é aproximadamente 18 (tanto para os tubos de 5 ½ quanto de 6 5/8 polegadas) a ruptura mais comum ocorre seguindo o regime plástico e os valores para as constantes da equação acima seriam: A = 3,181, B = 0,0819 e C = 2852.

O efeito de ovalização do tubo reduz a resistência ao colapso e deve ser considerada no dimensionamento de tubulações utilizadas em poços de petróleo. A ovalização ocorre durante a fabricação dos tubos e pode variar de 0,5 a 2%. Alguns trabalhos descrevem especificamente a influência da ovalização nas propriedades mecânica de tubos novos (Abassian, 1998). No

presente trabalho, foi considerado o menor valor de ovalização (0,5%) na análise dos tubos apenas para introduzir o efeito da ovalização no modelo implementado. Em análises futuras outros valores de ovalização devem ser considerados.

## 4.2 Teoria para Cálculo de Tensões em Cilindros

A obtenção de expressões para cálculo e avaliação das tensões desenvolvidas em cilindros submetidos à pressão interna ou externa é bem conhecida. A análise de tubulações utilizadas em aplicações industriais pode ser dividida em função da razão entre o diâmetro externo (OD) do tubo e sua espessura (h) de acordo com os seguintes critérios (Groehs, 2002):

1. Para  $OD/h < 10$  o cilindro é dito de parede espessa e a teoria de Lamé apresentada em 1852 descreve as equações para as tensões desenvolvidas em cilindros
2. Para  $OD/h > 10$  o cilindro é dito de parede fina e seu comportamento de tensões é descrito pela equação de Barlow (Groehs, 2002).

As expressões apresentadas por Lamé para o cálculo de tensões em cilindro de paredes espessas considerando pressões internas e externas uniformemente distribuídas são apresentadas a seguir:

$$\sigma_r = \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} - \frac{(P_e - P_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \frac{(P_e - P_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (4.3)$$

$$U = \frac{1}{E(R_e^2 - R_i^2)} \left[ (1 - \nu)(P_e R_e^2 - P_i R_i^2)r + (1 + \nu)(P_e - P_i)R_e^2 R_i^2 \frac{1}{r} \right] - \nu \frac{\sigma_x}{E} r \quad (4.4)$$

Onde:

$$\sigma_x = 2\nu \frac{P_e R_e^2 - P_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + E \varepsilon_x \tag{4.5}$$

A equação utilizada para o cálculo de tensões em cilindros de paredes finas pode ser obtida a partir do equilíbrio de forças em uma direção e é conhecida como equação de Barlow (Groehs, 2002):

$$\sigma_1 = \frac{(P_e - P_i)}{2t} (R_e), \quad \sigma_2 = \frac{(P_e - P_i)}{4t} R_e, \quad \sigma_3 = 0 \tag{4.6}$$

A variação das tensões tangenciais na parede de um tubo de paredes finas é apresentada na figura 33. A variação de tensão obtida analítica e numericamente apresenta boa coincidência conforme o gráfico apresentado nesta figura.

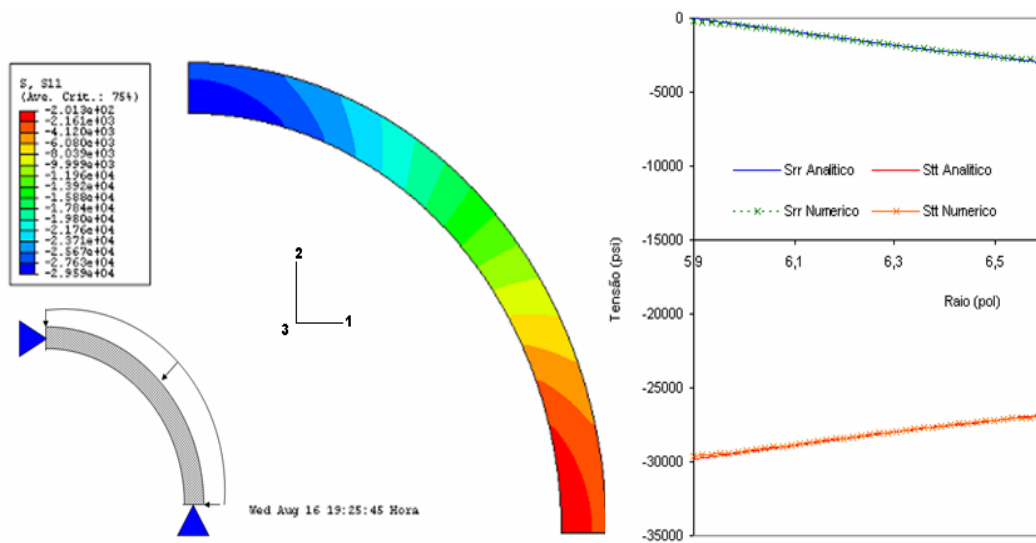


Figura 33 – Variação das tensões tangenciais e radiais com o raio do tubo (analítico x numérico) em psi.

### 4.3 Modelo de Quatro Rótulas

Um tubo no qual as seções transversais são perfeitamente circulares teria uma resistência ao colapso elevada e o seu comportamento seria bem descrito pelo regime elástico. No entanto o tubo pode apresentar imperfeições em função de suas características construtivas apresentando as suas seções transversais descritas não como perfeitamente circulares, mas na verdade como elipses. Isto levaria à uma resistência ao colapso inferior ao previsto pelo modelo de colapso elástico.

A avaliação da ovalização das seções transversais de um tubo foi descrita por Abassian (1995) utilizando o modelo de quatro rótulas, apresentando uma forma expedita de avaliação da resistência ao colapso de tubos com seções transversais elípticas. Neste modelo o comportamento pressão-deslocamento é obtido através da superposição das soluções elásticas e plásticas. Considerando a solução elástica descrita pela equação:

$$P_{eo} = P_e \left( 1 - \frac{u_o}{u} \right) \quad (4.7)$$

Onde  $P_e$  é a pressão crítica de colapso e é dada por:

$$P_e = \frac{2E}{1-\nu^2} \left( \frac{t}{d_t} \right)^3 \quad (4.8)$$

Nesta região a pressão depende apenas das propriedades físicas do material e da geometria do tubo. No modelo proposto por Abassian (1998), o comportamento plástico é descrito considerando que o tubo é formado por 4 seções rígidas ligadas por rótulas plásticas.

Este modelo apresentou bons resultados na predição do comportamento pressão-deslocamento para tubos que apresentam imperfeições de fabricação. O modelo constitutivo adotado por Abassian (1998) descreve a curva de rigidez do tubo como:

$$P_{pc} = P_y \left( -b + \sqrt{1 + b^2} \right) \quad (4.9)$$

Onde  $b$  é dado pela equação:

$$b = 2 \frac{u}{h} \left( 1 - \frac{u}{d_t} \right) \quad (4.10)$$

e  $P_y$ , a pressão onde iniciaria o regime de colapso plástico do tubo perfeitamente circular, é dado pela equação:

$$P_y = 2 \frac{\sigma_y h}{d_t} \quad (4.11)$$

A pressão de colapso é dada pela interseção entre as curvas do modelo elástico e plástico. Para descrever o comportamento plástico de tubos perfurados Abassian propõe a utilização de um fator de correção estabelecido em função do diâmetro dos furos e a da distância entre furos alinhados axialmente. Desta forma, a equação da curva de rigidez do tubo no regime plástico é multiplicado pelo fator  $\eta$ :

$$\eta = 1 - \frac{d_p}{a} \quad (4.12)$$

Onde  $d_p$  é o diâmetro dos furos e,  $a$  é a distância entre furos alinhados axialmente.

A figura 40 apresenta os resultados das curvas do regime elástico e plástico segundo o modelo de Abassian para tubos com diâmetro de 6 5/8 polegadas e diferentes densidades de furos (reduzindo assim a resistência ao colapso do tubo, determinada utilizando o parâmetro  $\eta$  dado pela equação 4.12).

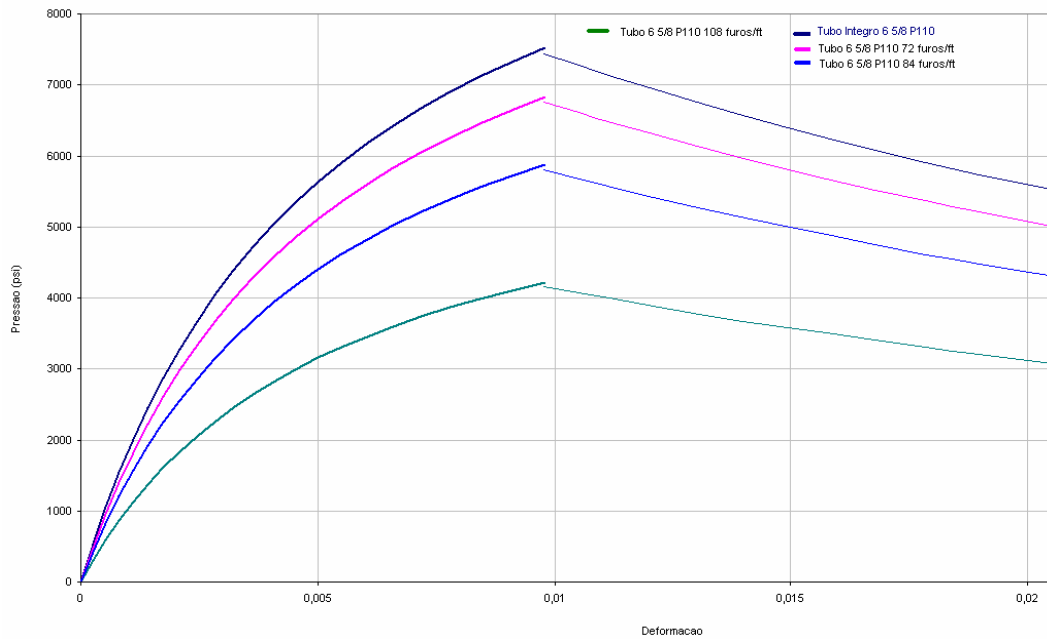


Figura 34 – Comportamento pressão x deslocamento para tubo 6 5/8" (Abassian 1998).

#### 4.4 Critério de Resistência de Von Mises

O critério de resistência utilizado neste trabalho é o da máxima energia de distorção (Von Mises). Este critério pode ser aplicado tanto para o escoamento quanto para ruptura dúctil e é largamente utilizado para avaliação da integridade de tubos de aço apresentando bons resultados para determinação da região do escoamento (Groehls, 2002).

Segundo o critério de Mises, a análise de resistência dos tubos está baseada na comparação do limite de escoamento do material com a máxima tensão de Mises obtida na superfície do tubo, onde a tensão de Mises é dada por (Groehls, 2002).

$$S_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_y \quad (4.13)$$



#### 4.5 Resultados Numéricos para Avaliação do colapso de tubos

As simulações numéricas para a solução de modelos bi e tridimensionais foram realizadas utilizando o ABAQUS™ considerando a geometria do tubo base variando: Do tubo íntegro ao tubo com furação de 216 furos/pé e diferentes diâmetros de furos.

Todas as simulações realizadas nesta etapa consideraram as condições de simetria de estrutura e carregamento, modelando trechos de  $\frac{1}{4}$  de tubo para representar tubos base de  $5 \frac{1}{2}$  polegadas de diâmetro externo.

Em todos os casos simulados considerou-se uma ovalização de 0,5% na direção y em relação ao diâmetro original do tubo. As análises realizadas foram avaliadas considerando o colapso através do critério de Von Mises.

A teoria da máxima energia de distorção (critério de Von Mises) gera valores menos conservadores que os encontrados utilizando o critério de Rankine para uma mesma avaliação e dimensionamento de tubos onde a razão espessura/diâmetro é inferior à 0,1 (como é o caso dos tubos de  $5 \frac{1}{2}$  e  $6 \frac{5}{8}$  polegadas).

A sensibilidade do modelo quanto ao número de elementos da malha e em relação à influência do comprimento L do anel 3D também foi avaliada. Inicialmente foram comparados os resultados 3D para os campos de deformação, tensão e deslocamento utilizando diversas razões  $OD/L$  a fim de determinar a influência do comprimento L do anel utilizado para representar o tubo.

Os resultados para a variação da magnitude da deformação com o comprimento L do modelo são apresentados na figura 35. Esta figura ilustra o comportamento da diferença do tubo no ponto médio entre duas fileiras de furos. Pode-se observar que para razões  $OD/L$  superior a 0,8 a deformação permanece constante para uma mesma pressão hidrostática aplicada.

Os resultados numéricos para modelos considerando a razão  $OD/L$  superior a 0,8 foram comparados com o modelo analítico de Abassian (1998) e com a metodologia API para previsão de colapso e são apresentados na tabela 1.

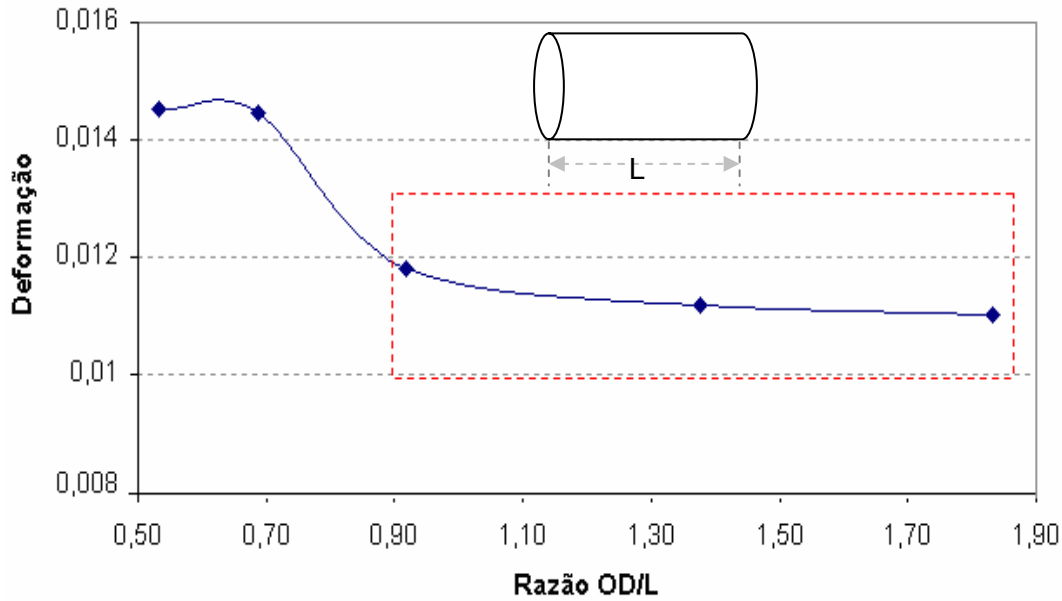


Figura 35 – Resultados para avaliação da influência do comprimento do modelo simulado, L, na deformação do tubo.

Tabela 1– Comparação da Pressão de Colapso para tubos P110

Tubo	(FEM) 3D		Abassian	API	Dados Teste
	P (psi)	Variação			
5 ½ P1110 72 furos/ft	6800	4%	7050	6905	>5000 psi
5 ½ P1110 84 furos/ft	6380	1%	6375	6541	
5 ½ P1110 144 furos/ft	6000	5%	6292	6357	
5 ½ P1110 216 furos/ft	5200	8%	5400	5757	

A figura 36 apresenta o gráfico da pressão x deslocamento (no caso uma razão deslocamento / diâmetro médio do tubo) obtido na simulação do carregamento hidrostático com pressão de 8000 psi para um tubo base de 5 ½ polegadas com 84 furos/pé de 3/8 polegadas.

O tubo apresenta o limite de estabilidade elástica em 6350 psi, a partir desta pressão ocorre deformação plástica nas regiões de concentração de tensões ao redor dos furos. Este comportamento é evidenciado na figura 41 b que apresenta o campo de deformação plástica de uma seção do tubo analisado. Os resultados são compatíveis com os apresentados por Abassian (curva verde) e inferior ao resultado obtido pelo método API.

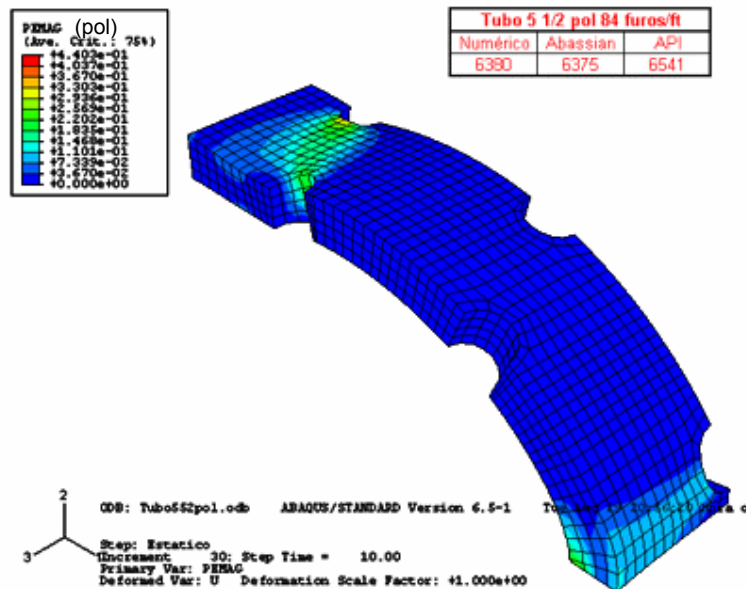
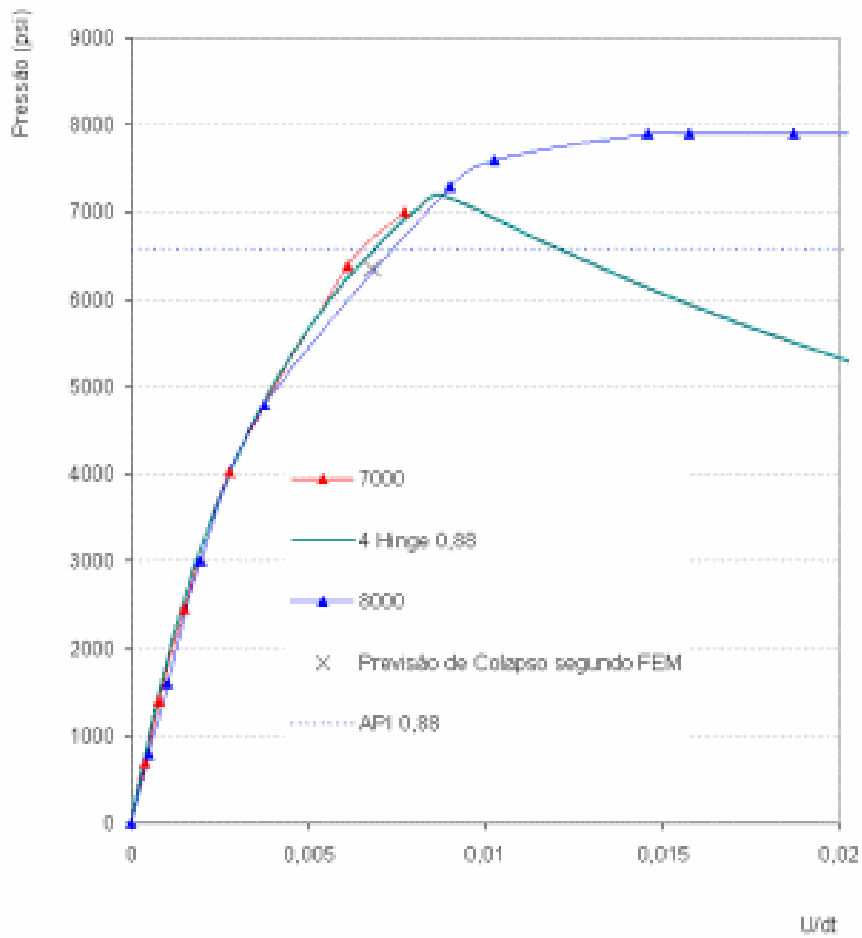


Figura 36 – Variação do comportamento do tubo base 5 ½ pol 84 furos/ft comparando com modelo de Abassian (1995).

A figura 37 apresenta os resultados obtidos nas simulações de carregamento hidrostático (superior a 5000 psi) para os tubos base de 5 ½ polegadas, diferentes furações e razão OD/L maior que 0,8. Estes resultados foram comparados com o modelo analítico de Abassian onde o  $\eta$  variou de 0,77 a 0,92 apresentando coincidência entre os resultados.

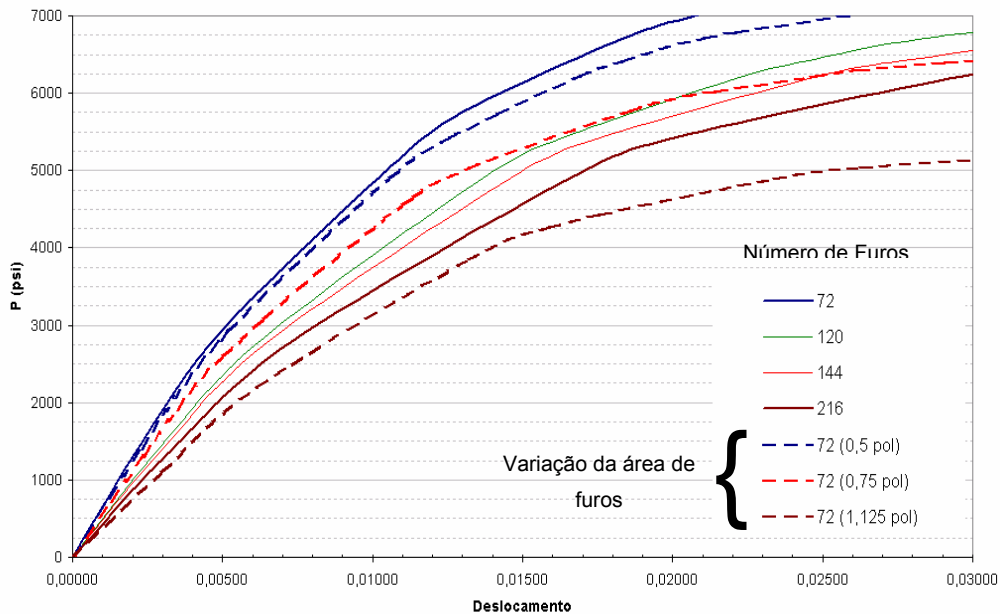


Figura 37 – Comparação com resultado de Abassian para tubo 5 ½ pol P110.

As figuras 38 e 39 apresentam o mapa de tensões de Mises para tubos de 5 ½ polegadas e furação variando de 72 a 216 furos/ft com ovalização de 0,5% na direção y e quando submetido ao carregamento hidrostático de 6000 psi

Pode-se verificar uma ampla região na parte superior do modelo onde a tensão de Mises supera o limite de escoamento para um tubo com densidade de furos 216 furos/pé. A distribuição de tensões de Mises foi avaliada em função da área aberta ao fluxo para variações de densidade e diâmetro de furos. Uma boa distribuição de tensões foi observada nos tubos com furação variando de 3/8 a 1/2 polegadas enquanto a área aberta ao fluxo variava até 8 %, conforme apresentado na figura 45.

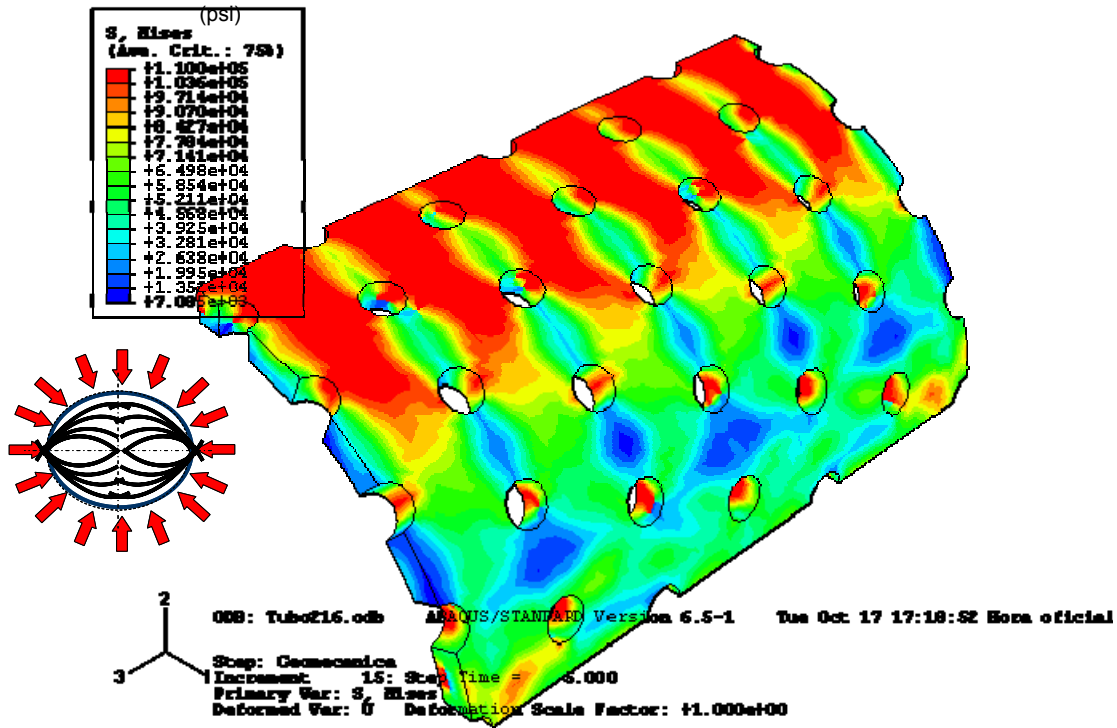


Figura 38 – Distribuição de tensão de Mises (em psi) no tubo com 216 furos/ft e 7000 psi.

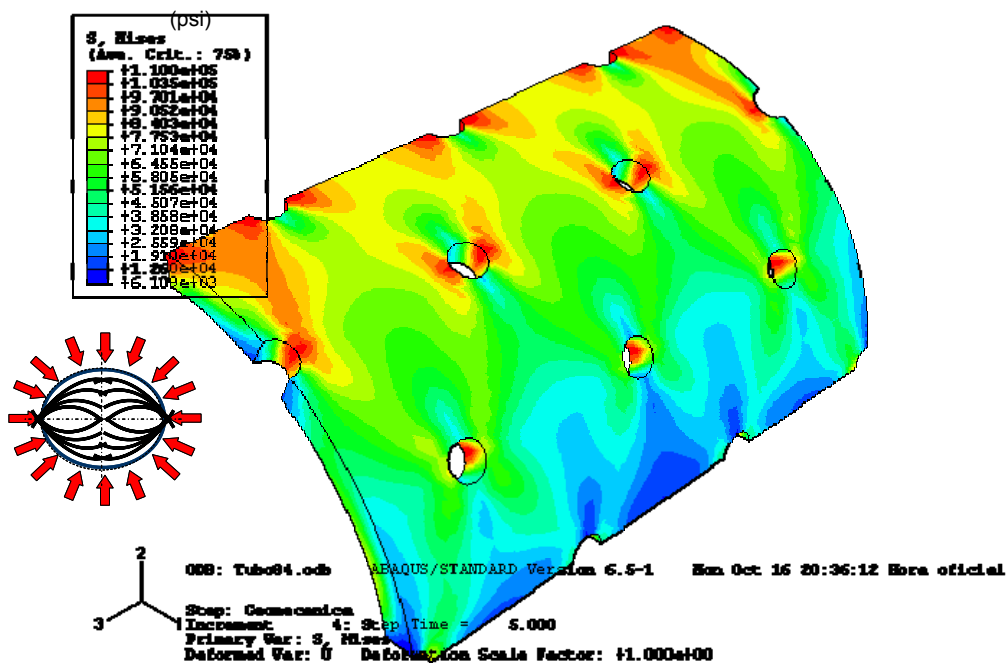


Figura 39 – Distribuição de tensão de Mises (em psi) no tubo com 72 furos/ft e 7000 psi.

A figura 40 apresenta a variação na pressão de colapso para diferentes áreas abertas ao fluxo variando tanto o diâmetro, quanto a densidade de furos. Os resultados indicam que, apesar do aumento significativo do número de furos, a pressão de colapso não reduz na mesma proporção, indicando a possibilidade de utilização de tubos base com uma área aberta ao fluxo maior.

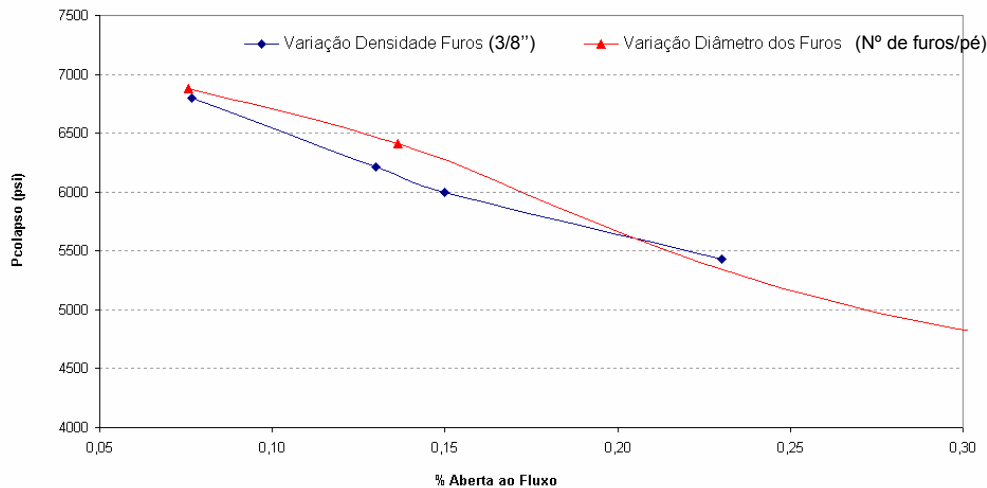


Figura 40 - Variação da pressão de colapso com a área aberta ao fluxo.

## 4.6 Conclusões

O comportamento de tubos perfurados submetidos ao carregamento hidrostático foi analisado numericamente apresentando resultados compatíveis com os obtidos através de métodos analíticos ou dados de literatura conforme evidenciado na tabela 1.

A simulação numérica forneceu condições para identificar a região de plastificação do tubo e prever seu comportamento durante o carregamento hidrostático e determinar o seu limite de estabilidade elástica. Foi verificada boa concordância entre os resultados numéricos e analíticos no que diz respeito a previsão da pressão de colapso do tubo e dimensionamento do conjunto de telas em relação ao colapso. Todas as simulações realizadas apresentaram resultados compatíveis com os ensaios fornecidos pelas indústria (que indicam colapso da tela com pressões superiores à 5000 psi).

A pressão de colapso não reduziu proporcionalmente com o aumento da área aberta ao fluxo, no entanto optou-se por uma configuração diâmetro e número de furos que mantivesse a pressão de colapso superior a 6000 psi, conforme apresentado na figura 40. Os principais resultados obtidos neste capítulo são:

1. Os modelos numéricos 2D e 3D para colapso de tubos apresentaram resultados compatíveis entre si e com dados de literatura (Abassian e API)
2. A previsão do colapso de tubos utilizando o modelo numérico apresentou variação inferior à 10% quando comparada ao modelo de Abassian.
3. Não foi observada variação dos resultados ao refinamento da malha para malhas com número de elementos superior à 2000
4. Modelos com razão OD/L superior a 0,80 apresentaram resultados semelhantes no que diz respeito à deformação próximo à zona de plastificação.
5. O modelo numérico para o tubo de 5 ½ polegadas permitiu a previsão do ponto de início de plastificação de acordo com os resultados fornecidos pelo fabricante da tela (obtidos através de ensaios experimentais e apresentados na tabela 1).

Desta forma, serão considerados os seguintes aspectos na próxima etapa deste trabalho (acoplamento entre os modelos da formação, gravel e tubo base):

1. Tubo de 5 ½ pol com razão OD/L superior a 0,8
2. A resistência do tubo base quanto ao colapso será avaliada considerando que a pressão máxima que o tubo poderá ser submetido não deverá conter zonas plastificadas (indicadas pelo mapa de magnitude de deformação plástica do ABAQUS™ que é obtida através das zonas que ultrapassaram o limite de escoamento segundo o critério de Von Mises)
3. Serão utilizados para os modelos do tubo malhas com número de elementos próximo à 2000.