



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE DE COLAPSO DE TUBOS BASE DE CONTENÇÃO DE AREIA

Bianca Torres Massa

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Ilson Paranhos Pasqualino

Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro

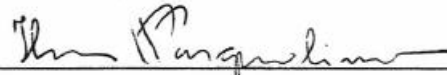
Fevereiro de 2012

ANÁLISE DE COLAPSO DE TUBOS BASE DE CONTENÇÃO DE AREIA

Bianca Torres Massa

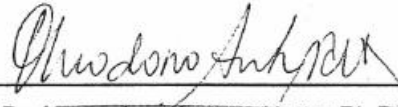
PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.

Examinada por:



Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D.Sc.

Engenharia Naval e Oceânica – COPPE/UFRJ



Prof. Theodoró Antoun Netto, Ph.D.

Engenharia Naval e Oceânica – COPPE/UFRJ



Prof. Paulo Couto, Dr. Eng

Engenharia do Petróleo – COPPE /UFRJ



Eng. Bianca de Carvalho Pinheiro, D.Sc.

Pesquisadora Visitante – PRH-35/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

Massa, Bianca Torres

Análise de Colapso de Tubos Base de Contenção de
Areia / Bianca Torres Massa. – Rio de Janeiro:
UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2012.

XII, 53p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Ilson Paranhos Pasqualino,
Theodoro Antoun Netto

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia do
Petróleo, 2012.

Referencias Bibliográficas: p.52-53.

1. Análise de Colapso 2.Tubos de contenção de areia
3. Pressão de Colapso. 4.Testes Experimentais.
5.Modelo Numérico. I. Paranhos Pasqualino, Ilson et al.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola
Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. III. Título.

Dedicatória

À minha família, especialmente meus pais Vinícius e Cristina, minha avó Léa e tia avó Yvonne, pelo apoio de sempre e constante presença em todas as etapas da minha vida.

Agradecimentos

Aos meus pais, por terem sempre me oferecido as melhores condições de estudo.

Aos meus orientadores Ison Paranhos Pasqualino e Theodoro Antoun Netto, pela sugestão do tema, incentivo, paciência e disponibilidade.

À ANP, pelo auxílio financeiro através do PRH-35 e à Cássia, pela atenção durante todo o período da bolsa.

À equipe do Laboratório de Tecnologia Submarina, pelo desenvolvimento da parte experimental deste projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Análise de Colapso de Tubos Base de Contenção de Areia

Bianca Torres Massa

Fevereiro/2012

Orientadores: Prof. Ilson Paranhos Pasqualino

Prof. Theodoro Antoun Netto

Curso: Engenharia de Petróleo

A completção de poços é o conjunto de operações destinadas a deixá-los em condições de produzir, de forma segura e econômica, durante toda a sua vida operacional. Dependendo do reservatório, a produção de óleo e gás pode vir acompanhada da produção de areia. É neste cenário que surge a necessidade da escolha de um método de controle de areia para o projeto de completção de um poço.

O presente trabalho apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre diferentes métodos de controle de areia e tem como objetivo analisar a resistência ao colapso de tubos furados utilizados como base em telas de contenção de areia. Para isto, foram realizados testes experimentais, no Laboratório de Tecnologia Submarina (COPPE/UFRJ), e numéricos, através da ferramenta de elementos finitos ANSYS, com tubos de diferentes geometrias e materiais. Os resultados de pressão de colapso obtidos através das duas metodologias foram comparados, sendo possível tirar algumas conclusões relevantes sobre quais parâmetros do tubo influenciam na sua resistência (razão diâmetro-espessura, ovalização inicial, distância longitudinal e circunferencial entre furos e diâmetro do furo).

Foi realizado ainda um estudo paramétrico, para se avaliar melhor a influência de tais parâmetros na resistência ao colapso, confirmando as conclusões resultantes dos testes experimentais e numéricos.

Palavras-chave: completção de poços, controle de areia, tubos base furados, testes experimentais, testes numéricos, estudo paramétrico.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Collapse analysis of Sand Control Base Pipes

Bianca Torres Massa

February/2012

Adivsors: Prof. Ilson Paranhos Pasqualino

Prof. Theodoro Antoun Netto

Course: Petroleum Engineering

Well completion is the set of operations to make them able to produce, safely and economically, throughout their working life. Depending on the reservoir type, the oil and gas may be accompanied by sand production. In this scenario, it is necessary to choose a method for sand control in the completion project.

This study presents a brief literature review on different methods of sand control and aims to analyze the collapse resistance of perforated base pipes used in sand control screens. To this aim, experimental tests were performed in the Subsea Technology Laboratory (COPPE/UFRJ), and numerical analyses by the finite element tool ANSYS, with pipes of different geometries and materials. The collapse pressure results obtained using the two methods were compared, making possible to draw some relevant conclusions about the parameters that have influence on the pipe resistance (diameter-thickness ratio, initial ovality, longitudinal and circumferential distance between holes and hole diameter).

It was also carried out a parametric study to better assess the influence of these parameters on the collapse resistance, confirming the results of experimental and numerical tests.

Keywords: well completion, sand control, perforated base pipes, experimental tests, numerical tests, parametric study.

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xii
1. Introdução	1
2. Completação de poços	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Produção de areia.....	4
2.3 Contenção de areia.....	6
2.4 Tipos de telas e métodos de contenção de areia	7
2.5 Causas de falha em telas de contenção de areia.....	14
3. Testes experimentais.....	15
3.1 Descrição do Teste	15
3.2 Propriedades e Geometria do Material.....	16
3.3 Resultados.....	21
4. Modelo numérico	23
4.1 Geometria.....	23
4.2 Material.....	23
4.3 Malhas de elementos finitos.....	24
4.4 Condições de contorno e carregamento	25
4.5 Resultados.....	26
5. Correlações	28
6. Estudo paramétrico	31
7. Conclusão	49
8. Bibliografia.....	52

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de poço após completção e ANM convencional no detalhe.....	4
Figura 2. Estrutura dos tubos telados. Fonte: Halliburton.....	8
Figura 3. Tubo telado tipo <i>wire-wrapped</i>	9
Figura 4. Tubo telado tipo <i>Premium</i>	11
Figura 5. Tubo telado tipo Pré-Empacotado.....	12
Figura 6. Falha por colapso em uma tela.....	14
Figura 7. Tubo preparado com chapa metálica e fita adesiva (a), e sobre estas, manta de borracha e fita adesiva (b).....	16
Figura 8. Curva tensão-deformação obtida para os tubos 4, 5 e 6 a partir do ensaio de tração uniaxial.....	17
Figura 9. Configuração do tubo furado T4 na direção longitudinal (a) e circunferencial (b).	19
Figura 10. (a) Configuração pós-colapso do tubo com a chapa metálica e (b) Detalhe da região furada.	22
Figura 11. Malha do tubo T5CFI-01.	25
Figura 12. Condições de contorno e carregamento.....	26
Figura 13. Gráfico do comportamento das pressões de colapso dos tubos no método experimental e numérico.....	29
Figura 14. Malhas dos tubos com parâmetros diferentes.	37
Figura 15. Gráfico de D/t para $l/D = 0,6$ e 8 furos circunferenciais.	38
Figura 16. Gráfico de D/t para $l/D = 0,4$, e 16 furos circunferenciais.	38
Figura 17. Gráfico de l/D para $D/t = 20$ e 8 furos circunferenciais.	39
Figura 18. Gráfico de l/D para $D/t = 25$ e 16 furos circunferenciais.	40
Figura 19. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,4$ e $D/t = 20$	41
Figura 20. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,6$ e $D/t = 25$	41
Figura 21. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,8$ e $D/t = 25$	42

Figura 22. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 20$ e 8 furos na circunferência.....	43
Figura 23. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 20$ e 16 furos na circunferência.....	44
Figura 24. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 25$ e 8 furos na circunferência.....	44
Figura 25. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 25$ e 16 furos na circunferência.....	45
Figura 26. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 30$ e 8 furos na circunferência.....	45
Figura 27. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 30$ e 16 furos na circunferência.....	46
Figura 28. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a $1/4''$ e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.....	47
Figura 29. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a $3/8''$ e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.....	47
Figura 30. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a $1/2''$ e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.....	48

Lista de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros que influenciam a produção de areia.....	7
Tabela 2. Propriedades mecânicas dos corpos de prova dos tubos 4, 5 e 6.	18
Tabela 3. Características dos tubos furados 4, 5 e 6.....	20
Tabela 4. Dados geométricos obtidos para cada corpo de prova antes do teste de colapso.....	20
Tabela 5. Pressão de colapso dos tubos 4, 5 e 6 usados nos experimentos.....	21
Tabela 6. Número de elementos circunferenciais, longitudinais e na espessura.	24
Tabela 7. Pressão de colapso dos tubos 4, 5 e 6 obtida pelo programa ANSYS.....	27
Tabela 8. Pressões de colapso obtidas experimental e numericamente.	28
Tabela 9. Propriedades geométricas dos tubos analisados.....	31
Tabela 10. Parâmetros dos modelos.....	32
Tabela 11. Número de elementos circunferenciais e longitudinais entre furos e na espessura de cada tubo.	32
Tabela 12. Espessura dos tubos intactos.....	34
Tabela 13. Pressões de colapso dos 54 modelos.	34

Nomenclatura

d	Diâmetro do furo.....	[mm]
D	Diâmetro externo do tubo.....	[mm]
E	Módulo de elasticidade ou Young.....	[N/mm ²]
l	Espaçamento longitudinal entre furos.....	[mm]
N _{ANG}	Número de elementos na direção circunferencial.....	[-]
N _{LONG}	Número de elementos na direção longitudinal.....	[-]
N _{ESP}	Número de elementos na espessura.....	[-]
P _{CO}	Pressão de colapso do tubo furado.....	[MPa]
P _{COI}	Pressão de colapso do tubo intacto.....	[MPa]
t	Espessura do tubo.....	[mm]

Símbolos gregos:

Δ_o	Ovalização inicial.....	[-]
Ξ_o	Excentricidade da espessura do tubo.....	[-]
λ	Fator de correção para pressão de colapso.....	[-]
ν	Coeficiente de Poisson	[-]
σ_p	Tensão de proporcionalidade	[-]
σ_y	Tensão de escoamento	[-]

1. Introdução

A produção de sólidos associada à produção de óleo e gás, principalmente nos poços de petróleo *offshore*, pode causar inúmeros problemas aos equipamentos utilizados para produção e separação do petróleo produzido.

Os efeitos relativos à produção de areia em um poço são quase sempre prejudiciais à sua produtividade, seja em curto ou em longo prazo. Os danos podem variar em intensidade, podendo ou não ser necessária alguma intervenção.

É fundamental considerar a instalação de sistemas para contenção de sólidos que previnam os danos aos equipamentos de superfície, subsuperfície e à própria formação, tais como: deposição e acúmulo de areia no poço, em separadores e nas tubulações de superfícies, erosão dos equipamentos por abrasão, descarte de resíduos e contaminação ambiental, danos à permeabilidade do reservatório, colapso do revestimento de produção ou perda de isolamento entre intervalos permo-porosos e, ainda, criação de grandes vazios por trás do revestimento, onde desmoronamentos poderão causar redução drástica da produção.

O controle da produção de areia torna-se necessário principalmente em reservatórios inconsolidados e tem como principal técnica o posicionamento de telas de contenção dentro do poço ao longo de intervalos produtores. Dentre os sistemas de contenção de areia, os mais utilizados são: *gravel pack*, telas *stand alone* ou expansíveis e o *frac pack*.

O conjunto de telas normalmente utilizados em projetos de sistema de contenção de areia é constituído por um tubo base de aço (furado ou rasgado), que confere a integridade estrutural ao conjunto telado, e camadas de telas com diferentes malhas, sem função estrutural, que permitem a contenção de sólidos da formação por um processo de filtração.

O presente trabalho apresenta uma breve explicação do cenário em que ocorre a produção de areia e como é feito controle dessa produção. Em seguida, é apresentado o

objetivo principal do trabalho, o estudo da integridade estrutural de tubos base de aço furados. Foram realizados testes experimentais e análises numéricas, para o estudo do colapso dos tubos base submetidos à pressão externa, com posterior comparação de resultados. O modelo numérico foi utilizado para um estudo paramétrico, no qual os principais parâmetros geométricos do tubo foram variados para analisar a influência dos mesmos na resistência ao colapso.

2. Completação de poços

2.1 Introdução

Denomina-se completção o conjunto de operaões e atividades que têm como objetivo equipar o poço para produão, instalando todos os acessórios e equipamentos que irão permitir a operaão segura do poço de petróleo.

A sequência de etapas normalmente executada na completção de poços *offshore* com contenão de areia é resumida abaixo:

- Substituição do fluido de perfuração e condicionamento do poço;
- Instalação do sistema de contenção de areia;
- Instalação da cauda intermediária;
- Instalação da coluna de produão e suspensor de coluna;
- Instalação da árvore de natal molhada;
- Realização de testes de formação;
- Instalação da tree cap e abandono do poço.

A Figura 1 mostra um esquema de poço completado com árvore de natal instalada.

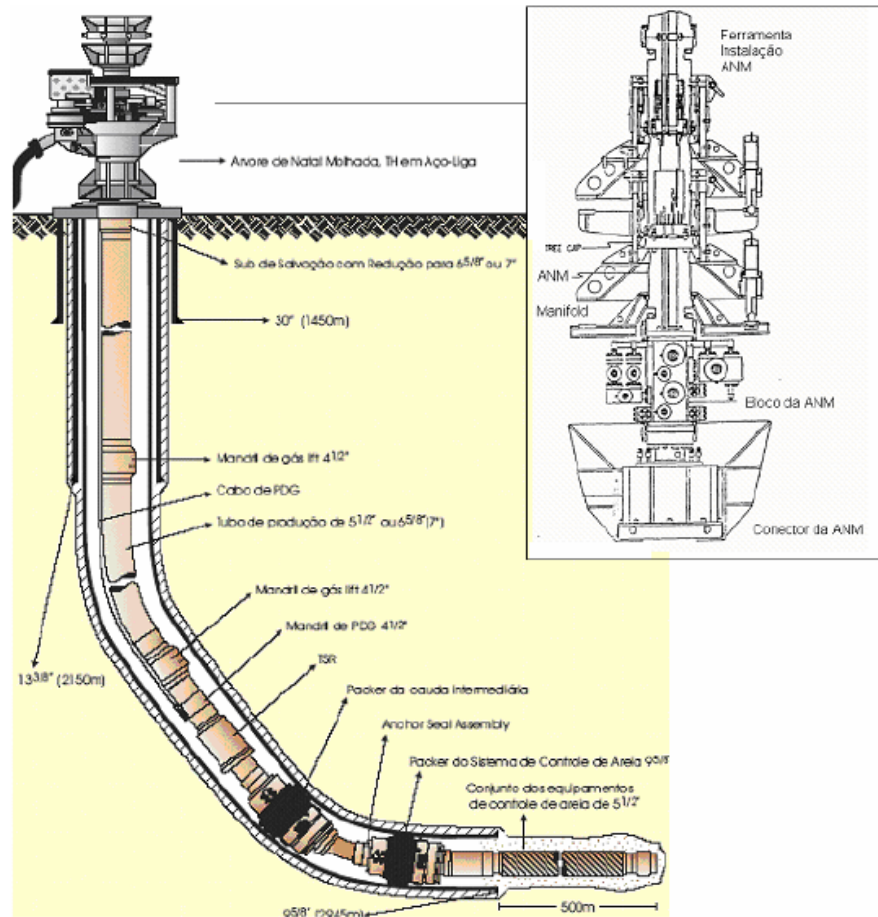


Figura 1. Esquema de poço após completação e ANM convencional no detalhe.

2.2 Produção de areia

A produção de areia ou produção de sólidos referenciada, normalmente, a arenitos não consolidados, engloba, além destes materiais, rochas como calcário e arenitos de resistência média a elevada, também susceptíveis a este fenômeno.

Em escala microscópica, a produção de areia é um processo desencadeado pela força de arraste associada ao fluido em movimento atuando em um conjunto de partículas próximas a uma superfície livre (parede do poço, cavidade do canhoneado). O transporte de partículas ocorre quando esta força, originada na diferença de pressão estabelecida entre o poço e a

formação, eventualmente se torna maior do que as forças estabilizadoras provenientes da coesão do material e da tensão de arco desenvolvida entre as partículas.

Veeken (1991) sugere a classificação da produção de areia para uma melhor interpretação e comparação dos eventos que levam um poço a produzir sólidos. Esta classificação, baseada em observações de campo, permite a distinção de três modos:

- Produção de areia transiente: refere-se ao declínio da produção de areia com o tempo sob condições de produção constante do poço. Este tipo de fenômeno é frequentemente observado durante a limpeza da parede do poço após a perfuração das cavidades.

- Produção de areia contínua: na maioria dos campos de exploração, observa-se a produção contínua de areia. A limitação da produção de areia deve obedecer a restrições operacionais como capacidade de separação, disposição de areia, localização do poço, etc. Limites típicos são da ordem de 6 a 600 g/m³ para formações de óleo e de 16 g/10³ m³ para formações de gás. Dependendo da capacidade do fluido em transportar partículas e da concentração, eventualmente ocorrerá a obstrução de parte do intervalo produtor.

- Produção de areia catastrófica: causa a suspensão das operações de um poço, pode ocorrer devido a uma produção maciça de areia que preenche e obstrui o poço.

Os principais mecanismos para a produção de areia são:

- Falha por cisalhamento – relacionada ao declínio da pressão nas proximidades do poço.
- Falha por tensão – relacionada normalmente ao incremento da vazão de produção.
- Migração de finos – a movimentação de pequenas partículas pela formação pode implicar na redução de permeabilidade, incrementando o arraste e iniciando a produção de areia.

2.3 Contenção de areia

Diante da necessidade de se minimizar a níveis toleráveis a produção de areia, um mecanismo de controle deve ser utilizado. Estes mecanismos atuam diretamente nos parâmetros de produção do poço ou diretamente na produção de areia. O controle feito sobre os parâmetros de produção consiste em manipular o “*drawdown*” (diferença entre a pressão no poço e a poro-pressão no reservatório) e a taxa de produção. O segundo tipo de controle é efetuado por técnicas como:

- *Gravel pack*;
- Consolidação química;
- Pré-consolidação da formação;
- Seleção das perfurações;
- *Frac-Pack*.

Destas técnicas, provavelmente a mais utilizada é o *gravel pack*, que consiste na utilização de um filtro sólido granular, para impedir a produção de grãos na formação. A consolidação química promove um aumento na resistência da formação pela injeção de resina, todavia leva a uma redução da permeabilidade e conseqüentemente da produção de um poço.

A seleção dos locais de perfuração é outro meio para minimizar a produção de areia. A ideia consiste em perfurar regiões onde a formação possui uma boa resistência mecânica, e, com isto, uma pequena possibilidade de produzir areia.

O *frac-pack* é uma técnica adequada para reservatórios onde a taxa de produção de óleo é elevada, cuja convergência do fluxo radial pode se tornar um agravante para a produção de sólidos. O método consiste na criação de uma pequena fratura condutora, cuja função é transformar o fluxo radial em fluxo linear através do poço, reduzindo o gradiente de pressão.

Apesar de controlarem a produção de areia, essas técnicas apresentam como inconveniente o alto custo de instalação e manutenção, assim como a redução da produção do

poço. A escolha de qual técnica e quando utilizá-la torna necessária a introdução de um método para a previsão da produção de areia. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros que influenciam a produção de areia.

Tabela 1. Parâmetros que influenciam a produção de areia.

Formação	Completação	Produção
Resistência da rocha	Diâmetro e orientação do poço	Taxa de fluxo
Tensões vertical e horizontal in-situ	Perfuração – tamanho, fase, densidade	Drawdown
Heterogeneidade	Dimensão dos tubos	Depletação

2.4 Tipos de telas e métodos de contenção de areia

Os métodos mecânicos de exclusão de areia consistem na colocação de um filtro que evita ou dificulta a entrada de areia da formação para dentro do poço. Os métodos mecânicos têm sido utilizados para o controle da produção de areia tanto em poços injetores como em poços produtores. Todos esses sistemas são aplicáveis em cenários específicos, dependendo da geometria do poço (vertical ou direcional revestido; horizontal aberto), das características do arenito (distribuição granulométrica, quantidade de finos, laminações, gradiente de fratura, etc) e vazão esperada, dentre outros fatores. Os sistemas usados para restringir a movimentação de areia são as telas ou os tubos ranhurados. Se houver a deposição de areia ou cerâmica de granulometria conhecida (*gravel*) entre a tela e a formação, temos o sistema *gravel pack*.

2.4.1 Tubo ranhurado

Este método é geralmente mais barato que o de tubos telados. Os tubos ranhurados são adaptações feitas em tubos comuns, com aberturas como entalhes feitos com o auxílio de

ferramentas de alta precisão. A área de abertura ao fluxo é limitada pelo número de ranhuras (slots). (Bertholdo, 2005).

A disposição das ranhuras interfere nos parâmetros de resistência dos tubos. Deve-se preferir rasgos verticais em relação ao eixo do tubo, uma vez que os rasgos horizontais reduzem a capacidade do tubo sob tração e compressão (Costa, 2009).

Os tubos ranhurados são mais suscetíveis ao fenômeno de plugueamento, caracterizado por um entupimento e conseqüente restrição ao fluxo. O uso destes é recomendado em poços de baixa produção e arenitos com distribuição granulométrica homogênea, onde a utilização de tubos telados é inviável economicamente. (Silva, 2008).

2.4.2 Tubo telado

O tubo telado é uma estrutura tubular mais eficaz que o tubo ranhurado e mais adequada às demandas da indústria do petróleo. Isso inclui maior resistência mecânica, maior área aberta ao fluxo e maior eficiência na filtração de partículas solidas. A estrutura de um tubo telado é mostrada na Figura 2.

Os tubos telados podem ser usados sozinhos (*stand-alone*) ou acompanhados do *gravel-pack* ou *frac-pack*.

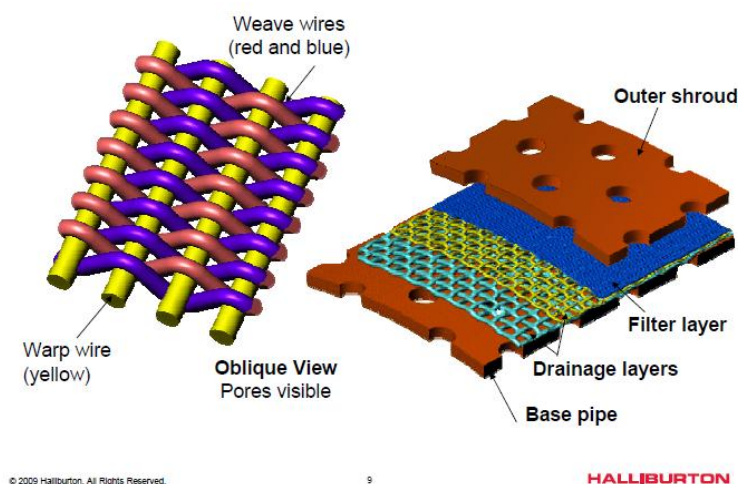


Figura 2. Estrutura dos tubos telados. Fonte: Halliburton

2.4.2.1 Tubo telado *wire-wrapped*

O *wire-wrapped* consiste em um tubo base, hastes devidamente posicionadas e um arame especial. A configuração pode ser vista na Figura 3.

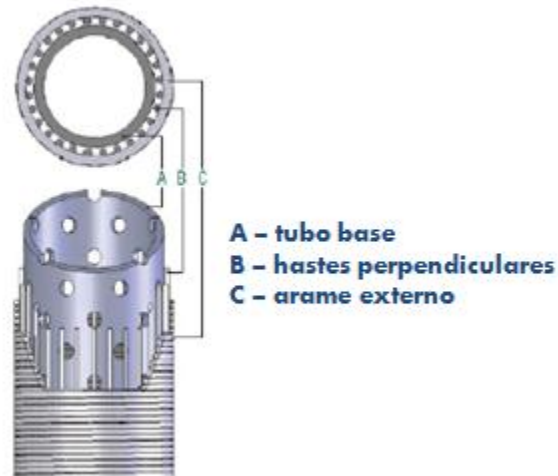


Figura 3. Tubo telado tipo *wire-wrapped*

Segundo Silva (2008), estes tubos têm aplicações bem variadas, sendo necessária uma análise precisa para determinar se um modelo é aplicável ou não ao poço estudado, levando em consideração o conhecimento do poço e a leitura da carta-guia específica do modelo que se deseja avaliar. Modelos TT (*Thru-Tubing*) podem ser utilizados na operação de *gravel-pack* respeitando-se a vazão e diâmetro imposto. Existe ainda a possibilidade da utilização em poços HP/HT (alta pressão e alta temperatura). De modo geral, as aplicações para modelos de diâmetro maior incluem principalmente operações de *gravel-pack* e completações *stand-alone*, tendo a possibilidade da utilização em *frac-packs* revestidos.

2.4.2.2 *Stand Alone*

As telas *stand alone* constituem uma alternativa de custo reduzido, quando comparadas ao *gravel pack* ou telas expansíveis, para a instalação de sistemas de contenção de areia em arenitos moderadamente selecionados.

Esse método consiste na descida e assentamento de um conjunto de telas *Premium* e no prosseguimento da completação sem a instalação do pacote de *gravel*. Neste caso, quando do início da produção, ocorreria o colapso da formação sobre o conjunto telado, preenchendo o espaço anular tela/formação com areia da formação.

Recomenda-se a utilização desse tipo de completação inferior (realizada antes da instalação da coluna de produção ou injeção, em contato direto com a formação) em poços onde o colapso da formação geraria um pacote com distribuição granulométrica uniforme, minimizando os riscos de erosão do conjunto telado.

A relação de diâmetros do poço aberto e da tela utilizada deve ser otimizada para minimizar a movimentação de finos e sua conseqüente produção e erosão dos equipamentos do poço.

2.4.2.3 Tubo telado *Premium*

Os tubos telados *Premium*, ou telas *Premium*, possuem a finalidade de conter o fluxo de partículas sólidas, assim como as telas pré-empacotadas, as *wire-wrapped* e as expansíveis. Podem ser usadas *stand-alone* em caso de areias com seleção moderada e teor de finos menor que 5%, e em conjunto com o *gravel pack* e *frac pack*.

Os tubos consistem de várias camadas de tela (camadas filtrantes), de distribuição granulométrica devidamente calculada, sobrepostas a um tubo base. A elaboração das camadas de telas que sobrepõem o tubo base utiliza alta tecnologia integrando estudo granulométrico de cada camada e resistência a tensão submetida. A Figura 4 mostra um tubo telado *Premium* com as diferentes camadas (Silva, 2008).

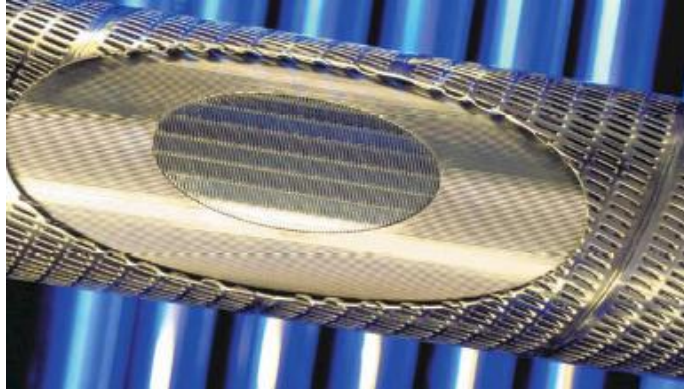


Figura 4. Tubo telado tipo *Premium*

2.4.2.4 Telas expansíveis

Tipo de tela utilizada na completação de poços *offshore* e *onshore* e que se baseia na tecnologia de *liners* expansíveis, proporcionando menor restrição possível ao diâmetro interno do poço – revestido ou aberto.

Esta tecnologia é uma alternativa, de execução mais simples, utilizada para evitar o problema de plugueamento das telas e do *gravel pack*.

As telas expansíveis são descidas e instaladas após a perfuração do poço aberto e são, posteriormente, deformadas à frio, até atingirem um diâmetro próximo ao diâmetro final do poço.

Apesar dessa tecnologia ainda ser pouco testada no Brasil, ela possui algumas vantagens, tais como, a construção de poços com maior diâmetro, próximo ao diâmetro da última fase perfurada e a redução da perda de carga do trecho horizontal.

2.4.2.5 Tubo telado Pré-Empacotado

Os tubos pré-empacotados são definidos como sendo um *Gravel Pack* modular, ou seja, pré-construído. Consiste em um sistema de dois tubos telados (filtros) principais concêntricos e um pacote de *gravel* entre eles (anular). Estes tubos são similares aos tubos

wire-wrapped, com a diferença de conter areia de granel resina, curada e compactada, ou uma manta de cerâmica flexível.

Em comparação com os tubos ranhurados, os pré-empacotados proporcionam melhor controle sobre a movimentação de sólidos, dada uma mesma abertura ao fluxo. (Bertholdo, 2005).

O início das completções dos poços horizontais que requeriam contenção de areia foi realizado com a utilização destas telas (Costa, 2009). E, até hoje, as telas pré-empacotadas são utilizadas de forma *stand-alone*, como uma alternativa mais economicamente viável ao *gravel pack*, quando a instalação *stand alone* da tela *wire-wrapped* ou do tubo ranhurado não satisfazem os requisitos para controlar a produção de areia. Entretanto, essas telas podem ainda serem utilizadas em poços com *gravel pack* sem grandes problemas (França,2010).

A configuração estrutural pode ser observada na Figura 5.

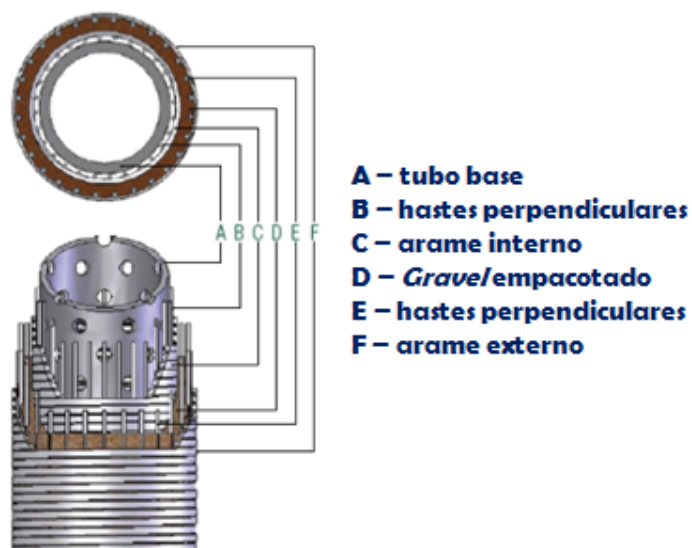


Figura 5. Tubo telado tipo Pré-Empacotado

2.4.3 Gravel Pack

O *Gravel Pack* é a prática mundialmente mais difundida. Consiste no preenchimento dos canhoneados e anular tubo telado/revestimento (em poços revestidos) ou anular tubo telado/formação (em poços horizontais não revestidos) com gravel (areia ou cerâmica) de granulometria bem selecionada, formando um pacote compacto. O gravel tem a função de reter a areia da formação e a tela tem a função de reter o gravel. O princípio deste método é que o gravel (agente de sustentação) atuará como segundo arcabouço, altamente permeável, impossibilitando a movimentação de grãos da formação. Além disso, este arcabouço deve ter uma interface estável com a formação, que não deve ser invadida por grãos menores sob a pena de redução da permeabilidade. O fluxo de fluidos deve ser permitido, mas os grãos da formação devem ser retidos.

2.4.4 Frac Pack

O *Frac Pack* é a operação de fraturamento hidráulico seguida da operação de *Gravel Pack*. O resultado é uma alta condutividade pela fratura que ultrapassa o dano da formação e alivia a migração de finos pela redução da queda de pressão perto do pólo e também da velocidade do fluxo.

Segundo Silva 2008, o interesse em *Frac Pack* cresceu depois de resultados insatisfatórios, dados pelos danos induzidos à formação pelos fluidos de perfuração e completação, filtrados do cimento e perfuração overbalance.

A operação de *Frac Pack* consiste basicamente no fraturamento da formação pela utilização de fluido com determinada concentração de propante com o objetivo de ultrapassar algum dano na região próxima ao poço provocado pelo fluido de perfuração. Logo após é feita a operação de *Gravel Pack*.

2.5 Causas de falha em telas de contenção de areia

As telas estão submetidas a condições severas dentro do poço, com relação à pressão, fluidos, erosão e carregamento mecânico. Os problemas nas telas geralmente se desenvolvem sob duas condições: durante a completção e a produção.

Durante as operações de completção, como *frac pack*, os principais problemas que podem ocorrer nas telas são erosão, colapso, plugueamento e falha.

Já durante a produção, os principais problemas são erosão, levando a produção de areia, e plugueamento, levando ao declínio da produção.

Geralmente, telas que falham após um tempo de produção, são abandonadas e não são analisadas. Por outro lado, telas que falham durante operações de completção são recuperadas e têm sido fonte de estudos sobre sua resistência.

A causa de falha nas telas estudadas no presente trabalho é o colapso por diferencial de pressão, dada a sua relevância e frequência nas operações de campo.

Segundo HAMID, telas pré-empacotadas possuem maior resistência ao colapso que telas *wire-wrapped* de mesmo tamanho. A Figura 6 mostra uma seção de uma tela colapsada, sendo o ponto A causado por pressões altas na presença de espaço entre o diâmetro interno da jaqueta e o diâmetro externo do tubo base.

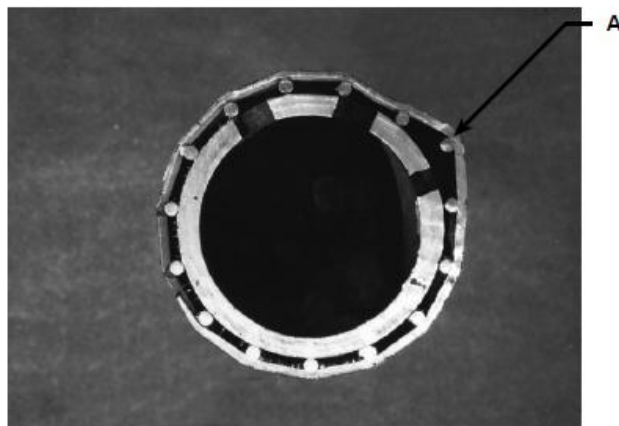


Figura 6. Falha por colapso em uma tela

3. Testes experimentais

3.1 Descrição do Teste

Os testes foram realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com corpos de prova fornecidos pela Petrobras. Foram testados tubos furados e intactos, em câmara hiperbárica, sob carregamento de pressão externa até o colapso.

Para possibilitar a aplicação de pressão externa no tubo furado, foi colocada sobre a região com furos uma chapa metálica de aço 1020 e uma manta de borracha. Primeiro foi colocada a chapa metálica de 1 mm de espessura, instalada com movimentação tangencial livre sobre o tubo. Portanto, as extremidades da chapa metálica não foram presas, tentando assim minimizar a contribuição na resistência ao colapso do tubo. Uma camada de fita foi colocada sobre a chapa como forma de vedação (Figura 7(a)). Sobre a chapa metálica e fita adesiva, foi colocada a manta de borracha, como forma de vedação do conjunto em sua extensão longitudinal. Para garantia da vedação nas extremidades da manta, uma fita adesiva foi utilizada para cobrir todo o conjunto chapa-manta (Figura 7(b)).

Os equipamentos utilizados no ensaio de colapso foram:

- Câmara hiperbárica horizontal com capacidade para 7.500 psi;
- Bomba hidráulica com acionamento pneumático para 30.000 psi (*Haske*);
- Transdutor de pressão para 15.000 psi WIKA (KTPP014) - certificado de calibração RBC N^o PE-0330/2006 de 21/11/2006;
- Módulo condicionador de sinais SCXI-1001 *National Instruments*;
- Micro-computador com placa analógico-digital.

Primeiramente, o tubo a ser testado é colocado dentro da câmara hiperbárica, que é então preenchida com água até que todo o ar do interior seja retirado. A câmara é então pressurizada a uma taxa inferior a 200 psi/min, até o colapso da amostra, caracterizado por um forte ruído seguido de queda abrupta da pressão aplicada.



(a)



(b)

Figura 7. Tubo preparado com chapa metálica e fita adesiva (a), e sobre estas, manta de borracha e fita adesiva (b).

3.2 Propriedades e Geometria do Material

As propriedades do material foram determinadas através de ensaios de tração uniaxial, realizados em uma máquina servo-hidráulica Instron - série 8802 – de acordo com a norma ASTM E8M. Os deslocamentos foram prescritos de forma a assegurar uma taxa de deformação de aproximadamente 10^{-4} s^{-1} .

Para os ensaios, foi retirado um corpo de prova na direção longitudinal de cada tubo (4, 5 e 6) utilizado nos testes experimentais. Assim, foram ensaiados 3 corpos de prova. Cada corpo de prova foi instrumentado com dois extensômetros elétricos (*strain gage*) uniaxiais,

posicionados no sentido longitudinal e em faces opostas, para minimizar efeitos de flexão do corpo de prova. Além disso, foi colocado um extensômetro uniaxial no sentido transversal de cada corpo de prova.

A partir dos dados obtidos foi possível determinar o valor do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν) do material, além da curva tensão-deformação no regime elasto-plástico. A Figura 8 apresenta a curva tensão versus deformação de engenharia obtida para os tubos 4, 5 e 6. A Tabela 2 apresenta um resumo das propriedades mecânicas obtidas para os tubos 4, 5 e 6, onde σ_p e σ_y são, respectivamente, a tensão de proporcionalidade e escoamento do material.

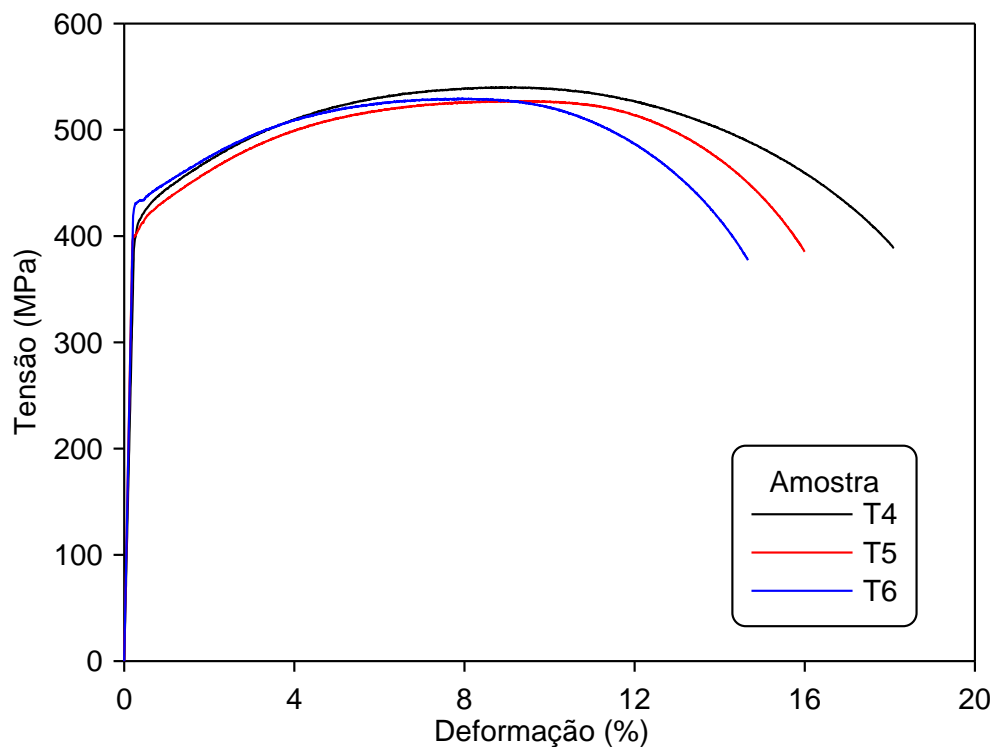


Figura 8. Curva tensão-deformação obtida para os tubos 4, 5 e 6 a partir do ensaio de tração uniaxial.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos corpos de prova dos tubos 4, 5 e 6.

Tubo	ν	E (MPa)	σ_p (Mpa)	σ_y (MPa)
4	0,28	170.316	387	421
5	0,31	205.491	395	410
6	0,30	200.640	420	431

Foram retirados dos tubos 4, 5 e 6, respectivamente, quatro (dois sem furos e dois com furos), três (com furos) e um (com furos) corpos de prova, que tiveram suas medidas geométricas levantadas antes dos testes de colapso.

Para isso, cada tubo foi dividido em 10 seções espaçadas de 75 mm, além de uma seção inicial e uma final. Cada seção foi subdividida em pontos equidistantes entre si (36°) na direção circunferencial. Em cada um desses pontos foram medidos os diâmetros externos e as espessuras, totalizando assim, 10 medidas de espessura e 5 medidas de diâmetro por seção.

Para cada seção do tubo, foram calculados espessura e diâmetro médios, \bar{t} e \bar{D} , respectivamente, e, a partir do diâmetro máximo (D_{max}) e mínimo (D_{min}), a ovalização Δ_o , além da excentricidade \mathcal{E}_o , obtida a partir das espessuras máximas (t_{max}) e mínimas (t_{min}) medidas nos bordos, de acordo com as equações abaixo:

$$\Delta_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (a) \quad \mathcal{E}_o = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} + t_{min}} \quad (b)$$

A Figura 9 é uma representação esquemática do tubo furado T4 nas direções longitudinal e circunferencial, onde N_{CIRC} é o número de furos na circunferência, N_{FIL} o número

de fileiras na direção longitudinal, D_f o diâmetro do furo, ESP_B a distância do bordo inicial até o centro da primeira fileira de furos e do bordo final até a última fileira e ESP_F a distância entre furos.

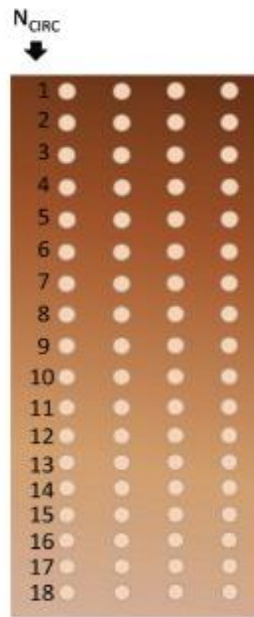
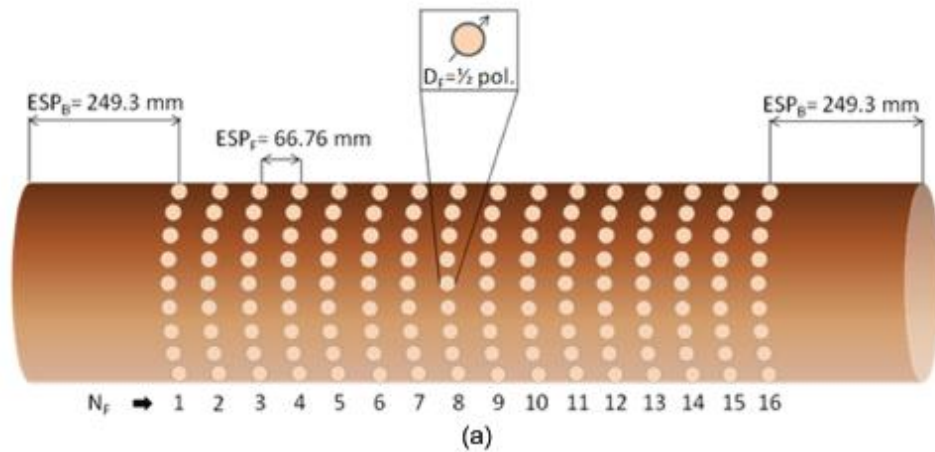


Figura 9. Configuração do tubo furado T4 na direção longitudinal (a) e circunferencial (b).

As propriedades geométricas dos tubos são apresentadas nas Tabelas 3 e 4. A nomenclatura utilizada na identificação das amostras seguiu o padrão abaixo:

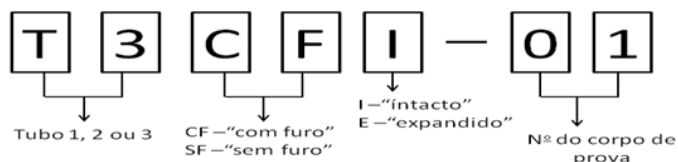


Tabela 3. Características dos tubos furados 4, 5 e 6

Corpo de prova	Comprimento do tubo	Diâmetro do furo	Espaçamento entre furos	Número de furos no perímetro	Número de furos longitudinais
T4CFI-01	1500 mm	1/2"	66,76 mm	18	16
T4CFI-02	1500 mm	1/2"	66,76 mm	18	16
T5CFI-01	1700 mm	1/2"	100 mm	8	14
T5CFI-02	1700 mm	1/2"	50 mm	8	27
T5CFI-03	1695 mm	1/4"	65 mm	8	21
T6CFI-01	1700 mm	3/4"	65 mm	8	21

Tabela 4. Dados geométricos obtidos para cada corpo de prova antes do teste de colapso.

Corpo de Prova	\bar{D}		\bar{t}		$\frac{\bar{D}}{\bar{t}}$	Δ_o	Ξ_o
	Pol	mm	Pol	mm	-	%	%
T4SFI-02	5,97	151,7	0,26	6,5	23,38	0,08	1,09
T4SFI-03	5,97	151,6	0,25	6,4	23,59	0,07	1,56
T4CFI-01	5,97	151,7	0,25	6,4	23,56	0,10	1,55
T4CFI-02	5,97	151,6	0,26	6,5	23,42	0,08	1,53
T5CFI-01	6,01	152,6	0,25	6,5	23,61	0,15	0,01
T5CFI-02	6,01	152,6	0,25	6,5	23,65	0,08	0,01
T5CFI-03	6,01	152,6	0,26	6,5	23,59	0,15	0,01
T6CFI-01	6,01	152,6	0,26	6,5	23,51	0,15	0,01

3.3 Resultados

Os resultados dos testes experimentais estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5. Pressão de colapso dos tubos 4, 5 e 6 usados nos experimentos.

Corpo de Prova	P_{co} (psi)	P_{co} (Mpa)
T4SFI-02	4.475	30,85
T4SFI-03	4.469	30,81
T4CFI-01	4.091	28,21
T4CFI-02	4.300	29,65
T5CFI-01	4.578	31,56
T5CFI-02	3.925	27,02
T5CFI-03	4.879	33,64
T6CFI-01	4.158	28,67

As pequenas diferenças de resultados entre os tubos similares são devidas às variações dos parâmetros geométricos e do material que afetam a resistência ao colapso destes tubos.

Os tubos com furos T4CFI-01 e T4CFI-02 apresentaram pressão de colapso em torno de 5% menor que a pressão de colapso dos tubos sem furos T4SFI-02 e T4SFI-03.

A pressão de colapso do T5CFI-02 apresentou redução em relação ao T5CFI-01 devido ao maior número de furos na direção longitudinal (menor espaçamento entre furos). No entanto, o diâmetro do furo parece ser um fator mais preponderante para a resistência ao colapso, tendo em vista que a pressão de colapso aumentou para T5CFI-03, mesmo tendo um

espaçamento longitudinal inferior ao de T5CFI-01. Já o corpo de prova T6CFI-01, comprova que o diâmetro dos furos reduz significativamente a pressão de colapso, em torno de 7% se comparado aos tubos sem furo T4SFI-02 e T4SFI-03, e 14,8% quando comparado a tubo de mesmo espaçamento longitudinal entre furos.

Os resultados dos tubos T5CFI-03 e T6CFI-01, com aproximadamente o mesmo espaçamento longitudinal entre furos de T4CFI-01 e T4CFI-02, menos furos na direção circunferencial e diâmetros de furos respectivamente menores e maiores, sugerem que a pressão de colapso não depende do número de furos ou espaçamento circunferencial.

A influência dos parâmetros citados será mais profundamente avaliada no capítulo Estudo Paramétrico.

As Figuras 10(a)-(b) mostram um tubo furado colapsado após os ensaios.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Configuração pós-colapso do tubo com a chapa metálica e (b) Detalhe da região furada.

4. Modelo numérico

Um modelo numérico não-linear foi desenvolvido através do programa comercial de elementos finitos ANSYS versão 13.0, capaz de simular o processo de colapso sob ação de pressão externa, para os tubos íntegros e furados. Os arquivos de geração dos modelos foram baseados no estudo de Pasqualino (2004).

4.1 Geometria

Foram utilizados os parâmetros de geometria dos tubos testados em laboratório (apresentados nas tabelas 3 e 4, do Capítulo 3) para posterior comparação. A geometria do tubo íntegro foi definida a partir do diâmetro externo, espessura e ovalização e do tubo furado foi definida a partir desses parâmetros e ainda a partir do número N de fileiras de furos, diâmetro d do furo, espaçamento circunferencial entre furos e espaçamento longitudinal entre furos.

Os modelos foram gerados segundo um sistema de referência global cartesiano onde o eixo z corresponde à direção longitudinal e os eixos x e y às direções transversais à geratriz do cilindro. Em função da geometria dos tubos e da natureza do carregamento aplicado, o plano x-z foi adotado como plano de simetria, permitindo a modelação de apenas metade do tubo. Foi considerada simetria radial e axial no tubo para diminuir o tempo computacional requerido para as análises numéricas. Ou seja, o tubo foi modelado com metade do comprimento dos corpos de prova e com a metade circunferencial superior, representando $\frac{1}{4}$ do tubo testado experimentalmente.

4.2 Material

O material de cada tubo foi considerado de acordo com as curvas de tensão-deformação obtidas através do ensaio de tração uniaxial, representadas na Figura 8, do

Capítulo 3. Os modelos foram definidos no regime elástico segundo um comportamento isotrópico linear adotando-se módulo de elasticidade igual a 205.000 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. No regime elasto-plástico, foi adotada uma lei de fluxo potencial segundo a função de escoamento de von Mises com encruamento isotrópico.

4.3 Malhas de elementos finitos

As malhas de elementos finitos foram desenvolvidas utilizando-se elementos sólidos tridimensionais com vinte nós e três graus de liberdade (três deslocamentos) por nó, referidos como elemento do tipo SOLID186. Este tipo de elemento apresenta funções de deslocamento quadráticas e é apropriado para a modelação de malhas irregulares.

A Tabela 6 abaixo mostra o número de elementos circunferenciais (N_{ANG}), longitudinais (N_{LONG}) e na espessura (N_{ESP}) dos tubos.

Tabela 6. Número de elementos circunferenciais, longitudinais e na espessura.

	N_{ANG}	N_{LONG}	N_{ESP}
T4SFI-02	16	48	2
T4SFI-03	16	48	2
T4CFI-01	72	64	2
T4CFI-02	72	64	2
T5CFI-01	32	70	2
T5CFI-02	32	130	2
T5CFI-03	32	100	2
T6CFI-01	32	100	2

A malha do tubo T5CFI-01 é apresentada na Figura 11.

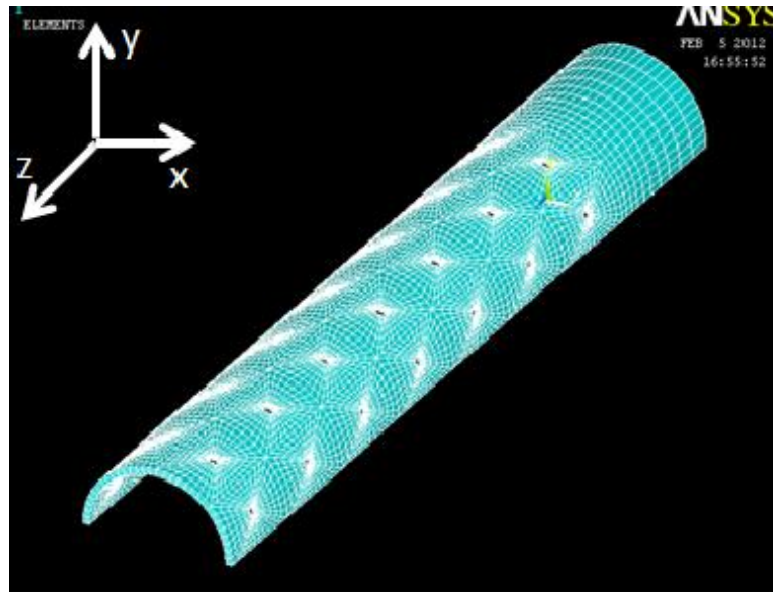


Figura 11. Malha do tubo T5CFI-01.

4.4 Condições de contorno e carregamento

Os modelos foram gerados segundo o sistema de coordenadas apresentados no item 4.1. No entanto, para efeito de aplicação de carregamento, condições de contorno e análise de resultados, trabalha-se com um sistema de coordenadas cilíndricas nos nós. Os deslocamentos e rotações nas direções x , y e z correspondem às direções radial, circunferencial e axial, respectivamente.

Para a simulação da condição de simetria imposta, modelando-se apenas meia seção do tubo, foram restritos os deslocamentos nodais na direção circunferencial y dos nós contidos no plano global x - z em $y=0^\circ$ e $y=180^\circ$ e os deslocamentos nodais na direção axial z dos nós contidos no plano x - y em $z=L$. Como o modelo foi simulado com simetria axial, foi imposta a condição de contorno somente nos nós de um bordo do tubo, com deslocamentos restritos em x e y .

Durante o processo de carregamento, foram definidas pressões atuantes na superfície externa do modelo. A carga axial das tampas utilizadas nos testes experimentais foi calculada e transformada em pressões prescritas na extremidade oposta ao plano de simetria na direção axial. A Figura 12 a seguir mostra o carregamento de pressão externa aplicado em toda a malha e as condições de contorno nos bordos do tubo.

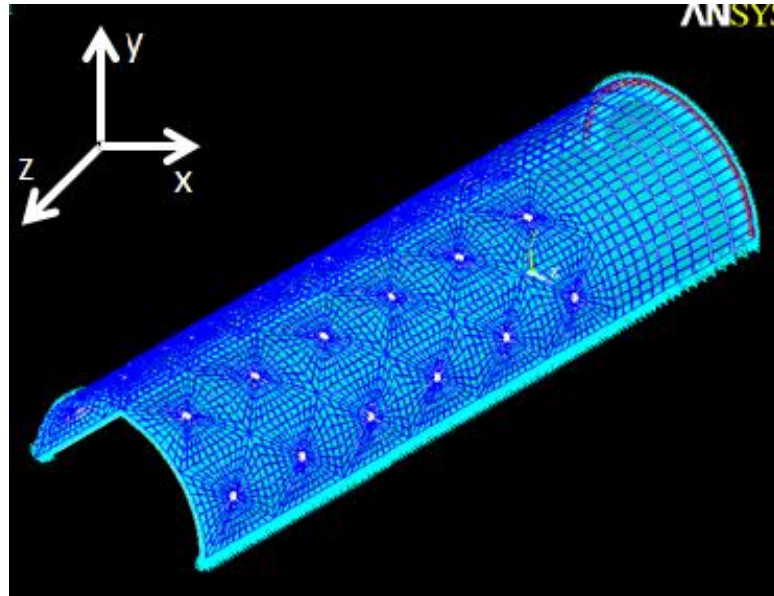


Figura 12. Condições de contorno e carregamento.

4.5 Resultados

Inicialmente, foram analisados os modelos correspondentes aos testes experimentais. Os resultados gerados pelo programa estão na Tabela 7.

Tabela 7. Pressão de colapso dos tubos 4, 5 e 6 obtida pelo programa ANSYS.

Corpo de Prova	P_{co} (MPa) (Numérico)
T4SFI-02	28,6
T4SFI-03	28,3
T4CFI-01	23,8
T4CFI-02	24,6
T5CFI-01	26,5
T5CFI-02	25,5
T5CFI-03	28,3
T6CFI-01	23,9

5. Correlações

A análise e comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, experimental e numérico, são fundamentais para avaliar a eficácia do modelo em reproduzir os efeitos dos parâmetros que influenciam na resistência do tubo base e para validar a utilização dos métodos.

A Tabela 8 abaixo apresenta as pressões de colapso obtidas para cada tubo e a variação percentual do método experimental para o numérico.

Tabela 8. Pressões de colapso obtidas experimental e numericamente.

Corpo de Prova	P _{co} (MPa)		Dif (%)
	Experimental	Numérico	
T4SFI-02	30,9	28,6	-7,3
T4SFI-03	30,8	28,3	-8,1
T4CFI-01	28,2	23,8	-15,6
T4CFI-02	29,7	24,6	-17,0
T5CFI-01	31,6	26,5	-16,0
T5CFI-02	27,0	25,5	-5,6
T5CFI-03	33,6	28,3	-15,9
T6CFI-01	28,7	23,9	-16,6

Os resultados de pressão de colapso encontrados no modelo numérico foram inferiores aos encontrados experimentalmente. Uma das possíveis causas dessa diferença é o efeito de anisotropia do material, já que no modelo numérico é considerada uma resistência do material a partir das propriedades mecânicas na direção longitudinal. Em função do processo de

fabricação dos tubos sob conformação à frio, a tensão de escoamento na direção circunferencial tende a ser maior, o que elevaria a pressão de colapso do duto, caso o seu valor fosse utilizado no modelo numérico. Essa anisotropia influencia mais ainda os resultados para tubos com furos. Outra possível causa é o refinamento da malha do modelo numérico.

Porém, os dois métodos apresentaram resultados com comportamento semelhante, o que é mostrado no gráfico da Figura 13. Isso significa que, caso esse efeito de anisotropia seja corrigido, os resultados tenderão a se correlacionar melhor.

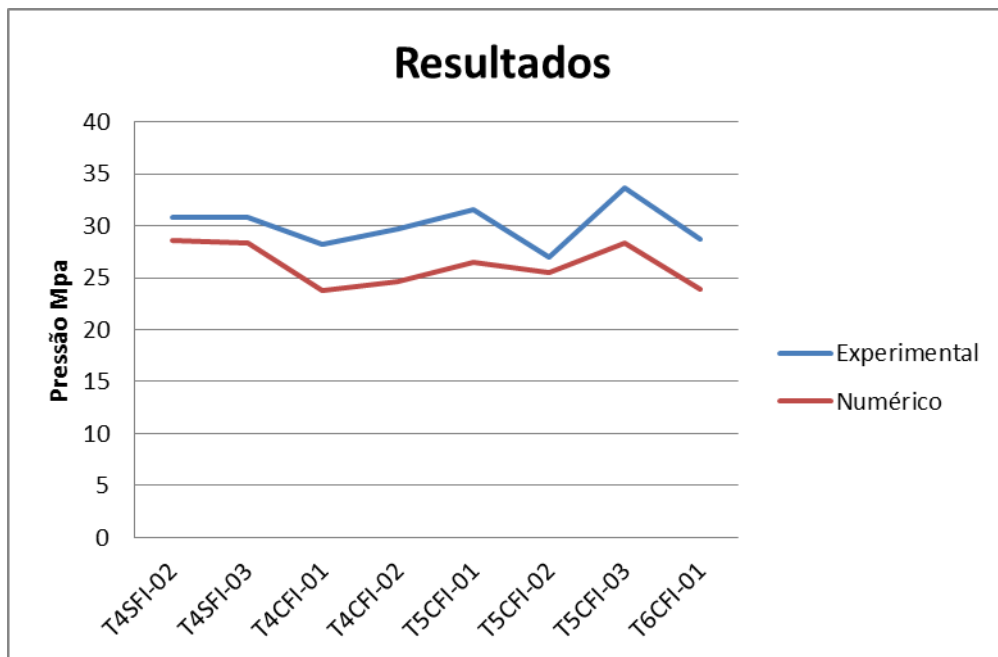


Figura 13. Gráfico do comportamento das pressões de colapso dos tubos no método experimental e numérico.

Comparando os tubos intactos e furados (T4SFI-02, T4SFI-03, T4CFI-01 e T4CFI-02), que possuem o mesmo material, diâmetro e espessura, notou-se uma redução de aproximadamente 6% na pressão de colapso devido à presença de furos. Comparando-se os

dois tubos furados, T4CFI-01 e T4CFI-02, a diferença entre eles se deu devido à ovalização, que é maior no primeiro, resultando em uma pressão de colapso menor.

Analisando os tubos T5, o tubo T5CFI-01 apresenta as mesmas características que o tubo T5CFI-02, com exceção do número de furos na direção longitudinal e espaçamento entre furos. O que tem mais furos e menor espaçamento (T5CFI-02) colapsou com uma pressão menor. Portanto, a redução do espaçamento longitudinal entre furos reduz a resistência do tubo ao colapso.

Já o tubo T5CFI-03, que apresenta mais furos na direção longitudinal e menor espaçamento entre furos que o T5CFI-01, porém tem um diâmetro de furo reduzido pela metade, apresentou uma pressão de colapso maior que os dois anteriores, o que mostra que o diâmetro do furo parece ser um fator de maior influência na resistência ao colapso que a distância longitudinal entre furos.

O corpo de prova T6CFI-01 comprova que o diâmetro dos furos reduz significativamente a pressão de colapso, em torno de 7% se comparado aos tubos sem furo T4SFI-02 e T4SFI-03, e 14,8% quando comparado ao tubo de mesmo espaçamento longitudinal (T5CFI-03), ainda que os corpos de prova tenham sido usinados a partir de dois tubos distintos.

Os resultados dos tubos T5CFI-03 e T6CFI-01, com aproximadamente o mesmo espaçamento longitudinal de T4CFI-01 e T4CFI-02, porém com menos furos circunferenciais e diâmetros de furos respectivamente menores e maiores, sugerem que o número de furos na circunferência, ou espaçamento entre furos na direção circunferencial, exerce menos influência sobre a pressão de colapso quando comparado ao diâmetro do furo.

6. Estudo paramétrico

Um estudo paramétrico foi efetuado com o uso do mesmo programa de elementos finitos para avaliar o comportamento da pressão de colapso de acordo com a variação dos seguintes parâmetros:

- Razão diâmetro externo - espessura do tubo (D/t)
- Distância longitudinal entre furos (l)
- Número de furos na direção circunferencial
- Diâmetro do furo (d)

Foram utilizadas as propriedades de material do tubo T5, ou seja, todos os tubos possuem os mesmos valores de tensão de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Além disso, foi utilizada a geometria apresentada na Tabela 9 abaixo, comum a todos os tubos.

Tabela 9. Propriedades geométricas dos tubos analisados.

Propriedades	
Ovalização	0,50%
Diâmetro externo (mm)	152,4
Pressão de colapso máxima (MPa)	35

Os parâmetros que foram variados são apresentados na Tabela 10. Foi feita uma combinação de todos os parâmetros para gerar os modelos a serem testados, resultando em um total de 54 análises.

Tabela 10. Parâmetros dos modelos.

Parâmetros			
D/t	nº de furos na circunferência	d	I/D
20	8	1/4"	0,4
25	16	3/8"	0,6
30		1/2'	0,8

Para analisar a influência da relação diâmetro-espessura do tubo, foi variada a espessura, mantendo-se o diâmetro externo constante. Já a distância longitudinal entre furos foi diretamente variada no modelo de elementos finitos. E por último, diâmetro dos furos e número de furos na direção circunferencial foram variados.

A malha utilizada seguiu a dos tubos furados T5, com exceção de alguns modelos que precisaram ter sua malha ajustada, referente ao número de elementos circunferenciais (N_{ANG}), devido à mudança de geometria. O número de elementos utilizados está na Tabela 11.

Tabela 11. Número de elementos circunferenciais e longitudinais entre furos e na espessura de cada tubo.

Tubo	N_{ANG}	N_{LONG}	N_{ESP}
TCFI-01	8	10	2
TCFI-02	8	10	2
TCFI-03	8	10	2
TCFI-04	8	10	2
TCFI-05	8	10	2
TCFI-06	8	10	2
TCFI-07	8	10	2
TCFI-08	8	10	2
TCFI-09	8	10	2
TCFI-10	8	10	2
TCFI-11	8	10	2
TCFI-12	8	10	2
TCFI-13	8	10	2
TCFI-14	8	10	2
TCFI-15	6	10	2

TCFI-16	6	10	2
TCFI-17	6	10	2
TCFI-18	4	4	2
TCFI-19	4	10	2
TCFI-20	4	10	2
TCFI-21	8	10	2
TCFI-22	8	10	2
TCFI-23	8	10	2
TCFI-24	8	10	2
TCFI-25	8	10	2
TCFI-26	8	10	2
TCFI-27	8	10	2
TCFI-28	8	10	2
TCFI-29	8	10	2
TCFI-30	8	10	2
TCFI-31	8	10	2
TCFI-32	6	10	2
TCFI-33	6	10	2
TCFI-34	6	10	2
TCFI-35	4	10	2
TCFI-36	4	10	2
TCFI-37	4	10	2
TCFI-38	8	10	2
TCFI-39	8	10	2
TCFI-40	8	10	2
TCFI-41	8	10	2
TCFI-42	8	10	2
TCFI-43	8	10	2
TCFI-44	8	10	2
TCFI-45	8	10	2
TCFI-46	8	10	2
TCFI-47	8	10	2
TCFI-48	8	10	2
TCFI-49	6	10	2
TCFI-50	6	10	2
TCFI-51	6	10	2
TCFI-52	8	10	2
TCFI-53	8	10	2
TCFI-54	8	10	2

Foram analisados, também, três modelos de tubos intactos, com a geometria apresentada na Tabela 9 e variando somente a espessura (Tabela 12), de forma a obter resultados de pressão de colapso que possam servir como base de comparação entre os resultados correspondentes aos tubos furados

Tabela 12. Espessura dos tubos intactos

Tubos intactos	t (mm)
TSFI-01	7,62
TSFI-02	6,096
TSFI-03	5,08

As pressões de colapso estão listadas na Tabela 13.

Tabela 13. Pressões de colapso dos 54 modelos.

Tubo furado	t (mm)	nº de furos na circunferencia	d (mm)	l (mm)	P_{co} (MPa)	P_{co}/P_{coi}
TCFI-01	7,62	8	6,35	60,96	32,72	0,99
TCFI-02	6,096	8	6,35	60,96	20,87	1,01
TCFI-03	5,08	8	6,35	60,96	13,72	1,03
TCFI-04	7,62	8	9,525	60,96	31,58	0,96
TCFI-05	7,62	8	12,7	60,96	30,16	0,91
TCFI-06	7,62	8	6,35	91,44	32,66	0,99
TCFI-07	7,62	8	9,525	91,44	31,90	0,97
TCFI-08	7,62	8	12,7	91,44	30,96	0,94
TCFI-09	7,62	8	6,35	121,92	32,74	0,99
TCFI-10	7,62	8	9,525	121,92	32,16	0,97
TCFI-11	7,62	8	12,7	121,92	31,41	0,95
TCFI-12	7,62	16	6,35	60,96	30,04	0,91
TCFI-13	7,62	16	9,525	60,96	28,85	0,87
TCFI-14	7,62	16	12,7	60,96	27,79	0,84
TCFI-15	7,62	16	6,35	91,44	29,87	0,91
TCFI-16	7,62	16	9,525	91,44	29,09	0,88
TCFI-17	7,62	16	12,7	91,44	28,39	0,86
TCFI-18	7,62	16	6,35	121,92	31,82	0,96

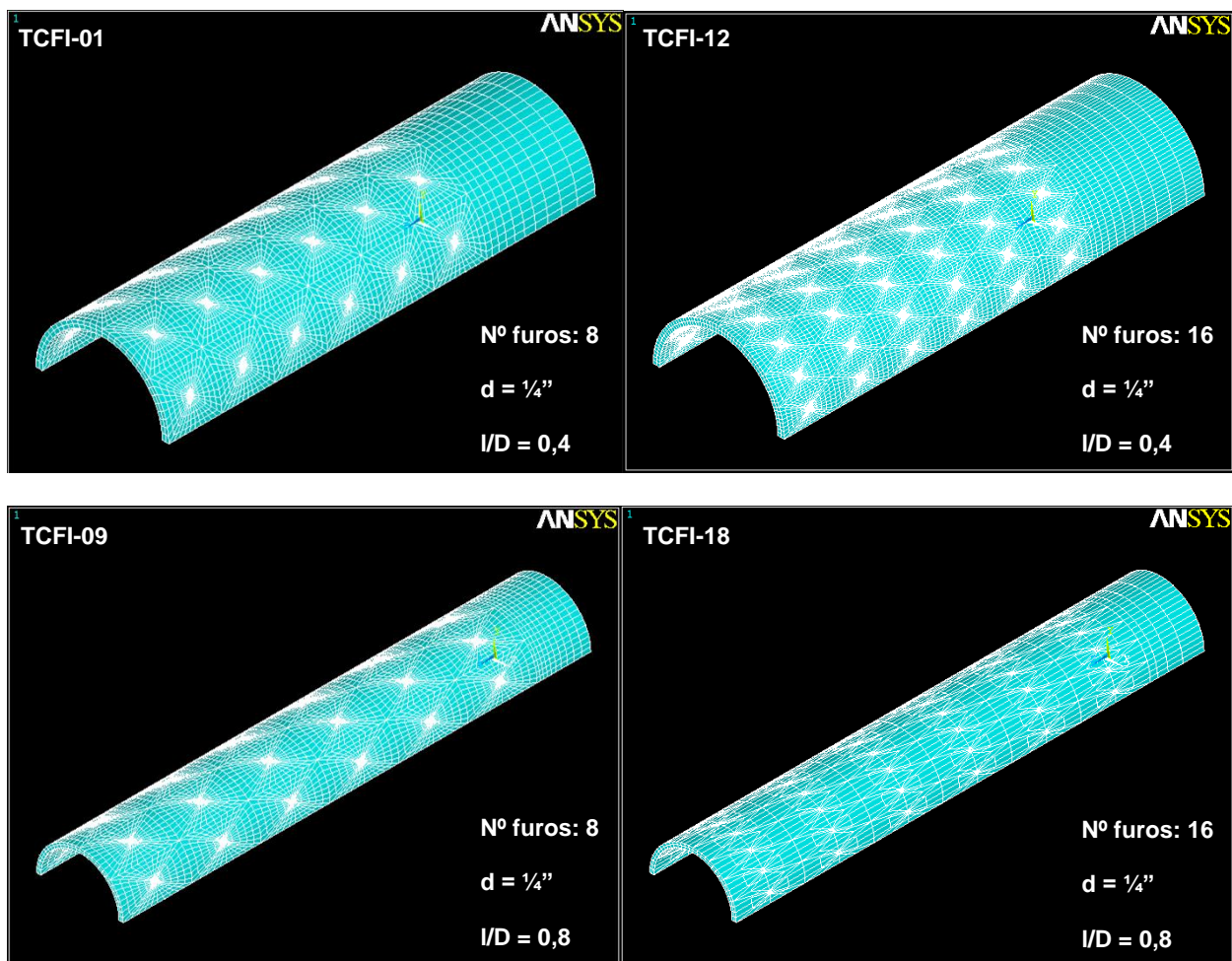
TCFI-19	7,62	16	9,525	121,92	29,44	0,89
TCFI-20	7,62	16	12,7	121,92	28,94	0,88
TCFI-21	6,096	8	9,525	60,96	20,33	0,98
TCFI-22	6,096	8	12,7	60,96	19,62	0,95
TCFI-23	6,096	8	6,35	91,44	20,63	1,00
TCFI-24	6,096	8	9,525	91,44	20,30	0,98
TCFI-25	6,096	8	12,7	91,44	19,83	0,96
TCFI-26	6,096	8	6,35	121,92	20,64	1,00
TCFI-27	6,096	8	9,525	121,92	20,40	0,99
TCFI-28	6,096	8	12,7	121,92	20,03	0,97
TCFI-29	6,096	16	6,35	60,96	19,17	0,93
TCFI-30	6,096	16	9,525	60,96	18,47	0,89
TCFI-31	6,096	16	12,7	60,96	17,82	0,86
TCFI-32	6,096	16	6,35	91,44	18,82	0,91
TCFI-33	6,096	16	9,525	91,44	18,40	0,89
TCFI-34	6,096	16	12,7	91,44	18,00	0,87
TCFI-35	6,096	16	6,35	121,92	18,86	0,91
TCFI-36	6,096	16	9,525	121,92	18,56	0,90
TCFI-37	6,096	16	12,7	121,92	18,29	0,88
TCFI-38	5,08	8	9,525	60,96	13,45	1,01
TCFI-39	5,08	8	12,7	60,96	13,05	0,98
TCFI-40	5,08	8	6,35	91,44	13,39	1,00
TCFI-41	5,08	8	9,525	91,44	13,23	0,99
TCFI-42	5,08	8	12,7	91,44	12,98	0,97
TCFI-43	5,08	8	6,35	121,92	13,35	1,00
TCFI-44	5,08	8	9,525	121,92	13,23	0,99
TCFI-45	5,08	8	12,7	121,92	13,04	0,98
TCFI-46	5,08	16	6,35	60,96	12,68	0,95
TCFI-47	5,08	16	9,525	60,96	12,25	0,92
TCFI-48	5,08	16	12,7	60,96	11,83	0,89
TCFI-49	5,08	16	6,35	91,44	12,29	0,92
TCFI-50	5,08	16	9,525	91,44	12,04	0,90
TCFI-51	5,08	16	12,7	91,44	11,79	0,88
TCFI-52	5,08	16	6,35	121,92	12,42	0,93
TCFI-53	5,08	16	9,525	121,92	12,23	0,92
TCFI-54	5,08	16	12,7	121,92	12,05	0,90

Os resultados de pressão de colapso dos 54 modelos foram normalizados pelas pressões de colapso dos tubos intactos com espessura correspondente, através da razão entre

pressão de colapso do tubo furado e pressão de colapso do tubo intacto (P_{CO}/P_{COI}), de forma a proporcionar melhor interpretação dos resultados.

Pode-se perceber na Tabela 13 algumas relações de P_{CO}/P_{COI} iguais ou maiores que 1, o que não é de se esperar, visto que a resistência de um tubo intacto deve ser maior que a resistência de um tubo furado de mesmo material e geometria. Esses resultados indesejados podem ter ocorrido devido a diferentes refinamentos de malha, já que com a variação dos parâmetros deste estudo, a malha foi distorcida e cada tubo ficou com uma malha particular.

A Figura 14 mostra as malhas de 8 tubos, com relação D/t igual a 20, número de furos na circunferência iguais a 8 e 16, diâmetros do furo iguais a $\frac{1}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ " e relação L/D iguais a 0,4 e 0,8.



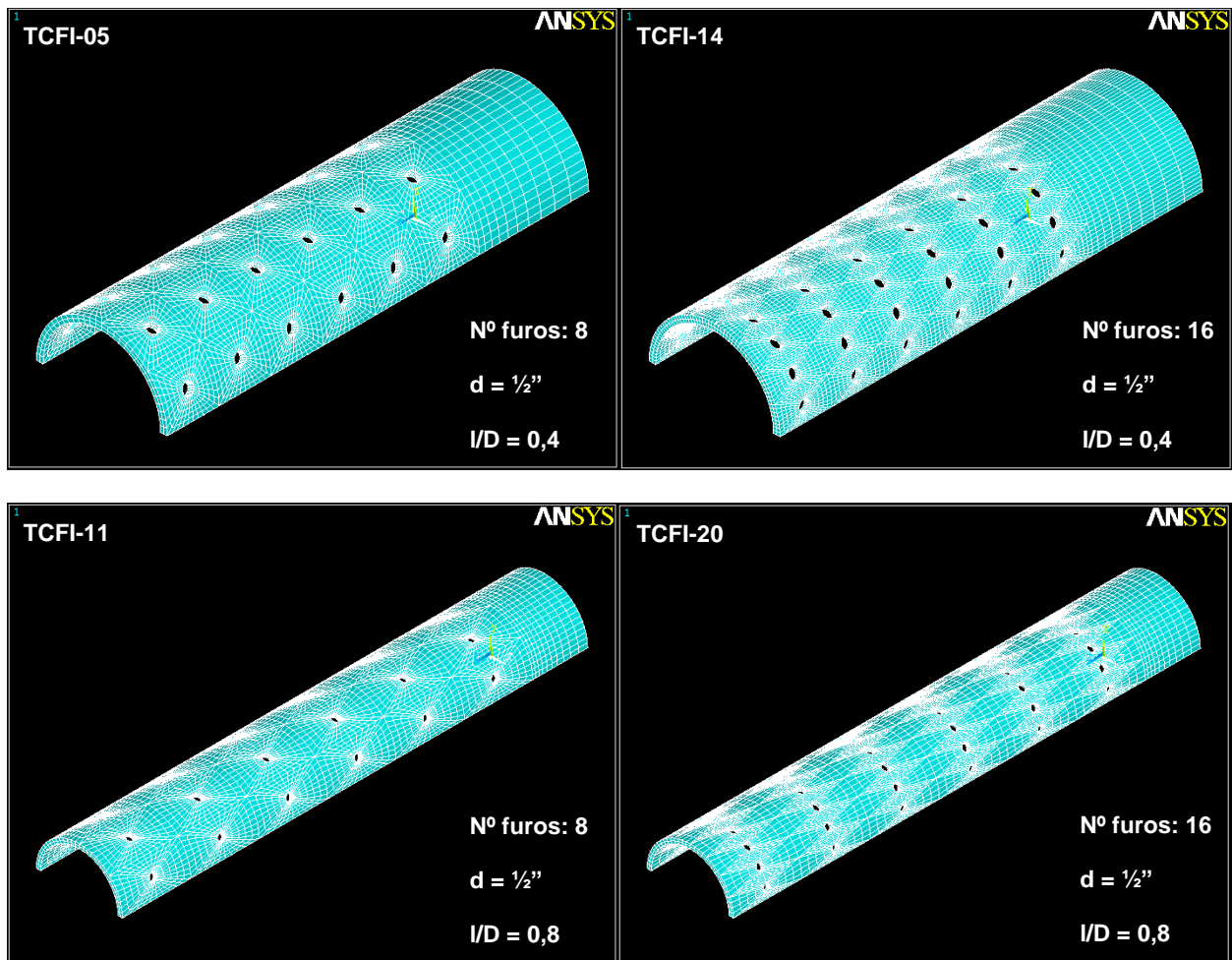


Figura 14. Malhas dos tubos com parâmetros diferentes.

Os gráficos de P_{co}/P_{coi} x d/D abaixo mostram os resultados obtidos.

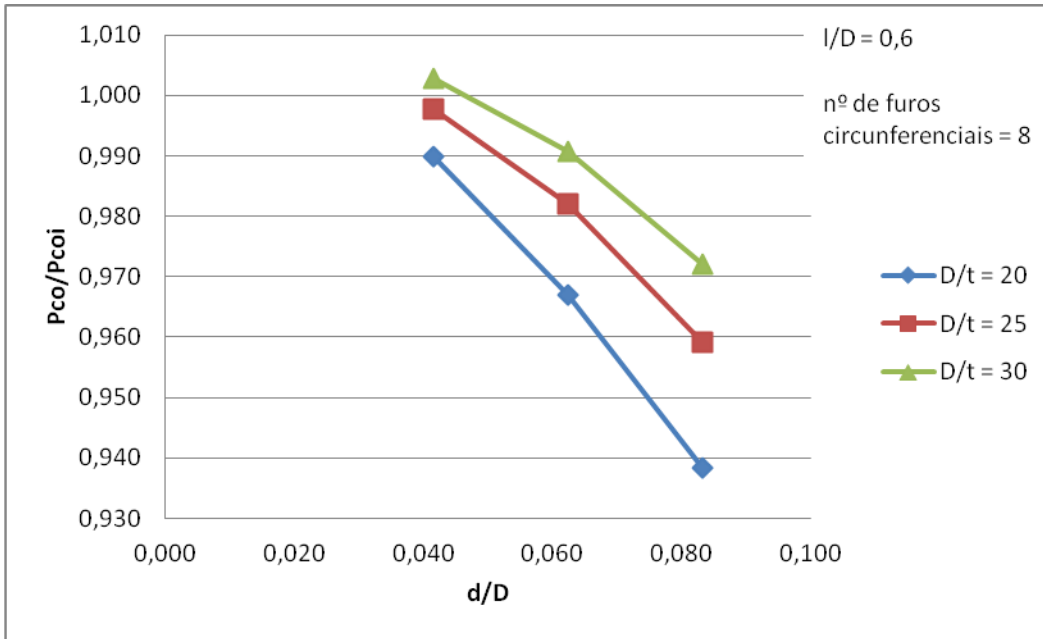


Figura 15. Gráfico de D/t para $l/D = 0,6$ e 8 furos circunferenciais.

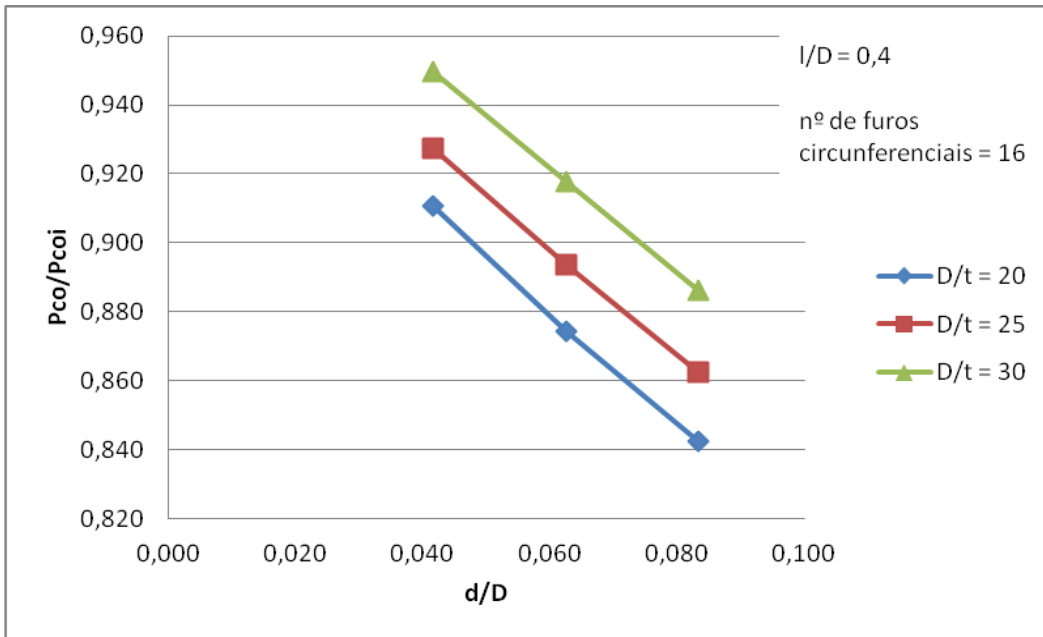


Figura 16. Gráfico de D/t para $l/D = 0,4$, e 16 furos circunferenciais.

As Figuras 15 e 16 mostram a influência da presença de furos de acordo com a razão D/t . Quanto mais esbelto for o tubo, isto é, quanto maior o D/t , mais próxima de 1 fica a curva, o que mostra que neste caso a presença de furos não tem influência significativa na pressão de colapso do tubo. Esse comportamento é semelhante para todos os espaçamentos longitudinais e circunferenciais testados. Além disso, verifica-se o aumento da influência do diâmetro do furo, para todas as relações D/t , na pressão de colapso.

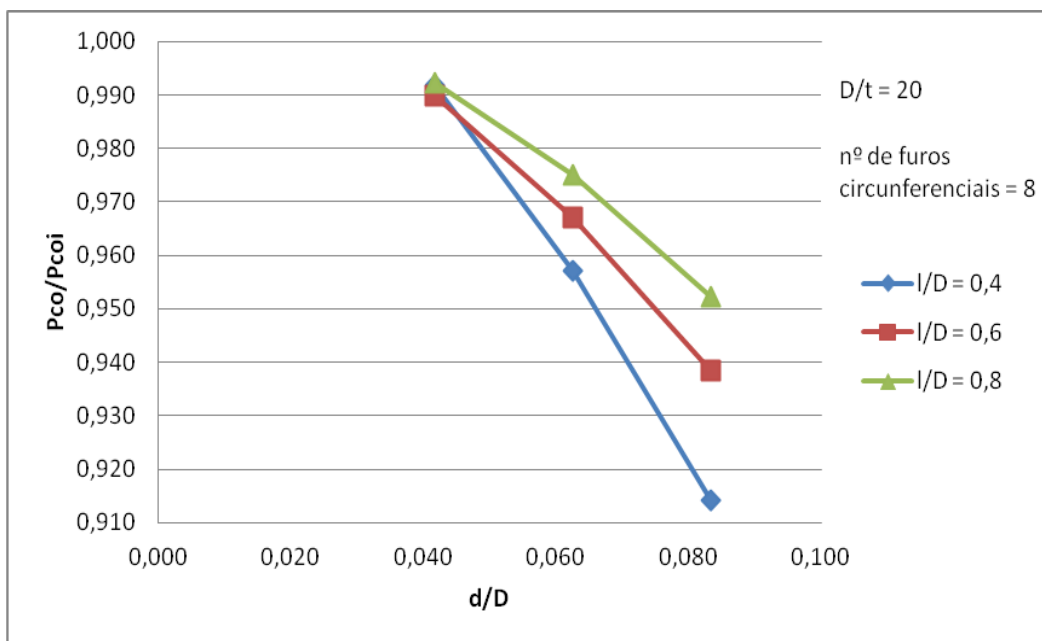


Figura 17. Gráfico de I/D para $D/t = 20$ e 8 furos circunferenciais.

A Figura 17 mostra a influência combinada do espaçamento longitudinal entre furos e do diâmetro do furo. Quanto menor for o diâmetro e maior o espaçamento longitudinal, mais próxima de 1 fica a curva, ou seja, a presença do furo tem menor influência sobre a pressão de colapso do tubo furado, que se aproxima da pressão do tubo intacto.

Outra conclusão importante que pode ser tirada do gráfico acima é que a influência do espaçamento longitudinal só é vista para diâmetros de furo maiores, já que o menor diâmetro de furo resultou em resultados muito próximos para diferentes razões l/D .

A Figura 18 abaixo mostra ainda que para l/D pequeno, o diâmetro do furo tem maior influência, dado pela inclinação da curva de $l/D = 0,4$ mais acentuada que as outras.

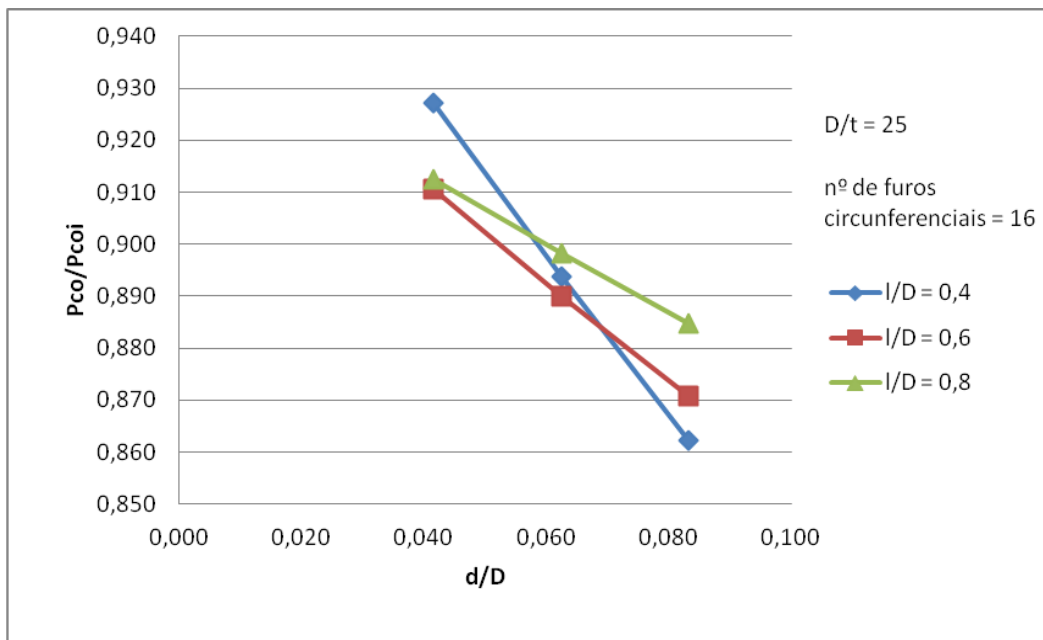


Figura 18. Gráfico de l/D para $D/t = 25$ e 16 furos circunferenciais.

Com relação ao número de furos na circunferência, para todos os valores de l/D e D/t , os tubos com menos furos tiveram a curva mais próxima de 1, o que mostra que estes tubos possuem comportamento mais semelhante ao tubo intacto. Isto pode ser ilustrado nas Figuras 19, 20 e 21.

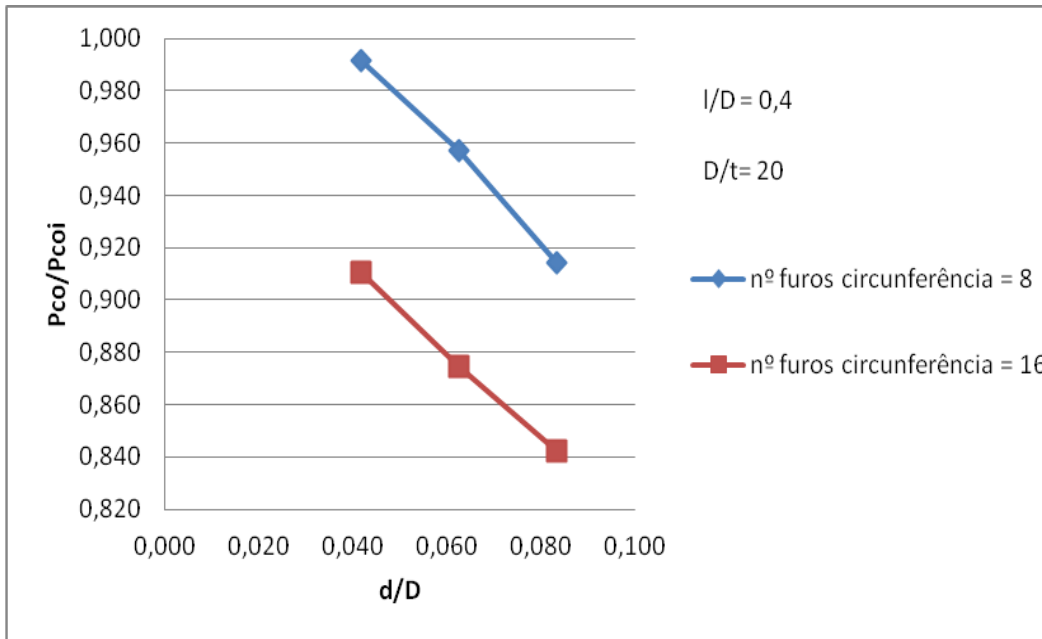


Figura 19. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,4$ e $D/t = 20$.

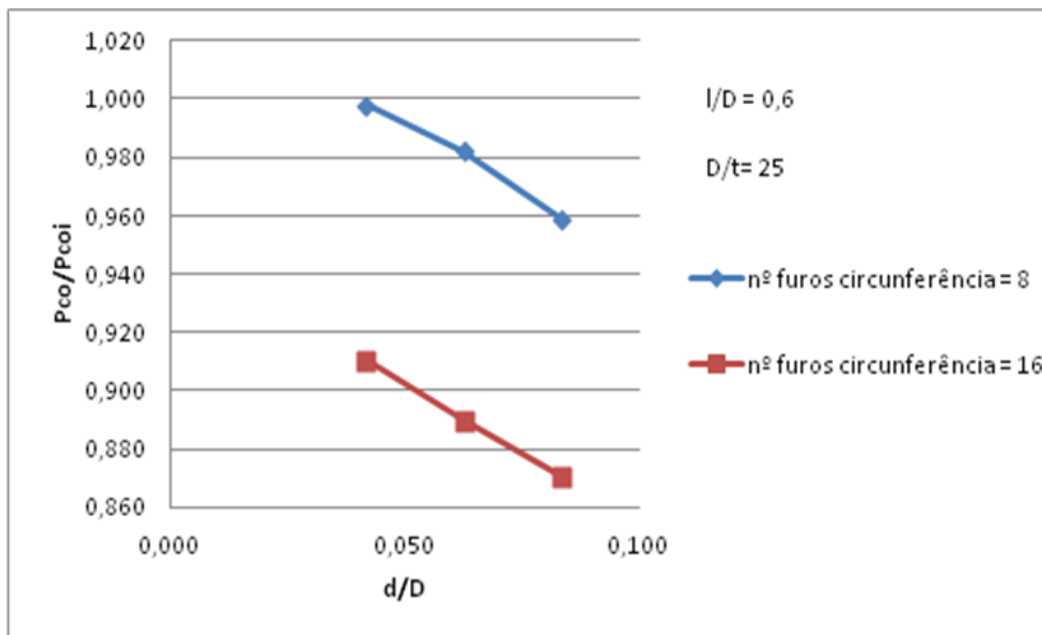


Figura 20. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,6$ e $D/t = 25$.

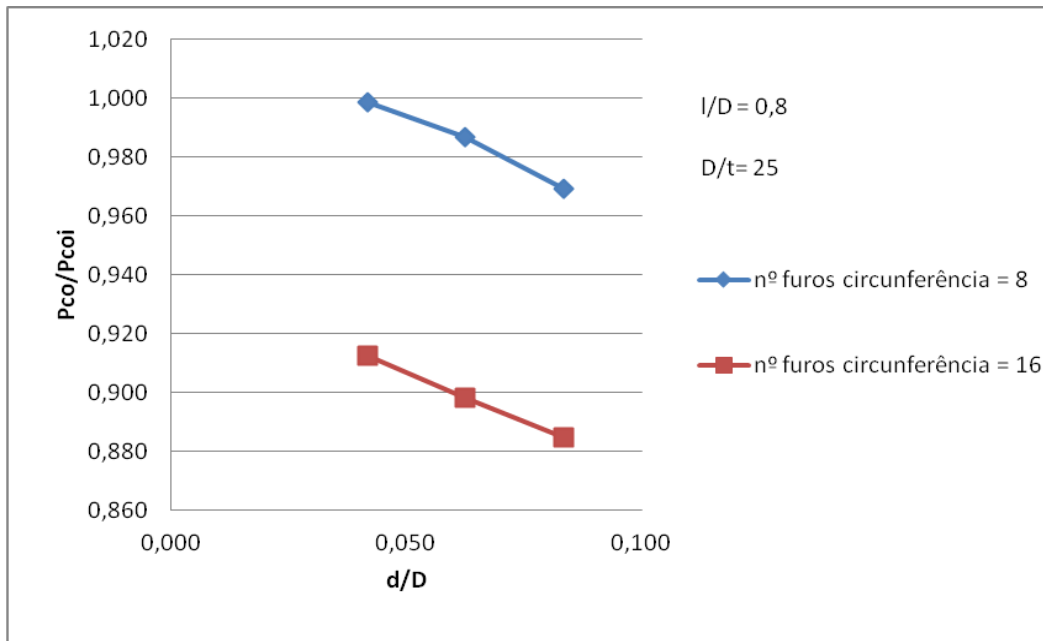


Figura 21. Gráfico do número de furos na circunferência para $l/D = 0,8$ e $D/t = 25$.

França (2010) apresenta uma equação, baseada no estudo de Abassian et al. (1998), para estimar a pressão de colapso de tubos utilizados no controle da produção de areia. O cálculo se aplica a análise da resistência ao colapso de tubos íntegros, em uma primeira etapa, e é expandido para a obtenção da resistência ao colapso de tubos furados, ranhurados e tubos de revestimento sob pressão não-uniforme. Assumindo uma distribuição uniforme de furos, tem-se a seguinte equação para tubos furados:

$$\lambda = 1 - \frac{d}{l}$$

onde λ é uma correção que representa a razão entre a pressão de colapso do tubo furado e a pressão de colapso do tubo intacto, d é o diâmetro do furo e l é a distância longitudinal entre furos.

O presente estudo paramétrico foi aproveitado para comparação dos resultados com as curvas do método analítico. Os gráficos de $P_{Co}/P_{CoI} (\lambda) \times l/d$ apresentados nas Figuras 22 a 27 mostram essa comparação. Os pontos representam os valores obtidos numericamente e as curvas são os valores estimados pela equação acima, para determinados diâmetros do furo diferenciados pela cor.

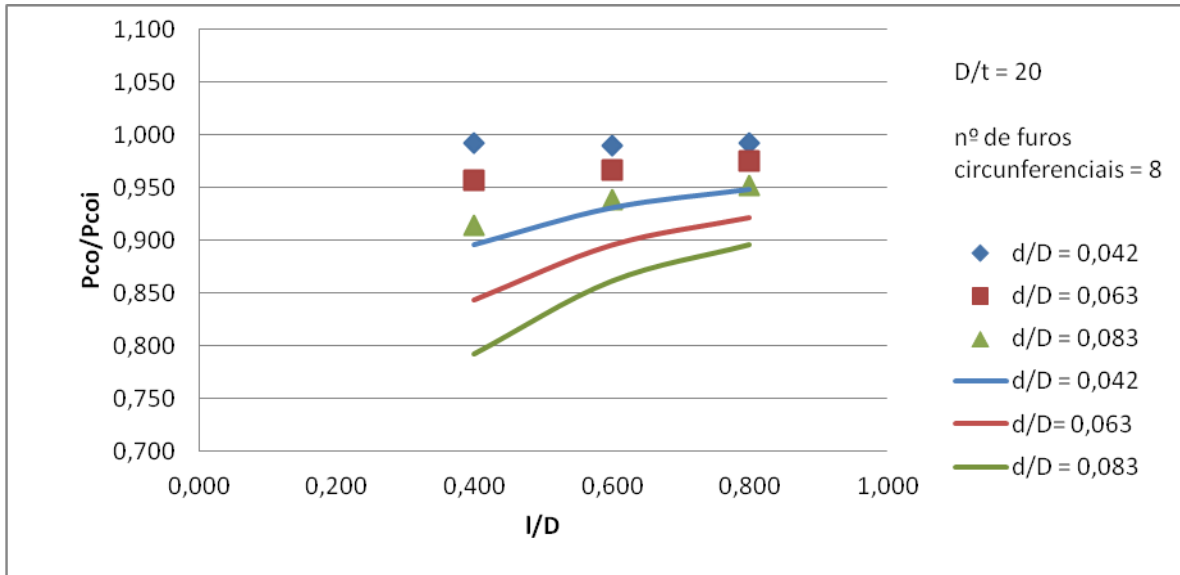


Figura 22. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 20$ e 8 furos na circunferência.

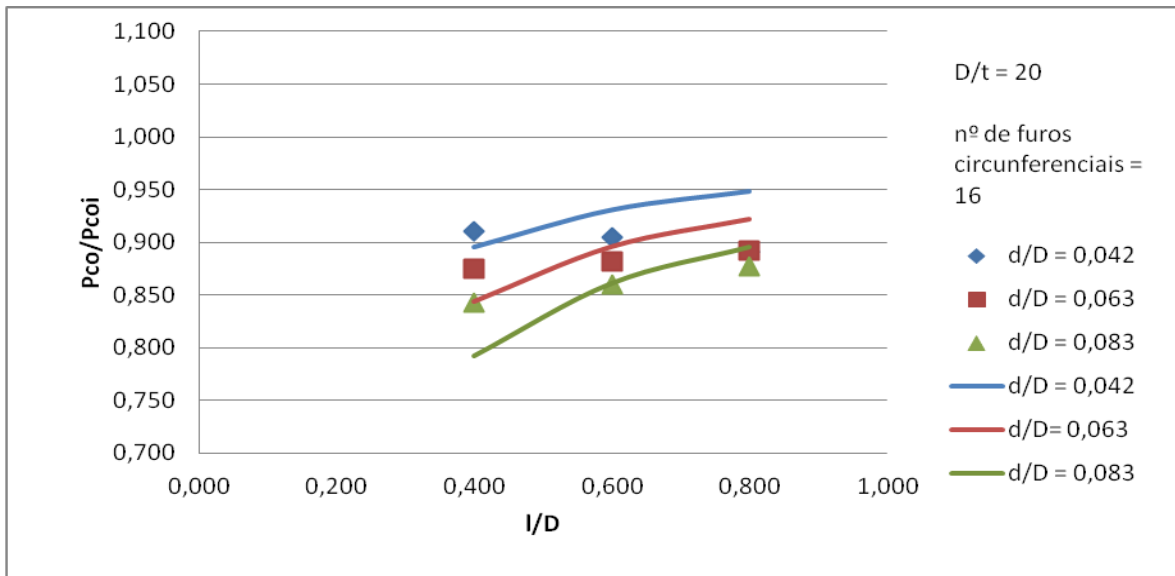


Figura 23. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 20$ e 16 furos na circunferência.

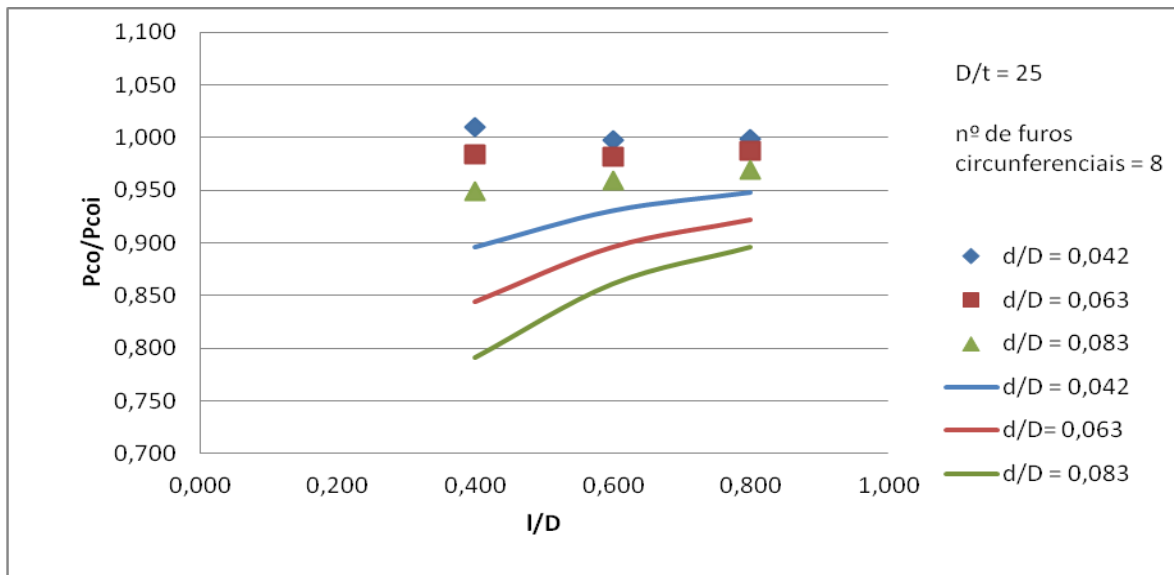


Figura 24. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 25$ e 8 furos na circunferência.

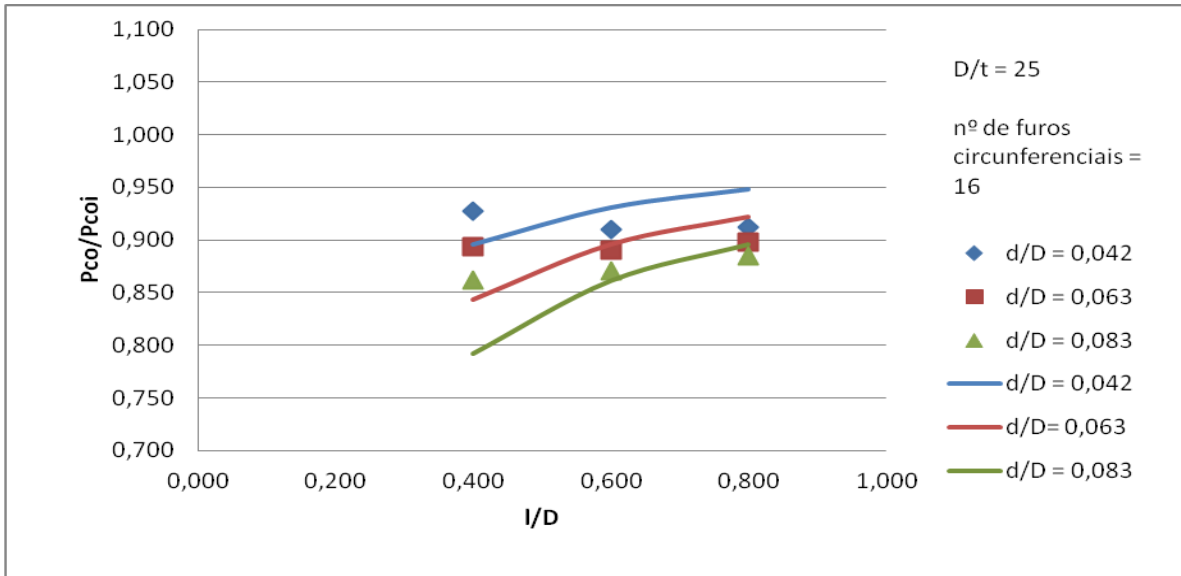


Figura 25. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 25$ e 16 furos na circunferência.

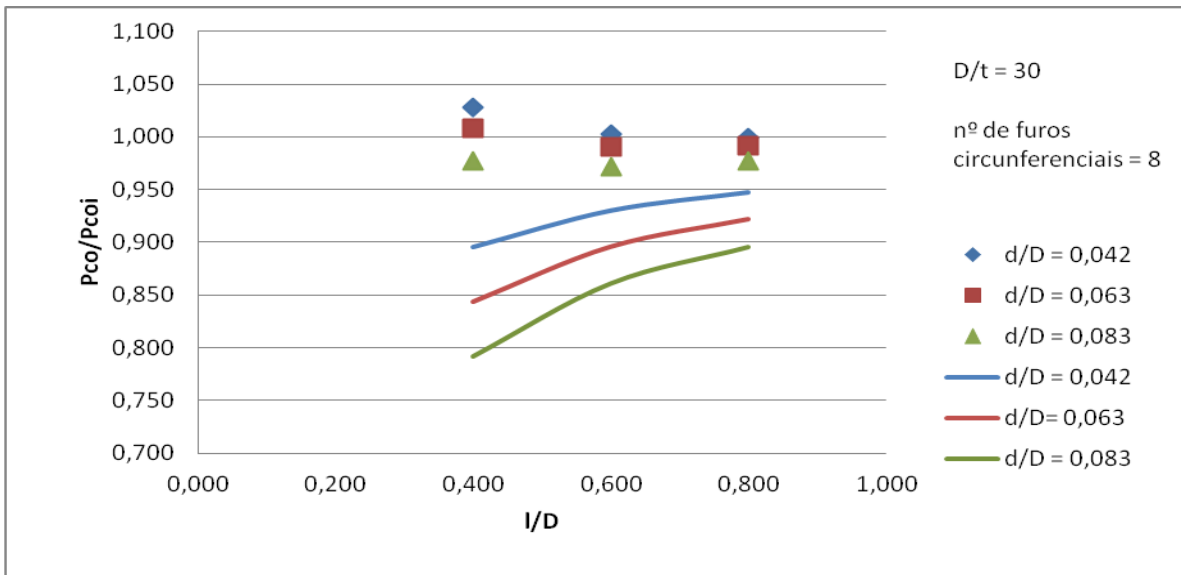


Figura 26. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 30$ e 8 furos na circunferência.

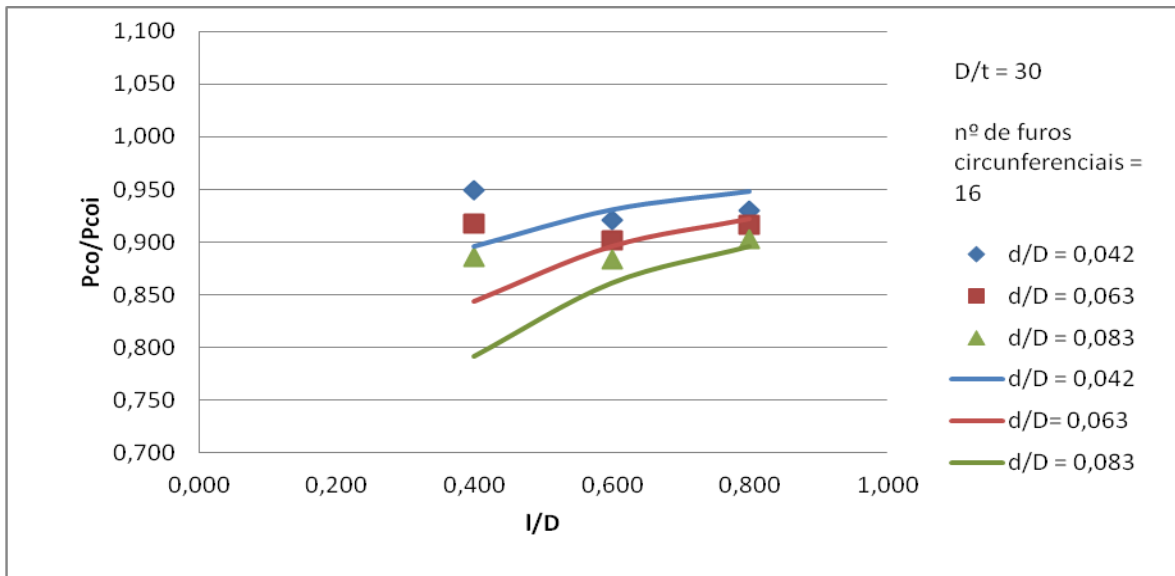
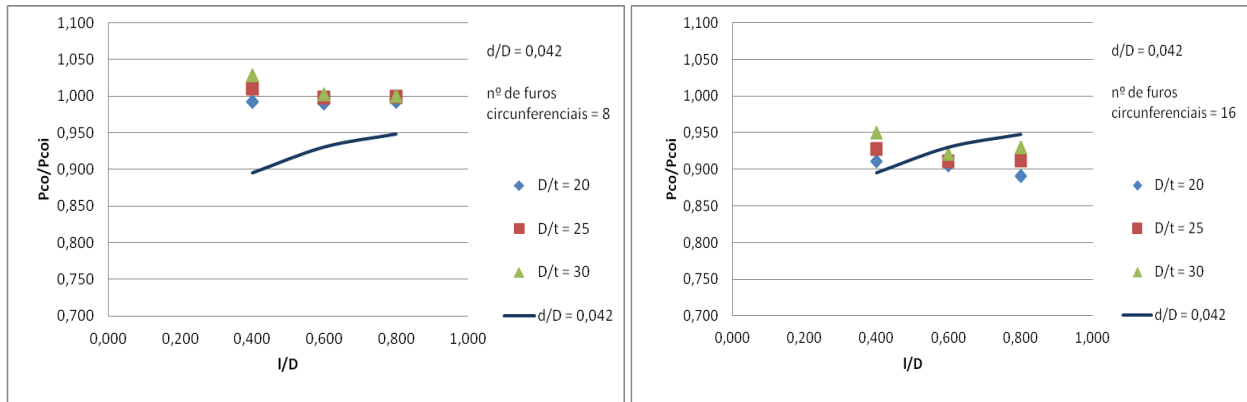


Figura 27. Variação da correção λ quanto ao diâmetro do furo e espaçamento longitudinal e comparação com os resultados da simulação numérica para $D/t = 30$ e 16 furos na circunferência.

Pode-se visualizar que tubos com menos furos na circunferência possuem resultados numérico e analítico mais distantes (Figuras 22, 24 e 26), ao passo que tubos com mais furos na circunferência apresentaram resultados mais próximos (Figuras 23, 25 e 27).

Observa-se nas Figuras 22 a 27 que os pontos de $I/D = 0,4$ apresentam um comportamento diferente dos pontos de $I/D = 0,6$ e $0,8$. Para I/D maiores, verifica-se a tendência ascendente das curvas obtidas pela equação de λ , o que sugere uma correlação analítico-numérica boa, enquanto que para I/D menores, a correlação não é tão boa. Mais análises devem ser feitas com I/D maiores que $0,8$ para se confirmar essa tendência e, ainda, para I/D menores deve-se checar a origem da diferença de comportamento.

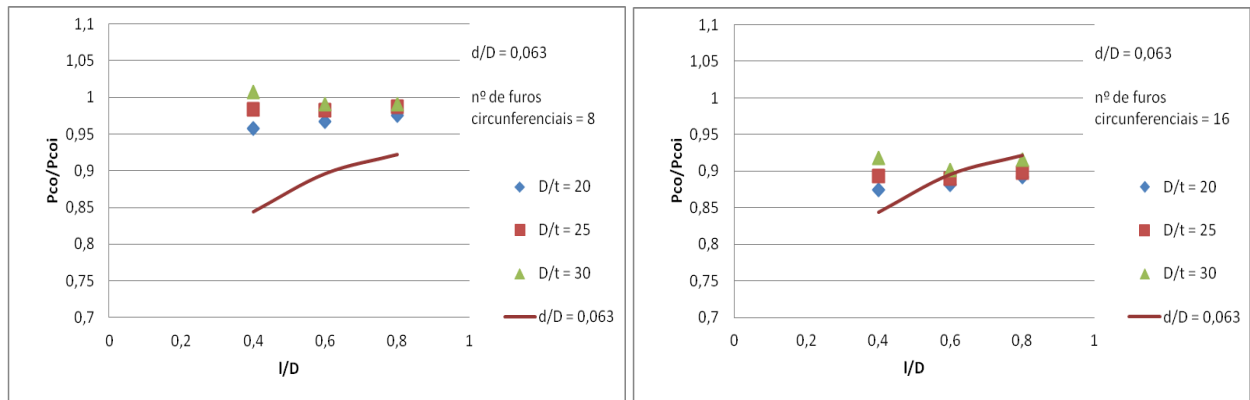
Os gráficos apresentados nas Figuras 28 a 30 mostram a influência do fator de correção λ com a variação de I/D , para as três razões D/t consideradas, e a comparação entre resultados numéricos e analíticos. O objetivo é avaliar se a razão D/t precisaria ser considerada na equação de correção λ .



(a)

(b)

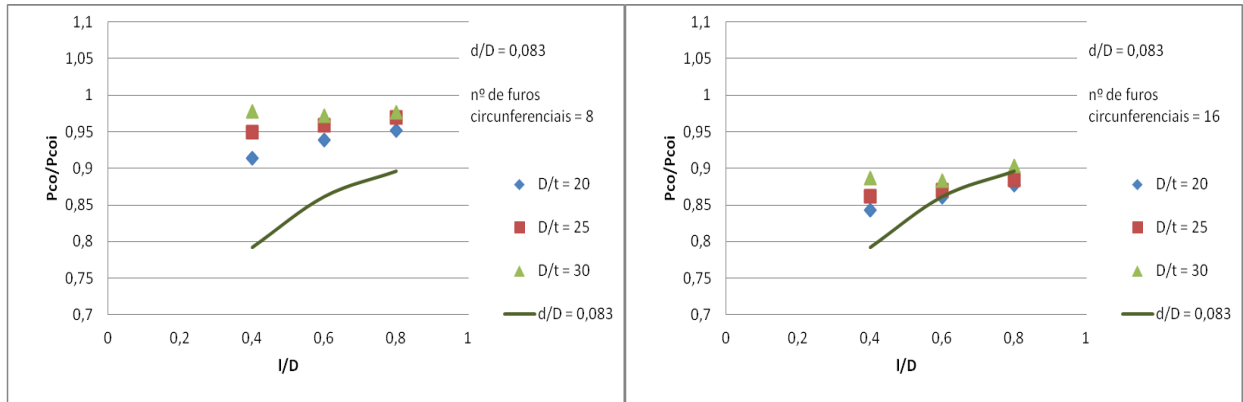
Figura 28. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a $1/4''$ e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.



(a)

(b)

Figura 29. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a $3/8''$ e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.



(a)

(b)

Figura 30. Variação da correção λ com espaçamento longitudinal para um diâmetro de furo igual a 1/2" e comparação com os resultados da simulação numérica para diferentes D/t (a) com 8 furos na circunferência e (b) com 16 furos na circunferência.

Assim como já visto anteriormente, os resultados para um número de furos na circunferência maior ficaram mais próximos da curva analítica do que para um número de furos menor. Já os pontos para os diferentes D/t ficaram bem próximos uns dos outros, o que indica que este parâmetro tem pouca influência sobre a equação de λ .

7. Conclusão

O desempenho da manutenção da produção em campos de petróleo corresponde à maior parte do ciclo de vida dos projetos de desenvolvimento. A intervenção em poços é a operação associada mais importante e dispendiosa e a produção de areia é um dos principais eventos que pode levar à necessidade de intervenção. Por isso, é vital minimizar os riscos e garantir um bom sistema de contenção de areia, através da escolha do método de controle mais adequado. Isso inclui o estudo da resistência ao colapso de tubos utilizados na contenção de areia, de acordo com os parâmetros de geometria e material destes tubos.

Nesse sentido, foi realizada uma análise de resultados de testes experimentais e numéricos de tubos base furados submetidos à pressão externa, de onde foram tiradas as seguintes conclusões:

Dos testes experimentais:

- Pode-se concluir que o espaçamento longitudinal entre furos, o diâmetro dos furos e a ovalização do tubo foram os parâmetros que mais afetaram a resistência ao colapso dos tubos furados. Quanto maior o diâmetro dos furos e ovalização do tubo e menor o espaçamento entre furos, menor a resistência.
- A correlação numérico-experimental se mostrou eficaz, mesmo com os resultados de pressão numéricos inferiores aos experimentais. Atribuiu-se, principalmente, ao efeito de anisotropia do material a causa dessa diferença, onde se considera uma resistência menor no modelo numérico do que nos testes experimentais. Sendo esse efeito corrigido, uma melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais poderia ser obtida.

Do estudo paramétrico:

- Quanto mais esbelto for o tubo, ou seja, quanto maior a relação D/t , a pressão de colapso do tubo furado se aproxima mais da pressão de colapso do tubo intacto, já que a influência da presença de furos é reduzida.
- Quanto menor for o diâmetro do furo e maior o espaçamento longitudinal entre furos, mais o tubo furado se assemelha ao tubo intacto.
- O espaçamento longitudinal exerce maior influência para tubos com furos de diâmetro maior.
- Para espaçamento longitudinal pequeno, o diâmetro do furo exerce maior influência.
- Tubos com menos furos na circunferência possuem pressões de colapso mais próximas de tubos intactos e quanto maior for o espaçamento longitudinal entre furos.
- Tubos com números de furos na circunferência maiores apresentam pressões de colapso mais próximas das obtidas pelo método analítico, ou seja, a equação da correção λ é adequada para tubos com número de furos circunferenciais maiores.
- Ainda com relação à correção λ , os gráficos de $\lambda \times l/D$ com variação de D/t revelaram resultados bem próximos, indicando que este parâmetro não precisa ser considerado na equação de λ .

Trabalhos futuros

Sugere-se estudar mais a fundo o comportamento divergente dos resultados numéricos e analíticos apresentados no capítulo 5, com mais modelos e maior atenção à malha utilizada. Com relação à equação, foi visto que o número de furos circunferenciais deve ser considerado, já que a variação deste parâmetro mostrou resultados mais eficazes para um número de furos maior. Foi visto ainda que a relação l/D pequena apresentou resultados diferentes de l/D maior, sendo então sugerido que se façam mais análises com l/D maiores para verificar se a tendência ascendente dos pontos, coerente com as curvas da equação de λ , se confirma.

8. Bibliografia

ABBASSIAN, F., PARFIRR, S.H.L., "A Simple Model for Collapse and Post-Collapse Behavior of Tubulars With Application to Perforated and Slotted". *SPE Drilling & Completion*, v.13. n.3, pp 190-196, Sep. 1998.

ANSYS, Workbench User's Guide. Release 13.0, 2010.

BARRETO, J.B. *et al.*, "Elaboração de um Projeto de Gravel Pack como Sistema de Contenção de Areia em Poços de Petróleo: Estudo de Caso na Bacia de Campos – Uma Visão por Gerência de Projetos". *XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de Outubro de 2007.

FRANÇA, M.R., *Análise Estrutural de Diferentes Concepções de Tubo para Contenção de Areia*. Monografia, Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

FONSECA, C.E., *Análise do Comportamento Estrutural sob Pressão Externa de Tubos Expansíveis para Poços de Petróleo*. Dissertação de M.SC., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

HAMID, S., ALI, S.A., "Causes of Sand Control Screen Failures and Their Remedies", *SPE European Formation Damage Conference*, The Hague, Netherlands, 2-3 June 1997.

MINASSA, L., *Controle de Areia em Poços de Águas Profundas*, Minicurso, Semana de Petróleo e Gás - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

PASQUALINO, I.P., *Análise Numérica de Revestimentos Rasgados (Liners) sob Carregamento de Compressão Radial*. Relatório Técnico ao CENPES/PETROBRAS, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

SANTOS, A.R., *Análise de Colapso de Telas Utilizadas em Sistemas de Contenção de Areia em Poços Horizontais*. Dissertação de M.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SILVA, F.S.B, *Análise Paramétrica da Aplicabilidade da Tecnologia de Controle de Produção de Areia em Poços de Petróleo*. Monografia, Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

VEEKEN, C.A.M., DAVIES, D.R., KENTER, C.J., KOOIJIMAN, A.P. – “Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach”. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE 22792. Dallas, Texas, EUA. 6-9 October, 1991.