

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS SUBMARINOS COM DANOS

Caroline Ferraz de Melo Netto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro Dezembro de 2017

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS SUBMARINOS COM DANOS

Caroline Ferraz de Melo Netto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Segen Farid Estefen, Ph.D.

Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza, D.Sc.

Eng. Rafael Familiar Solano, D.Sc.

Eng. Ana Paula Souza, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL DEZEMBRO DE 2017 Netto, Caroline Ferraz de Melo

Avaliação da pressão de colapso de dutos submarinos com danos/ Caroline Ferraz de Melo Netto – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017

XVI, 74,p.:il.; 29,7cm

Orientador: Theodoro Aunton Netto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 73-74

1. Colapso 2. Iniciação 3. Dutos Submarinos. I. Netto, Theodoro Antoun. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título

À memória do meu pai, ao meu marido e meu filho, com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me mostrar que está sempre ao meu lado, ao colocar pessoas maravilhosas em meu caminho e por provar, através da minha fé, que mesmo o que dá errado, pode ser para o bem.

Ao meu pai, por ter me ensinado que não há outro caminho para o sucesso que não seja através dos estudos e do trabalho árduo, toda minha gratidão. Sem os esforços, insistência e renúncias dele, eu não teria chegado até aqui.

À minha mãe pelo amor incondicional, pelo exemplo de virtude e resiliência e pelo incansável apoio, suprindo meu filho de amor nos momentos que estive ausente nessa empreitada. Tenho certeza que suas orações em minha intenção foram atendidas. À minha família, pela eterna torcida.

Ao meu marido, por me incentivar a crescer sempre, pessoal e profissionalmente, pelo exemplo de determinação, disciplina e coragem e pelo apoio e compreensão a minha ausência e falta de tempo. Deixo aqui o meu muito obrigada pelo companheirismo, respeito e principalmente por não permitir que eu desistisse.

Ao meu filho Lorenzo, que após o seu nascimento, me fez perceber a vida de uma outra forma. Me fez perceber que tudo que vale a pena, requer trabalho duro e coração aberto. Fez aumentar dentro de em mim a vontade de ser uma pessoa melhor todos os dias – para ele e por ele.

À minha amiga Nara Oliveira, por ouvir meus desabafos nos momentos de desespero, sempre me acalmando e afirmando que tudo daria certo. Por me ajudar em momentos que ela também precisava de ajuda e mesmo assim, dedicou um pouco do seu restrito tempo a mim.

Ao meu orientador Prof. Theodoro Antoun Netto, por toda a orientação, paciência e incentivo durante esses anos de trabalho. Deixo aqui o meu respeito e admiração por sua excelência técnica e enorme habilidade em conduzir mentes iniciantes e confusas rumo a um trabalho científico de qualidade. Sua exigência e seu rigor na orientação, assim como sua amizade e serenidade, foram primordiais para a conclusão desse trabalho. Obrigada por me fazer acreditar que eu seria capaz, mesmo quando essa certeza me faltava.

À todos os colegas do Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), em especial aos técnicos Renan, Lucas, Luciano e Ricardo, por toda ajuda e amizade durante a condução dos testes experimentais. Ao técnico Marcos Pedreira, pelo apoio na condução dos testes de material e, principalmente, pela ajuda diária nos últimos dois meses, fundamental para que eu pudesse concluir esse trabalho dentro do prazo.

Ao CNPq, por disponibilizar a bolsa de estudos para que eu pudesse desenvolver esse trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS SUBMARINOS COM DANOS

Caroline Ferraz de Melo Netto

Dezembro/2017

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Oceânica

Através do desenvolvimento de modelos numéricos que utilizam o método de elementos finitos e de testes experimentais realizados em laboratório, o presente trabalho propõe estudar a iniciação e propagação do colapso em dutos com danos em grandes profundidades. Testes experimentais em escala reduzida de colapso propagante foram realizados, considerando diferentes espessuras de parede e diferentes geometrias de dano. Testes de material foram realizados para caracterizar as propriedades mecânicas do material das amostras testadas. Os modelos numéricos desenvolvidos foram calibrados e uma correlação numérico-experimental foi obtida. Análises numéricas em software de elementos finitos foram realizadas para simular geometrias, danos e material não contemplados nos testes experimentais. Um estudo paramétrico foi desenvolvido utilizando geometrias de dutos submarinos comerciais, visando estudar a influência da geometria do dano nas pressões de colapso inicial de dutos com diferentes espessuras de parede. Observou-se grande influência da magnitude e forma do dente nas pressões de colapso do duto indentado, tanto experimental quanto numericamente. Para dutos com grandes danos, uma nova trajetória de equilíbrio estável foi observada após o colapso inicial - revelando um comportamento diferente do reportado na literatura. Através do estudo paramétrico realizado, foi possível propor um modelo simplificado para prever a pressão de colapso de dutos com danos do tipo dente a partir da medida de ovalização máxima da seção danificada, da razão D/t e da pressão de colapso do duto intacto.

vii

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

ON THE COLLAPSE PRESSURE OF DENTED PIPELINES FOR DEEPWATER APPLICATIONS

Caroline Ferraz de Melo Netto

December/2017

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Ocean Engineering

The present work is related to collapse pressure and buckle propagation of dented pipelines installed in deep waters. Numerical models based on finite elements method and small-scale buckle propagation tests in dented samples were performed. These models and experimental tests have taken into account different pipeline and dent geometries. Material tests were performed to predict mechanical properties of the material of the samples tested. The numerical models were calibrated and a numericalexperimental correlation was obtained. A parametric study was developed using commercial pipeline geometries, aiming to study the influence of dent geometry and magnitude on the collapse pressures for dented pipelines with different wall thicknesses. Significant influence of magnitude and shape of dents in the collapse pressures was observed, both experimentally and numerically. For pipes with big dents, a new stable equilibrium trajectory was observed after the initial collapse revealing a different behavior from what has being reported in the literature. Through the parametric study, it was possible to propose a simplified model to predict the collapse pressure of dented pipes, using the maximum ovalisation of damaged section, the ratio D/t and the collapse pressure of the intact pipe.

SUMÁRIO

1	Inti	odução	1
2	Со	ntextualização, Motivação e Objetivos	3
3	Tes	stes experimentais	5
	3.1	Descrição das amostras	5
	3.2	Mapeamento geométrico	6
	3.3	Caracterização do material	8
	3.4	Indentação	15
	3.5	Teste de colapso propagante	23
	Prepa	ração das amostras	23
	Proce	dimento	24
	Result	ados	26
4	An	álise numérica	41
	4.1	Modelo Numérico	42
	Geom	etria	42
	Malha	de elementos finitos	43
	Carre	gamento	44
	Propri	edade do material	45
	4.2	Indentação colapso	47
	4.3	Iniciação/propagação estática	49
	4.4	Correlação numérico-experimental	50
5	Est	udo paramétrico	52

	5.2	Modelo Simplificado	68
6	Co	onclusões	71
7	Re	ecomendações para Trabalhos Futuros	72
8	Re	eferências	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomenclatura das amostras de colapso propagante	5
Figura 2 – Croqui do corte das varas	6
Figura 3 – Desenho esquemático das posições de mapeamento da geometria	7
Figura 4 – Corpos de prova para testes de tração	9
Figura 5 – Desenho esquemático das dimensões dos CP's do teste de tração	9
Figura 6 – Posições para medição da geometria dos CP's do teste de tração	10
Figura 7 – Posição dos extensômetros	11
Figura 8 – Corpo de prova instrumentado na máquina de tração	11
Figura 9 – Corpos de prova antes e depois dos testes de tração – D/t=15	13
Figura 10 – Corpos de prova antes e depois dos testes de tração – D/t=24	13
Figura 11 – Curva de material – D/t =15	14
Figura 12 – Curva do material – D/t = 24	14
Figura 13 – Par de Indentadores Esférico 1 – Diâmetro=35 mm	15
Figura 14 – Par de indentadores Esférico 2 – Diâmetro = 62,95 mm	15
Figura 15 – Par de indentadores plano	15
Figura 16 – Aparato de indentação – Indentador esférico 2	17
Figura 17 – Amostra sendo indentada – Indentador esférico 2	17
Figura 18 – Vista interna do tubo com dano – Indentador esférico 2	18
Figura 19 – Dano esférico simétrico	18
Figura 20 – Aparato de indentação - Indentador plano simétrico	19
Figura 21 – Vista interna do tubo com dano – Indentador plano simétrico	19
Figura 22 – Dano plano simétrico	19
Figura 23 – Rampa de aplicação dos deslocamentos	20
Figura 24 – Croqui de medição de ovalização	21
Figura 25 - Curva Força versus deslocamento – D/t = 15	22
Figura 26 – Curva força versus deslocamento – D/t = 24	22
Figura 27 –Câmara hiperbárica	23

Figura 28 – Tampas de vedação das amostras	24
Figura 29 – Vedação das extremidades das amostras	24
Figura 30 – Sistema de medição de volume expelido	25
Figura 31 – Pressão versus variação de volume interno – TP151A	28
Figura 32 – Pressão versus variação de volume interno – TP151B	29
Figura 33 – Croqui para Identificação dos patamares para cálculo da pressão propagação média e identificação do sentido de propagação	• de 30
Figura 34 – Pressão versus variação de volume interno – TP151C	31
Figura 35 – Pressão versus variação de volume interno – TP152A	32
Figura 36 – Pressão versus variação de volume interno – TP152B	33
Figura 37 – Pressão versus variação de volume interno – TP152C	34
Figura 38 – Pressão versus variação de volume interno – TP241A	35
Figura 39 – Pressão versus variação de volume interno – TP241B	36
Figura 40 – Pressão versus variação de volume interno – TP241C	37
Figura 41 – Pressão versus variação de volume interno – TP242A	38
Figura 42 – Pressão versus variação de volume interno –TP242B	39
Figura 43 – Pressão versus variação de volume interno – TP242C	40
Figura 44 – Condições de contorno no modelo numérico – 1/8	42
Figura 45- Vista longitudinal da malha do modelo numérico (l/D=6)	43
Figura 46 – Vista transversal da malha do modelo numérico	44
Figura 47 – Curva do material média – D/t = 15	46
Figura 48 – Curva do material média – D/t = 24	46
Figura 49 – Representação numérica dos indentadores	47
Figura 50 – Modelo numérico de contato	48
Figura 51 – Curva Pressão versus volume expelido	49
Figura 52 – Correlação Numérico-Experimental – D/t =15	51
Figura 53 – Correlação Numérico-Experimental – D/t =24	52
Figura 54 – Geometria do indentadores do estudo paramétrico	54

Figura 55 – Elementos na direção longitudinal - Estudo paramétrico	55
Figura 56 – Elementos na seção transversal - Estudo Paramétrico	55
Figura 57 – Curva do material – Aço X70	57
Figura 58 - Ovalizações finais para os 4 indentadores – profundidade 95 mm	57
Figura 59 – Danos com os indentadores R2 (esquerda) e P1(direita) – Vista XY	58
Figura 60 – Danos com indentador P2 – Vista XY	59
Figura 61 – Danos com indentador P3 – Vista XY	59
Figura 62 – Seção transversal com danos do indentador R2 – Vista YZ	60
Figura 63 – Seção transversal com danos do indentador P1 – Vista YZ	60
Figura 64 – Seção transversal com danos do indentador P2 – Vista YZ	61
Figura 65 – Seção transversal com danos do indentador P3 – Vista YZ	61
Figura 66 – Pressão versus Δ para D/t=24 e indentadores R2 e P2	62
Figura 67 – Pressão versus Δ o para D/t=15 e indentadores R2 e P2	63
Figura 68 – Pressão versus Δ para D/t=10 e indentadores R2 e P2	63
Figura 69 – Pressão versus Δ para danos com indentador P2	64
Figura 70 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ para o indentador P2	65
Figura 71 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t para indentador P2	66
Figura 72 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t para D/t=15	67
Figura 73 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – completo	68
Figura 74 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – Abordagem 2	69
Figura 75 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – Abordagem 3	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação dos tubos utilizados para fabricar as amostras	5
Tabela 2 – Mapeamento da geometria das amostras de colapso propagante	8
Tabela 3 – Mapeamento da geometria das amostras de colapso - intacto	8
Tabela 4 – Geometria dos corpos de prova de tração10	D
Tabela 5 – Propriedades do material – tubos indentados12	2
Tabela 6 - Propriedades do material - tubos intactos12	2
Tabela 7 – Geometria dos indentadores10	6
Tabela 8 – Deslocamentos prescritos nas indentações20	C
Tabela 9 – Ovalizações experimentais resultantes2	1
Tabela 10 – Resultados experimentais – Colapso propagante2	7
Tabela 11 – Resultados experimentais – Colapso intacto2	7
Tabela 12 – Refinamento de malha adotado em cada direção43	3
Tabela 13 – Cálculo do fator de carga axial equivalente4	5
Tabela 14 – Propriedade do material - média4	7
Tabela 15 – Pressões de colapso experimental e numérica 50	C
Tabela 16 – Ovalizações finais experimental e numérica5	1
Tabela 17 – Matriz de casos do estudo paramétrico5	3
Tabela 18 – Geometria dos dutos – Estudo paramétrico5	3
Tabela 19 – Geometria dos indentadores – Estudo paramétrico54	4
Tabela 20 – Nomenclatura e deslocamentos prescritos adotados	6
Tabela 21 – Propriedades do material - Aço X7050	6
Tabela 22 – Pressões de colapso - intacto6	1

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

- CP corpo de prova
- D diâmetro externo
- D_{max} diâmetro externo máximo
- D_{min}- diâmetro externo mínimo
- D_{med}- diâmetro externo médio
- D/t relação diâmetro-espessura
- D/tmed relação diâmetro-espessura média
- Dente danos do tipo mossa
- LTS Laboratório de Tecnologia Submarina
- P1 Indentador plano 1
- P2 Indentador plano 2
- P- pressão
- P_{CO} pressão de colapso do duto intacto
- P_{COD} pressão de colapso do duto com dano
- P_P pressão de propagação do colapso
- R1 indentador esférico 1
- R2 indentador esférico 2
- P1 indentador plano 1
- P2 indentador plano 2
- P3 indentador plano 3
- t espessura do tubo ou duto
- t_{med} espessura média do tubo ou duto
- δ deslocamentos
- Δ₀ Ovalização inicial
- Δ_{max}– Ovalização máxima
- Δ_{med} Ovalização média
- Δ_f Ovalização final após indentação

- ε deformação
- ϵ_{ln} deformação logarítmica
- $\epsilon^{\mathsf{p}_{\mathsf{ln}}}-\mathsf{deformação}$ logarítmica plástica
- σ tensão
- σ_T Tensão verdadeira

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual de exploração e produção de petróleo no mundo, e principalmente no Brasil, estruturas como dutos rígidos submarinos desempenham um papel crucial na economia, logística e segurança do setor. Com os campos de petróleo situados em profundidades cada vez maiores, as pressões hidrostáticas impostas aos dutos são cada vez maiores e o dimensionamento desses quanto à falha por colapso e sua eventual propagação têm levado a paredes com grandes espessuras, gerando desafios na fabricação e instalação e custo elevado.

O colapso de dutos submarinos submetidos a pressão hidrostática externa vem sendo estudado intensivamente e seu comportamento estrutural está bem entendido nos dias de hoje. Sabe-se que os parâmetros que possuem maior influência no colapso dessas estruturas são a razão diâmetro-espessura do duto (D/t), as propriedades do material, imperfeiçoes geométricas, anisotropias no escoamento e tensões residuais oriundas do processo de fabricação. O dimensionamento de projeto pelo critério de colapso envolve, de maneira simplista, propor para um determinado diâmetro a combinação de espessura de parede e tensão de escoamento - com uma determinada tolerância geométrica associada - capaz de prover resistência ao colapso do duto quando submetido ao diferencial de pressão em operação. Porém, projetar essas estruturas considerando que o colapso irá ocorrer sempre com a estrutura intacta não é apropriado e nem suficiente.

Importantes trabalhos realizados no passado, tais como em PALMER et al. (1975), KYRIAKIDES et al. (1981), KYRIAKIDES et al. (1984), ESTEFEN et al. (1992 e 1994), dentre outros, chamam atenção para a redução na resistência ao colapso e consequente falha local quando os dutos apresentam algum tipo de dano. Esses danos podem ser oriundos do impacto acidental de objetos, curvaturas excessivas durante o processo de instalação e operação ou perda de espessura devido ao desgaste e/ou corrosão. Essas falhas locais por sua vez podem se propagar e consumir grande parte das linhas a grandes velocidades. Segundo NETTO (1998), a pressão mínima capaz de fazer com que a falha se propague é chamada de pressão de propagação (P_p) e é uma pressão característica do duto. Ainda segundo NETTO (1998), normalmente a P_p corresponde a aproximadamente 20% da pressão de colapso do duto intacto (P_{co}). Portanto, o projeto de um duto submarino pode alternativamente considerar como critério de dimensionamento a pressão de propagação, isto é, quando se impõe que o diferencial de pressão de operação do

duto esteja abaixo da pressão de propagação, garantindo que uma eventual falha local não irá se propagar.

Esse trabalho propõe revisitar o estudo da resistência ao colapso de dutos indentados, aplicado a um cenário atual englobando dutos com paredes espessas. A estrutura dessa dissertação está descrita a seguir.

No Capítulo 2 é feita uma contextualização do problema estudado, seguido de uma descrição dos motivos que levaram a condução desse trabalho e os objetivos perseguidos durante a execução do mesmo.

O Capítulo 3 apresenta os testes experimentais realizados em laboratório em dutos em escala reduzida para determinação das pressões de colapso e mínima de propagação dos tubos com danos. Amostras com diferentes espessuras de parede foram utilizadas na campanha experimental e diferentes geometrias de danos foram impostos aos tubos. Nesse capítulo é possível observar que dependendo da magnitude e forma do dente imposto ao tubo, a pressão de colapso inicial pode assumir valores inferiores à pressão de propagação. Adicionalmente, pode surgir um novo equilíbrio estável que exige pressões mais altas do que a pressão encontrada no colapso inicial antes de dar início à propagação.

No Capítulo 4 são descritas as análises numéricas em software de elementos finitos que foram realizadas para simular situações testadas experimentalmente. São apresentados também os resultados dos testes de material que foram realizados com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas do material das amostras utilizadas. Uma boa correlação numérico-experimental foi obtida, com a qual os modelos numéricos foram calibrados. Esse modelo foi utilizado posteriormente em um estudo paramétrico com dutos reais.

Visando estudar o comportamento observado nos capítulos anteriores, agora aplicado a um duto com geometria e material reais e comerciais, no Capítulo 5 é apresentado um estudo paramétrico utilizando modelos numéricos calibrados. Novamente, diferentes geometrias tanto do duto quanto do dente foram exploradas nessas análises. Com esse estudo foi possível propor um modelo simplificado para prever a pressão de colapso de dutos com danos do tipo dente a partir da medida de ovalização máxima da seção danificada, da razão D/t e da pressão de colapso do duto intacto.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações e conclusões desse trabalho e no Capítulo 7 são sugeridos alguns pontos a serem melhor estudados em trabalhos futuros.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Com as demandas oriundas da exploração de petróleo em águas ultra profundas impondo carregamentos cada vez mais severos aos dutos, tanto de fabricação e instalação quanto de operação, e com critérios de projeto cada vez mais restritivos, as paredes dos dutos que operam nesse cenário estão cada vez mais espessas.

No Capítulo 1 foi mencionada a importância do estudo da pressão de colapso dos dutos indentados e de se considerar que essa falha pode eventualmente se propagar de maneira catastrófica. Diversos trabalhos foram desenvolvidos na tentativa de se prever a redução da capacidade de um duto em resistir ao colapso e sua posterior propagação.

KYRIAKIDES et al. (1984), estudaram diversos tubos de aço carbono com diversas geometrias e intensidades de dentes para uma faixa de D/t entre 33 e 43. Nesse trabalho foi concluído que a ovalização final obtida era o parâmetro que mais influenciava no colapso. Como um trabalho subsequente, PARK et al. (1994) estudaram dutos comerciais de alumínio para uma faixa de D/t entre 19 e 37 com dentes oriundos de indentadores esféricos e assimétricos e as conclusões foram similares. Foi então proposta uma curva universal de resistência ao colapso para dutos com dentes (UCRC – *Universal Collapse Resistance Curve*), com a qual é possível prever a pressão de colapso de um determinado duto que apresente dano utilizando apenas os valores de ovalização da seção mais deformada do duto.

Em ESTEFEN et al. (1992) foram investigados dutos com danos oriundos do impacto acidental de objetos modelados com forma do tipo "faca", posicionados transversalmente ao comprimento, para dutos com D/t 20 e 25. Concluíram que a magnitude dos dentes mostrava significativa influência na redução da resistência ao colapso dos dutos indentados – quanto maior a magnitude do dente, maior é a redução na pressão de colapso.

Sabe-se segundo KYRIAKIDES e CORONA (2007) que a pressão de propagação depende principalmente da razão D/t e das propriedades do material e que não é influenciada pelo dano inicial do duto. KHALILPASHA (2013) também estudou o efeito dos danos do tipo dente na pressão de propagação. Nesse trabalho

três valores de imperfeições foram utilizados como dano em dutos com D/t iguais a 20 e 25, onde foi concluído que houve uma redução na pressão de colapso dos dutos conforme a intensidade dos danos nos mesmos aumentava.

Conforme foi brevemente comentado no Capítulo 1, importantes trabalhos foram desenvolvidos para dutos com D/t acima de 20 e com datas relativamente antigas. Nos últimos anos, poucos trabalhos podem ser encontrados sobre pressão de colapso de dutos com dentes e com razão diâmetro-espessura abaixo de 20. Um trabalho recente de SOUZA et al. (2017) contempla um estudo com testes experimentais em escala real de dutos de 8 polegadas de diâmetro, com D/t iguais a 10, 15 e 20. Nesse trabalho foi encontrado para o D/t = 10 um comportamento até então não reportado na literatura. Foi observado um aumento da resistência a propagação do colapso após a amostra sofrer o colapso inicial.

Os experimentos apresentados em SOUZA et al (2017) foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE/UFRJ. Durante as análises numéricas realizadas para dimensionamento dos indentadores e acessórios necessários para a realização dos testes de propagação, foi observado que a forma dos dentes afeta a pressão de colapso dos dutos. Adicionalmente, dependendo da magnitude do dano, dois fatos interessantes foram observados: a pressão de colapso inicial ficava abaixo da pressão de propagação; após o colapso inicial, ocorria um aumento significativo da resistência a propagação, formando um pico com valores de pressão acima da pressão de propagação. Assim, esses comportamentos novos juntamente com um número reduzido de publicações sobre o fenômeno de iniciação da propagação nos últimos anos serviram de motivação para o estudo mais aprofundado dos fenômenos observados.

O objetivo principal dessa dissertação é desenvolver um método simplificado para o cálculo da pressão de colapso de dutos com danos na forma de dentes. Além disso, secundariamente, obter evidências experimentais adicionais sobre a influência da magnitude do dano na forma da trajetória de equilíbrio estável após o colapso inicial.

3 TESTES EXPERIMENTAIS

Esse trabalho envolveu a execução de testes experimentais de colapso de tubos intactos, de colapso propagante em tubos com danos, ensaios de indentação e testes de tração para caracterização do material. Os testes de colapso foram feitos sob carregamento de pressão hidrostática externa em câmara hiperbárica e os testes de indentação e de material foram realizados em máquina de tração.

No total, foram realizados 14 testes de colapso, 12 indentações e 10 testes de tração, todos no LTS.

3.1 Descrição das amostras

Para os testes experimentais foram utilizadas seis varas de tubo de aço inox sem costura com 5,5m cada uma, com as especificações apresentadas na Tabela 1.

Número de Varas	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Material
3	73,03	3,05	5500	AISI304
3	73,03	5,16	5500	AISI304

Tabela 1 – Especificação dos tubos utilizados para fabricar as amostras

Para os testes de colapso propagante de tubo com dano, foram utilizadas duas varas de cada D/t, sendo retiradas 3 amostras de cada vara, cada uma com 1700 mm de comprimento, totalizando 12 amostras. Para os testes de colapso do tubo intacto, foram confeccionadas duas amostras de 1100 mm cada, uma de cada vara de cada D/t. Para os testes de material, 6 amostras, uma de cada vara, com comprimento de 400 mm foram fabricadas. As amostras do teste de colapso receberam as identificações ilustradas na Figura 1.



Figura 1 – Nomenclatura das amostras de colapso propagante

A identificação das amostras de colapso foi análoga: TCXXYZ, sendo TC=Teste de Colapso, XX = D/t, Y=número da vara e Z=posição na vara. Nesse caso, como só foi retirado uma amostra de cada vara, o código Z ficou sendo igual a "A".

A identificação das amostras destinadas aos testes de material também é similar: TPXXY-n. O indicador da posição na vara não é necessário para esse caso. Como foram confeccionadas 2 amostras para cada vara, o número n serve para diferenciar uma da outra (n=1 ou 2).

A Figura 2 ilustra como as amostras foram cortadas de cada vara, com os respectivos comprimentos e nomenclaturas adotados.



Figura 2 - Croqui do corte das varas

3.2 Mapeamento geométrico

Foi realizado um levantamento das propriedades geométricas de cada uma das amostras. O diâmetro externo (D) foi medido em doze pontos igualmente espaçados ao longo da circunferência e em 09 seções transversais ao longo do comprimento total. Essas medidas foram obtidas através de um paquímetro calibrado. Para medição de espessura (t) foi utilizado um micrômetro que registrou valores nas duas extremidades de cada tubo com espaçamento angular de 30°. A Figura 3 mostra esquematicamente as nove seções transversais (S1, ..., S9), as extremidades B1 e B2 e a divisão angular equidistante ao longo da circunferência.



Figura 3 – Desenho esquemático das posições de mapeamento da geometria

Este conjunto de dados foi utilizado para calcular o diâmetro médio (D_{med}), espessura média (t_{med}), razão diâmetro-espessura média (D/t_{med}), ovalização média (Δ_{0med}) e ovalização máxima (Δ_{0max}) de cada amostra. Obteve-se a ovalização (Δ_0) das seções transversais medidas, definidas da seguinte forma, segundo KYRIAKIDES et al. (2007):

$$\Delta_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$
[1]

Na Tabela 2 são apresentados esses dados obtidos para cada amostra destinada aos testes de colapso propagante em tubos com dano. A linha identificada como "média" representa a média de cada parâmetro, considerando as 6 amostras de cada D/t. A maior ovalização foi 0,34%, encontrada na amostra TP241A. E a menor ovalização foi de 0,07%, identificada nas amostras TP241B e TP242B.

Amostra	D/t _{med}	D _{med} (mm)	t _{med} (mm)	Δ _{0 med} (%)	Δ _{0 max} (%)				
	D/t=15								
TP151A	14,8	72,91	4,92	0,18%	0,24%				
TP151B	14,7	72,95	4,96	0,14%	0,31%				
TP151C	14,7	73,06	4,96	0,22%	0,21%				
TP152A	14,9	72,97	4,91	0,19%	0,31%				
TP152B	14,6	73,00	5,00	0,10%	0,24%				
TP152C	14,7	72,99	4,96	0,09%	0,27%				
Média	14,74	72,98	4,95	0,15%	N/A				
		D/	ťt=24						
TP241A	24,6	73,5	3,0	0,12%	0,34%				
TP241B	24,4	73,57	3,02	0,07%	0,24%				
TP241C	24,8	73,66	2,97	0,10%	0,27%				
TP242A	24,5	73,49	3,01	0,17%	0,17%				
TP242B	23,5	73,44	3,12	0,07%	N/A				
TP242C	23,0	73,53	3,20	0,20%	0,24%				
Média	24,13	73,54	3,05	0,12%	0,24%				

Tabela 2 – Mapeamento da geometria das amostras de colapso propagante

A Tabela 3 mostra os valores obtidos nas medições realizadas nas amostras da vara 3, para cada D/t, destinadas aos testes de colapso com amostras intactas.

Tabela 3 – Mapeamento da geometria das amostras de colapso - intacto

Amostra	D/t_{med}	D _{med} (mm)	t _{med} (mm)	Δ _{0 med} (%)	$\Delta_{0 \max_{max_{med}}}(\%)$	Δ _f (%)
Amostras Intactas						
TC153_i	14,9	73,270	4,930	0,08%	0,17%	N/A
TC243_i	24,0	73,340	3,060	0,07%	0,14%	N/A

Vale notar que os valores nominais para a razão D/t foram 14 e 24. Porém, após as medições geométricas das amostras, observou-se que os valores médios para a menor razão foi de aproximadamente 15. Por essa razão as nomenclaturas se referem as relações D/t como sendo iguais a 15 e 24.

3.3 Caracterização do material

O objetivo dos testes de material é obter as propriedades mecânicas do material dos tubos utilizados como amostras nos testes experimentais. Testes de tração foram realizados para obter a curva tensão-deformação do material.

Os testes de tração consistem na aplicação de uma carga axial trativa em um corpo de prova com geometria e dimensões iniciais padronizadas, sendo realizada

simultaneamente a medição das variações de comprimento do mesmo. Esses testes foram realizados utilizando uma máquina de ensaios de tração, compressão e fadiga INSTRON 8802 com capacidade para 250kN.

Para isso, foram confeccionados 12 corpos de prova, 2 para cada vara. A Figura 4 mostra esquematicamente o corpo de prova sendo retirado longitudinalmente do tubo (a), um croqui da geometria (b) e seção transversal de dois corpos de prova, um de cada D/t (c). O comprimento L, e a largura b, nominais foram iguais a 200 mm e 12 mm, respectivamente, e a espessura foi a espessura do tubo correspondente – conforme mostra a Figura 5.



Figura 4 – Corpos de prova para testes de tração



Figura 5 – Desenho esquemático das dimensões dos CP's do teste de tração

Os corpos de prova foram fabricados nessa geometria por questão de simplicidade no processo de usinagem. Apesar de não seguirem o padrão estabelecido pela norma ASTM E8/E8M–09, as propriedades mecânicas necessárias para a posterior reprodução numérica dos experimentos são bem caracterizadas usando-se essa geometria simplificada.

Cada corpo de prova foi dividido em cinco seções, 2A, 1A, 00, 1B e 2B, e as medidas de largura e espessura de cada uma foram registradas, sendo a última medida na linha de centro (LC). A Figura 6 mostra a divisão adotada.



Figura 6 – Posições para medição da geometria dos CP's do teste de tração

Obteve-se então um valor médio para esses parâmetros. Com esses valores médios, calcula-se a área média da seção transversal de cada corpo de prova. Essas áreas, juntamente com as medições de variação de comprimento durante o teste, serviram para calcular as deformações e então obter a curva tensão versus deformação. A geometria dos corpos de prova dos tubos destinados aos testes de colapso propagante é apresentada na Tabela 4.

	TP2	41-1	TP1	51-1	TP2	42-1	TP1	52-1
Seção	b (mm)	t (mm)						
2A	11,90	2,90	11,90	4,93	11,75	3,21	11,85	5,20
1A	11,90	2,85	11,85	4,94	11,70	3,19	11,85	5,16
0	11,85	2,80	11,85	4,94	11,70	3,19	11,90	5,12
1B	11,90	2,85	11,85	4,94	11,80	3,16	11,70	5,05
2B	11,85	2,89	11,85	4,96	11,85	3,16	11,60	4,99
Média	11,88	2,86	11,86	4,95	11,76	3,18	11,78	5,10
	TP241-2		TP151-2		TP242-2		TP152-2	
Seção	b (mm)	t (mm)						
2A	11,80	2,88	11,85	4,87	11,90	3,14	11,85	5,20
1A	11,80	2,87	11,90	4,83	11,90	3,12	11,85	5,11
0	11,80	2,85	11,80	4,84	12,00	3,07	11,80	5,09
1B	11,75	2,83	11,80	4,84	12,00	3,04	11,80	5,07
2B	11,75	2,84	11,80	4,83	11,90	2,99	11,75	5,04
Média	11,78	2,85	11,83	4,84	11,94	3,07	11,81	5,10

Tabela 4 – Geometria dos corpos de prova de tração

As aquisições de dados de deformação nos corpos de prova foram obtidas com auxílio de extensômetros. Inicialmente testou-se um corpo de prova de cada vara. A

instrumentação em cada corpo de prova foi feita através de 1 *clip gage* e dois *strain gages*. De um lado do corpo de prova foi colado um *strain gage* bi-axial – medindo deformações nas direções longitudinal e transversa, e um *clip gage* medindo deformações longitudinais e do outro lado um *strain gage* uniaxial – medindo deformações na direção longitudinal do corpo de prova. A Figura 7 mostra o corpo de prova já instrumentado com extensômetros e um croqui indicando a posição de cada um no mesmo.



Figura 7 – Posição dos extensômetros

A Figura 8 mostra o corpo de prova posicionado na máquina de tração instrumentado com os *strain gages* e *clip gage*.



Figura 8 – Corpo de prova instrumentado na máquina de tração

Posteriormente, os dados aquisitados foram utilizados para a obtenção da curva tensão-deformação.

A partir dessa curva é possível obter o módulo de elasticidade E, o coeficiente de Poisson v, a tensão de escoamento a uma deformação de 0,2%, σ_0 e a tensão de proporcionalidade σ_{prop} . A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam esses parâmetros para os tubos indentados e intactos, respectivamente.

СР	E(GPa)	v	σ₀ (MPa)	σ _{prop} (MPa)
TP151	186,23	0,29	203,96	75,35
TP152	188,57	0,30	221,29	77,81
TP241	186,67	0,28	303,22	89,63
TP242	188,61	0,28	255,16	92,34

Tabela 5 – Propriedades do material – tubos indentados

Tabela 6 - Propriedades do material - tubos intactos

СР	E(GPa)	v	σ ₀ (MPa)	σ _{prop} (MPa)
TP153	199,11	0,2735	318,16	140,46
TP243	180,50	0,2615	237,41	148,23

Vale notar que os resultados apresentados levam em consideração os valores medidos pelos *strain gages* até uma deformação entre 4% e 5% e, posteriormente os valores medidos pelos *clip gages*. Como foram utilizados 2 *strain gages* longitudinais, foi calculada uma curva média dos dados aquisitados de cada um dos *strain gages*.

Devido os testes com os primeiros corpos de prova terem sido válidos, os corpos de prova com n=2 foram instrumentados apenas com *clip gages* para corroborar os resultados encontrados nos primeiros testes. Caso houvesse alguma divergência, um novo corpo de prova seria instrumentado com *strain gages* novamente. Como foram obtidos dados do *clip gage* oriundos de dois corpos de prova, uma curva média foi utilizada para os dados aquisitados desse tipo de extensômetro.

A Figura 9 e a Figura 10 mostram os corpos de prova antes e após os testes de cada D/t. Observa-se que em alguns deles, houve ruptura do corpo de prova.



Figura 9 – Corpos de prova antes e depois dos testes de tração – D/t=15



Figura 10 – Corpos de prova antes e depois dos testes de tração – D/t=24

Como a curva tensão x deformação não considera a área transversal instantânea e nem o comprimento do corpo de prova em cada instante de carga para determinação da deformação subsequente, para uma melhor precisão, a curva de tensão verdadeira x deformação logarítmica foi calculada, utilizando as equações abaixo:

$$\sigma_T = \sigma \times (1 + \varepsilon)$$
^[2]

$$\varepsilon_{LN} = \ln(1 + \varepsilon) \tag{3}$$

A média das curvas tensão verdadeira x deformação logarítmica dos resultados do *clip gage* foi utilizada para cálculo da curva final tensão x deformação de engenharia. Os resultados para o tubo TP15 e TP24 são apresentados na Figura 11 e na Figura 12, respectivamente.



Figura 12 – Curva do material – D/t = 24

3.4 Indentação

Para os testes de colapso propagante em tubos com dano, foram escolhidas três geometrias diferentes para o dano: duas esféricas e uma plana. Para tal, foram utilizados 3 pares de indentadores de maneira que o dano imposto ao tubo fosse simétrico. Os indentadores esféricos possuem 62,95 mm e 35 mm de diâmetro, mostrados na Figura 13 e na Figura 14, respectivamente e o plano possui 110 mm de comprimento, 80 mm de largura e 19 mm de espessura, conforme Figura 15. A Tabela 7 apresenta um resumo da geometria dos indentadores.



Figura 13 – Par de Indentadores Esférico 1 – Diâmetro=35 mm



Figura 14 - Par de indentadores Esférico 2 - Diâmetro = 62,95 mm



Figura 15 – Par de indentadores plano

Indentadores	Forma	Dimensões (mm)	
		Diâmetro	Lxbxt(*)
R1	Esférico	35,00	N/A
R2	Esférico	62,95	N/A
P1	Plano	N/A	110x80x19

Tabela 7 – Geometria dos indentadores

(*) L= comprimento axial, b=largura e t=espessura

O procedimento da indentação consiste em acoplar os indentadores na máquina de tração e com a ajuda de uma girafa posicionar a seção de menor espessura do tubo alinhado com os indentadores e com a horizontal, de forma simétrica. Na Figura 16 é mostrado esse posicionamento. Após essa etapa, define-se na máquina o deslocamento total a ser prescrito pelos indentadores contra a amostra, assim como a taxa de aplicação desse deslocamento. A aquisição dos dados desse ensaio inclui os deslocamentos registrados pelo transdutor de deslocamento da máquina, força registrada por uma célula de carga com capacidade para 250 kN e os deslocamentos registrados por um relógio comparador instalado nos indentadores. A Figura 16 mostra uma amostra pronta para receber um dano com o indentador esférico 2 (R2) e na Figura 17 uma amostra já com o dano. A Figura 18 apresenta uma vista interna da seção do tubo que foi indentada. Já na Figura 19 é possível observar a simetria do dano. Todos os danos foram posicionados na seção S3 de cada tubo e no ângulo correspondente a menor espessura medida na extremidade B1.



Figura 16 – Aparato de indentação – Indentador esférico 2



Figura 17 – Amostra sendo indentada – Indentador esférico 2



Figura 18 – Vista interna do tubo com dano – Indentador esférico 2



Figura 19 – Dano esférico simétrico

Na Figura 20 é possível observar o aparato de indentação utilizando o indentador plano e o relógio comparador posicionado. A Figura 21 mostra uma vista do interior do tubo após a indentação com a forma prismática. O dano final imposto a amostra TP152A, plano e simétrico, pode ser observado na Figura 22.



Figura 20 – Aparato de indentação - Indentador plano simétrico



Figura 21 – Vista interna do tubo com dano – Indentador plano simétrico



Figura 22 – Dano plano simétrico

Comparando a Figura 19 e a Figura 22, pode-se observar a diferença entre as formas finais dos danos feitos com indentador esférico e plano, respectivamente.

Na Tabela 8 é listada a forma do indentador utilizado em cada amostra, assim como os deslocamentos e taxas de carregamento prescritos e o posicionamento angular do cada dano adotado. A rampa de aplicação dos deslocamentos é explicada na Figura 23.

Amostra	Forma do Indentador	Deslocamento prescrito na máquina (mm)	Posicionamento angular (grau)	Taxa de aplicação do deslocamento (mm/min)
TP151A	R2	23	120	
TP151B	R2	30	90	
TP151C	R1	33	60	
TP152A	P1	22	0	2
TP152B	R2	45	120	
TP152C	R2	15	300	
TP241A	R2	25	270	
TP241B	R2	30	0	
TP241C	R2	45	330	2
TP242A	P1	22	210	2
TP242B	R2	15	60	
TP242C	R1	34	30	

Tabela 8 – Deslocamentos prescritos nas indentações



Figura 23 – Rampa de aplicação dos deslocamentos
Após o procedimento de indentação, as amostras são retiradas da máquina de tração e as medidas de diâmetro máximo e mínimo são realizadas, conforme Figura 24. As ovalizações finais são calculadas através da formulação já apresentada na equação [1].



Figura 24 – Croqui de medição de ovalização

Os resultados das indentações são apresentados na Tabela 9. As ovalizações resultantes variam de 9% a 39%.

Amostra	Forma do Indentador	Ovalização experimental resultante (%)
TP151A	R2	17,2
TP151B	R2	25,6
TP151C	R1	25,5
TP152A	P1	24,9
TP152B	R2	38,8
TP152C	R2	10,6
TP241A	R2	16,8
TP241B	R2	23,2
TP241C	R2	36,0
TP242A	P1	23,2
TP242B	R2	9,0
TP242C	R1	20,7

Tabela 9 – Ovalizações experimentais resultantes

A seguir são apresentados graficamente os dados aquisitados durante os testes de indentação. Com esses dados foi possível plotar as curvas de força *versus* deslocamento para cada amostra indentada, conforme ilustrado na Figura 25 e na Figura 26.



Figura 25 - Curva Força versus deslocamento – D/t = 15



Figura 26 – Curva força versus deslocamento – D/t = 24

3.5 Teste de colapso propagante

Os testes de colapso foram realizados com uma câmara hiperbárica, com capacidade para 15000 psi, equipada com transdutor de pressão com capacidade para 10000 psi, interligada a uma unidade de pressurização hidro-pneumática com capacidade para 30000 psi. Ela é conectada e monitorada por um computador com software de aquisição de dados e controle de processo dedicados. A câmara possui 2400 mm de comprimento e diâmetro interno igual a 200 mm e apenas um acesso em uma das extremidades, com o qual é vedado através de uma tampa anel BX. A Figura 27 mostra uma visão geral da câmara hiperbárica, (a) e (b), e uma imagem detalhada da tampa de vedação da mesma.



Figura 27 – Câmara hiperbárica

Preparação das amostras

Após as amostras serem indentadas, a vedação das extremidades é feita. Para tal, são utilizadas tampas de vedação fabricados em pares para cada D/t. Cada par possui dois diâmetros: um equivalente ao diâmetro interno da amostra e outro equivalente ao diâmetro externo. Elas possuem furos que permitem o preenchimento interno e a retirada de ar das amostras. A Figura 28 mostra a geometria dessas tampas.



Figura 28 – Tampas de vedação das amostras

Essas tampas impõem a primeira barreira de vedação interna e sua fixação às amostras é feita através de resina epóxi de cura rápida, preenchendo o espaço tampatubo. Além dessa, uma segunda barreira – agora externa, é feita com uma lona de borracha e fixada com abraçadeiras de metal. A Figura 29 apresenta a amostra com as duas vedações.



Figura 29 - Vedação das extremidades das amostras

A última etapa de preparação das amostras é o preenchimento interno do tubo com água e a colocação de um tubo de aço (*tubing*) que permitirá a coleta do líquido que será expulso do interior da amostra para o exterior da câmara durante a propagação do colapso.

Procedimento

Com a amostra indentada, vedada e internamente preenchida com água, iniciase a montagem da mesma dentro da câmara hiperbárica. A amostra é posicionada no interior da câmara e em seguida as conexões são feitas. As conexões entre o interior da amostra e o exterior da câmara, o interior e exterior da câmara e os sistemas de retirada de ar (*vent*) foram feitas através de tubos de aço passantes pela tampa da câmara (*tubings*). O *tubing* que comunica o interior da amostra ao exterior da câmara é conectado a um sistema de coleta. Esse sistema monitora o peso de água (e consequentemente o volume de água) expelida ao longo do teste com aquisição contínua durante todo o teste. A Figura 30 mostra o sistema de coleta.



Figura 30 - Sistema de medição de volume expelido

Após conclusão das conexões, a câmara é vedada e dá-se início ao enchimento e posterior pressurização da mesma.

O enchimento da câmara e pressurização externa da amostra é feito com água doce, através de uma bomba hidropneumática, até o colapso inicial local. A taxa de pressurização desejável é 50 psi/min até o colapso inicial. A pressão na câmara hiperbárica é obtida usando transdutor de pressão calibrado e aferido, conectado ao sistema de aquisição de dados. A pressão no interior da câmara é monitorada e registrada durante todo o teste por um sistema de aquisição de dados dedicado. Esse sistema mostra ao longo do teste os valores de pressão no interior da câmara versus

volume expelido do interior da amostra. Quando a amostra colapsa, a pressão no interior da câmara cai e o maior valor de pressão registrado até esse momento define a pressão de colapso inicial.

Após o colapso inicial, a pressão continua caindo, significando que a amostra continua a se deformar localmente na região do colapso inicial. Há então uma flutuação da pressão devido a amostra estar se deformando para formar o perfil de propagação. Espera-se até que a pressão no interior da câmara atinja um patamar e/ou cesse o fluxo de fluido hidráulico para o exterior da câmara.

Após a pressão no interior da câmara atingir um patamar, deve-se reiniciar o bombeamento de água para o interior da câmara. Essa pressurização deve ser feita através de um bombeamento lento de água para o interior da câmara de forma a garantir a propagação quase-estática do colapso. Quando o fluido interno da amostra voltar a ser expelido, significa que a propagação foi iniciada na pressão mínima de propagação. Nesse momento, a pressão deve ser mantida aproximadamente constante. A velocidade de propagação é controlada pela vazão de fluido expelido e de forma a manter a pressão aproximadamente constante. A propagação do colapso deve ser monitorada até que o colapso se propague pelo comprimento desejado.

Quando esse comprimento é atingido, o teste é encerrado e a câmara hiperbárica é despressurizada e posteriormente esvaziada. A amostra é então retirada da câmara e uma inspeção visual é feita.

Resultados

A seguir os resultados dos testes experimentais de colapso propagante obtidos para as amostras com danos são apresentados. A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam uma compilação dos resultados obtidos para as amostras com danos sem danos, respectivamente. As pressões de colapso obtidas para os tubos intactos foram de 6115 psi (D/t=15) e 2243 psi (D/t=24).

26

ID_Amostra	Pressão Máxima (psi)	Pressão de colapso inicial (psi)	Pressão mínima de propagação (psi)
	D	/t=15	
TP151A	2552	2552	1749
TP151B	2326	2326	1786
TP151C	2448	2448	1836
TP152A	2007	1583	1765
TP152B	3112	2077	1808
TP152C	3232	3232	1815
D/t=24			
TP241A	1297	1297	618
TP241B	1039	1039	577
TP241C	778	756	537
TP242A	670	670	585
TP242B	1759	1759	618
TP242C	1223	1223	655

Tabela 10 - Resultados experimentais - Colapso propagante

Tabela 11 - Resultados experimentais - Colapso intacto

ID Amostra	Pressão de colapso (psi)	Pressão de colapso (MPa)
TP153_i	6115	42
TP243_i	2243	15

A seguir são apresentados os gráficos de pressão *versus* variação de volume da amostra obtidos em cada um dos testes realizados. Em cada gráfico são listados relação diâmetro-espessura (D/t), ovalização máxima inicial antes do dano e ovalização máxima após indentação de cada amostra. A pressão de colapso inicial e a pressão de propagação obtidas nos testes também são mostradas nos gráficos.



Figura 31 – Pressão versus variação de volume interno – TP151A

A Figura 31 apresenta o resultado para a amostra TP151A, cujo dano causou uma ovalização final de 17%. Para essa amostra observa-se que o colapso local é seguido de uma instabilidade dinâmica do tubo, representada no gráfico através de uma linha pontilhada vermelha. Ao colapsar, a variação de volume do tubo acarreta uma queda de pressão no interior da câmara hiperbárica já que o fluido pressurizado (água) é aproximadamente incompressível. A deformação dinâmica do tubo cessa quando a pressão no interior da câmara decai abaixo da pressão mínima necessária para continuar a propagação do colapso. Essa queda de pressão no interior da câmara em função da variação do volume da amostra é dependente do volume de água pressurizada. Quanto maior o volume de água pressurizada no interior da câmara, maior o comprimento da amostra consumido dinamicamente no pós-colapso.

A pressão de colapso do duto indentado, chamado aqui de P_{COD} , corresponde ao primeiro pico registrado no gráfico, 2552 psi. A pressão de propagação P_P , é a média dos valores de pressão do patamar formado (1749 psi) e é representada nos gráficos como uma linha horizontal pontilhada preta. O segundo pico nunca havia sido observado e/ou reportado em trabalhos anteriores, exceto em SOUZA et al. (2017). Nesse trabalho, comportamento similar foi observado experimentalmente em um duto

em escala real com relação diâmetro-espessura D/t) igual a 10, com dano com ovalização final média igual a 27%. Como será corroborado posteriormente, vale notar que valor encontrado no segundo pico depende da forma e magnitude do dente. Portanto, nesse caso, a pressão de iniciação corresponde ao valor encontrado no segundo pico e não é associada à pressão de colapso inicial do duto indentado (P_{COD}).



Figura 32 – Pressão versus variação de volume interno – TP151B

A Figura 32 mostra o resultado para amostra TP151B, cujo dano imposto causou uma ovalização final de aproximadamente 26%. Essa amostra apresentou uma pressão de colapso inicial igual a 2326 psi e a pressão de propagação média equivalente a 1786 psi (média dos valores obtidos nos dois patamares) e é novamente representada pela linha pontilhada horizontal. O aumento da pressão quando a variação de volume atinge pouco mais de 70% se deu quando a propagação do colapso atingiu a extremidade B1. Nesse ponto, a propagação nesse sentido é interrompida pela presença do *plug*, que funciona como um enrijecedor (como um *buckle arrestor*). Posteriormente a pressão no interior da câmara volta a subir até que atinja o valor mínimo necessário para iniciar a propagação da falha no sentido oposto (extremidade B1).

Para uma melhor compreensão da maneira como a pressão de propagação média é calculada, o croqui apresentado na Figura 33 mostra os dois patamares utilizados para tal circulados em azul. Ainda nesse croqui é possível entender como o sentido de propagação pode ser identificado, no qual uma representação esquemática do posicionamento da seção do dano (S3) e das extremidades do tubo (B1 e B2) foi sobreposta ao gráfico.



Figura 33 – Croqui para Identificação dos patamares para cálculo da pressão de propagação média e identificação do sentido de propagação



Figura 34 – Pressão versus variação de volume interno – TP151C

O teste com a amostra TP151C, cuja ovalização após indentação foi de 25%, apresentou dois momentos de instabilidade, como pode ser observado na Figura 34. Nesse caso o colapso se propagou primeiro no sentido da seção S9, atingiu a extremidade fazendo com que a pressão subisse novamente. Um novo momento de colapso dinâmico ocorreu e só então o colapso se propagou para a extremidade B1. As pressões de colapso inicial (P_{COD}) e de propagação obtidas foram 2448 psi e 1836 psi, respectivamente.



Figura 35 – Pressão versus variação de volume interno – TP152A

Na Figura 35 mostra-se o resultado para a amostra TP152A, cujo dano causou uma ovalização máxima de 25%. A ovalização final foi semelhante às amostras TP151B e TP151C, porém agora com a forma plana. Observou-se que apesar das ovalizações dessas três amostras terem sido próximas, a pressão de colapso inicial da TP152A foi menor que as anteriores – 1593 psi. Essa pressão de colapso se mostrou menor do que a pressão de propagação, igual a 1765 psi. Outro ponto relevante desse teste foi o aumento significativo da pressão antes de dar início à propagação. Esse aumento significa que após o colapso inicial, uma nova trajetória de equilíbrio estável ocorreu antes do início da propagação da falha.



Figura 36 – Pressão versus variação de volume interno – TP152B

Durante o teste da amostra TP152B, sob a qual foi imposta a maior ovalização da campanha (39%), observou-se dois momentos de instabilidade: um no colapso inicial e outro quando a propagação foi cessada ao atingir a extremidade B2 e recomeçou para o sentido oposto. Nesse caso, a pressão de colapso inicial ficou acima da pressão de propagação – sendo 2077 psi e 1808 psi, respectivamente. Entretanto, logo após o colapso inicial houve novamente um aumento significativo na pressão, representando um aumento na capacidade de resistir a propagação do colapso. Logo em seguida foi observado um momento de instabilidade, quando só a partir daí o colapso se propagou. Quando o colapso atingiu a extremidade B2, ocorreu uma nova instabilidade e a propagação continuou no sentido oposto.



Figura 37 – Pressão versus variação de volume interno – TP152C

A amostra TP152C recebeu a menor ovalização para esse D/t: 11%. A pressão de colapso inicial foi de 3232 psi. Conforme mostrado na Figura 37, o colapso inicial ocorreu dinamicamente. A propagação do colapso ocorreu primeiro no sentido da extremidade B1 (até 30% do volume expelido) e depois para o sentido da extremidade B2. A pressão média de propagação obtida foi de 1815 psi.

A seguir são apresentados os resultados e comentários para as amostras com D/t igual a 24.



Figura 38 – Pressão versus variação de volume interno – TP241A

A amostra TP241A, com uma ovalização pós dano de 17%, apresentou P_{COD} igual a 1297 psi. Apresentou uma instabilidade no momento de colapso e uma pressão de propagação média de 618 psi. Observando o gráfico, conclui-se que a propagação ocorreu primeiro no sentido da extremidade B1.



Figura 39 – Pressão versus variação de volume interno – TP241B

A amostra TP241B, cuja ovalização máxima imposta foi de 23%, apresentou uma P_{COD} e P_P iguais a 1039 psi e 577 psi, respectivamente. O colapso inicial se deu de forma quase estática e a propagação ocorreu primeiro para a extremidade B1.



Figura 40 – Pressão versus variação de volume interno – TP241C

O tubo TP241C recebeu a maior ovalização das amostras com D/t=24: 36%. A pressão de colapso inicial foi de 756 psi e a de propagação de 537 psi. Nota-se que houve um novo pico de pressão antes iniciar a propagação de colapso, com valor muito próximo ao encontrado para o colapso, e que a propagação ocorreu novamente no sentido da extremidade B1.



Figura 41 - Pressão versus variação de volume interno - TP242A

Para a amostra TP242A foi imposta uma ovalização máxima de 23% e a pressão de colapso inicial P_{COD} , obtida foi de 670 psi. Conforme mostrado na Figura 41, a pressão nesse pico inicial se mostrou acima, porém muito próxima, da pressão de propagação que foi de 585 psi.



Figura 42 – Pressão versus variação de volume interno –TP242B

O tubo TP242B recebeu a menor ovalização de todas as amostras (9%). O colapso ocorreu de forma dinâmica, sob a pressão de 1759 psi, e como pode ser observado na Figura 42, consumiu todo o comprimento da amostra entre a seção do dano (S3) e a extremidade B1. A pressão mínima de propagação foi bem estabelecida e a média dos valores foi de 618 psi.



Figura 43 – Pressão versus variação de volume interno – TP242C

Os resultados obtidos para a amostra TP142C são apresentados na Figura 43. A pressão de colapso inicial foi de 1223 psi e a pressão de propagação igual a 655 psi. Os resultados mostram que a propagação ocorreu primeiro no sentido da extremidade B2 e por já ter apresentado um patamar bem estabelecido até então, o teste foi finalizado antes da propagação no sentido oposto.

Considerações

Nota-se nos resultados e comentários supracitados que em alguns casos houve instabilidade dinâmica no momento do colapso, fazendo com que a pressão no interior da câmara caísse abruptamente e um grande volume de água fosse expulso do interior da amostra. Esse comportamento pode ser observado nas amostras TP151A, TP151C, TP152B, TP152C, TP241A e TP242B. Em alguns casos, esse colapso dinâmico consome o comprimento da amostra entre as seções S3 e a extremidade mais próxima – B1.

Considerando tanto os tubos com D/t=15 quanto D/t=24, os resultados de pressão de colapso inicial para amostras com ovalizações finais parecidas, porém

oriundas de diferentes indentadores, mostram uma significativa influência da forma do dente. Esse resultado se mostra diferente em relação ao que foi feito no passsado, podendo essa diferença estar associada a faixa de D/t e ovalizações consideradas em cada estudo.

Para D/t=15, foi obtida uma diferença de aproximadamente 5% na pressão de colapso inicial entre os indentadores esféricos R1 e R2 – o que para efeitos de engenharia não é significativa. Já entre os indentadores R2 e P1, a diferença foi de 32%. O mesmo aconteceu com os tubos com D/t=24: uma diferença de aproximadamente 17% (só não foi menor porque as ovalizações finais ficaram com uma diferença de 2%) na pressão de colapso inicial entre os indentadores esféricos R1 e R2. Entre os indentadores R2 e P1, a diferença foi de 36%.

Os testes experimentais chamaram a atenção para um comportamento não típico do processo de colapso e iniciação da propagação. Para amostras com danos muito grandes, após o colapso inicial, a pressão subiu de forma significativa - em alguns casos chegando a ficar acima da pressão de colapso inicial e pressão de propagação. Esse comportamento foi reportado por SOUZA et al. (2017) para amostras em escala real com D/t=10.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Análises foram realizadas utilizando modelos numéricos tridimensionais baseados no método dos elementos finitos para obter estimativas da pressão de colapso inicial e da pressão de propagação dos dutos intactos e com danos submetidos à pressão externa. Os resultados experimentais foram utilizados para calibração dos modelos e as análises foram realizadas com o software Abaqus versão 6.14.

As amostras testadas no Capítulo 3 foram reproduzidas no modelo numérico com base nos dados obtidos nas medições, ou seja, reproduzindo diâmetro médio, espessura média e ovalização máxima. Com esses modelos, uma correlação numérico-experimental foi obtida. A pressão de colapso foi calculada para duas amostras, uma de cada D/t. A indentação de cada amostra amostras foi reproduzida numericamente e os resultados de força versus deslocamento aplicados foram comparados com os obtidos experimentalmente. A pressão de colapso inicial e a pressão de propagação do colapso dos tubos com dano foram obtidas e também comparadas com os resultados obtidos nos experimentos.

41

4.1 Modelo Numérico

Geometria

Os tubos utilizados nos experimentos descritos no Capítulo 3 foram modelados em elementos finitos e analisados no software Abaqus 6.14. A geometria dos modelos foi baseada nos dados de medição apresentado na Tabela 2.

Com o objetivo de reduzir o tempo de processamento numérico, o modelo foi elaborado adotando simetrias em relação aos planos X-Y, Y-Z e X-Z, ou seja, representando metade do tubo na direção longitudinal e 1/4 da seção transversal. Sendo então reduzido a um oitavo de seu tamanho original.

Para as simetrias em relação ao plano Y-Z, os graus de liberdade de translação foram restringidos em X. Em relação ao plano X-Y, os graus de liberdade de translação foram restringidos em Z. Em relação ao plano X-Z, os graus de liberdade de translação foram restringidos em Y. A seção x=L/2, foi deixada livre na direção axial. A Figura 41 apresenta as condições de contorno aplicadas nos modelos e eixos de referência.



Figura 44 – Condições de contorno no modelo numérico – 1/8

A ovalização dos tubos foi simulada através de uma imperfeição local iniciada em x=0, representada pela seguinte expressão (NETTO, 1998):

$$w_o(\theta) = -\Delta_0 \exp\left[-\beta \left(\frac{x_1}{D}\right)^2\right] \cos(2\theta)$$
[4]

onde, w_0 é o deslocamento radial, θ é a coordenada angular polar medida a partir do eixo x₂. A máxima amplitude da ovalização é Δ_0 e β é o parâmetro multiplicador que

determina a extensão da imperfeição. Seguindo o mesmo procedimento de estudos anteriores, para análises similares em NETTO (1998), β foi considerado como 2 diâmetros (diâmetro externo nomina).

Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos foi gerada a partir de elementos sólidos quadráticos do tipo C3D27R do ABAQUS que se caracterizam como tridimensionais, com 27-nós, 3 graus de liberdade de translação por nó e integração reduzida. Para geração da malha de elementos finitos foi utilizado um programa em código Fortran. Os dados de entrada do programa são os parâmetros geométricos dos tubos que devem ser representados pela malha, como comprimento, raio interno, espessura, número de elementos nas 3 direções e a ovalização inicial.

Em NETTO (1998), um estudo de sensibilidade de malha foi realizado com o objetivo de selecionar o refinamento que apresentasse um melhor resultado em função do tipo de carregamento aplicado e geometria do modelo. Visto a similaridade das análises presentes nesse trabalho, em outros trabalhos já publicados na literatura, assim como em outras correlações numérico-experimentais realizadas pela equipe do LTS, inclusive utilizando experimentos em escala real, para os modelos desenvolvidos neste estudo foi utilizado o mesmo procedimento de geração de malha. A Tabela 12 apresenta o número de elementos considerados no refinamento da malha do modelo numérico, nas direções circunferencial, radial e longitudinal.

Tubo	Circunferencial	Radial	Longitudinal
Nº de elementos	22	4	27

Tabela 12 – Refinamento de malha adotado em cada direção

A Figura 45 e a Figura 46 mostram uma vista longitudinal de um tubo com I/D=6 e uma vista transversal, respectivamente.



Figura 45- Vista longitudinal da malha do modelo numérico (I/D=6)



Figura 46 – Vista transversal da malha do modelo numérico

Carregamento

Nas análises de colapso, foi considerada apenas a pressão externa pura agindo na superfície externa do tubo, utilizando o Método de Riks. Este método usa a magnitude da carga como uma variável adicional, envolvendo simultaneamente carga e deslocamento, sendo recomendado em casos onde a resposta da relação cargadeslocamento mostra uma rigidez negativa e a estrutura deve liberar energia de deformação para permanecer em equilíbrio, como ocorre no colapso ou flambagem. Para avaliar o progresso da solução, o programa usa o comprimento do arco, ao longo do caminho estático de equilíbrio no espaço carga-deslocamento.

Para simular a mesma condição de carregamento do experimento descrito no Capítulo 3, foi aplicada, além da pressão radial longitudinal, uma pressão equivalente a área transversal da cabeça de vedação, na direção longitudinal ao longo de toda espessura da extremidade do tubo. Sendo o fator de carga calculado como:

$$F_{CARGAEQUIVALENTE} = \frac{A_{VED}}{A_{TUBO}}$$
^[5]

onde A_{VED} é a área transversal externa, exposta ao carregamento hidrostático, da cabeça de vedação e A_{TUBO} é a área transversal do tubo.

A Tabela 13 apresenta os valores do fator de carga equivalente calculados para os tubos D/t=15 e D/t=24.

	D/t=15	D/t=24
Diâmetro médio (mm)	73,3	73,3
Espessura média (mm)	3,1	4,9
Área transversal da cabeça de vedação (mm ²)	4220	4220
Área transversal do tubo (mm²)	678	1060
Fator de carga equivalente	6,2	4,0

Tabela 13 - Cálculo do fator de carga axial equivalente

Propriedade do material

Nos modelos numéricos, foram adotadas as curvas de tensão verdadeira *versus* deformação logarítmica obtidas a partir da média dos testes de tração de cada tubo. A Figura 47 e a Figura 48 apresentam as curvas de material utilizadas nos modelos numéricos dos tubos D/t=15 e D/t=24, respectivamente. A Tabela 14 mostra os valores de tensão de proporcionalidade σ_p , limite de escoamento, σ_0 , módulo de elasticidade E, e coeficiente de Poisson v, referentes às curvas.





Tensão verdadeira versus Deformação plástica logarítimica (curva média)





СР	E (GPa)	v	σ₀ (MPa)	σ_{prop} (MPa)
TP15-1_med	187,40	0,29	212,63	76,58
TP24-1_med	187,64	0,28	279,19	90,99

Tabela 14 – Propriedade do material - média

4.2 Indentação colapso

O processo de indentação das amostras foi simulado numericamente e para isso cada indentador teve sua geometria modelada no ABAQUS. Os indentadores foram representados por elementos rígidos do tipo R3D4, com os nós de referência sempre posicionados no centro geométrico dos mesmos. As condições de contorno aplicadas foram simetria em relação aos três eixos (1/8 do indentador é modelado) e apenas o grau de liberdade de translação em y foi deixado livre para prescrever o deslocamento desejado para cada modelo.

As mesmas dimensões apresentadas na Tabela 7 foram utilizadas para a modelação numérica de cada indentador. A Figura 49 mostra o modelo numérico de um indentador esférico (a) e de um plano (b).



Figura 49 – Representação numérica dos indentadores

O modelo numérico de contato entre o indentador e o tubo foi feito por um par de contato de superfície "dominante" para superfície "escrava" e, inicialmente, foi utilizado o comando "*hard*" do *Abaqus*, onde a força de contato entre as superfícies é descontínua – zero antes do contato e assume o valor correspondente quando o contato se estabelece. Posteriormente o comando "exponencial" foi usado, onde a força de contato varia exponencialmente com a distância entre as superfícies. A Figura 50 ilustra a resposta dos dois modelos quanto a curva de força versus deslocamento. Observa-se nesse gráfico, ondulações na resposta que não são representativas e por isso, o modelo que utiliza uma aplicação da pressão entre as duas superfícies de maneira exponencial foi escolhido para as análises apresentadas nesse trabalho.



Figura 50 – Modelo numérico de contato

4.3 Iniciação/propagação estática

Análises numéricas de propagação estática foram realizadas a fim de obter uma estimativa da pressão de propagação. Para tal, dois modelos foram construídos, um para cada D/t, utilizando as geometrias médias e as curvas de material médias. A malha utilizada e as condições de contorno são as mesmas dos modelos anteriores. Porém, nesses modelos, um plano com os graus de liberdades fixos foi adicionado e posicionado no centro do tubo e um novo contato superfície-superfície entre os elementos da parede interna do tubo e esse novo plano foi estabelecido. Como o método de solução utilizado foi o Método de Riks, não é fornecido como saída a variação de volume expelido durante a propagação. Assim, o volume de líguido interno expulso durante a propagação foi estimado através de um cálculo simplificado utilizando o conceito de energia de deformação. A curva que se deseja obter é a curva de pressão versus variação de volume, onde a área abaixo da mesma nos fornece a energia de deformação plástica durante o colapso e a propagação do mesmo. O método de Riks nos fornece essa energia e a pressão para cada incremento. Assim, com uma conta inversa, podemos calcular o volume para cada um dos incrementos. A Figura 50 mostra o resultado da pressão de propagação para o modelo com geometria e propriedade de material médios.



Figura 51 - Curva Pressão versus volume expelido

4.4 Correlação numérico-experimental

Análises numéricas foram realizadas para simular numericamente os testes experimentais realizados e os resultados obtidos. No total foram confeccionados 14 modelos numéricos, 7 para cada D/t. Uma curva universal foi gerada considerando um tubo intacto, com a geometria equivalente à média obtida nas medições e com a curva de material média. As demais 6 rodadas consideraram a geometria de cada amostra e a curva de material da vara correspondente.

A Tabela 15 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos nos experimentos e no modelo numérico. A relação entre eles variou de 0,3% a 6,3%, sendo as diferenças atribuídas às diferenças nas ovalizações finais, simplificações realizadas com relação ao mapeamento geométrico dos tubos, às propriedades dos materiais e às condições de carregamento. A Tabela 16 apresenta as ovalizações obtidas após as indentações experimentais e numéricas.

Amostra	Pressão colapso experimental (MPa)	Pressão Colapso numérica (MPa)	Erro (%)
TP151A	17,6	17,6	0,3
TP151B	16,0	15,5	3,7
TP151C	16,9	15,9	5,8
TP152A	10,9	11,1	-1,6
TP152B	14,3	14,7	-2,7
TP152C	22,3	23,0	-3,2
TP241A	8,9	8,6	4,4
TP241B	7,2	7,2	-0,4
TP241C	5,2	5,6	-6,3
TP242A	4,6	4,4	5,8
TP242B	12,1	11,6	4,8
TP242C	8,4	8,1	4,0

Tabela 15 – Pressões de colapso experimental e numérica

Amostra	Ovalização experimental (%)	Ovalização numérica (%)	Erro na ovalização (%)
TP151A	17	18	5,8
TP151B	26	25	-1,4
TP151C	26	25	-0,6
TP152A	25	26	3,5
TP152B	39	39	0,0
TP152C	11	11	5,1
TP241A	17	16	-4,1
TP241B	23	23	-0,3
TP241C	36	36	-0,1
TP242A	23	22	-6,1
TP242B	9	8	-6,3
TP242C	21	20	-4,2

Tabela 16 – Ovalizações finais experimental e numérica

Na Figura 52 e na Figura 53 são apresentados os resultados graficamente para D/t igual a 15 e 24, respectivamente.



Figura 52 – Correlação Numérico-Experimental – D/t =15



Figura 53 – Correlação Numérico-Experimental – D/t =24

Os resultados apresentados acima indicam uma boa correlação entre o modelo numérico e os testes experimentais. Observou-se que a curva universal apresentou uma boa correlação quando as ovalizações são pequenas, até 10%. Resultados com indentadores esféricos R1 e R2 apresentaram diferenças irrelevantes. O resultado que mais se destacou foi para tubos com danos planos, que apresentaram decréscimos significativos na pressão de colapso inicial, considerando ovalizações semelhantes.

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

No Capítulo 4 foi apresentada a correlação numérico-experimental realizada. Com os resultados obtidos, pode-se mostrar que o modelo numérico proposto funcionou e apresentou uma representação aceitável e coerente do comportamento estrutural da estrutura real. Assim, uma série de análises numéricas foram realizadas para simular geometrias, danos e material não contemplados nos testes experimentais. Foi considerado para esse estudo um duto com diâmetro externo, espessuras e material comerciais reais. Um único diâmetro externo e três espessuras de parede foram adotados. O material escolhido foi o API X70, comumente utilizado na indústria *offshore*. Quatro indentadores foram considerados: um esférico e três planos, cada um com comprimento longitudinal diferente. Os danos foram especificados pelas profundidades de penetração dos indentadores. Foram prescritos de 6 a 8 profundidades diferentes para cada indentador e para cada D/t. A Tabela 17 apresentada a matriz de casos realizada, totalizando 96 casos.

D/t	Indentador	Profundidade do dano (mm)
10	Esférico – R2	0 (intacto)
15	Plano – P1	15
24	Plano – P2	25
	Plano –P3	35
		45
		55
		75
		95

Tabela 17 – Matriz de casos do estudo paramétrico

Geometria dos dutos e indentadores

Para esse estudo foi escolhido um duto com diâmetro externo de 8.6 polegadas (219 mm) e três espessuras de parede. As razões diâmetro-espessura consideradas foram: 10, 15 e 24; e a ovalização adotada foi de 0,2%. A Tabela 18 resume essas geometrias.

D/t	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Ovalização máxima (%)
10	219	21,90	
15	219	14,60	0,2
24	219	9,125	

Tabela 18 – Geometria dos dutos – Estudo paramétrico

Quatro indentadores foram propostos para essas análises. Um indentador com formato cilíndrico e três com formato plano dentre os quais de diferenciam apenas pelo comprimento axial. A Tabela 19 descreve a geometria e nomenclatura adotadas para os indentadores.

Indontadoros	dentadores Forma -	Dimensé	ŏes (mm)
indentadores		Diâmetro	L x b x t (*)
R2	Esférico	62,95	N/A
P1	Plano	N/A	300x300x60
P2	Plano	N/A	189x80x20
Р3	Plano	N/A	378x80x60

Tabela 19 – Geometria dos indentadores – Estudo paramétrico

(*) L= comprimento axial, b=largura e t=espessura

A geometria dos indentadores R2 e P1 foram pensadas de maneira a obter uma correlação com os indentadores testados experimentalmente. As razões diâmetro do indentador/diâmetro do tubo e comprimento do indentador/diâmetro do tubo foram mantidas iguais àquelas apresentadas pelas amostras testadas no Capítulo 3. Para o caso esférico, o indentador D1 não foi reproduzido, pois seus resultados não apresentaram diferenças relevantes em relação ao indentador D2.

O indentador P2 possui o comprimento axial igual ao diâmetro do indentador R2. Almeja-se com isso, avaliar diretamente o impacto da forma do dano no decréscimo da pressão de colapso inicial. Para o indentador P3 foi considerado um comprimento axial correspondente ao dobro do P2, com o objetivo de avaliar o efeito do comprimento na pressão de de colapso inicial.



Na Figura 54 são apresentadas ilustrações das geometrias propostas.

Figura 54 - Geometria do indentadores do estudo paramétrico

Modelo Numérico

O modelo numérico é análogo ao apresentado no Capítulo 4. As mesmas condições de contorno e simetria foram adotadas, assim como a malha de elementos finitos, tipos de elementos e modelo de contato. O comprimento axial total considerado foi de 2600 (12D), porém apenas 1300 mm foram modelados por questão de simetria. A malha utilizada é reproduzida nas Figuras Figura 55 e Figura 56.



Figura 55 – Elementos na direção longitudinal - Estudo paramétrico



Figura 56 - Elementos na seção transversal - Estudo Paramétrico

Condições de carregamento

A sequência de carregamento adotada nas análises é: indentação, retirada do indentador e aplicação das pressões.

A indentação é feita através de prescrição de deslocamentos no nó de referência do indentador na direção do duto e logo depois ocorre a retirada do indentador e a seção avariada é estabelecida. O último passo é a aplicação do carregamento de pressão radial e axial equivalente para simular a pressão hidrostática. A Tabela 20 apresenta a nomenclatura adotada para identificar cada caso analisado nesse estudo e os deslocamentos considerados para indentar os dutos. Na nomenclatura, "EP_DtYY_XX" pode ser lido como: EP=Estudo Paramétrico; Dt = razão diâmetro/espessura; YY o valor de D/t (10, 15 ou 24); XX = nome do indentador (R2, P1, P2 ou P3. O índice "i" identifica o caso intacto e os índices "d" identificam o caso cujo modelo apresenta um dente e os números seguintes indicam os deslocamentos que foram prescritos pelo indentador para causar o dano.

Caso ID	Deslocamento prescrito (mm)
EP_DtYY_XX_i	N/A
EP_DtYY_XX_d15mm	15
EP_DtYY_XX_d25mm	25
EP_DtYY_XX_d35mm	35
EP_DtYY_XX_d45mm	45
EP_DtYY_XX_d55mm	55
EP_DtYY_XX_d70mm	70
EP_DtYY_XX_d95mm	95
EP_DtYY_XX_d125mm (*)	125

Tabela 20 – Nomenclatura e deslocamentos prescritos adotados

(*) apenas para o indentador R2

Curva do Material

O material escolhido para esse estudo foi o aço X-70 por ser um aço muito utilizado em dutos offshore. Foi adotada uma curva tensão-deformação teórica já utilizada e ajustada em trabalhos anteriores realizados no LTS, a partir de testes de material. Na Tabela 21 são apresentadas as propriedades mecânicas e na Figura 57 é plotada a curva tensão-deformação plástica logarítmica usada como dado de entrada no Abaqus.

Tabela 21 – Propriedades do material - Aço X70

Material	E(MPa)	Poisson	σ (MPa)	σ_{prop}
X70	193796,4	0,3	65	474,5


Figura 57 – Curva do material – Aço X70

Indentação

A seguir serão apresentadas imagens ilustrando as diferentes formas e profundidades dos danos simulados nesse estudo paramétrico. Para efeito de simplificação, apenas os casos com D/t=24 são apresentados.

A Figura 58 mostra os 4 indentadores utilizados no estudo, posicionados simetricamente em relação ao duto, e uma vista isométrica das diferentes formas assumidas pelas seções transversais após o processo de endentação: R2 (a), P1 (b), P2 (c) e P3 (d).



Figura 58 - Ovalizações finais para os 4 indentadores - profundidade 95 mm

Na Figura 59 apresenta vistas no plano XY do duto nas quais é possível comparar três diferentes profundidades de dano, 15 mm em (a), 55 mm em (b) e 95 mm em (c), para o indentador R2 (lado esquerdo) e para o P1 (lado direito). O mesmo é apresentado na Figura 60 e na Figura 61 para os indentadores P2 e P3, respectivamente.



Figura 59 – Danos com os indentadores R2 (esquerda) e P1(direita) – Vista XY



Figura 60 – Danos com indentador P2 – Vista XY



Figura 61 – Danos com indentador P3 – Vista XY

A Figura 62, Figura 63, Figura 64 e Figura 65 apresentam as seções transversais resultantes do processo de indentação para três profundidades de dano: 15 mm (a), 55 mm (b) e 95 mm (c), para os indentadores R2, P1, P2 e P3, respectivamente.



Figura 62 – Seção transversal com danos do indentador R2 – Vista YZ



Figura 63 – Seção transversal com danos do indentador P1 – Vista YZ



Figura 64 – Seção transversal com danos do indentador P2 – Vista YZ



Figura 65 – Seção transversal com danos do indentador P3 – Vista YZ

5.1 Resultados - Pressão versus ovalização

A seguir são apresentados os resultados encontrados nas análises realizadas nesse estudo paramétrico. A compilação dos resultados de pressão de colapso inicial e de ovalização obtida após cada indentação, para cada indentador e cada D/t é mostrada graficamente. Os resultados para os dutos na condição intacta também foram compilados e podem ser vistos na Tabela 22.

Caso	Ovalização (%)	P _{co} (MPa)
EP_Dt10_i		119,4
EP_Dt15_i	0,2	71,44
EP_Dt24_i		30,52

Tabela 22 - Pressões de colapso - intacto

A Figura 66 mostra os resultados encontrados para a relação D/t=24, considerando os indentadores R2 e P2. Observa-se que para a mesma ovalização

final, as pressões de colapso para dutos com dentes planos foram menores do que para os dutos com dentes esféricos. Considerando que o indentador P2 possui um comprimento longitudinal igual ao diâmetro do R2, essa diferença está diretamente ligada à forma do dente. Nesse gráfico é possível comparar os resultados dos dutos com dentes em relação a curva do duto intacto. Observa-se que a curva não apresenta uma boa aproximação para a maioria dos casos, inclusive entre ovalizações oriundas do mesmo indentador. A curva universal se apresenta de forma conservadora para dentes esféricos e não conservadora para dentes planos.

O mesmo comportamento foi observado para o D/t=15 e D/t=10, conforme mostrado na Figura 67 e na Figura 68, respectivamente.



Figura 66 – Pressão versus ∆ para D/t=24 e indentadores R2 e P2



Figura 67 – Pressão versus ∆ o para D/t=15 e indentadores R2 e P2



Figura 68 – Pressão versus Δ para D/t=10 e indentadores R2 e P2

Na Figura 69 são mostrados os resultados de P_{COD} versus ovalização obtidos para cada D/t, considerando dentes impostos utilizando o indentador plano P2. Como visto acima, o indentador plano apresentou resultados mais críticos em relação ao esférico. Por essa razão, foi dada maior ênfase a essa geometria de indentador nas análises a seguir. Conforme já esperado, para um mesmo D/t, quanto maior a ovalização, menor é a pressão de colapso (P_{COD}). Avaliando as três espessuras de parede, para uma mesma ovalização, quanto maior o D/t, menor é o valor de P_{COD} .



Figura 69 – Pressão versus Δ para danos com indentador P2

A Figura 70 mostra o decréscimo na resistência ao colapso (P_{COD}/P_{CO}) na presença de diferentes níveis de dente (ovalizações finais) para as três razões D/t. Notou-se que para uma mesma ovalização, os dutos com paredes mais finas apresentaram uma maior perda na capacidade de resistir ao colapso. Por exemplo, para uma ovalização em torno de 20%, essa redução é de 54% para o D/t = 10, de 66% para o D/t=15 e de 72% para o D/t=24 ($P_{COD}/P_{CO} = 0,46, 0,34 e 0,28,$ respectivamente).



Figura 70 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ para o indentador P2

Com os resultados mostrados até agora, constatou-se que tanto a geometria do duto (D/t) quanto a geometria do dente influenciam a pressão de colapso inicial do mesmo. Buscando uma alternativa mais realista para estimar a pressão de colapso de um duto com dente a partir de sua ovalização final, independente da forma, propõe-se, a partir de observação empírica, reportar os resultados P_{COD}/P_{CO} em função da ovalização multiplicada pelo D/t. A Figura 71 mostra essa proposta para os dutos com dentes do tipo P2 e o resultado é que as pressões de colapso inicial, que antes apresentavam diferenças significativas quando relacionadas apenas às ovalizações,

assumiram valores mais próximos quando as ovalizações foram multiplicadas pela razão D/t.



Figura 71 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ.D/t para indentador P2

O passo seguinte foi analisar o comportamento para todos os indentadores. A Figura 72 apresenta a curva P_{COD}/P_{CO} versus Δ^*D/t para todos os indentadores, considerando D/t=15. Como se pode constatar, os comprimentos dos indentadores não apresentaram relevância nos resultados, uma vez que os resultados para P1, P2 e P3 ficaram muito próximos. Por outro lado, ainda é possível observar uma dependência da forma do dano, visto que os resultados para R2 ficaram deslocados dos demais.



Figura 72 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ.D/t para D/t=15

Na busca de um procedimento simples para a estimativa da pressão de colapso de um duto que apresenta um dente pré-existente, foram reportados os resultados contemplando todos os indentadores, exceto o esférico, e todas as espessuras de parede. Uma vez que não foi possível eliminar a influência da forma, optou-se por trabalhar com a forma mais crítica - a plana. O que se obtém é uma nuvem de pontos muito próximos, conforme pode ser visto na Figura 73. Nesse gráfico são incluídos também dois resultados experimentais realizados no Capítulo 3, representados por quadrados sem preenchimento, que mostraram uma boa aderência aos resultados numéricos.



Figura 73 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – completo

5.2 Modelo Simplificado

A partir do gráfico apresentado na Figura 73, algumas abordagens podem ser adotadas para se obter, de forma simples, o decréscimo na pressão de colapso de um duto que apresente um dano na forma de dente. Para todas as abordagens, o procedimento de utilização do diagrama proposto é o mesmo. Para tal, precisa-se ter conhecimento da pressão de colapso do duto indentado em questão intacto, seja através dos valores de projeto ou de uma simulação numérica; a relação D/t; e da ovalização máxima na seção do dente. De posse do produto $\Delta^*(D/t)$, obtém-se do gráfico o valor da razão P_{COD}/P_{CO} correspondente e, consequentemente, o valor da pressão de colapso inicial.

Abordagem 1 – Utilizar a nuvem de pontos

Essa é a abordagem mais simples de todas, com a qual se obtém os valores de P_{COD}/P_{CO} graficamente, de forma visual, podendo optar pelo nível de conservadorismo a ser considerado.

Abordagem 2 – Ajustar uma curva média

Nessa abordagem, uma curva exponencial é ajustada inicialmente a todos os resultados usando o método dos mínimos quadrados. A equação exponencial foi adotada considerando-se a tendência dos resultados obtidos, mantendo-se como parâmetros de ajuste as variáveis α e β conforme

abaixo:

$$\frac{P_{COD}}{P_{CO}} = 1 - \alpha (1 - \beta^{-\Delta \frac{D}{t}})$$

Para fins de simplificação, os parâmetros α e β obtidos pelo método dos mínimos quadrados foram arredondados, conforme mostra a equação abaixo, representada graficamente na Figura 74. Essa curva apresentou um erro médio igual a 1,32% e uma correlação de 98%. A equação abaixo foi utilizada para definir essa curva.

$$\frac{P_{\rm COD}}{P_{CO}} = 1 - 0.8(1 - 2^{-\Delta \frac{D}{t}})$$



Figura 74 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – Abordagem 2

Abordagem 3 – Ajustar uma curva conservadora

Nessa abordagem, uma curva é ajustada de maneira que a maior parte dos pontos fiquem acima dela. Novamente uma curva exponencial foi escolhida para representar os pontos, conforme Figura 75. Para esse ajuste um erro médio de -9,32% foi encontrado. A correlação foi de 97%. O sinal negativo do erro médio indica o conservadorismo dessa abordagem. A seguir a equação matemática representativa da curva:



Figura 75 – Razão P_{COD}/P_{CO} versus Δ .D/t – Abordagem 3

Abordagem 4 – Ajustar uma curva para faixa de interesse

Nessa abordagem, uma curva é ajustada utilizando apenas os pontos que estejam dentro da uma faixa específica de ovalizações de interesse. Isso fará com que o erro associado a utilização da curva diminua e que seja possível trabalhar com níveis mais baixos de conservadorismo.

6 CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, observaram-se pontos interessantes em relação ao comportamento da estrutura quanto ao colapso quando apresentam diferentes geometrias de dano causado por dente.

Os testes experimentais realizados indicaram, logo de início, que dependendo do dano inicial imposto ao duto, a pressão de colapso inicial (P_{COD}) pode ter um valor menor do que a pressão mínima de propagação (P_P).

Outro ponto importante observado foi um aumento da resistência ao colapso após o colapso inicial e antes da propagação do mesmo. O aumento significativo da pressão antes de dar início à propagação significa que após o colapso inicial, uma nova trajetória de equilíbrio estável ocorreu antes do início da propagação da falha. Esse resultado sugere que a pressão necessária para que a propagação se inicie pode ser considerada igual ao valor encontrado no segundo pico e não associada à pressão de colapso inicial do duto indentado (P_{COD}). Em termos de dimensionamento de projeto, esse aumento na pressão a ser considerada como limite inferior significa que, para um mesmo coeficiente de segurança, o duto pode ter uma parede mais fina.

As análises numéricas realizadas foram uma importante etapa do estudo, possibilitando uma correlação numérico-experimental com resultados aderentes que possibilitaram validar e comprovar a confiança no modelo numérico desenvolvido. Os testes de material para uma representação fidedigna das propriedades mecânicas dos tubos e uma correta representação numérica dos fenômenos físicos envolvidos desempenharam um papel fundamental para tal.

Através de modelos numéricos representativos do comportamento estrutural dos dutos, foi possível fazer um estudo paramétrico, simulando geometrias e danos que não puderam ser reproduzidos experimentalmente. Novamente nessa etapa foram observados resultados interessantes. Foi possível concluir que, diferentemente do que se afirmou no passado, a forma do dente tem influência na pressão de colapso inicial para a faixa de D/t estudadas nesse trabalho.

A pressão máxima na segunda trajetória de equilíbrio estável antes da propagação da falha também é afetada pela forma e magnitude do dano. Isso se dá devido ao quão próximo ou afastado a forma do duto indentado está do perfil de propagação que o duto assume ao ser colapsado a partir de uma geometria intacta. Esse perfil pode ser entendido como o perfil de preferência do duto em propagar o

71

colapso, ou seja, o perfil que exige menor energia para a propagação. Assim, se o dano tiver uma forma muito longe da forma de menor energia, o duto precisará transformar o perfil indentado em um perfil que desprenda menor energia ao se propagar. Essa transformação exige uma energia maior, ou seja, fazendo com que a pressão necessária para tal seja superior.

Finalmente, através do estudo paramétrico e uma análise crítica dos resultados obtidos, foi possível desenvolver um modelo simplificado para se obter o decréscimo da pressão de colapso de um determinado duto causado por um dente. Os resultados apresentados em forma de gráficos podem servir como uma importante ferramenta de tomada de decisão sobre a necessidade de reparar um trecho de duto que apresente um dano, uma vez que é possível obter de forma simples o nível de redução da resistência ao colapso de cada caso.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um estudo mais detalhado sobre energias de deformações durante o processo de indentação e durante o colapso da estrutura intacta mostra-se importante e interessante para que se entendam melhor as diferenças encontradas para diferentes danos.

Outro item que deve ser explorado no futuro é o estudo da relação entre o dano inicial e a pressão máxima da segunda trajetória de equilíbrio estável. Para os casos em que a segunda trajetória de equilíbrio estável é bastante pronunciada - e particularmente quando a pressão máxima da mesma é superior à pressão de colapso inicial - deve ser avaliada, através de análises dinâmicas, qual é efetivamente a pressão de iniciação da propagação.

Outros tipos de danos localizados, como corrosão e desgaste, também podem causar o colapso local e posterior propagação da falha. Deve ser estudado se o comportamento observado para dentes com grandes magnitudes ocorreria de forma similar para esses casos.

Finalmente, testes experimentais com outras relações diâmetro-espessura e materiais serviriam para ampliar a base de dados que suportam as conclusões apresentadas nessa dissertação.

72

8 REFERÊNCIAS

ASTM E8/E8M – 09 - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

ESTEFEN, S. F., NETTO, T.A. ALVES, T. M. J., 1995. "Initiation and Propagation of Buckling in Deepwater Pipelines". *In: Proceedings of the IX International Symposium on Offshore Engineering.*, v.I., pp. 459-466, Rio de Janeiro.

ESTEFEN, S. F., NETTO, T.A., ALVES, T. M. J., 1992. "Residual Strength of Damaged Offshore Pipelines", *In Proceedings of the 11 th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. V. p. 233-238, Calgary, Sept.

KHALILPASHA, H., 2013 "Buckle Propagation in Ultra- Long Deep Subsea Pipelines", *KBR Technical Presentation*, Brisbane, Australia, Nov.

KYRIAKIDES, S. and BADCOCK, C.D., 1981. "Experimental Determination of the Propagation Pressure of circular Pipes", *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, v. 103, pp.328-336.

KYRIAKIDES, S., BADCOCK, C.D. and ELYADA, D., 1984. "Initiation of Propagation Buckles from Local Pipeline Damages", *ASME Journal of Energy Resources Technology*, v. 106, pp. 79-87.

KYRIAKIDES, S. and CORONA, E., 2007 *Mechanics of Offshore Pipelines*, 1ed. Elsevier.

NETTO T.A. and ESTEFEN S.F., 1996. "Ultimate strength behavior of submarine pipelines under external pressure and bending". *Journal Constructional Steel Research, v.* 28, pp. 137-151.

NETTO T.A., 1998. On the dynamics and arrest of propagating buckles on offshore pipelines. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.

PALMER, A.C. and MARTIN, J.H., 1975. "Buckle propagation in Submarine Pipelines", *Nature*, v. 254, pp.46-48.

PARK, T.-D. and KYRIAKIDES, S.,1994. "On the collapse of dented cylinders under external pressure", *International Journal Mechanic*, Sci. 38, pp. 557-578.

73

SOUZA A.F., SOLANO F.R., AZEVEDO F.B., et al., 2017. "Collapse propagation of deep water pipelines". *International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 62107, Trondheim, Norway, 25-30 June

ABAQUS/CAE, User's Manual, Version 6.14