

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE DANO PRÉ-EXISTENTE NAS PRESSÕES DE  
COLAPSO E DE PROPAGAÇÃO EM DUTOS SUBMARINOS

por

Matheus Freitas Kuhn

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

CIP – Catalogação na Publicação

Kuhn, Matheus Freitas

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE DANO PRÉ-EXISTENTE  
NAS PRESSÕES DE COLAPSO E DE PROPAGAÇÃO EM  
DUTOS SUBMARINOS / Matheus Freitas Kuhn. – 2021.

18 f.

Orientador: Felipe Tempel Stumpf

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de  
Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil, 2021.

1. Colapso. 2. Dutos Submarinos. 3. Geometria de Dano. I.  
Felipe Tempel Stumpf, Orient. II. Título.

Matheus Freitas Kuhn

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE DANO PRÉ-EXISTENTE NAS PRESSÕES DE  
COLAPSO E DE PROPAGAÇÃO EM DUTOS SUBMARINOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Escolher uma das áreas de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, novembro de 2021

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Departamento de Engenharia Mecânica – UFRGS, pelo ensino de qualidade e a transmissão eficiente dos conhecimentos aplicados na elaboração desta monografia.

Agradecimento ao Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, pelo fornecimento de recursos computacionais e por seu vasto conhecimento, compartilhado, em dutos submarinos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE DANO PRÉ-EXISTENTE NAS  
PRESSÕES DE COLAPSO E DE PROPAGAÇÃO EM DUTOS  
SUBMARINOS

**Kuhn, F. Matheus**

matheus.kuhn@ufrgs.br

***Resumo.** O colapso e a sua propagação em dutos submarinos são fenômenos de alta complexidade e abordados em projetos de linhas de exploração de petróleo e gás. Normas, como DNVGL-ST-F101, auxiliam no projeto destas linhas, no entanto, suas aplicações são restritas a duto com pequenas imperfeições, não conseguindo prever o comportamento da pressão de colapso e a pressão de propagação do colapso em tubulações sujeitas a danos maiores, como aqueles gerados por impactos de objetos ou embarcações. Além disso, a norma sugere que para estes casos se realize uma análise experimental ou pelo método dos elementos finitos. Dessa forma, este trabalho busca realizar uma análise do comportamento da pressão de colapso e da pressão de propagação do colapso para diferentes geometrias de endentadores através do uso do método dos elementos finitos. Um modelo numérico representativo foi gerado com o uso de análises explícitas e pelo método de RIKS. Os valores obtidos para cada geometria foram comparados e analisados. Foi possível verificar que dentre os endentadores modelados, o endentador com geometria cúbica gerou as maiores variações de pressão de colapso e de pressão de propagação do colapso. Além disso, quanto maior é o parâmetro ovalidade por endentação, maior é o impacto sobre a pressão de colapso e menor é a razão entre pressão de colapso e pressão de propagação do colapso. Danos com valores de ovalidade por endentação superiores a 35 % já podem iniciar propagação do colapso e a falha total da estrutura.*

***Palavras-chave:** Colapso, Dutos Submarinos, Geometria de dano*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

INFLUENCE OF PRE-EXISTING DAMAGE GEOMETRY ON COLLAPSE  
AND PROPAGATION PRESSURES IN SUBSEA PIPES

**Kuhn, F. Matheus**

matheus.kuhn@ufrgs.br

***Abstract.** The collapse and its propagation in subsea pipelines are highly complex phenomena and are addressed in oil and gas exploration line projects. Standards such as DNVGL-ST-F101 assist in the design of these lines, however, their applications are restricted to pipelines with small imperfections, failing to predict the behavior of the collapse and propagation pressure in pipelines subject to major damage, such as those generated by impacts from objects or vessels. In addition, the standard suggests that for these cases an experimental analysis or the finite element method is carried out. Thus, this work seeks to perform an analysis of the behavior of the collapse and propagation pressure for different indenter geometries through the use of the finite element method. A representative numerical model was generated using explicit analyzes and the RIKS method. The values obtained for each geometry were compared and analyzed. It was possible to verify that among the modeled indenters, the indenter with cubic geometry generated the greatest variations in collapse pressure and collapse propagation pressure. Furthermore, the greater the ovality per indentation parameter, the greater the impact on the collapse pressure and the smaller the ratio of collapse pressure to collapse propagation pressure. Damage with indentation ovality values greater than 35% can initiate collapse propagation and complete failure of the structure.*

**Key-words:** Collapse, Undersea Pipelines, Damage Geometry

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$P_c$	Pressão de colapso	[Pa]
$P_{c0}$	Pressão de colapso para tubulação sem dano	[Pa]
$E$	Módulo de Elasticidade	[Pa]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	
$t$	Espessura nominal	[m]
$D$	Diâmetro nominal	[m]
$P_{el}$	Pressão de colapso plástico	[Pa]
$P_{pl}$	Pressão de colapso elástico	[Pa]
$f_0$	Ovalização	
$P_{pr}$	Pressão propagação do colapso	[Pa]
$P_{pr0}$	Pressão propagação do colapso para tubulação sem dano	[Pa]
$f_y$	Tensão de Escoamento	[Pa]
$\alpha_{fab}$	Fator de fabricação	
$D_{max}$	Diâmetro máximo	[m]
$D_{min}$	Diâmetro mínimo	[m]
$OE$	Ovalidade por endentação	
$\varepsilon$	Deformação	
$\sigma$	Tensão	[Pa]
$E$	Módulo de Elasticidade	[Pa]
$\alpha$	Yield Offset	
$\sigma_y$	Tensão de escoamento	[Pa]
$n$	Coefficiente de encruamento	

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3	OBJETIVO .....	3
4	FUNDAMENTAÇÃO .....	3
5	METODOLOGIA .....	7
5.1	Condições de contorno.....	9
5.2	Malha .....	10
5.3	Análises.....	10
5.4	Tratamento dos dados numéricos .....	10
6	RESULTADOS .....	10
6.1	Análise da malha.....	10
6.2	Influência do dano sobre a pressão de colapso. ....	11
6.3	Influência do dano sobre a pressão de propagação colapso.....	14
7	CONCLUSÃO .....	16
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
9	APÊNDICES .....	18

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração de reservas de petróleo traz consigo os mais complexos desafios para a indústria de óleo e gás. Projetar tubulações que resistam aos efeitos altamente corrosivos do meio, e os esforços mecânicos dinâmicos e danos oriundos da instalação e operação destas tubulações é fundamental para garantir a segurança operacional do processo de exploração.

O projeto da espessura da parede de uma tubulação é geralmente alicerçado na capacidade de resistência de quatro requisitos: pressão interna, flexão da tubulação, cargas combinadas e pressão externa. Neste último requisito estão presentes a pressão de colapso e a pressão de propagação do colapso (JAEYOUNG,2009). Todos estes os itens acima citados são abordados em normas de projeto destas tubulações, e dentre estas normas destaca-se a DNVGL-ST-F101 – *Submarine Pipeline Systems*.

A instabilidade local, o colapso, de uma tubulação submetida a pressão externa vai ocorrer somente se houver algum tipo de imperfeição, sejam alterações geométricas do processo de fabricação, como ovalização e excentricidade, como também imperfeições geométricas geradas no processo de instalação ou operação da tubulação, como a flexão da tubulação e danos oriundos de impacto sobre a tubulação. Quando a exploração de petróleo e gás ocorre em mares com baixa profundidade, geralmente próximo à costa continental, estas tubulações estão sujeitas diretamente ao risco de serem danificadas com o impacto de objetos lançados ao mar, como âncoras, por exemplo. O impacto destes objetos leva à perda de rigidez local da estrutura e à nucleação do colapso da mesma. Além disso, outros mecanismos de falha podem ser ativados, como corrosão e desgaste. Uma das formas mais comuns de falha destas tubulações é devido à geração de endentações por impacto de objetos (DEMARS, 1977).

Uma vez que estas tubulações danificadas estão submetidas a pressão externa suficiente, o colapso local vai ocorrer, e caso se mantenha a magnitude da pressão externa, também será iniciada a propagação do colapso. As equações disponíveis na DNVGL-ST-F101 consideram as imperfeições (ou danos) apenas para cálculo da pressão de colapso da tubulação, no entanto, para os cálculos da pressão de propagação do colapso a questão da imperfeição não é dada como relevante. Além disso, a baixa disponibilidade de estudos referentes a danos gerados por impacto e sua correlação com a pressão de propagação do colapso abre precedente para realização de um estudo mais aprofundado sobre a propagação do colapso e sua relação com a geometria do dano, já que modificações no projeto da espessura de parede, como sua redução, implicam em redução considerável nos gastos tanto de fabricação, como de instalação e operação. Por outro lado, cautela deve ser mantida, uma vez que existem risco nestas operações de exploração e estes estão ligados a vidas humanas e marinhas como também ao meio ambiente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ovalizações e danos gerados nos dutos submarinos vão impactar diretamente em sua resistência mecânica (COSHAM, 2004; ZHAO,2020), a pressão de colapso,  $P_c$  e a pressão de propagação de colapso,  $P_{pr}$  podem ter seus valores alterados em virtude destes danos. O efeito da endentação sobre  $P_c$  é objeto de estudo de PARK e KYRIAKIDES (1995), no qual avaliaram o efeito de endentações sobre a pressão de colapso de dutos, e concluíram que a endentação reduz drasticamente a  $P_c$ . Além disso, realizaram um estudo numérico com o uso de endentadores esféricos com diâmetros diferentes e compararam estes resultados com dados experimentais. A Figura 1 apresenta alguns resultados onde pode-se verificar que para um mesmo valor de ovalidade por endentação,  $OE$ , são apresentados diferentes valores de  $P_c$ , para distintas dimensões de endentadores. Logo, para esta análise, a dimensão do endentador tem relação, mesmo pouca (4%), com a pressão de colapso.

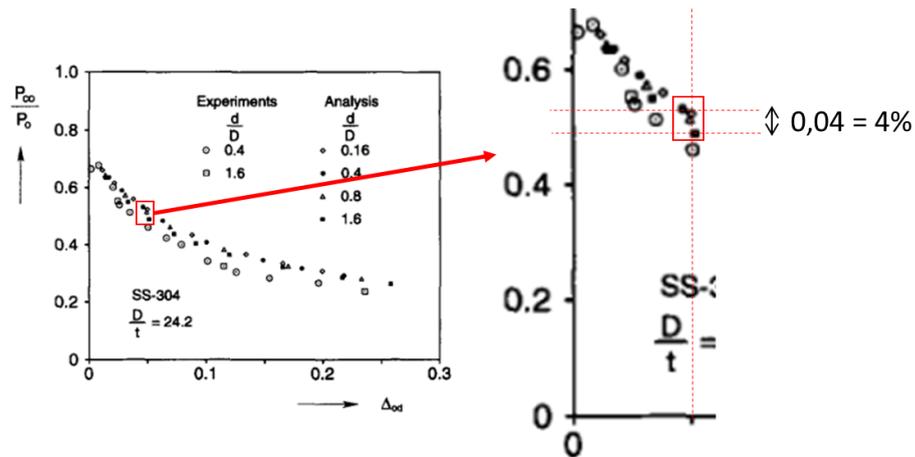


Figura 1 – Dimensão do endentador e sua relação com a  $P_c$ .  
Fonte: Adaptado de PARK e KYRIAKIDES (1995).

Chen (2019) estudou o efeito de endentações esféricas em tubulações submetidas à pressão externa. Em seu trabalho verificou que com o aumento da profundidade na qual o endentador é submetido, aumento do dano, ocorre redução da  $P_c$ , este comportamento foi verificado para diferentes razões entre o diâmetro externo e espessura da tubulação.

A influência da geometria da endentação na  $P_c$  e  $P_{pr}$  também foi estudada por Ramasamy (2014). Utilizando a simulação numérica avaliou três geometrias diferentes de endentadores com 11 dimensões cada uma. O resultado obtido para a pressão de colapso pode ser visualizado na Figura 2, na qual, nota-se que diferentes geometrias de endentadores levam a diferentes valores de  $P_c$ . Analisando a  $P_{pr}$ , o autor também pôde concluir que a geometria influencia em seu valor, porém não é notado uma tendência de redução como mostrada na Figura 2.

Ye (2016) comparou diferentes geometrias de endentadores (esférica e elipsoidal) e seus efeitos sobre a  $P_c$ . Em seu trabalho, conclui que as geometrias elipsoidais reduzem mais significativamente a pressão de colapso das tubulações do que as geometrias esféricas.

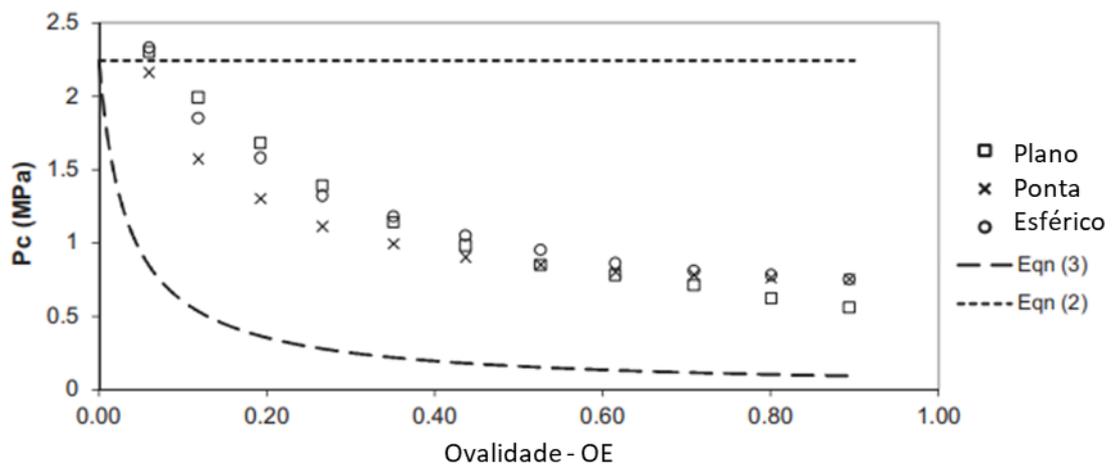


Figura 2 – Dimensão do endentador e sua relação com a  $P_c$ .  
Fonte: Adaptado de RAMASAMY (2014).

### 3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o efeito da geometria de um endentador no valor da pressão de colapso e na pressão de propagação do colapso através do uso de ferramenta computacional de simulação.

Os objetivos específicos são:

- Determinar, dentre as geometrias analisadas, qual gera maior variação no valor da pressão de colapso;
- Determinar, dentre as geometrias analisadas, qual gera maior variação no valor da pressão de propagação do colapso;
- Avaliar a validade do uso de ferramenta computacional para simulação do fenômeno da propagação do colapso.

### 4 FUNDAMENTAÇÃO

Dois fenômenos relacionados à integridade estrutural de dutos submarinos - o colapso e a propagação do colapso - e como estes estão correlacionados com a pressão externa são fundamentais na compreensão deste trabalho. O colapso da tubulação é o resultado de uma instabilidade estrutural. A instabilidade é um distúrbio caracterizado pelo fato de que a posição equilíbrio da estrutura é modificada por infinitesimais variações de carga ou deslocamento (SIMITSES e HODGES, 2006).

Muitos métodos têm sido propostos para estimar o colapso de dutos nas condições a que são submetidos. Sabe-se que, em termos de cargas, os dutos muitas vezes precisam suportar pressões externas combinadas com outras cargas, como tração e flexão. O colapso de tubos ocorre quando um tubo perfeitamente circular ovaliza progressivamente à medida que a pressão externa aumenta, até que um limite de pressão seja ultrapassado, o que leva a uma perda de rigidez. Este fenômeno é resultado da bifurcação do estado de pré-flambagem da geometria (KYRIAKIDES e CORONA, 2007). Devido ao seu processo de fabricação, os tubos geralmente contêm imperfeições que são aceitáveis até certos limites impostos pelas normas internacionais, mas que afetam negativamente esses limites de pressão. A pressão de limiar pode ser descrita como a pressão de colapso,  $P_c$ , e é definida por (KYRIAKIDES e CORONA, 2007; YEH e KYRIAKIDES, 1986).

$$P_c = \frac{2E}{(1 - \nu^2)} \left[ \frac{t}{D} \right]^3 \quad (1)$$

Tubos reais colapsam por meio de uma interação entre mecanismos elásticos e plásticos. A magnitude da pressão de colapso depende de algumas variáveis externas, como nível de ovalização, carregamento de pressão, variação de espessura de parede, resposta de tensão-deformação do material e tensão residual devido ao processo de fabricação. Esses fatores mudam os parâmetros de entrada e as condições de contorno para a Equação (1). A consequência negativa dos defeitos na pressão de colapso é ilustrada na Figura 3, que mostra a diminuição da pressão de colapso para diferentes níveis de ovalização,  $f_0$ , em comparação a um tubo sem defeitos. Esta figura expressa  $P_c$  normalizado pela pressão de colapso plástico para deslocamentos arbitrários.

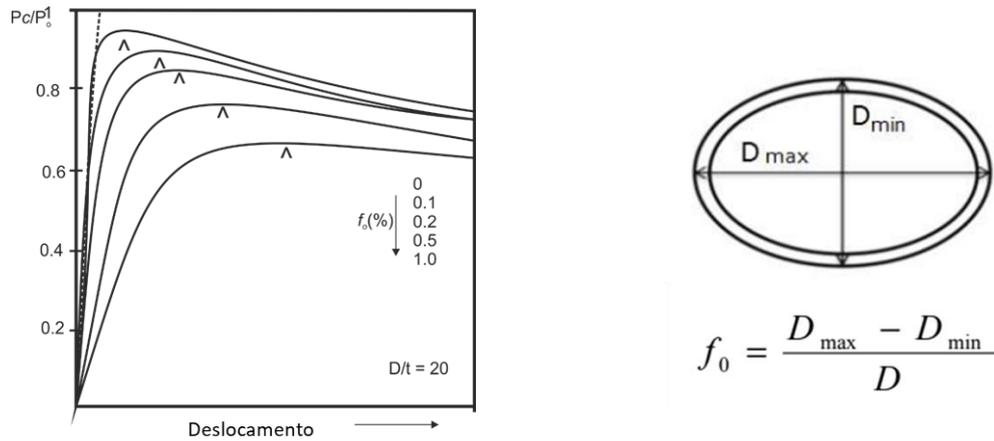


Figura 3 – Pressão de colapso para diferentes ovalidades ( $f_0$ ) no tubo.  
Fonte: Adaptado de KYRIAKIDES e CORONA (2007).

Na presença de uma imperfeição, a pressão de colapso diminui significativamente. Esta alta sensibilidade da pressão de colapso a imperfeições aponta para a importância da ovalização inicial como um parâmetro de projeto (KYRIAKIDES e CORONA, 2007). A contínua pesquisa neste tópico resultou em modelos matemáticos que podem fornecer boas representações do problema, a interação entre o colapso elástico e plástico gerou embasamento para construção do modelo de Haagsma e Schaap (HAAGSMA e SCHAAP, 1981) representado por.

$$(P_c - P_{el}) * (P_c^2 - P_{pl}^2) = \frac{P_c * P_{el} * P_{pl} * f_0 * D}{t} \quad (2)$$

$$P_{el} = 2 * \frac{E}{(1 - \nu^2)} * \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (3)$$

$$P_{pl} = \alpha_{fab} * 2\sigma_y * \left(\frac{t}{D}\right) \quad (4)$$

A ponderação entre o colapso elástico, equação 3, e o colapso plástico, equação 4 é fundamental na construção da equação 2 e esta pode ser analisada figura 4. Para razões  $D/t$  maiores que 35 a equação 2 possui valores muito semelhantes a equação do colapso elástico e assim é possível afirmar que ela é governada pela flambagem elástica. Por outro lado, para  $D/t$  inferiores a 12 é possível verificar que os valores fornecidos pela equação 2 são muito semelhantes a equação de colapso plástico e dessa forma, também afirmar que esta região da equação é governada pela plastificação.

O modelo matemático da equação 2, foi adotado pelo padrão DNVGL-ST-F101 (2017) para prever a pressão de colapso em dutos submarinos. A equação permite a introdução de um termo para explicar a ovalização do tubo na previsão de colapso. A norma também estabelece limites de ovalização mínimo e máximo para tubos a serem estudados por este modelo. As descobertas mais influentes neste campo são representadas na Figura 4 para tubos de aço, que correlaciona a pressão de colapso em função da razão  $D/t$  para tubos com 2% de ovalização. Note que a Figura 4 apresenta o comportamento da equação proposta pelo modelo de Haagsma e Schaap.

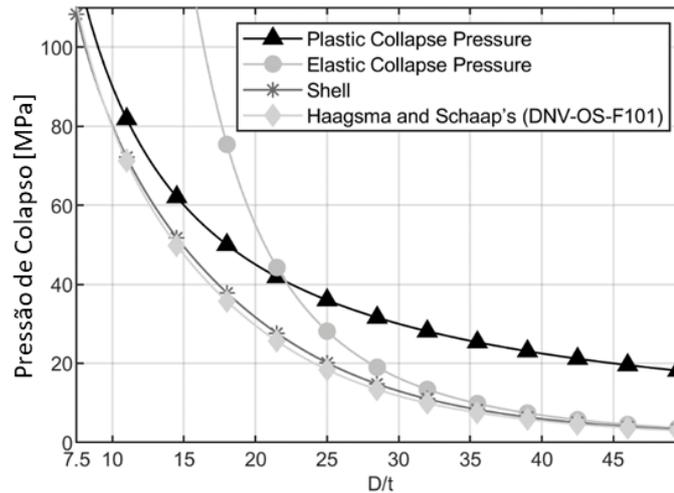


Figura 4 – Pressão de colapso para diferentes modelos matemáticos em função da razão diâmetro externo e espessura, D/t.

Fonte: Adaptado de Acervo interno LAMEF (2021).

A norma DNVGL-ST-F101 restringe a faixa de predição a uma faixa limitada de razões D/t entre 15 e 45 e ovalidade entre 0,5% - 4% (DNV, 2017). Para dutos fora dessa faixa, a recomendação é o uso de análise numérica para estimar a pressão de colapso do duto. Logo, um dano por endentação, não poderá ser abordado pela norma e uma análise numérica deverá ser realizada.

Uma vez definida a pressão de colapso, vamos para o segundo fenômeno: a propagação do colapso. A propagação do colapso não pode ser iniciada sem que se tenha um colapso local na estrutura e pressão externa suficiente. O valor da pressão de propagação do colapso pode ser obtido através de (DNV, 2017)

$$P_{pr} = 35 * f_y \alpha_{fab} * \left(\frac{t}{D}\right)^{2,5} \quad (5)$$

Note que para a Equação 5, nenhum fator referente a alguma imperfeição ou dano é levado em conta na análise da pressão de propagação, ao contrário da Equação 2, que apresenta o parâmetro de ovalização,  $f_o$ .

Através de ensaios experimentais ou modelos numéricos é possível gerar curvas que correlacionam a pressão externa aplicada em uma tubulação e a variação do seu volume interno. Estas curvas também irão fornecer os valores de pressão de colapso e pressão de propagação do colapso. A Figura 5 apresenta um exemplo de uma curva típica obtida através de análise numérica, na qual podem ser vistos quatro marcações denominadas:

- a – Região de predomínio da elasticidade do material.
- b – Região de Inflexão I ou Pressão de Colapso.
- c – Contato entre faces internas da tubulação.
- d – Região de inflexão II ou Pressão de Propagação do Colapso.

Importante notar que na Região de Inflexão I da curva (ponto b), se obtém o valor da pressão de colapso,  $P_c$ . Este se refere ao valor encontrado no máximo desta região. Já na Região de Inflexão II (ponto d), se obtém o valor da pressão de propagação do colapso  $P_{pr}$ , caracterizado como o valor máximo obtido naquela região.

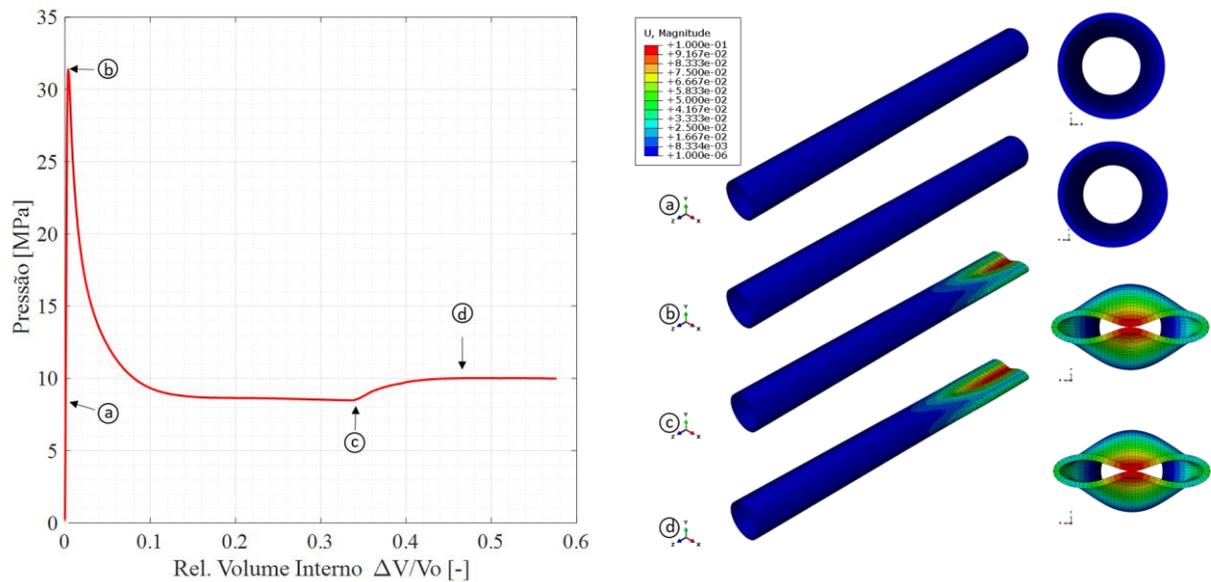


Figura 5 – Curva pressão v.s. variação do volume.  
Fonte: Autor (2021)

Assim, ao observar a correlação da Figura 5, pode-se tender ao seguinte entendimento: já que a tubulação está aplicada no fundo do mar sob pressão externa constante, ao se atingir a  $P_c$  (ponto b da Figura 5), ocorrerá a propagação instantânea do colapso, uma vez que o valor da  $P_c$  é superior ao valor da  $P_{pr}$ . Embora isto seja uma verdade, foi mostrado na Figura 3 que a ovalização leva à redução da  $P_c$ , logo, pode-se inferir que a dimensão de uma imperfeição gerada pelo impacto de algum objeto na tubulação também pode levar à redução da  $P_c$ , até um ponto que a  $P_c$  possa ficar menor que a  $P_{pr}$ .

Em locais onde há a navegação de embarcações pode ocorrer a queda de objetos, lançamentos de âncoras e o impacto destes nas tubulações, Figura 6. Estes objetos irão gerar um dano, uma imperfeição geométrica, uma endentação na tubulação, e dependendo do grau desta endentação ocorrerá uma redução da pressão de colapso do duto. Para danos suficientemente grandes,  $P_c$  pode ser inferior à  $P_{pr}$ , e com uma pressão externa bem inferior poderá ocorrer a falha da tubulação devido à propagação do colapso.

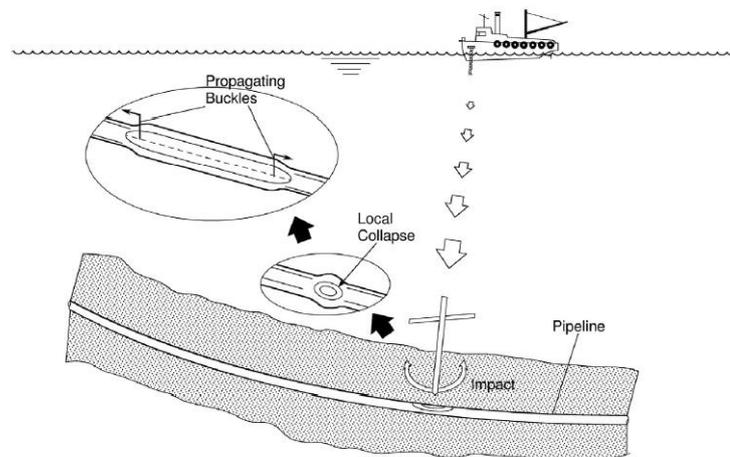


Figura 6 – Propagação do colapso por impacto de objetos.  
Fonte: (KYRIAKIDES e CORONA, 2007).

Na colisão de distintos objetos nas tubulações, serão geradas diferentes deformações. A geometria deste objeto endentador será responsável pelas características da região deformada (Han 2018). KYRIAKIDES e CORONA (2007), analisaram como as geometrias dos endentadores atuavam no valor da pressão de propagação do colapso de dutos. Seu estudo resultou no desenvolvimento de um parâmetro de ovalidade por endentação, o qual relaciona as dimensões da seção transversal da tubulação após o impacto do endentador, conforme

$$OE = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (4)$$

Os valores de  $D_{max}$  e  $D_{min}$  podem ser obtidos conforme mostrado na Figura 7. O uso da adimensionalização do dano gerado pela geometria do endentador através do parâmetro  $OE$  pode permitir a comparação entre diferentes geometrias e diferentes intensidades de dano.

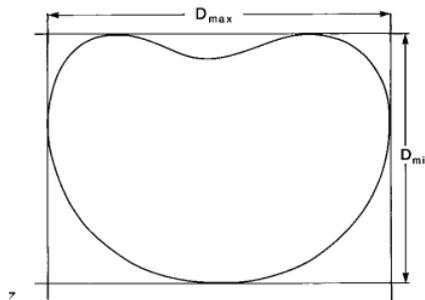


Figura 7 – Determinação dos parâmetros para o cálculo da ovalidade por endentação.  
Fonte: (KYRIAKIDES e CORONA, 2007).

## 5 METODOLOGIA

Conforme já observado no capítulo 4, o cálculo da  $P_c$  e da  $P_{pr}$  com o uso das equações 2 e 3 fornecidas na norma DNV não são válidos para grandes imperfeições geométricas. Visto isto, para a análise destes fenômenos são possíveis duas saídas: procedimentos experimentais e a simulação por elementos finitos. A simulação por elementos finitos foi escolhida devido à indisponibilidade de recursos para produção dos ensaios experimentais, além do fato de se tratar de um método de engenharia preciso, ágil e confiável.

Neste capítulo serão apresentados a construção do modelo numérico representativo para o fenômeno do colapso e de sua propagação. Além disso, serão descritos os resultados extraídos e seus tratamentos posteriores à simulação.

Para simulação por elementos finitos foi utilizado o *software* Abaqus, o qual permite análises com uso do algoritmo de Riks modificado, com consequente obtenção dos valores de pressão de colapso e pressão de propagação do colapso.

Problemas estáticos geometricamente não lineares às vezes envolvem comportamento de flambagem ou colapso, onde a resposta carga-deslocamento apresenta uma rigidez negativa e a estrutura deve liberar energia de deformação para permanecer em equilíbrio. A maioria dos métodos assume que o carregamento é proporcional, isto é, que todas as cargas variam com um único parâmetro escalar. Também, assume-se que a resposta é razoavelmente contínua, ou seja, bifurcações súbitas não ocorrem. Muitos métodos têm sido propostos para problemas com bifurcações, e dentre eles está o método de Riks modificado. Este método pode fornecer soluções mesmo em casos de resposta complexa e instável, e os resultados fornecidos por este método são a carga e os deslocamentos correspondentes a um incremento de comprimento de arco.

No processo de simulação são utilizadas 3 estruturas geométricas: tubo, endentador e placa com é mostrado na Figura 8, onde com cor verde seria a placa plana, simulando o fundo do mar em contato com o duto, em cor vermelha a tubulação e em cor cinza o endentador. A Figura 9 apresenta as diferentes formas geométricas do endentador e suas respectivas dimensões.

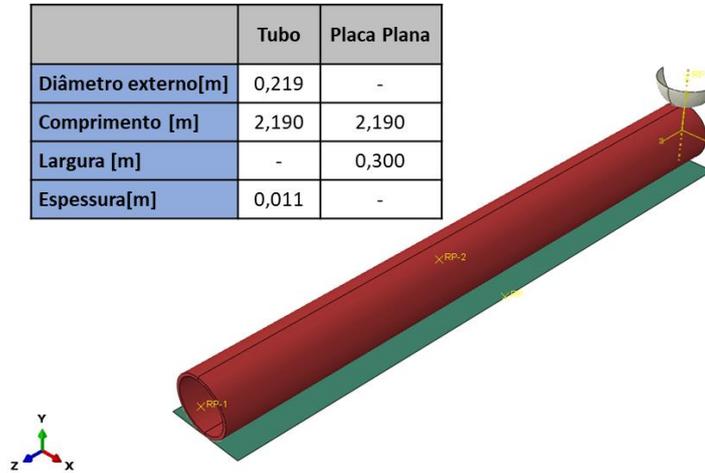


Figura 8 – Estruturas geométricas do modelo.

Fonte: Autor (2021)

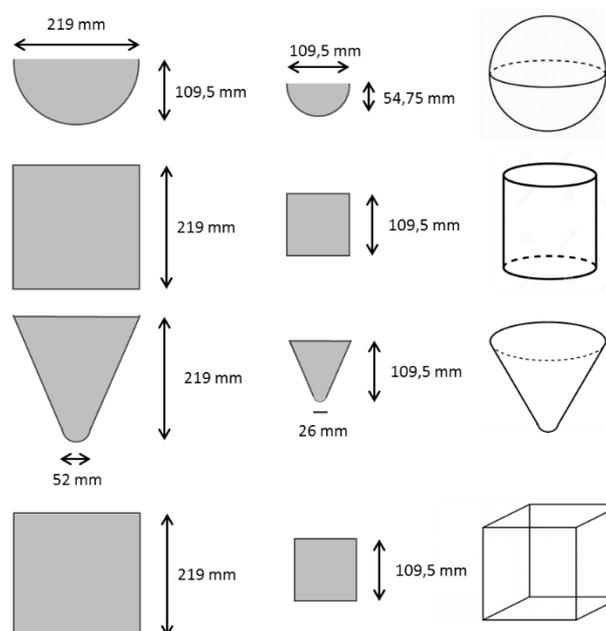


Figura 9 – Geometria e dimensões dos endentadores

Fonte: Autor (2021)

A placa plana e o endentador são modelados como corpos rígidos. O tubo de aço será modelado com o material DNV-450, equivalente ao aço API 5L X65. Suas propriedades principais são: módulo de elasticidade de 207 GPa; *yield offset* de 1,29; tensão de escoamento de 450 MPa; coeficiente de encruamento de 25,58; coeficiente de Poisson igual a 0,3. Para descrever o comportamento tensão x deformação na região de plastificação do material foi utilizado o modelo de material Ramberg-Osgood, dado por

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} + \frac{\alpha \cdot \sigma_y}{E} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \quad (10)$$

### 5.1 Condições de contorno

Para os elementos geométricos apresentados anteriormente são aplicadas as seguintes condições de contorno:

- Placa plana: Elementos rígidos 2D e lineares – Abaqus R3D4. Todos nós da placa estão restritos em todos graus de liberdade, ou seja,  $u_x=u_y=u_z=\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$ .
- Tubo: Na face, figura 10-a, onde irá ocorrer a endentação, foram restritas as translações na direção z, para obtenção de uma condição de simetria no duto. Além disso, para simular uma condição de tubo infinito, um nó de referência é adicionado nas coordenadas (0;0;2,19) e neste nó são restritas todas as rotações e os deslocamentos em x e y, permitindo apenas o deslocamento na direção longitudinal da tubulação. Após isso neste nó são acoplados todos os elementos da superfície da seção transversal do tubo, como mostrado na Figura 10-b). Este acoplamento é realizado em coordenadas polares e permite apenas a movimentação na direção radial, os demais graus de liberdade ficam restritos (BJÖRN, 2009). São utilizados elementos 3D – C3D8R lineares. Na superfície externa da tubulação é aplicada uma pressão inicial de 5 MPa tanto durante a endentação quanto na análise posterior. A mesma pressão é aplicada na análise por Riks, na qual representa uma profundidade de lâmina de água de aproximadamente 500 metros. Interações de auto contato nas paredes internas do duto são aplicadas, na qual são caracterizadas por contato sem atrito e *hard contact*, que é a condição que o valor de pressão de contato é ilimitado e que o contato somente é estabelecido quando ocorre o contato dos nós.

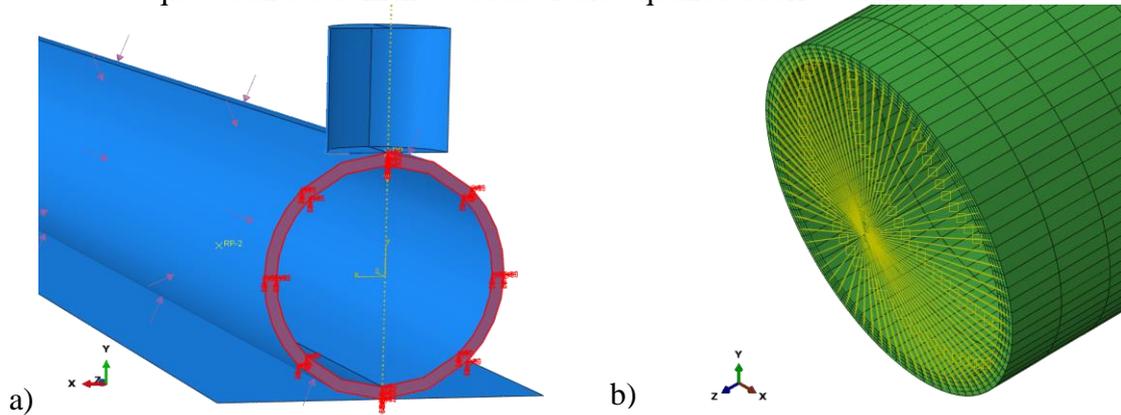


Figura 10 – Condições de contorno. a) Condições de contorno na região próxima a endentação. b) Elementos da superfície acoplados ao nó central.

Fonte: Autor (2021)

- Endentador: Elementos rígido 2D e lineares – Abaqus R3D4, acoplamento de todos os nós em um nó de referência, este nó de referência é restrito em todas as rotações e translações nas direções x e z. Deslocamento apenas permitido na direção y. Valores dos deslocamentos são: 0 mm; 0,15\*D; 0,3\*D; 0,4\*D; 0,5\*D; 0,6\*D; 0,7\*D., onde D é o diâmetro externo do duto. O endentador realiza o dano e é afastado da tubulação.

Todos as geometrias de endentador estão com condição de contato geral, sem atrito e *hard contact*.

## 5.2 Malha

O critério de aceitabilidade para malha é a obtenção de uma diferença menor que 1% entre as malhas para o valor da pressão de colapso. Foi fixado o valor de 64 elementos na longitudinal do duto. O número de elementos na circunferencial foi variado para os valores: 64, 80, 96 e ao longo da espessura do tubo foram analisados 2, 3, 4, 5 elementos. Estudos semelhantes podem ser vistos em Björn (2009) e Bastola A. (2013).

## 5.3 Análises

As simulações foram realizadas em duas etapas:

- a) Análise explícita: o endentador se desloca e causa a deformação na tubulação;
- b) Com estrutura deformada, inicia-se análise de Riks. Um fator proporcional de carga é aplicado à pressão externa.

Dos dados obtidos nas simulações:

- a) Curva do fator de carregamento em função do comprimento do arco longo para cada incremento;
- b) Coordenadas dos nós da superfície interna da tubulação após endentação para cada incremento.

## 5.4 Tratamento dos dados numéricos

Os resultados obtidos foram tratados da seguinte maneira:

- a) Os valores da curva do fator de carregamento são multiplicados pela pressão aplicada no modelo (5 MPa), gerando uma curva de pressão externa em função do incremento;
- b) Com os nós das coordenadas internas são calculados os novos volumes internos, após a endentação, para cada incremento. Uso de rotina MATLAB para automatização do processo.
- c) A variação de volume causada pela endentação é definida pela subtração do volume interno inicial, ou seja, sem endentação e o volume interno após a endentação.
- d) Geração das curvas de pressão vs variação do volume, semelhantes a Figura 5, e obtenção dos valores de  $P_c$  e  $P_{pr}$ .
- e) Os dados são agrupados e plotados em gráficos de dispersão para análise.

# 6 RESULTADOS

## 6.1 Análise da malha.

A partir dos resultados obtidos, podemos verificar na Figura 11-a) uma forte influência do número de elementos na espessura da tubulação sobre a  $P_c$ . Também pode ser verificado que a partir de 4 elementos ao longo da espessura o critério de aceitabilidade da malha é válido, área em cinza, o resultado que condiz ao apresentado em Bastola (2013). A figura 11-b)

apresenta o comportamento dos valores de  $P_c$  em relação aos elementos circunferenciais, note que cada cor representa um valor fixo de elementos na espessura da tubulação. Para esta figura podemos verificar que dentre os valores propostos ocorrem pequenas variações em relação à  $P_c$ . Munido destas informações é escolhido utilizar uma malha com 4 elementos na espessura e 80 elementos na circunferencial.

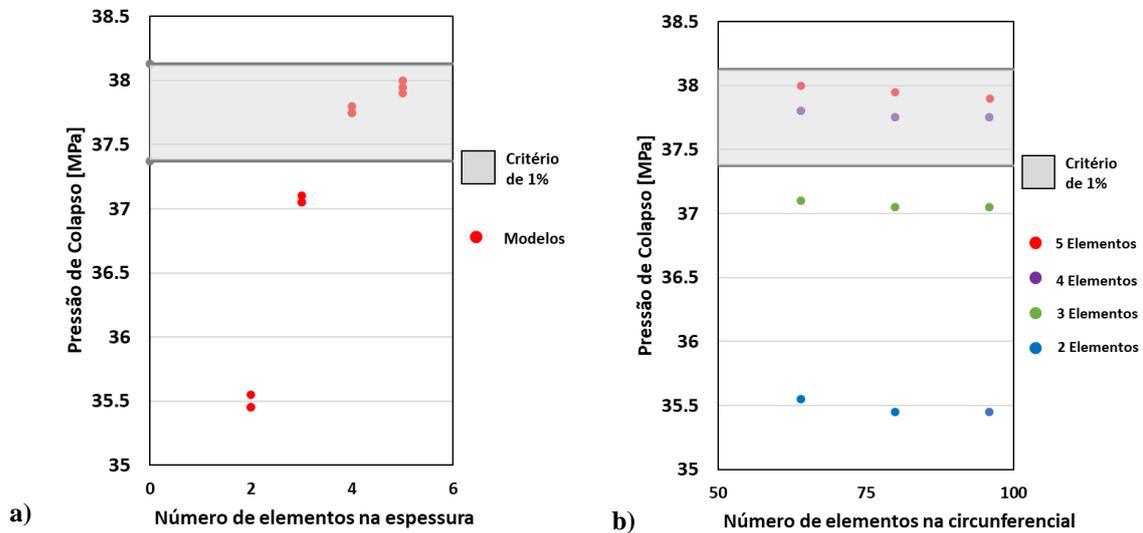


Figura 11 – Análise da malha – a) Avaliação do número de elementos na espessura em relação a pressão de colapso. b) Avaliação do número de elementos na circunferencial em relação a pressão de colapso.

Fonte: Autor (2021)

## 6.2 Influência do dano sobre a pressão de colapso.

Os dados obtidos numericamente para pressão de colapso são correlacionados nas Figuras 12, 13 e 14 e descritos no Apêndice I, a pressão de colapso para a tubulação sem danos é expressa por  $P_{c0}$ . Como a própria DNV já descreve a redução da  $P_c$  em função de um aumento de ovalidade da tubulação, podemos verificar comportamento semelhante para os resultados obtidos. Quanto maior for a intensidade do dano, maior o deslocamento do endentador contra a tubulação, e menor é a  $P_c$ , e menor é o valor da razão  $P_c / P_{c0}$ , vide Figura 12. Nesta análise também pode-se afirmar que a geometria do endentador influencia diretamente na redução da  $P_c$ . A geometria do endentador cúbico obteve os maiores percentuais de redução para todos os deslocamentos propostos, já a geometria cônica obteve menor impacto na redução da  $P_c$ .

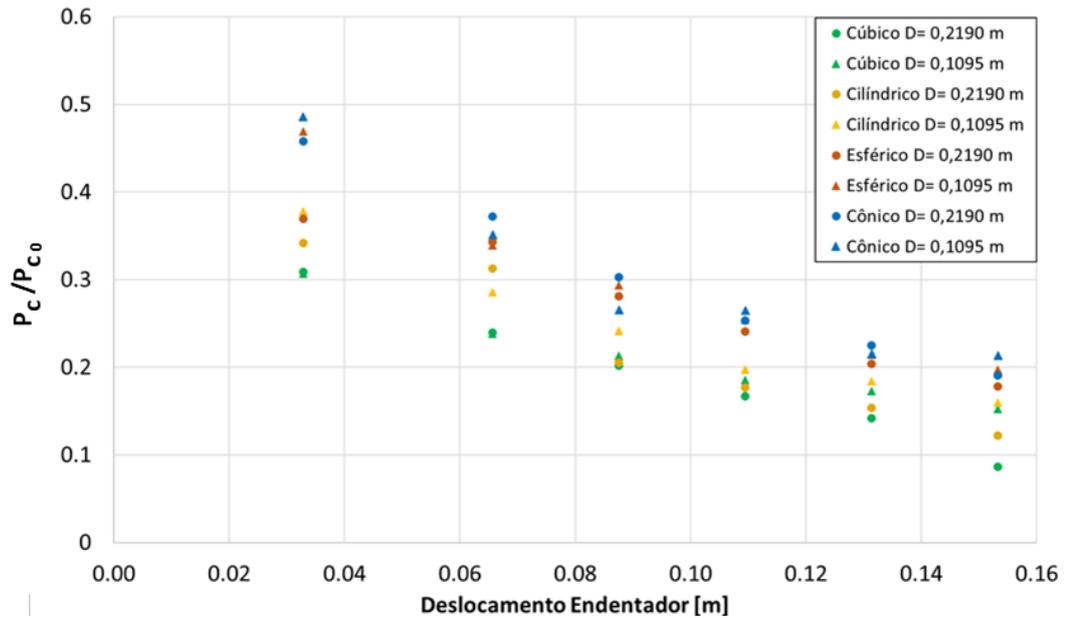


Figura 12 – Influência do deslocamento do endentador na pressão de colapso.

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados da  $P_c$  em função da variação do volume gerada pelo impacto do endentador, Figura 13, podemos notar que a geometria cúbica também leva à maior redução de  $P_c$ , e isto se deve a um maior dano volumétrico local. Logo, geometrias que alteram com maior significância o volume da tubulação original tendem a reduzir mais drasticamente a  $P_c$ . Já geometrias que não causam tantas alterações no volume, como as cônicas em azul, nas Figuras 12 e 13, geram menores reduções da  $P_c$ .

Utilizando abordagem sugerida por KYRIAKIDES e CORONA (2007) sobre a ovalidade por endentação, parâmetro  $OE$  que é apresentado na fundamentação deste trabalho, pode ser verificado na Figura 14 e seus valores no Apêndice III o comportamento da  $P_c$  em relação a  $OE$ . Na qual o endentador cúbico obteve, novamente, as maiores reduções de  $P_c$ . Assim, quanto maior for a ovalidade por endentação gerados pelo impacto, menor será a  $P_c$ . Outro dado muito importante, é que mesmo para pequenos danos, reduções de 50 % ou mais na  $P_c$  podem ser verificadas. Logo, o dano gerado por uma endentação desempenha um fator de risco altíssimo para a integridade da estrutura e deve ser avaliado de forma conservadora em uma linha da exploração. O comportamento da  $P_c$  em função da ovalidade por endentação foi semelhante aos resultados apresentados na Figuras 1 e 2 deste trabalho.

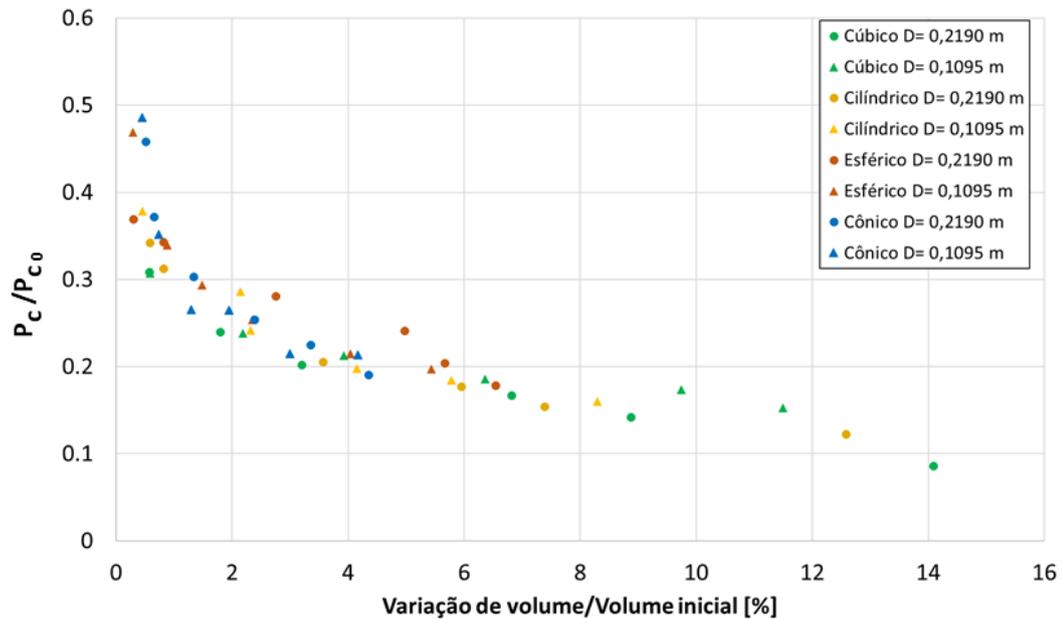


Figura 13 – Pressão de colapso em função da variação relativa de volume.  
Fonte: Autor (2021)

A segunda abordagem a ser estudada é se a forma do endentador gera alterações em relação à  $P_c$ . Uma forma de analisar é fixar um valor de ovalidade por endentação e verificar se ao longo da direção vertical do gráfico conseguimos obter diferentes geometria para este valor. Na Figura 14, olhando nas posições das linhas verticais tracejadas, pegando um valor de  $OE = 0,12$ , podemos verificar a diferença na  $P_c$  em relação ao endentador cúbico e o cilíndrico. Além disso, logo ao lado, em torno de  $OE = 0,18$  podemos verificar diferentes valores de  $P_c$  para o endentador esférico e cônico. Com esta análise podemos afirmar que a geometria do endentador tem influência sobre a redução da  $P_c$  com encontrado em PARK e KYRIAKIDES (1995), RAMASAMY (2014) e em YE (2016).

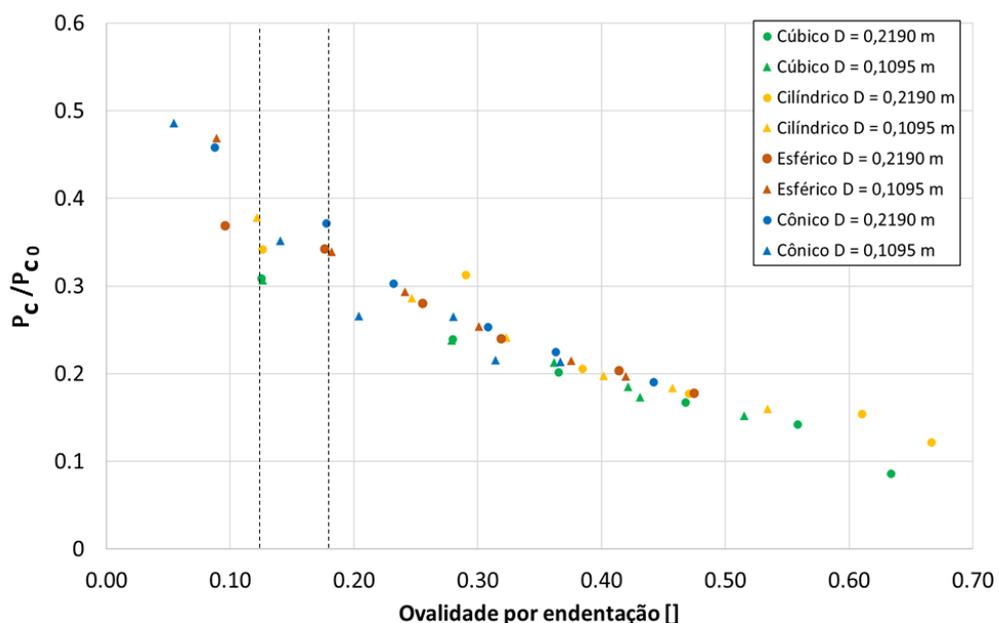


Figura 14 – Pressão de colapso em função da ovalidade por endentação.  
Fonte: Autor (2021)

### 6.3 Influência do dano sobre a pressão de propagação colapso.

Outro aspecto analisado neste trabalho é a influência da geometria do endentador na  $P_{pr}$  como também sua influência em relação a pressão de propagação do colapso para a tubulação sem danos, representado por  $P_{pr0}$ . A Figura 15 apresenta a razão  $P_{pr}/P_{pr0}$  da tubulação endentada em função dos deslocamentos impostos ao endentador para cada geometria. Nota-se que para todos endentadores se tem inicialmente um aumento da  $P_{pr}$  seguido de uma redução. Para os endentadores estudados, o cúbico obteve a maior redução da pressão de propagação do colapso para grandes deslocamentos do endentador. O endentador cônico levou a um maior aumento da pressão de colapso. Todos os valores de  $P_{pr}$  estão disponíveis no Apêndice II.

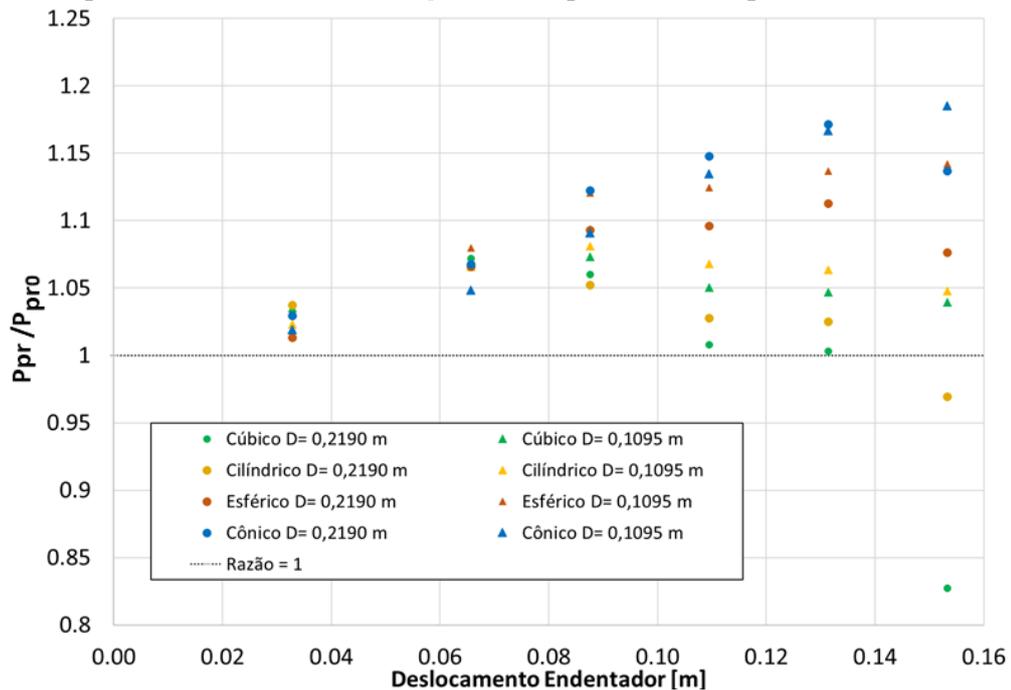


Figura 15 - Pressão de propagação do colapso em função do deslocamento do endentador.

Fonte: Autor (2021)

Já a Figura 16, correlaciona a  $P_{pr}$  com a variação de volume relativa. É observado que a partir de um certo valor de variação de volume se começa a obter, novamente, a redução da pressão de colapso. Assim, para pequenos danos, pequenas variações de volume, inferiores a 2%, o dano da endentação gera aumento da  $P_{pr}$ , independentemente da forma do endentador. Já para valores superiores, diferentes comportamentos podem ser atribuídos para diferentes geometrias do endentador e intensidades de dano. Este aumento inicial da pressão de propagação do colapso pode ser atribuído ao encruamento do material devido às deformações plásticas que lhe são impostas.

Realizando a adimensionalização por OE, sugerida por KYRIAKIDES e CORONA (2007), podemos verificar na Figura 17 que é mantida a mesma tendência de aumento da  $P_{pr}$  para os danos pequenos, baixos valores de OE, e posterior redução dos valores de  $P_{pr}$ , altos valores de OE. Novamente, observando um valor fixo de OE, podemos verificar que para valores acima de 0,25% ocorrem grandes diferenciações entre os valores de  $P_{pr}$  para cada geometria de endentador proposta. Logo a geometria possui influência sobre a  $P_{pr}$  como, também, verificado por RAMASAMY (2014) e KYRIAKIDES, S., BABCOCK, C.D. AND ELYADA, D. (1984).

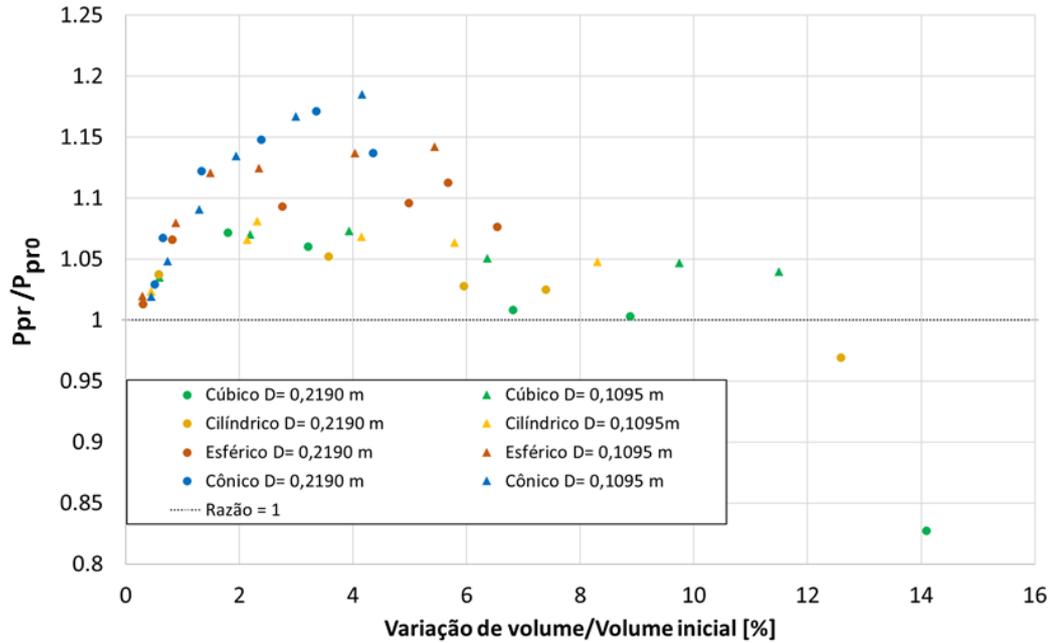


Figura 16 – Pressão de propagação do colapso e a variação de volume relativo.  
Fonte: Autor (2021)

Reunindo todas as informações de  $P_c$  e  $P_{pr}$  podemos correlacioná-las e verificar qual valor de  $OE$  é necessário para que  $P_c$  seja menor que  $P_{pr}$  e desta forma, a propagação do colapso inicie. A Figura 18 apresenta esta relação e dessa forma, danos com  $OE$  superior a 0,35 já podem iniciar o processo de propagação do colapso e a falha dos dutos. Além disso, podemos verificar que mesmo utilizando o procedimento de adimensionalização do dano geométrico, temos diferentes valores de  $OE$  para o início da  $P_{pr}$  e isso é resultado da influência da geometria do endentador sobre  $P_c$  e  $P_{pr}$ .

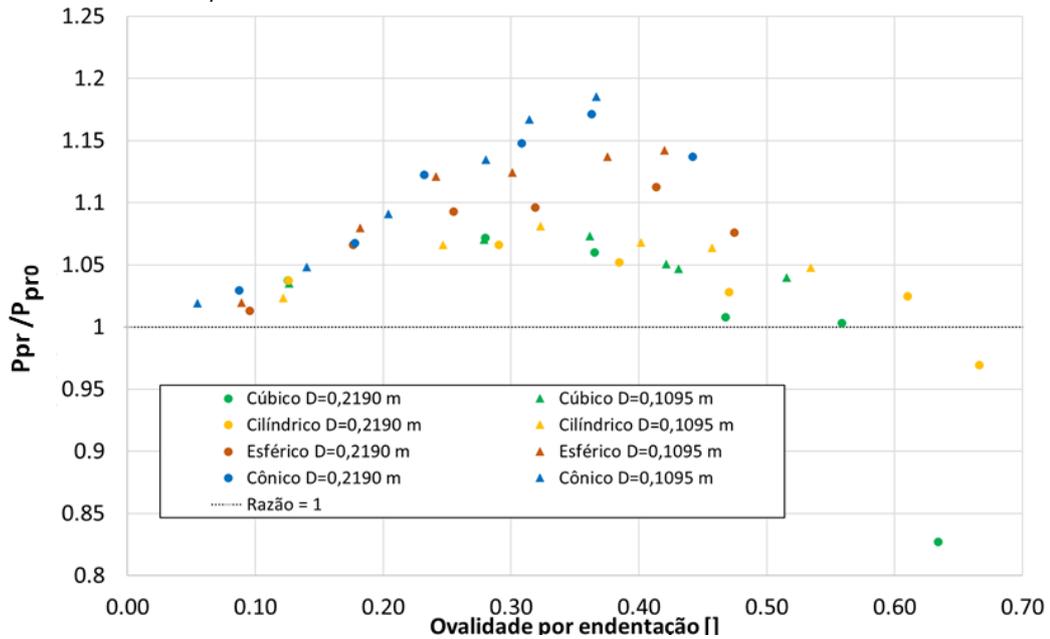


Figura 17 – Pressão de propagação do colapso e a ovalidade por endentação.  
Fonte: Autor (2021)

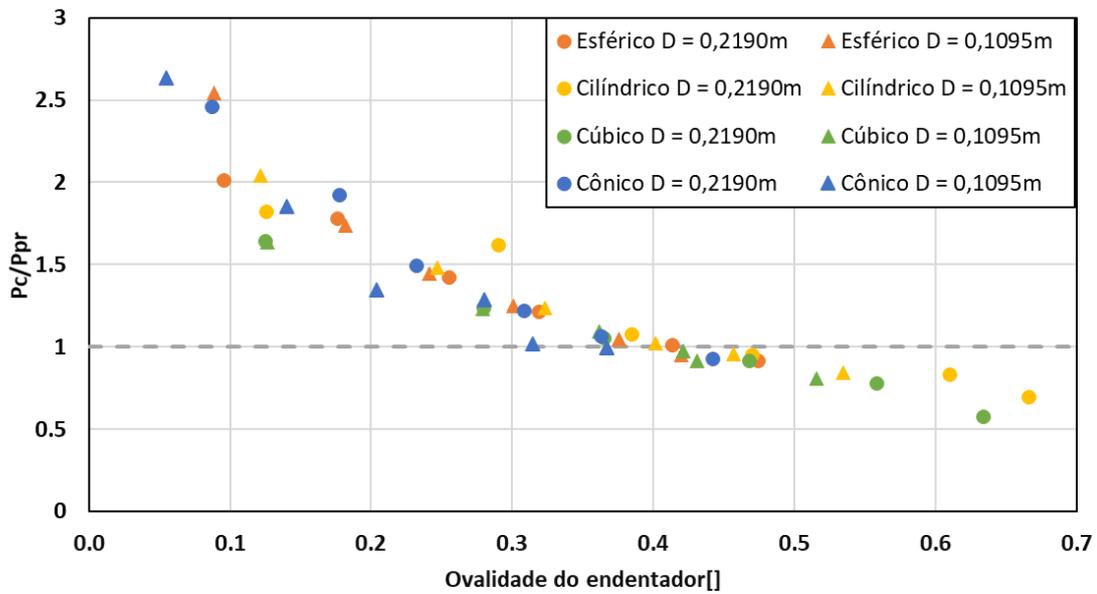


Figura 18 – Correlação entre  $P_c$  e  $P_{pr}$ .

Fonte: Autor (2021)

## 7 CONCLUSÃO

O presente estudo comprovou a capacidade do uso da ferramenta de elementos finitos na simulação de danos causados por endentadores em tubulações submarinas e sua influência na  $P_c$  e  $P_{pr}$ . Dentre os endentadores modelados, o endentador cúbico gerou as maiores variações de  $P_c$  e  $P_{pr}$ .

Além disso, foi possível concluir que quanto maior é o dano, ou seja, a ovalidade por endentação,  $OE$ , maior é o impacto sobre a  $P_c$  e também, quanto maior é o parâmetro de ovalidade por endentação, menor é a razão entre  $P_c$  e  $P_{pr}$ . Dessa forma, tanto a  $P_c$  quanto a  $P_{pr}$  estão correlacionadas diretamente com a geometria do endentador. Para os danos gerados por estas geometrias com valores de  $OE$  superiores a 35 % pode ser iniciada a propagação do colapso e a falha total da estrutura. Logo, uma vez que identificado o dano por impacto de alguma geometria, este dano deve ser dimensionado e comparado com modelos computacionais para avaliação de risco, e se necessário a troca do segmento da tubulação.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACERVO INTERNO LAMEF (2021) – Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BASTOLA, Ajit et al. Predicting hydrostatic collapse of pipes using finite element analysis. **In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V06AT04A048. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23690>

BJÖRN, Fallqvist. **Collapse of thick deepwater pipelines due to hydrostatic pressure**. (2009). Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:857656/FULLTEXT01.pdf>

CHEN, Yanfei et al. Ultimate External Pressure Capacity of Deepsea Dented Pipeline with Combined Axial Compressive Force. **In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 032050.

COSHAM, Andrew; HOPKINS, Phil. The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual. **International journal of pressure vessels and piping**, v. 81, n. 2, p. 127-139, 2004.

DEMARS, K. R. et al. Pipeline Failure: Aneed For Improved Analyses And Site Surveys. **Offshore Technology Conference**. Offshore Technology Conference, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.4043/2966-MS>

DNV, G. L. DNVGL-ST-F101, Submarine Pipeline Systems. **Standard (DNV GL)**, 2017.

HAAGSMA, Sjoerd C.; SCHAAP, D. Collapse resistance of submarine lines studied. **Oil Gas J.:(United States)**, v. 79, 1981.

HAN C., et. al. Simulation investigation of dent behavior of steel pipe under external load, **Engineering Failure Analysis**, Volume 90,2018, Pages 341-354,ISSN 1350-6307, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.024>

JAEOUNG Lee, P. E. **Introduction to Offshore Pipelines and Risers**. 2009.

KYRIAKIDES, Stelios; CORONA, Edmundo. **Mechanics of offshore pipelines: volume 1 buckling and collapse**. Elsevier, 2007.

KYRIAKIDES, S., BABCOCK, C.D. AND ELYADA, D. (1984). Initiation of propagating buckles from local pipeline damages. **ASME Journal of Energy Resource Technology**, 106, 79–87. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3231029>

PARK, T.-D. AND KYRIAKIDES, S. (1994). On the collapse of dented cylinders under external pressure. **International Journal of Mechanical Sciences**. 38, 557–578. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00065-8)

RAMASAMY R., et. al. Nonlinear finite element analysis of collapse and post-collapse behaviour in dented submarine pipelines, **Applied Ocean Research**, Volume 46, 2014, Pages 116-123, ISSN 0141-1187, Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.02.007>

SIMITSES, George; HODGES, Dewey H. Fundamentals of structural stability. Butterworth-Heinemann, 2006. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.007>

ZHAO, Pengcheng et al. Strain response of API 5L X80 pipeline subjected to indentation. **Applied Ocean Research**, v. 94, p. 101991, 2020.

YE H. *et al.*, Collapse of dented subsea pipelines under external pressure, **OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey**, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANS.2016.7761480.

YEH, M.-K.; KYRIAKIDES, S. Collapse of deepwater pipelines. In: **Offshore technology conference**. OnePetro, 1986.

## | 9 APÊNDICES

Apêndice I – Valores de Pressão de Colapso.

Valores Pressão de Colapso [Mpa]								
Deslocamento [m]	Geometria							
	Esférica		Cilíndrica		Cúbica		Cônica	
	$\varnothing = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$	$\varnothing = 0,219$ $h = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$ $h = 0,1095$	$L = 0,219$	$L = 0,1095$	$\varnothing_s = 0,219$ $\varnothing_i = 0,052$	$\varnothing_s = 0,1095$ $\varnothing_i = 0,026$
0.0000	37.7400	37.7400	37.7400	37.7400	37.7400	37.7400	37.7400	37.7400
0.0329	13.9350	17.6950	12.9000	14.2750	11.6400	11.5800	17.2850	18.3300
0.0657	12.9400	12.7950	11.8000	10.7900	9.0400	8.9900	14.0300	13.2650
0.0876	10.6000	11.0750	7.7500	9.1150	7.6100	8.0300	11.4250	10.0300
0.1095	9.0800	9.5800	6.6750	7.4500	6.3000	6.9950	9.5650	10.0000
0.1314	7.7000	8.1030	5.8100	6.9450	5.3500	6.5350	8.4900	8.1200
0.1533	6.7150	7.4400	4.6000	6.0300	3.2500	5.7450	7.1950	8.0550

Apêndice II – Valores da Pressão de Propagação do Colapso.

Valores Pressão de Propagação do Colapso [MPa]								
Deslocamento [m]	Geometria							
	Esférica		Cilíndrica		Cúbica		Cônica	
	$\varnothing = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$	$\varnothing = 0,219$ $h = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$ $h = 0,1095$	$L = 0,219$	$L = 0,1095$	$\varnothing_s = 0,219$ $\varnothing_i = 0,052$	$\varnothing_s = 0,1095$ $\varnothing_i = 0,026$
0.0000	6.8300	6.8300	6.8300	6.8300	6.8300	6.8300	6.8300	6.8300
0.0329	6.9200	6.9650	7.0850	6.9900	7.0850	7.0700	7.0300	6.9600
0.0657	7.2800	7.3750	7.2800	7.2800	7.3200	7.3100	7.2900	7.1600
0.0876	7.4650	7.6550	7.1850	7.3850	7.2400	7.3300	7.6650	7.4500
0.1095	7.4850	7.6800	7.0200	7.2950	6.8850	7.1750	7.8400	7.7500

0.1314	7.6000	7.7650	7.0000	7.2650	6.8500	7.1500	8.0000	7.9700
0.1533	7.3500	7.8000	6.6200	7.1550	5.6500	7.1000	7.7650	8.0950

Apêndice III– Valores da ovalidade por endentação OE.

Valores da ovalidade por endentação								
Deslocamento [m]	Geometria							
	Esférica		Cilíndrica		Cúbica		Cônica	
	$\varnothing = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$	$\varnothing = 0,219$ $h = 0,219$	$\varnothing = 0,1095$ $h = 0,1095$	$L = 0,219$	$L = 0,1095$	$\varnothing_s = 0,219$ $\varnothing_i = 0,052$	$\varnothing_s = 0,1095$ $\varnothing_i = 0,026$
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0329	0.0956	0.0891	0.1261	0.1217	0.1253	0.1264	0.0875	0.0546
0.0657	0.1764	0.1821	0.2903	0.2469	0.2799	0.2789	0.1777	0.1403
0.0876	0.2551	0.2413	0.3848	0.3229	0.3652	0.3616	0.2319	0.2039
0.1095	0.3189	0.3010	0.4705	0.4017	0.4678	0.4213	0.3083	0.2801
0.1314	0.4138	0.3754	0.6104	0.4573	0.5585	0.4310	0.3632	0.3144
0.1533	0.4747	0.4198	0.6664	0.5343	0.6340	0.5155	0.4422	0.3668