

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Bernardo Luis Pessutto

**Influência da geometria na análise de flambagem em cilindros de
paredes finas**

Ilha Solteira
2018

Bernardo Luis Pessutto

**Influência da geometria na análise de flambagem em cilindros de
paredes finas**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

Ilha Solteira
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pessutto, Bernardo Luis.

P475i Influência da geometria na análise de flambagem em cilindros de paredes
finas / Bernardo Luis Pessutto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
72 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. Área de conhecimento: Engenharia Mecânica, 2018

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Instabilidade. 2. Flambagem. 3. Elementos Finitos. 4. Fotogrametria.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: influência da geometria na análise de flambagem em cilindros de paredes finas

AUTOR: BERNARDO LUIS PESSUTTO

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

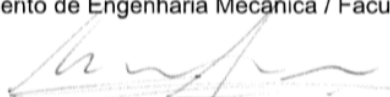
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECÂNICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA
Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Ilha Solteira, 23 de fevereiro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa, Leliane Piasson, pelos anos em que ela abdicou de minha presença.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Amarildo Tabone pela orientação e confiança no trabalho, ao NEPAE pelo empréstimo e liberação de equipamentos e espaço, ao LabSiN e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio financeiro, meus colegas de mestrado, amigos e família que oferecem apoio nesta jornada.

RESUMO

Estruturas de parede fina são amplamente utilizadas na engenharia contemporânea devido à sua boa relação peso x resistência. Sua aplicação vai da construção civil, como cúpulas e pontes, até a aeronáutica e aeroespacial. Uma geometria de parede fina comum são os cilindros, observados em oleodutos, fuselagem e vasos de pressão. Para ser classificados como parede fina, a razão entre a espessura da parede e seu raio não deve ultrapassar 1:10. Eles ficam submetidos a esforços constantes e suscetíveis à instabilidade estrutural, em especial à flambagem, entrando em colapso repentinamente, muito abaixo da carga de projeto estipulada. Assim, compreender o comportamento desta instabilidade torna-se essencial para o avanço da engenharia. Para iniciar a compreensão da instabilidade, primeiro necessita-se conhecer as imperfeições geométricas da estrutura, ocasionadas, muitas vezes, pelo próprio processo de fabricação. A concepção destas imperfeições foi tratada por duas técnicas: CMM – *Coordinates Mensuring Machine* e CAI – *Computer Aided Inspection*. A primeira, tradicional, por contato, utilizando sensores LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*, e, a segunda, vanguardista, sem contato, denominada "fotogrametria". Com isto, foi possível conceber uma estrutura tridimensional a ser analisada numericamente para obtenção das cargas críticas de flambagem, na qual estas duas técnicas apresentaram desvios condizentes com a literatura atual. Isto demonstrou, não somente, a acuracidade da técnica tradicional de contato para obtenção da geometria, mas, também, como a fotogrametria pode ser uma alternativa viável para inspeções rápidas de geometria.

Palavras-chave: Instabilidade. Flambagem. Elementos finitos. Fotogrametria

ABSTRACT

Thin wall structures are widely used in contemporary engineering because of their good weight and strength ratio. Their application goes from civil construction such as domes and bridges, to aeronautics and aerospace. A common thin wall geometry are the cylinders, observed in oil pipelines, fuselage and pressure vessels. In order to be classified as thin wall, the ratio between the wall thickness and its radius must not exceed 1:10. They are subjected to constant efforts and susceptible to structural instability, especially buckling, suddenly collapsing, quite below the stipulated design load. Thus, understanding the behavior of this instability becomes essential for the advance of engineering. In order to begin the understanding of instability, it is firstly necessary to know the geometrical imperfections of the structure, often caused by the manufacturing process itself. The design of these imperfections was treated by two techniques, CMM – Coordinates Measuring Machine and CAI – Computer Aided Inspection. The first one, more conservative, by contact, using LVDT sensors, and, the second one, avant-garde, contactless, called “photogrammetry”. With this, it was possible to design a three-dimensional structure to be numerically analyzed to obtain the critical loads of buckling, in which these two techniques presented follow deviations from the current literature. This demonstrates not only the accuracy of the traditional contact technique to obtain geometry, but also how photogrammetry can be a viable alternative for rapid geometry inspections.

Keywords: Instability. Buckling. Finite element. Photogrammetry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Elementos cilíndricos: (a) silo; (b) fuselagem de compósito; (c) ônibus espacial Atlantis.....	10
Figura 2	– Experimento de Fairbairn e Hodgkinson.....	11
Figura 3	– Experimento de Carman.....	12
Figura 4	– Experimento de Stewart.....	13
Figura 5	– Experimento de Sturm.....	15
Figura 6	– Detalhe da montagem do corpo de prova (SLS).....	16
Figura 7	– Detalhe da captura dos deslocamentos, corpo de prova hachurado.....	17
Figura 8	– Equilíbrio estável de uma esfera em superfície côncava.....	18
Figura 9	– Equilíbrio instável de uma esfera em superfície convexa.....	19
Figura 10	– Equilíbrio metaestável de uma esfera em um vale cercada por picos.....	19
Figura 11	– Trajetórias de equilíbrio em cascas ideais e imperfeitas.....	21
Figura 12	– Deformação instantânea de uma barra com aplicação gradativa de carregamento.....	21
Figura 13	– Comparativo entre resultados Batdorf e Sturm.....	23
Figura 14	– Representação de cilindros para um mesmo valor de Z	24
Figura 15	– Forças circunferenciais e coeficiente de flambagem em cilindros com pressão lateral.....	25
Figura 16	– Gráfico $K \times Z$	26
Figura 17	– Carga de Euler x Deslocamento máximo.....	27
Figura 18	– Mapeamento geométrico utilizando sensores LVDT.....	28
Figura 19	– Mapeamento geométrico utilizando blue scanner.....	29
Figura 20	– Incrementos no carregamento.....	30
Figura 21	– Bancada experimental durante o mapeamento com sensores LVDT.....	32
Figura 22	– Bancada experimental durante o mapeamento com câmera.....	32
Figura 23	– Bancada experimental durante o ensaio destrutivo com sensores LVDT.....	33
Figura 24	– Corpo de prova utilizado nos ensaios.....	26
Figura 25	– Corpo de prova na bancada após aplicação de adesivo de poliuretano.....	35
Figura 26	– Esquemático da medição de imperfeição geométrica com sensor LVDT.....	37
Figura 27	– Mapeamento da geometria com sensor LVDT.....	38
Figura 28	– Textura feita no cilindro: CDP-1 (esquerda) e CDP-2 (direita).....	39
Figura 29	– Esquemático de captura de imagens para Fotogrametria.....	40
Figura 30	– Esquemático do tratamento da Fotogrametria.....	41
Figura 31	– Elemento finito Shell281 do ANSYS®.....	42
Figura 32	– Condições de contorno.....	42
Figura 33	– Tipos de carregamento.....	43
Figura 34	– Bancada experimental com sensores LVDT posicionados em pontos pré-determinados.....	45
Figura 35	– Bancada de fotovelocidade montada.....	46
Figura 36	– Imperfeições geométricas no CDP-1 com sensores LVDT.....	48
Figura 37	– Geometria 3D obtida com sensores LVDT do CDP-1.....	49
Figura 38	– Geometria 3D obtida pela Fotogrametria para o CDP-1 (dir.) e CDP-2 (esq.).....	49
Figura 39	– Pontos de controle no cilindro CDP-2.....	50
Figura 40	– Pontos de controle na malha após a fotogrametria do CDP-2.....	50
Figura 41	– Comparação da geometria do CDP-1: Ideal (verde), Fotogrametria (vermelho)...	52
Figura 42	– Convergência da geometria do CDP-1.....	52
Figura 43	– Planos para comparação de geometria do CDP-1: ideal (verde), Fotogrametria (vermelho).....	53
Figura 44	– Convergência do CDP-1 (Ideal x LVDT).....	54
Figura 45	– Convergência Ideal x Fotogrametria para o CDP-2.....	55
Figura 46	– Curva de convergência para o CDP-1 com Mapeamento LVDT.....	57
Figura 47	– Curva de convergência para o CDP-1 com Mapeamento Fotogrametria.....	57
Figura 48	– Curva de convergência para o CDP-2 com Mapeamento Fotogrametria.....	57
Figura 49	– Modo de flambagem do CDP-1 com Mapeamento LVDT.....	58

Figura 50	– Modo de flambagem do CDP-1 com Mapeamento Fotogrametria.....	58
Figura 51	– Modo de flambagem do CDP-2 com Mapeamento Fotogrametria.....	59
Figura 52	– Modo de flambagem do cilindro com geometria ideal.....	59
Figura 53	– Curva de Pressão x Deslocamento dos sensores LVDT no ensaio do CDP-1.....	60
Figura 54	– Modos de flambagem, experimental.....	61
Figura 55	– Pontos selecionados no CDP-2 para o Ensaio Fotovelocidade.....	62
Figura 56	– Variação no tempo das distâncias no CDP-2 para o Ensaio Fotovelocidade.....	63
Figura 57	– Curva de carregamento no CDP-2 obtida pelo sensor digital de pressão absoluta.....	64
Figura 58	– Modo de flambagem apresentado pelo CDP-2 no ensaio experimental.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_c	Ponto de bifurcação
λ_l	Ponto crítico de flambagem de uma casca perfeita
λ_s	Carga limite ou ponto limite de uma casca imperfeita
N_y	Força circunferencial
N_x	Força axial
σ_y	Tensão atuante no eixo y
σ_x	Tensão atuante no eixo x
p	Pressão crítica
r	Raio do cilindro
t	Espessura
L	Comprimento do cilindro
Z	Parâmetro de Batdorf
k_y	Coeficiente de flambagem
ν	Coeficiente de Poisson
K	Rigidez da membrana
E	Módulo de elasticidade longitudinal
D	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1	REVISÃO HISTÓRICA	10
2.2	CONCEITOS DE FLAMBAGEM EM CASCAS	17
2.2.1	Tipos de equilíbrio	18
2.2.1.1	<i>Equilíbrio</i> estável	18
2.2.1.2	<i>Equilíbrio</i> instável	19
2.2.2	Pontos de bifurcação e pontos críticos	20
2.2.3	Análise clássica	22
2.2.4	Imperfeições	26
2.2.5	Método numérico	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL E CORPOS DE PROVA	31
3.2	MAPEAMENTO DA GEOMETRIA	36
3.2.1	Mapeamento LVDT	36
3.2.2	Mapeamento fotogrametria	38
3.3	ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL	41
3.4	ENSAIO EXPERIMENTAL DESTRUTIVO	44
3.4.1	Ensaio LVDT	44
3.4.2	Ensaio fotovelocidade	45
4	RESULTADOS	47
4.1	MAPEAMENTO LVDT	47
4.2	MAPEAMENTO FOTOGRAMETRIA	49
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS GEOMETRIAS MAPEADAS	51
4.4	ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL	56
4.5	ANÁLISE EXPERIMENTAL	59
4.5.1	Ensaio LVDT	60
4.5.2	Ensaio fotovelocidade	62
4.6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
5	CONCLUSÃO	68
6	TRABALHO FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A indústria contemporânea busca, constantemente, a otimização de recursos, empregando, em suas concepções, materiais cada vez mais leves e finos, objetivando uma melhor competitividade no cenário global.

Geometrias cilíndricas com espessura reduzida são amplamente empregadas em elementos estruturais de veículos espaciais, aeronaves, tubulações, vasos de pressão e tanques de armazenagem.

Por conta da intensa solicitação a que esta geometria é sujeita, pode ocorrer o fenômeno de flambagem. Esta situação, também chamada de “perda de estabilidade” estrutural, deve ser observada atentamente, dado que as tensões necessárias para que o fenômeno ocorra, normalmente, são menores do que as tensões de escoamento do material selecionado.

O estudo da flambagem em elementos cilíndricos não deve ser generalizado, já que vários fatores influenciam, diretamente, na definição da carga crítica de flambagem e na estabilidade estrutural. Por exemplo, o comprimento, o material selecionado para os corpos de prova, o tipo de carregamento e as restrições.

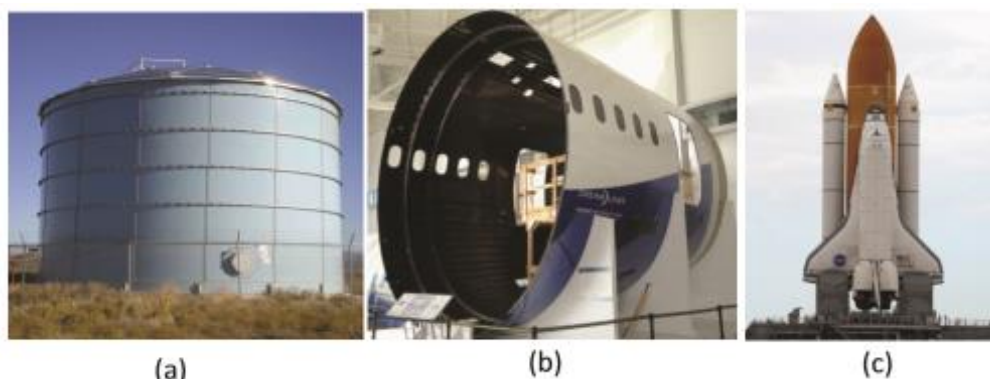
O objetivo deste trabalho foi analisar a influência geométrica na ocorrência do fenômeno. Erros de forma e desvios macrogeométricos (cilindricidade e formação de vincos), ocasionados por conta da confecção do corpo de prova, são fatores sensíveis à perda de estabilidade. Técnicas clássicas e modernas de se aferir as imperfeições geométricas foram comparadas, utilizando, como critério, a carga crítica de flambagem, avaliando os desvios provocados pelos métodos de inspeção geométricos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REVISÃO HISTÓRICA

Geometrias cilíndricas têm sido, extensamente, utilizadas, durante décadas, em diversas vertentes da engenharia civil, de óleo e gás e na indústria aeroespacial, como, por exemplo, em tanques de armazenagem, vasos de pressão e fuselagens. A aplicabilidade desta geometria não é por acaso. A razão peso x resistência demonstrou eficácia, principalmente, na indústria aeroespacial, responsável pelos mais significativos avanços das teorias clássicas e metodologias experimentais em cilindros de parede fina.

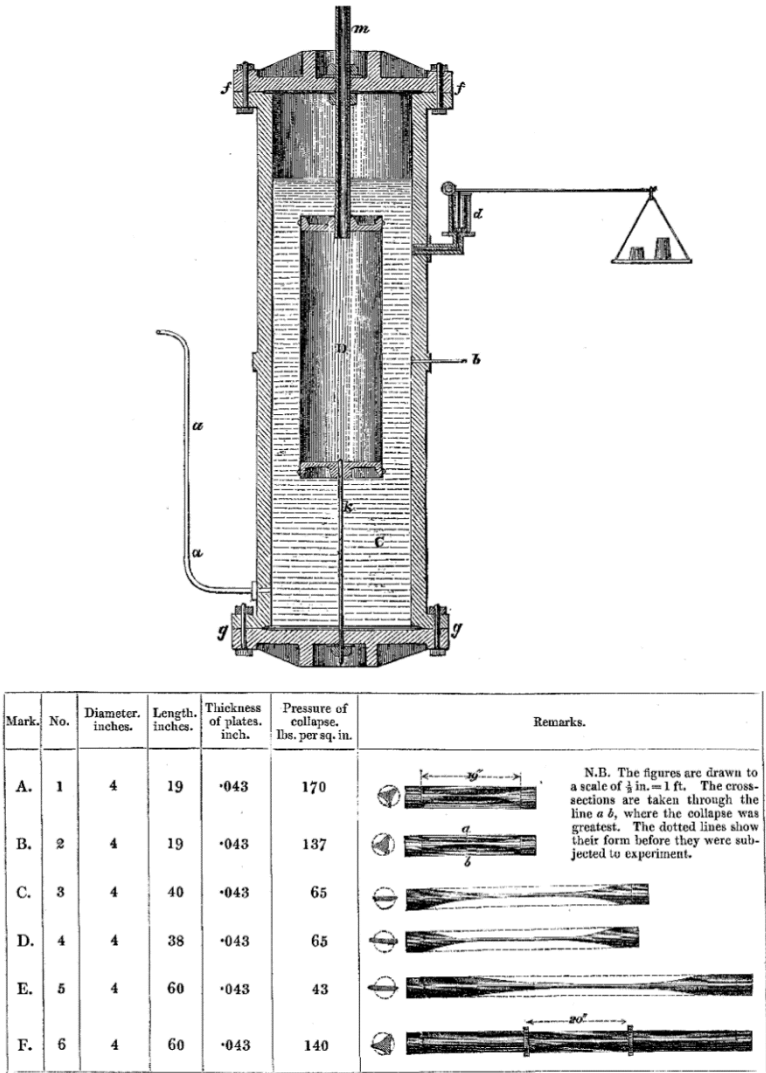
Figura 1 - Elementos cilíndricos: (a) silo; (b) fuselagem de compósito; (c) ônibus espacial Atlantis



Fonte: Ning (2015).

Os primeiros ensaios experimentais em cilindros sujeitos à pressão datam de 1858. Fairbairn (1858) apresentou à Royal Society um estudo para determinar as leis que governam a resistência em vasos cilíndricos expostos à pressão e sua aplicação prática no projeto de caldeiras mais seguras, por conta do alto índice de explosão destes equipamentos. O experimento de Fairbairn, retratado na Figura 2, era composto de uma câmara na qual o corpo de prova, cilíndrico, acoplado internamente à câmara, era submetido à pressão pelo bombeamento de água em seu interior, até que o corpo de prova se colapsasse. Com isto, foi obtida a pressão de colapso e os modos de flambagem para corpos de prova com comprimento variável.

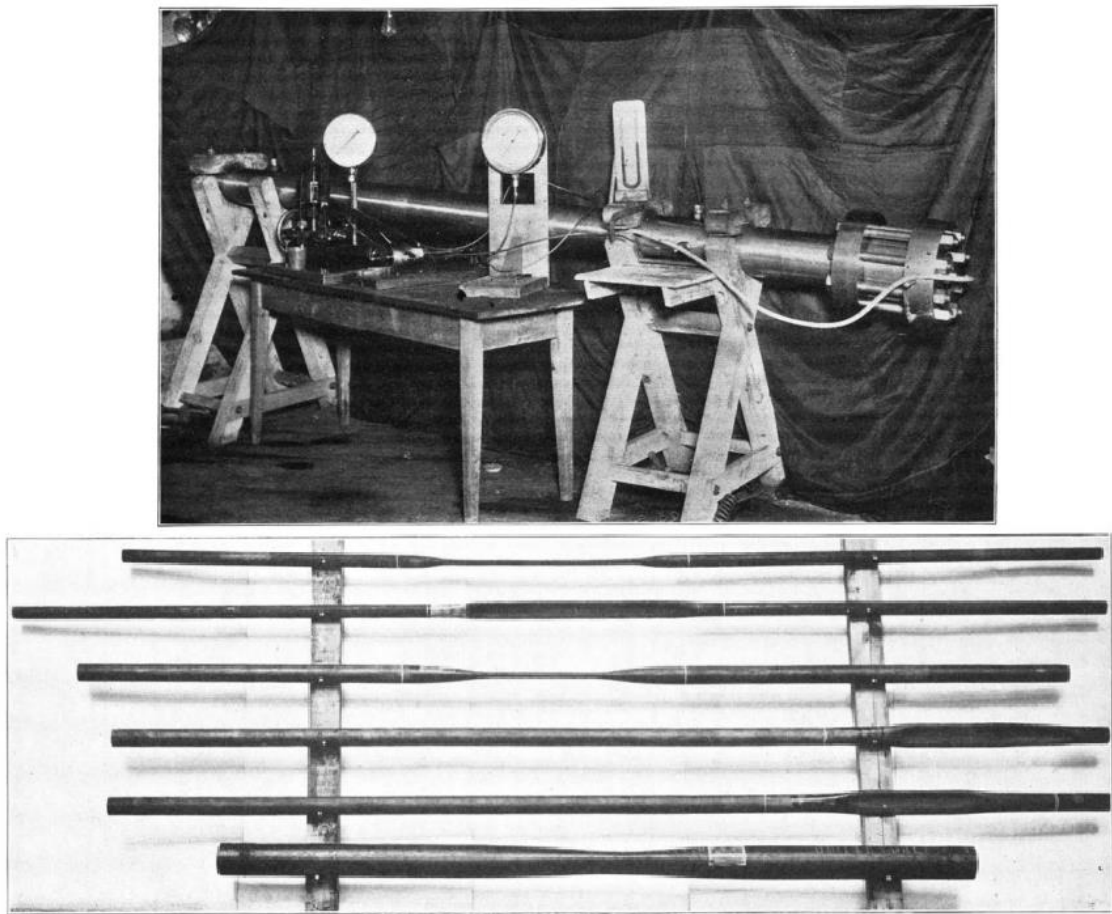
Figura 2 - Experimento de Fairbairn e Hodgkinson



Fonte: Fairbairn (1858).

Tais ensaios preliminares chamaram a atenção da comunidade científica para a explicação deste fenômeno. Pesquisadores como Carman (1906) e Stewart (1906) executaram uma série de investigações experimentais com objetivos semelhantes. Carman tinha como meta utilizar os resultados de sua pesquisa no design e inspeção dos tubos flamotubulares em caldeiras. A Figura 03 retrata seu experimento. Esta experimentação consistia de cilindros longos de parede fina sujeitos à pressão hidrostática externa. Os experimentos de Stewart tinham o mesmo objetivo, porém, o corpo de prova estudado apresentava comprimento superior aos de Carman, e visava conhecer a influência das juntas soldadas para união dos cilindros e a determinação da carga crítica de flambagem. Este último é retratado na Figura 4.

Figura 3 - Experimento de Carman



Fonte: Carman (1906).

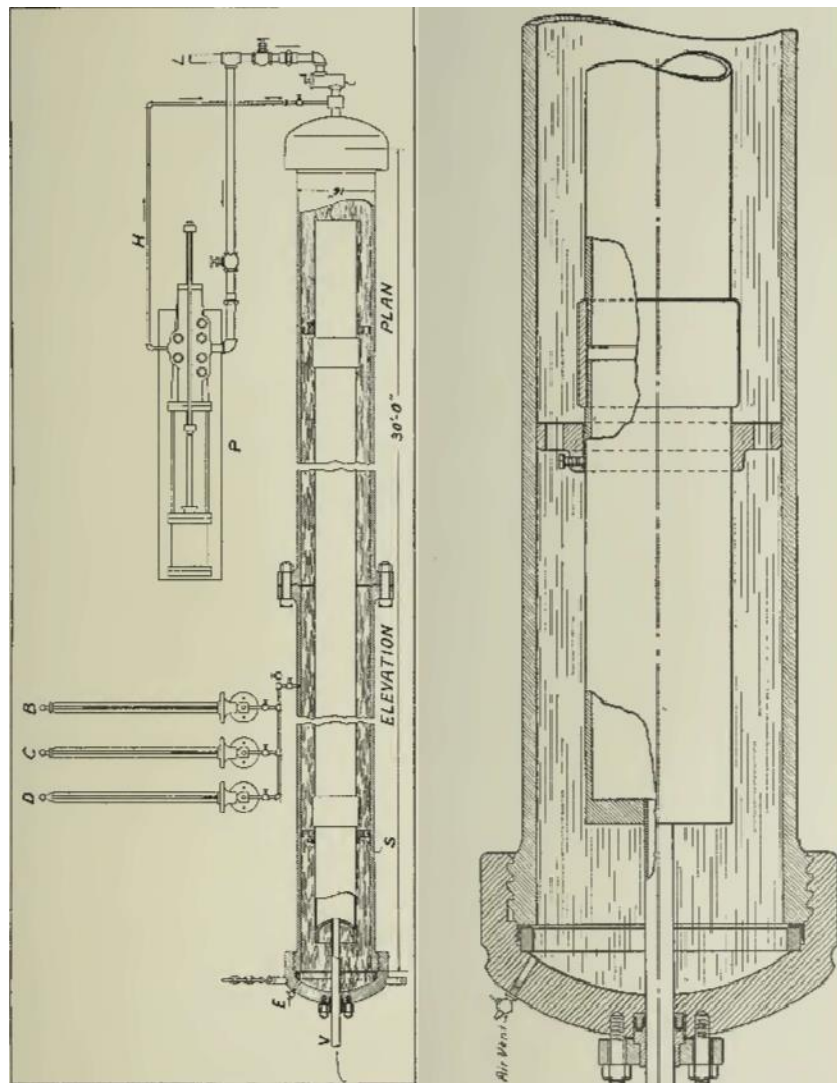
Love (1906) e Basset (1892) foram os primeiros a apresentar uma aproximação bem-sucedida da teoria de cascas baseada na teoria da elasticidade. Para simplificar a relação entre tensão e deformação em cascas, Love aplicou a hipótese de Kirchhoff, desenvolvida, originalmente, para placas, o que ficou conhecido como "hipótese de Kirchhoff-Love". Mas, também, pode ser denominada como "aproximação de primeira ordem da teoria de cascas". 50 anos após os experimentos de Fairbairn e Hodgkinson, as hipóteses de Kirchhoff-Love apresentaram, à comunidade científica, uma fórmula racional para predizer a carga de flambagem em cilindros (Equação 01). (SINGER; ARBOCZ; WELLER, 2002)

$$p_{cr} = \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^3$$

(Equação 01)

Em 1917, Slocum (1909 apud SINGER; ARBOCZ; WELLER, 2002) comparou a fórmula racional de Love com os dados experimentais de Carman e Stewart, e concluiu que ela apresentava os fatores de correção necessários para lidar com as imperfeições em cilindros. Estudos posteriores provaram que a formulação de Love estava simplificada. Carman, no mesmo ano, realizou outra bateria de testes, com aproximadamente 150 corpos de prova, com o objetivo de encontrar o comprimento crítico de flambagem, utilizando, em vez da formulação de Love, o novo tratamento teórico apresentado por Southwell (1915).

Figura 4 - Experimento de Stewart



Fonte: Stewart (1906).

Infelizmente, esta nova formulação não considerava o comprimento crítico que um cilindro apresentava quando sujeito à flambagem, mas, apenas, a dependência entre a imperfeição e os modos de flambagem. (SINGER; ARBOCZ; WELLER, 2002)

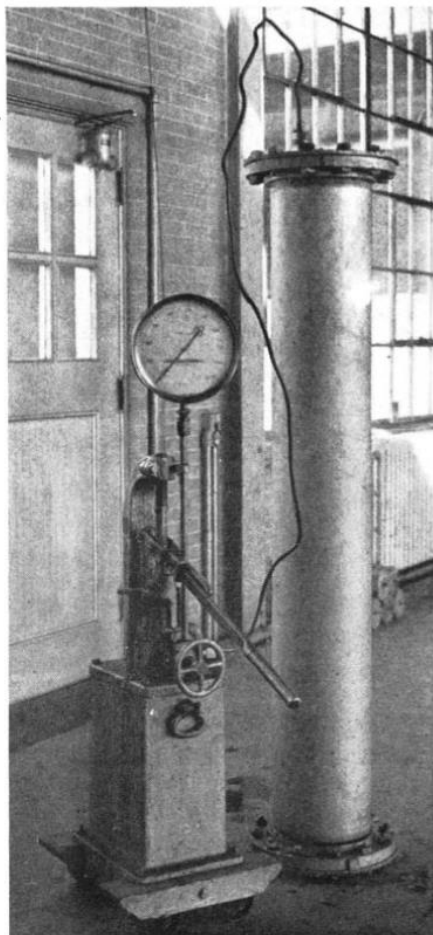
O envolvimento de órgãos certificadores para padronização de um código de design se tornou necessário. O envolvimento da ASME, resumindo os resultados experimentais obtidos pelo comitê naval americano, e correlacionando-os com as formulações teóricas de Southwell, Von Mises e Tokugawa, geraram a formulação conhecida como *Basin Model* (Equação 02), que é utilizada no projeto de vasos de pressão e é base para futuros códigos de projeto (Design Codes VII).

$$p_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \cdot \frac{(t/D)^{5/2}}{\left[L/D - 0,45(t/D)^{1/2} \right]} \quad (\text{Equação 02})$$

Os motivos iniciais, no século XIX, para estudar a flambagem em cilindros que sofriam pressão vieram por conta da necessidade de desenvolver caldeiras mais seguras e eficientes. No século XX, ficou clara a necessidade de estudar o fenômeno, impulsionada pela necessidade de se desenvolverem submarinos, túneis, domos e, porventura, o advento da aviação comercial. Este tema ganhou destaque e foi mais bem detalhado por pesquisadores e instituições. Sanders e Winderburg (1931) foram os primeiros a descrever a influência da manufatura dos cilindros e a importância na aferição das imperfeições iniciais e como elas influenciam o colapso. Sturm (1941) enfatizou, em sua pesquisa, as diferenças experimentais entre cilindros que sofriam pressão hidrostática e pressão lateral e a importâncias das condições de contorno na determinação da carga crítica de flambagem. Seu experimento, retratado na Figura 5, consistia em um cilindro engastado em apenas uma das extremidades, que sofria pressão lateral de uma bomba manual a vácuo. Isso proporcionou, aos engenheiros da época, confiabilidade no desenvolvimento de estruturas cilíndricas sujeitas à pressão externa. (SINGER; ARBOCZ; WELLER, 2002).

Ressalta-se a influência, no século XX, de Koiter, e sua famosa tese de doutorado *On The Stability of Elastic Equilibrium*, finalizada em 1945. Porém, impedido de publicá-la em inglês pelo regime nazista, foi, apenas, apresentada à comunidade científica em 1960. Poucas publicações na engenharia mecânica causaram impactos tão profundos como a tese de doutorado de Koiter. Ela provinha de uma investigação da estabilidade de corpos com uma fundamentação matemática mais sólida. A teoria da sensibilidade a imperfeições de Koiter foi um marco na engenharia. Sua teoria veio em uma época em que a pesquisa da estabilidade em cilindros de parede fina era essencial para o avanço da corrida espacial americana.

Figura 5 – Experimento de Sturm



Fonte: Sturm (1941).

Flambagem e pós-flambagem ainda são uma grande preocupação da NASA nos dias atuais. A flambagem de elementos de casca é o principal fator no projeto dos veículos de lançamento de satélite, em especial, do sistema de lançamento espacial (SLS), que é governado pelas leis da estabilidade estrutural. Fatores conservativos não se aplicam ao projeto deste componente por conta do incremento do peso do veículo. Com isto, o foco se volta a pesquisas realizadas em novos códigos para determinação da carga crítica de flambagem, técnicas de captura de imperfeições e sua influência. Pata tal, a NASA conta com um departamento específico, o NESC - *NASA Engineering and Safety Center*, responsável pelo projeto dos veículos espaciais. (THOMPSON, 2014)

Nas Figuras 6 e 7, pode-se observar os testes realizados em 2013 no sistema de lançamento, cujo objetivo era validar novos códigos de modelagem, compostos de cilindros enrijecidos, confeccionados com uma liga de alumínio e lítio. Eles tinham 8,3 metros de diâmetro e foram os responsáveis por armazenar os tanques de combustível sólido. Submetidos a um carregamento axial instantâneo, sua deflexão foi aferida com câmeras de alta velocidade. (HILBURGER, 2013)

Figura 6 – Detalhe da montagem do corpo de prova (SLS)



Fonte: Thompson (2014).

2.2 CONCEITOS DE FLAMBAGEM EM CASCAS

Segundo Bushenell (1981), a palavra "flambagem" remete à falha em uma estrutura que foi submetida a um determinado carregamento. Em elementos de casca, a rigidez da membrana pode absorver uma quantidade considerável de energia de deformação sem que ela ocorra. Porém, caso esta energia tome características de flexão, ocorrerá a deformação drástica com a mesma quantidade de energia. A flambagem está associada com esta transição, entre a energia armazenada na membrana a ser convertida em energia de flexão. Por isto, a maneira como a flambagem ocorre está associada em como a casca é submetida ao carregamento, sua geometria e seu material.

Figura 7 – Detalhe da captura dos deslocamentos, corpo de prova hachurado.



Fonte: Página da NESC¹ (ano).

¹ Disponível em: <https://www.nasa.gov/offices/nesc/home/Feature_ShellBuckling.html>. Acesso em set. 2017.

Este fenômeno está associado ao conceito de equilíbrio em uma estrutura. Está relacionado, também, a grandes deslocamentos em pequenos intervalos de tempo, sem sinais precedentes. (FONSECA; OLIVEIRA; MELO, 2006)

2.2.1 Tipos de equilíbrio

Considerando a estabilidade, os sistemas mecânicos podem ser divididos em sistemas com estável e sistemas com equilíbrio instável.

2.2.1.1 *Equilíbrio estável*

Um sistema mecânico é considerado estável quando uma pequena perturbação no sistema resulta em uma pequena resposta. Ele, então, retorna à condição de equilíbrio quando essa ocorrência é interrompida.

Uma analogia para explicar o equilíbrio estável é utilizando uma esfera em uma concavidade, conforme representado na Figura 08, e aplicando-lhe uma pequena perturbação lateral. Ela irá subir e retornar ao vale da concavidade retomando sua posição de equilíbrio. É importante ressaltar que a perturbação deve ser pequena, pois uma grande pode fazer com que a esfera saia da concavidade, tornando o modelo imprevisível.

Figura 8 - Equilíbrio estável de uma esfera em superfície côncava



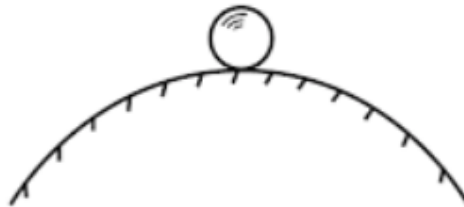
Fonte: Jones (2006).

2.2.1.2 Equilíbrio instável

Um sistema é considerado instável quando uma pequena perturbação resulta em uma grande resposta. Quando essa ocorrência é encerrada, ele não retorna à condição de equilíbrio inicial.

Uma analogia, representada na Figura 09, é uma esfera posicionada, cuidadosamente, no pico de uma superfície convexa. Qualquer perturbação ocasionará um grande deslocamento, e ela não retornará à sua posição de equilíbrio quando esta ocorrência for interrompida.

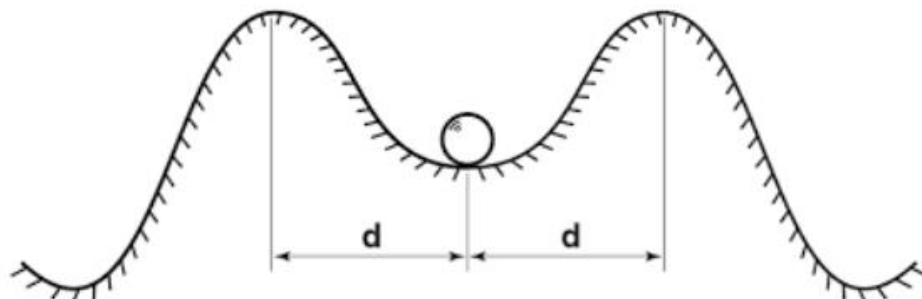
Figura 9 - Equilíbrio instável de uma esfera em superfície convexa



Fonte: Jones (2006).

Outra variação do equilíbrio instável é quando ele apresenta um ponto de equilíbrio que suporta pequenas perturbações e se comporta como um equilíbrio estável. Entretanto, quando estas ocorrências ultrapassam um limite, ele apresenta características de instabilidade. Este tipo de equilíbrio é denominado “metaestável” e pode ser explicado por meio de uma analogia, mostrada na Figura 10, com uma esfera posicionada em um vale e cercada por dois picos.

Figura 10 - Equilíbrio metaestável de uma esfera em um vale cercada por picos



Fonte: Jones (2006).

2.2.2 Pontos de bifurcação e pontos críticos

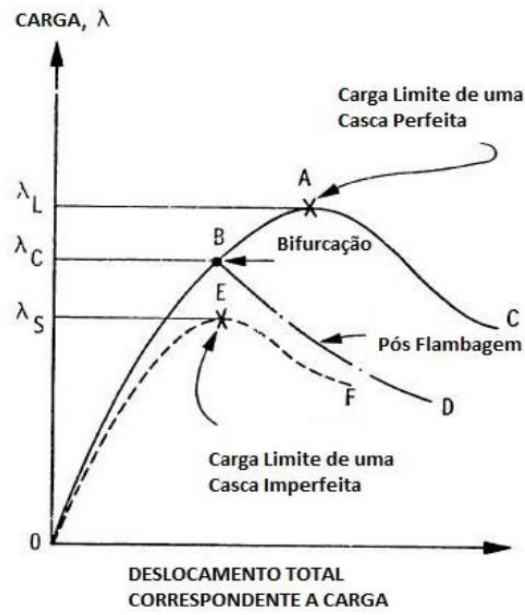
A flambagem em elementos cilíndricos (cascas) pode ser descrita por meio de sua trajetória de equilíbrio. Em um gráfico carga x deslocamento, destacam-se dois comportamentos distintos, o ponto de bifurcação e o ponto crítico.

O primeiro (λ_c) caracteriza-se pela bifurcação do caminho fundamental do equilíbrio em caminhos secundários causando uma mudança súbita da geometria que é expressada na Curva D da Figura 11. Ou o carregamento pode continuar a partir do ponto de bifurcação sem que ocorra a deformação do corpo de prova, atingindo o ponto crítico de uma casca perfeita (λ_l), expressada pela curva C na Figura 11. Esta característica é encontrada em cilindros que não apresentem imperfeições geométricas em sua superfície, denominados “cilindros ideais”. (SILVA, 2009)

O ponto limite (λ_s), também conhecido como carga limite, é o que acontece em geometrias reais que apresentem imperfeições iniciais. Isso pode ser visto na curva F da Figura 11. Caracteriza-se por apresentar apenas uma trajetória secundária quando o ponto é atingido, passando, a estrutura, de estável para instável em um curto período de tempo. Caso a geometria não apresente nenhuma restrição, irá ocorrer a deformação instantânea, denominada “*snap-trough*”. A estrutura, então, retornará a um equilíbrio estável. Uma analogia, representada na Figura 12, pode ser utilizada para mostrar o “*snap-trough*”, no qual uma força é aplicada, gradativamente, em uma barra até que ela perca, instantaneamente, sua estabilidade. Este ato de passagem entre as condições de equilíbrio é o melhor exemplo deste fenômeno.

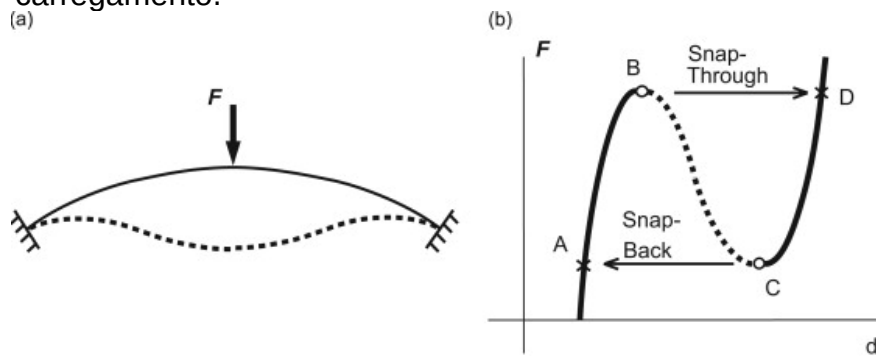
Segundo Blachut e Ifayefunmi (2010), o ponto de bifurcação delimitado dentro do regime linear da flambagem apresenta características elásticas e o ponto limite de um cilindro imperfeito (λ_s) pode ser mensurado. De acordo com Ross (1988), isso pode ser obtido precisamente, caso o corpo de prova apresente tensões de escoamento acentuadas (170 a 250 GPa), podendo utilizar considerações de estabilidade no regime elástico.

Figura 11 - Trajetórias de equilíbrio em cascas ideais e imperfeitas



Fonte: Bushnell (1981).

Figura 12 – Deformação instantânea de uma barra com aplicação gradativa de carregamento.



Fonte: Chandra et al. (2013).

2.2.3 Análise clássica

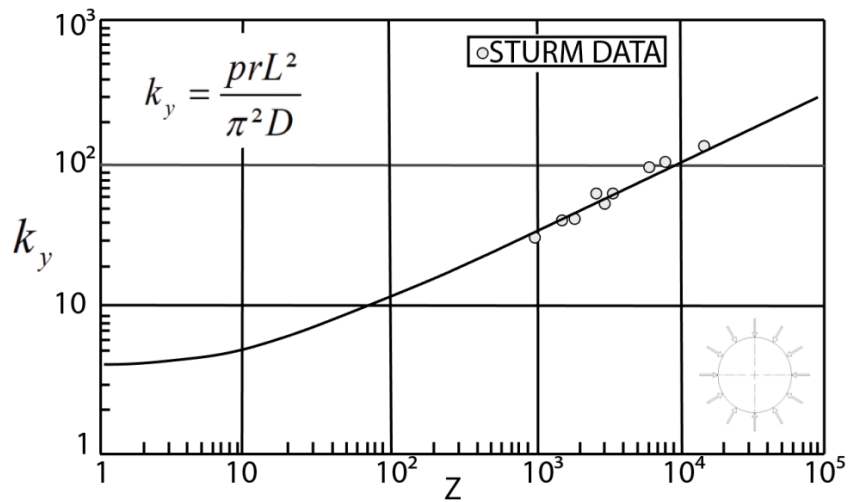
A linearização do ponto de bifurcação, para obtenção da carga crítica de flambagem, é de difícil significado físico e sempre resulta em um problema de autovalor. Uma formulação mais geral do método de equilíbrio transforma o problema da estabilidade em um problema de autovalor. Nesse caso, utilizando-se deste artifício, pode-se, não só, obter a carga crítica de flambagem (autovalor), mas, também, os modos de flambagem (autovetor). A análise clássica de estruturas cilíndricas nada mais é do que uma série de soluções predeterminadas baseadas nesta metodologia. (KRAUTHAMMER, 2001)

Donnell (1933) se destaca por criar sua própria aproximação e interpretação para casos específicos de cilindros de parede fina. Por conta de sua simplicidade, é facilmente empregado para se obter a carga crítica de flambagem. É baseado na hipótese de Kirchhoff-Love com algumas considerações que simplificam a relação de tensão e deslocamento e as equações de equilíbrio. (KRAUTHAMMER, 2001)

Análises clássicas utilizando a teoria de Donnell somente são aplicadas em situações em que a estrutura se comporta como uma membrana, sem considerações de flexão, apenas deformações axiais e circunferenciais. (JONES, 2006)

Em 1940, Samuel B. Batdorf e seus associados publicaram uma série de soluções com condições de contorno e carregamento predeterminados utilizando as equações de Donnell. Estas soluções originaram o código da NASA - SP 8007, e apresentaram um novo parâmetro, chamado "Parâmetro de Curvatura de Batdorf (Z)". Com ele, é possível obter o coeficiente de flambagem (k_y) e, porventura, a pressão de colapso do cilindro (p). Na Figura 13, há um comparativo entre a previsibilidade da obtenção da pressão crítica de flambagem para diversos fatores Z, em relação aos dados obtidos experimentalmente na pesquisa de Sturm (1941) (JONES, 2006)

Figura 13 - Comparativo entre resultados Batdorf e Sturm



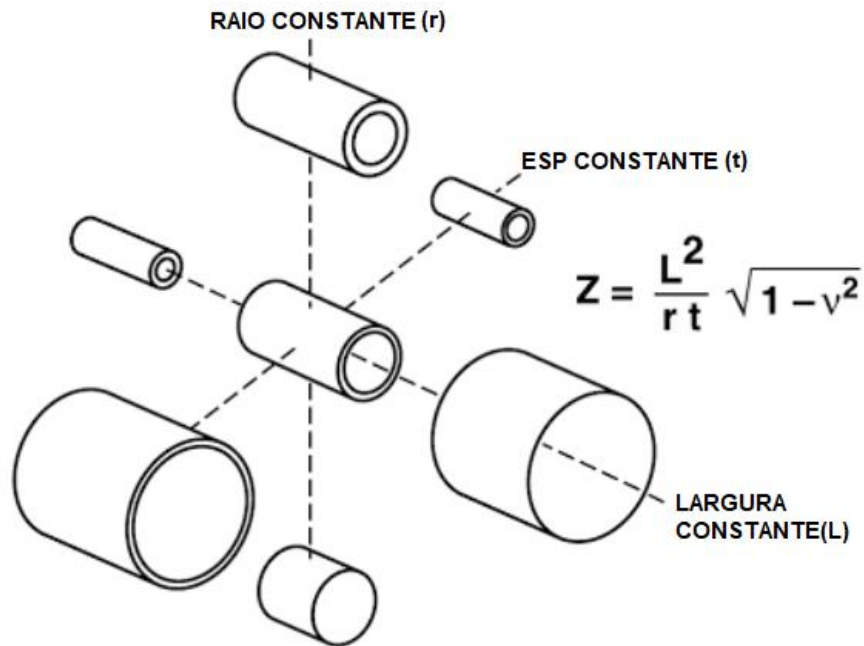
Fonte: Adaptado de Jones (2006).

O parâmetro Z de curvatura de Batdorf (Equação 3) é um fator geométrico. Porém, apresenta um efeito médio por conta da inclusão de Poisson e pode ser utilizado para representar uma série de cilindros, conforme mostrado na Figura 14. Mantendo-se o parâmetro de Batdorf constante e um mesmo valor de L , o cilindro varia de um raio pequeno e uma espessura média para um raio grande e uma espessura fina. Caso o raio se mantenha constante, o cilindro varia de longo e espesso para fino e curto. Mantendo-se constante a espessura, o cilindro varia de um grande comprimento de raio para um pequeno comprimento e raio (JONES, 2006)

$$Z = \frac{L^2}{r.t} \cdot \sqrt{1 - \nu^2}$$

(Equação 3)

Figura 14 - Representação de cilindros para um mesmo valor de Z



Fonte: Jones (2006).

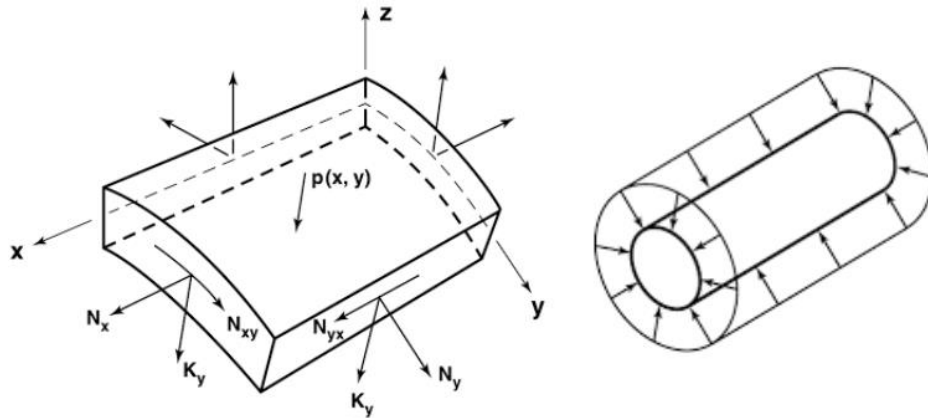
A pressão lateral, atuando no cilindro, adentrando a coordenada z, gera uma força circunferencial N_y e uma tensão σ_y que atua na casca, conforme mostra a Figura 15. Estes elementos são detalhados nas equações 4 e 5.

Outros tipos de pressão atuantes geram diferentes forças e tensões no cilindro. Uma compressão axial gera uma força N_x e uma tensão σ_x gera uma pressão hidrostática que atua em todo o cilindro, e não só em sua parede. De forma geral, trata-se de uma força combinada N_{xy} , N_{yx} e uma tensão de cisalhamento τ_{xy} . Cada tipo de pressão atuante exige sua determinada equação.

$$N_y = p.r \quad (\text{Equação 4})$$

$$\sigma_y = \frac{pr}{t} \quad (\text{Equação 5})$$

Figura 15 - Forças circunferenciais e coeficiente de flambagem em cilindros com pressão lateral.



Fonte: Jones (2006).

Segundo Batdorf (1965), a pressão crítica que ocasiona a flambagem em cilindros com pressão lateral pode ser obtida pela Equação 8, obtida a partir da equação 6.

$$N_y = k_y \cdot \frac{\pi^2 \cdot K}{L^2} \quad (\text{Equação 6})$$

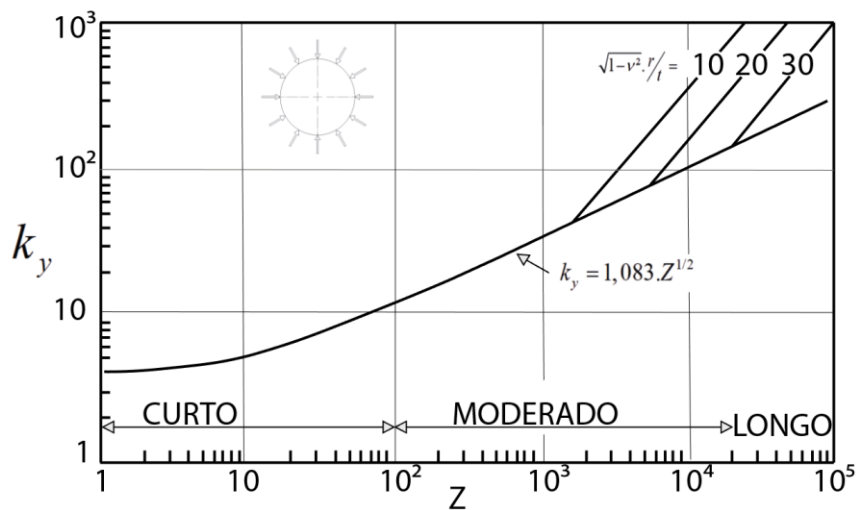
$$p \cdot r = k_y \cdot \frac{\pi^2 \cdot K}{L^2} \quad (\text{Equação 7})$$

$$p = k_y \cdot \frac{\pi^2 \cdot K}{L^2 \cdot r} \quad (\text{Equação 8})$$

Para cilindros de comprimento moderado, conforme mostrado na Figura 16, o coeficiente de flambagem (k_y) é $1,0396Z^{1/2}$, e a rigidez da membrana do cilindro é representada por K. Esta última pode ser obtida pela Equação 9:

$$K = \frac{E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (\text{Equação 9})$$

Figura 16 - Gráfico K x Z



Fonte: Adaptado de Jones (2006).

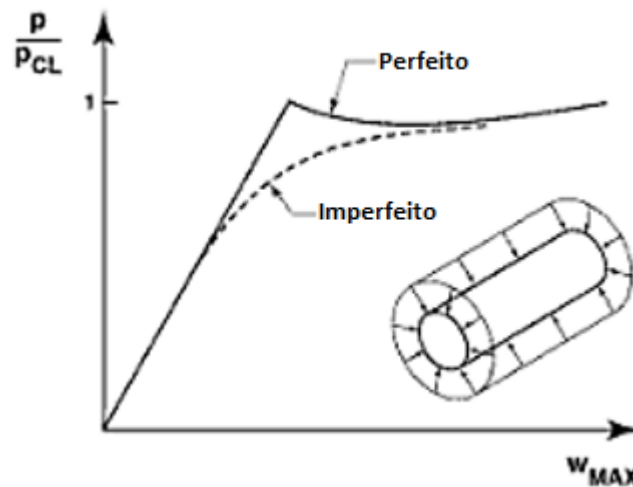
Posteriormente, as soluções apresentadas por Batdorf, Cheng e Ho (1963) mostraram uma equação genérica baseada na manipulação numérica da teoria de Flugge, que é considerada mais refinada do que a linearização das equações de estabilidade de Donnell. Porém, as duas interpretações, tanto a de Donnell como a de Flugge, têm, em seu cerne, a simplicidade de aplicação para casos específicos de cilindro de parede fina. Esta aproximação permite, de uma maneira simples, obter a pressão crítica de cilindros sob pressão lateral, e pode ser obtida a partir da Equação 10. (FRANO; FORASASSI, 2007)

$$p = \frac{2\pi.E.t^2}{3\sqrt{6}.(1-\nu)^{3/4}.r.L} \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (\text{Equação 10})$$

2.2.4 Imperfeições

A estabilidade de cilindros é dependente das imperfeições em sua geometria. Southwell observou discrepâncias entre dados experimentais e análises clássicas. Em resumo, as cargas de flambagem eram menores nas análises experimentais quando comparadas com as previsões em um cilindro perfeito, como mostrado na Figura 17. (CASTRO et al., 2014)

Figura 17 - Carga de Euler x Deslocamento máximo



Fonte: Jones (2006).

As primeiras tentativas de análise computacional de placas e cascas assumiam uma geometria perfeita baseada na ideia de que a carga de flambagem seria igual à carga crítica elástica. Infelizmente, a falta de confiabilidade destes modelos computacionais demonstrou discrepância quando comparada com os modelos experimentais. Esta inconsistência ocorreu por conta da falta de aferição da geometria inicial, causando variações na carga crítica de flambagem. (MARTINS et al., 2015)

Segundo Khakimova (2016), qualquer método de fabricação tem uma variação entre a estrutura real e a idealizada. Por isso, é necessário considerar estas variações nos modelos teóricos para descrever, corretamente, o fenômeno de flambagem. A técnica clássica de aferição de imperfeições em geometrias reais baseia-se em CMM – *Coordinates Mensuring Machine*, e faz uso de instrumentos de mensuração por contato. O mais comum é o sensor LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*. Com esta técnica, é possível aferir as variações radiais de um cilindro imperfeito e executar seu mapeamento geométrico. Esta técnica é mostrada na Figura 18, na qual um conjunto de sensores LVDT é utilizado para mapeamento de um tampo semielíptico. (HAIFENG et al., 2017)

As técnicas modernas de mapeamento de imperfeições baseiam-se em inspeções auxiliadas por computação (CAI), consideradas de não-contato, contemplando *scanners* infravermelhos (Figura 19) ou fotogrametria. Esta técnica, além de econômica, é de rápida experimentação quando comparada com técnicas CMM. Também, auxilia na conversão de modelos físicos em modelos tridimensionais CAD, promovendo uma análise computacional mais assertiva para determinação da carga crítica de flambagem. (HAIFENG et al., 2017)

Figura 18 – Mapeamento geométrico utilizando sensores LVDT



Fonte: Singer, Arbocz e Weller (2002).

2.2.5 Método numérico

Para determinar, numericamente, a carga de flambagem em uma estrutura, existem duas maneiras. A primeira é uma análise linear-elástica de autovalor, que corresponde ao carregamento crítico, e autovetor, que é o modo de instabilidade. A segunda, uma análise não linear. Elas equivalem à linearização das equações de equilíbrio de Donnell para obtenção da carga crítica de flambagem. Os resultados destas análises, geralmente, apresentam cargas de flambagem superior às reais. Porém, a capacidade computacional requerida é menor do que quando comparado à análise não-linear. Neste tipo de análise, a magnitude dos deslocamentos pós-colapso permanece indefinida.

Figura 19 - Mapeamento geométrico utilizando *blue scanner*

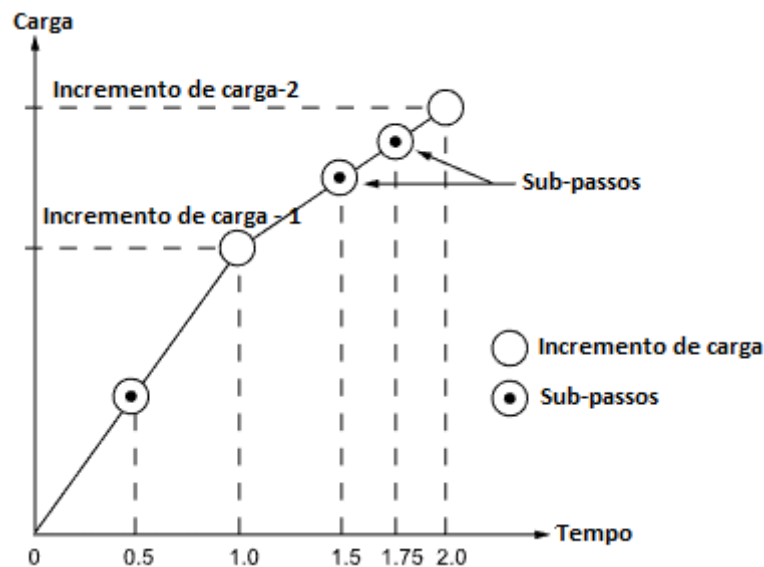


Fonte: Haifeng et al. (2002).

A análise não linear é chamada de elasto-plástica. São consideradas grandes deformações e a não-linearidade do material. A carga é aplicada gradativamente e, a cada passo de aplicação da carga, são calculadas as reações da estrutura e a nova matriz de rigidez do material, até o momento em que ela se torna instável e a análise perde a convergência. Apesar de o poder computacional requerido ser maior do que em uma análise linear, os resultados obtidos da carga de flambagem apresentam bons indicativos. (SUBRAMANI; SUGATHAN, 2012)

O software comercial, em especial o ANSYS Workbench, utiliza, para análise não-linear, o método de Newton-Rapshon, no qual a carga é dividida em pequenos incrementos e aplicada gradativamente na estrutura. Se o critério de convergência adotado não for alcançado (Figura 20), ele reavalia o carregamento e atualiza a matriz de rigidez até a obtenção de uma nova solução. (ANSYS, 2013)

Figura 20 – Incrementos no carregamento



Fonte: ANSYS (2013).

A análise não-linear para obtenção da carga de flambagem detém uma característica única, já que a perda de convergência é um indicativo de ocorrência de flambagem. Para determinar o último instante de perda de convergência e, assim, determinar a carga, é necessário incluir um indicativo de bissecção, que é responsável por indicar a perda de instabilidade. (ANSYS, 2013)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nas próximas seções, os materiais e os métodos para análise de casca cilíndrica sujeita à carga de pressão lateral serão detalhados para mostrar a bancada experimental e os corpos de prova confeccionados, bem como, os parâmetros utilizados nas análises numéricas e experimentais.

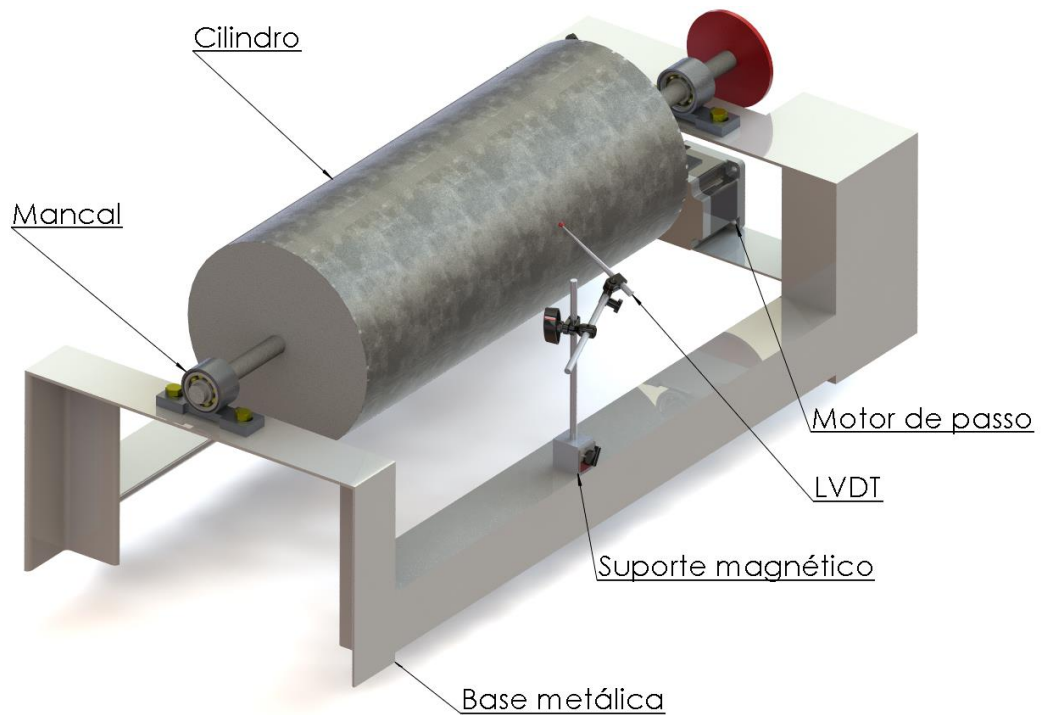
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL E CORPOS DE PROVA

A confecção da bancada e o experimento foram realizados na UNESP – Ilha Solteira, nas dependências do Laboratório de Simulação Numérica - LabSiN do Departamento de Engenharia Mecânica e no Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural – NEPAE do Departamento de Engenharia Civil. No primeiro, foram feita a fotogrametria e análises numéricas computacionais, e, no segundo, as aferições com os sensores LVDT e o ensaio destrutivo. O experimento foi dividido em duas etapas, a primeira é o mapeamento geométrico dos corpos de prova, e a segunda é o ensaio destrutivo.

A bancada experimental (Figuras 21,22 e 23) foi confeccionada conforme experimentos de Golzan e Showkati (2011), composta de uma base de aço rígida com mancais nas extremidades, concêntricos entre si. De um lado, há um motor de passo e um sistema de engrenagem que auxiliam na rotação do corpo de prova.

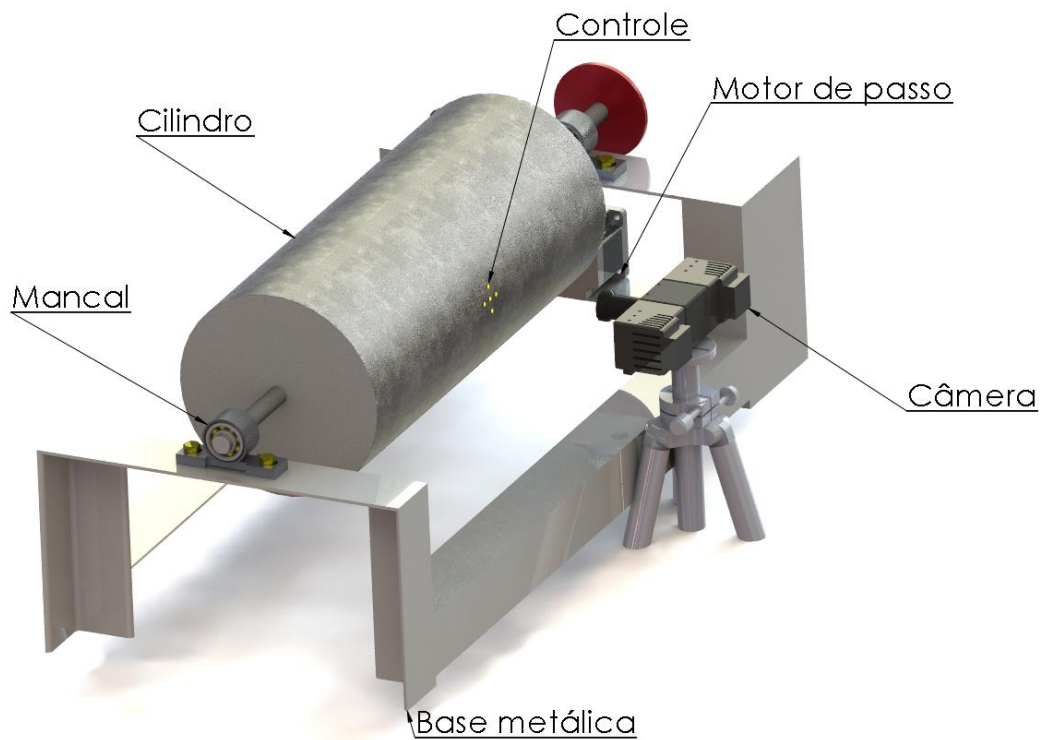
A bancada experimental foi confeccionada para executar as duas fases do experimento: o mapeamento geométrico da superfície (Figura 21 e 22), cujos resultados são expostos nos itens 4.1 e 4.2, e o ensaio destrutivo (Figura 23), onde resultados são mostrados no item 4.5. Na fase do ensaio destrutivo foi acoplado ao cilindro uma bomba de vácuo e manômetro, mais bem detalhado no item 3.6.

Figura 21 – Bancada experimental durante o mapeamento com sensores LVDT.



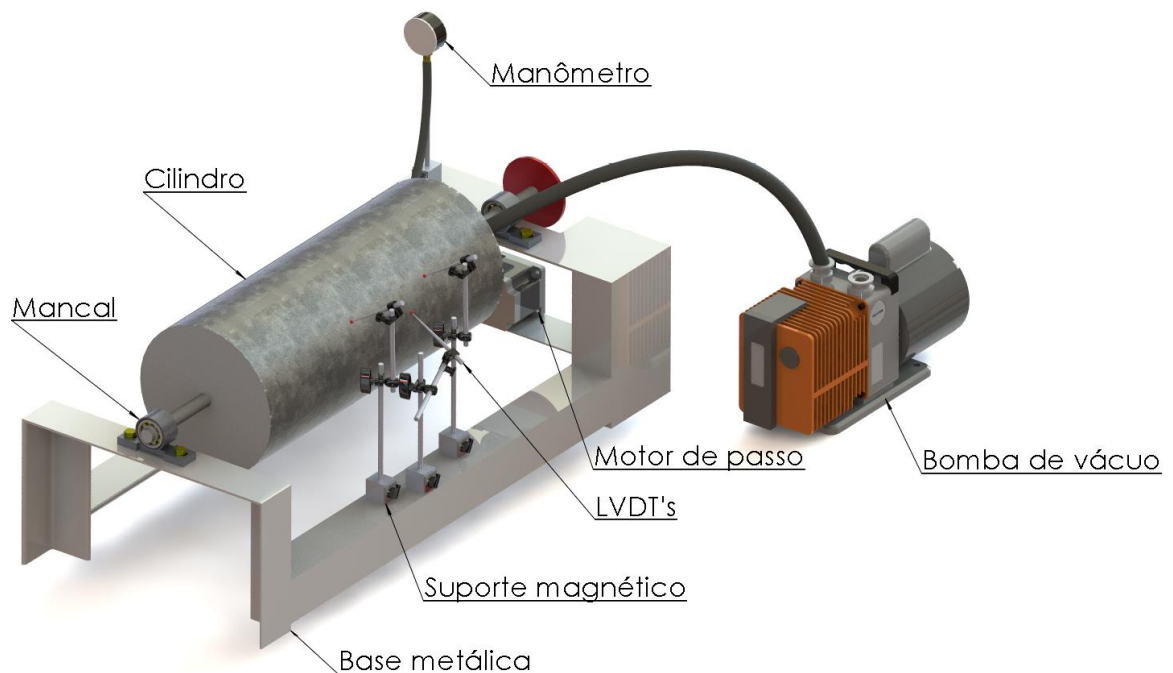
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 – Bancada experimental durante o mapeamento com câmera.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Bancada experimental durante o ensaio destrutivo com sensores LVDT.



Fonte: Elaborada pelo autor

Como mostrado na Figura 24, os corpos de prova ensaiados têm as características geométricas descritas na Tabela 01 (dois corpos de prova foram confeccionados). As superfícies do cilindro foram confeccionadas em chapas de aço carbono com revestimento superficial de zinco, os tampos de fechamento em aço carbono sem revestimento superficial. Com espessura da ordem de 10 vezes superior à da superfície, a espessuras dos tampos laterais conferem ao experimento o regime de carregamento com pressão lateral, provocando o colapso somente da superfície.

A confecção dos cilindros segue o preceito de fabricação realista comum em instalações industriais. O cilindro foi calandrado a frio e conta com junta longitudinal de união por meio de solda TIG. Este preceito de fabricação apresenta vantagem na obtenção de resultados experimentais podendo ser correlacionado com métodos empíricos de projeto, sem deixar dúvidas quanto ao efeito do material na obtenção de resultados. (SINGER; ARBOCZ; WELLER, 2002).

Figura 24 - Corpo de prova utilizado nos ensaios.



Fonte: Elaborada pelo autor

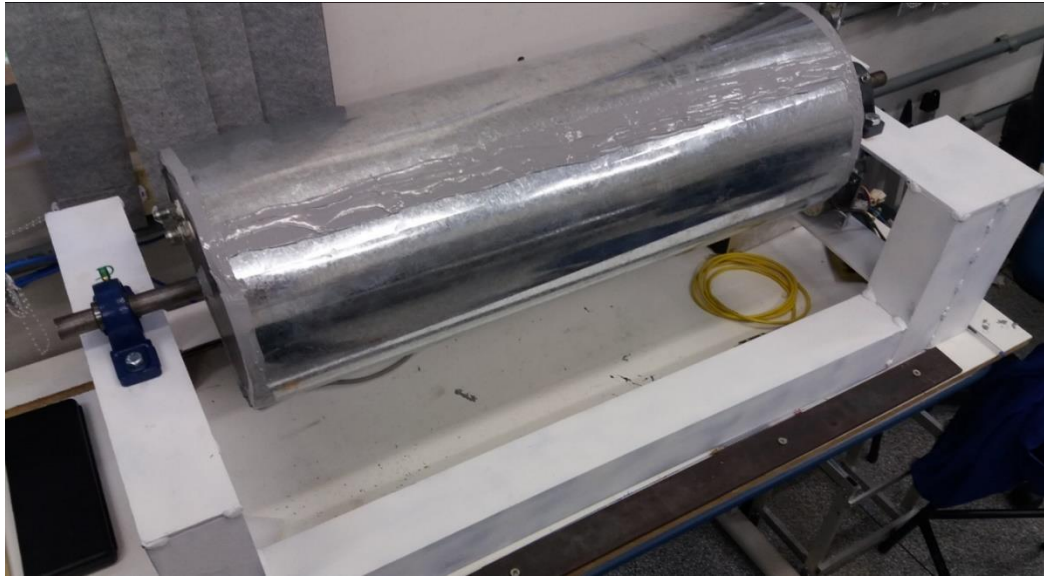
Tabela 1 - Propriedades geométricas do corpo de prova

Propriedades	Cilindros
Raio Perfeito[mm]	125
Comprimento[mm]	705
Espessura da Parede [mm]	0,45

Fonte: Elaborada pelo autor

A estanqueidade é essencial para que a geração do vácuo interno seja constante. Isto foi feito com adesivo à base de poliuretano, com cura de 48 horas, aplicado nas juntas longitudinais e na união da superfície com os tampos laterais, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 – Corpo de prova na bancada após aplicação de adesivo de poliuretano.



Fonte: Elaborada pelo autor

Para conhecer a propriedade do material utilizado, Campos (2017) realizou ensaios de tração em 5 corpos de prova extraídos da chapa utilizada para confeccionar os cilindros. Estas propriedades mecânicas são listadas na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades mecânicas do material

Propriedades Mecânicas	
Módulo de Elasticidade[GPa]	194,77
Tensão ao Escoamento[MPa]	335,92
Limite de Resistencia[MPa]	391,71
Tensão de Ruptura[MPa]	354,9

Fonte: Campos (2017).

3.2 MAPEAMENTO DA GEOMETRIA

Para realizar a análise pelo método dos elementos finitos, foi necessário formar a estrutura tridimensional, para, assim, efetuar a simulação numérica. Para obter um modelo que capture todas as imperfeições da geometria, foram utilizadas duas técnicas de inspeção de geometria, para simplificar, definidas como:

1. **Mapeamento LVDT:** utilizando a técnica de contato com sensores LVDT (CMM – *Coordinates Mensuring Machine*);
2. **Mapeamento Fotogrametria:** utilizando a técnica de não-contato fotogrametria (CAI – *Computer Aided Inspection*).

3.2.1 Mapeamento LVDT

O sensor LVDT é um instrumento que realiza medições lineares de deslocamento. Somente o sensor LVDT não é capaz de gerar uma estrutura tridimensional utilizada na simulação, pois apenas capta os desvios positivos e negativos tomando o cilindro ideal como referência. Quando somados os dados extraídos do equipamento a um cilindro perfeito referencial, foi possível obter os desvios radiais da estrutura, possibilitando, assim, a conceituação tridimensional do corpo de prova.

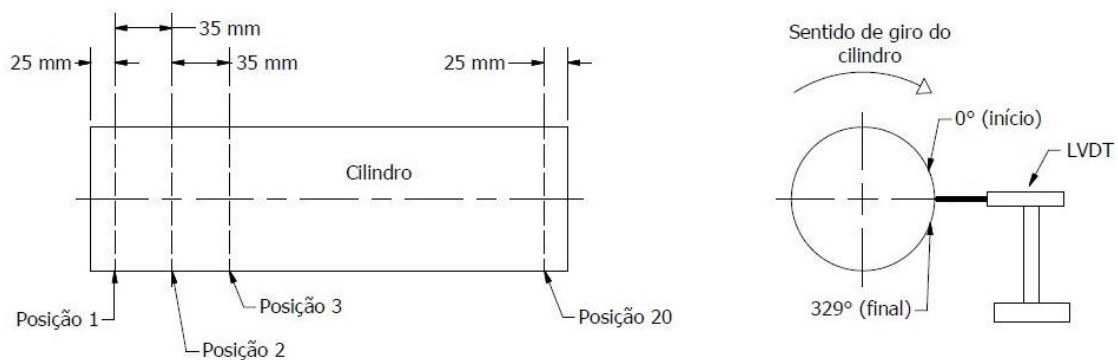
Os sensores LVDT utilizados são fabricados pela empresa KYOWA, modelo DTH-A30, e sua aquisição de dados foi feita pelo sistema DASyLab.

Para a execução do mapeamento geométrico, o cilindro foi fixado aos mancais pelo seu eixo e apenas um sensor LVDT foi utilizado. Com o cilindro fixado na bancada experimental, ele foi ajustado para a posição angular denominada 0, fixou-se um LVDT na posição axial 1 (Figura 26) e direcionou-se sua haste para que ela ficasse normal ao cilindro (Figura 27). O LVDT foi calibrado para que aquela posição inicial fosse o zero absoluto. Inicia-se a rotação do cilindro e o equipamento capta as variações de dimensões em torno do seu eixo de giro. Nas regiões próximas à vedação, foi impossível executar a aferição por contato utilizando os sensores LVDT, pois ele fica preso à superfície irregular. Com isto, o deslocamento angular efetivo, considerado para a medição, foi de 350 graus, e não uma rotação completa de 360 graus.

A distância axial para se efetuar a primeira medição foi 25 mm da tampa e as medições seguintes são espaçadas em 35 mm, com 20 faixas de medição. Cada uma apresenta 35 tomadas de deslocamento. Obtêm-se várias faixas de variações radiais do cilindro que, somadas, formam a geometria imperfeita.

Ressalta-se a importância de se obter um cilindro no qual haja possibilidade de se obter um raio perfeito, para que as tomadas de deslocamento sejam somadas ou subtraídas com confiabilidade a partir do seu raio perfeito. Isto foi obtido confeccionando-se um eixo que ligue as duas tampas laterais, impedindo que o corpo de prova apresente deslocamentos não desejados do seu raio perfeito no momento do acoplamento à bancada experimental.

Figura 26 - Esquemático da medição de imperfeição geométrica com sensor LVDT



Fonte: Elaborada pelo autor

Com todas as medidas realizadas pelo sensor LVDT, foi necessário transformar os pontos de deslocamento em coordenadas no espaço, dado que os pontos obtidos estão em função de coordenadas cilíndricas. Para que o software interprete a nuvem de pontos, eles devem ser transformados em coordenadas cartesianas e, a partir delas, obter a geometria da superfície. O software utilizado para converter a nuvem de pontos em uma superfície foi o SolidWorks, em especial a ferramenta "Scan to 3D".

Figura 27 - Mapeamento da geometria com sensor LVDT.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Mapeamento fotogrametria

A fotogrametria é uma técnica de inspeção de não-contato auxiliada por computador, que busca modelar, em três dimensões, uma estrutura utilizando apenas imagens em duas dimensões, associando várias imagens por meio de pontos comuns. Para esta associação, é necessário que o deslocamento seja tal que as imagens processadas tenham parte da anterior e parte da nova capturada. (EGELS; KASSER, 2002).

Outras técnicas de inspeção auxiliadas por computador utilizam equipamentos denominados “estéreos”, constituídos por câmeras infravermelhas, que são mais comuns para mapeamento da superfície. Porém, apresentam um alto custo experimental. Com o aumento da resolução das câmeras digitais e o poder de processamento dos computadores pessoais, a fotogrametria tem conseguido destaque por demandar um menor custo na inspeção de geometrias diversas.

Para que o algoritmo possa associar as imagens e conceber a estrutura mapeada, há a necessidade de incluírem-se pontos de referências. Segundo Deseillingy e Clery (2012), quanto mais rica a textura da superfície da estrutura, mais assertiva a concepção da estrutura mapeada. Assim, para realizar a inspeção dos cilindros, foi feita uma pintura texturizada com fundo branco e manchas pretas aleatórias (Figura 28).

A tomada das imagens a serem fotoprocessadas deve seguir um padrão, no qual é necessário ter imagens do cilindro em seus 360°. Elas devem possuir um ponto em comum, ou seja, a cada duas fotos, deve existir um trecho da superfície comum entre elas.

Foram capturadas 60 fotos ao redor dos corpos de prova 01 e 02, rotacionando-os em seus eixos. Elas foram divididas em três lotes: extremidade esquerda, centro e extremidade direita, conforme mostrado na Figura 29.

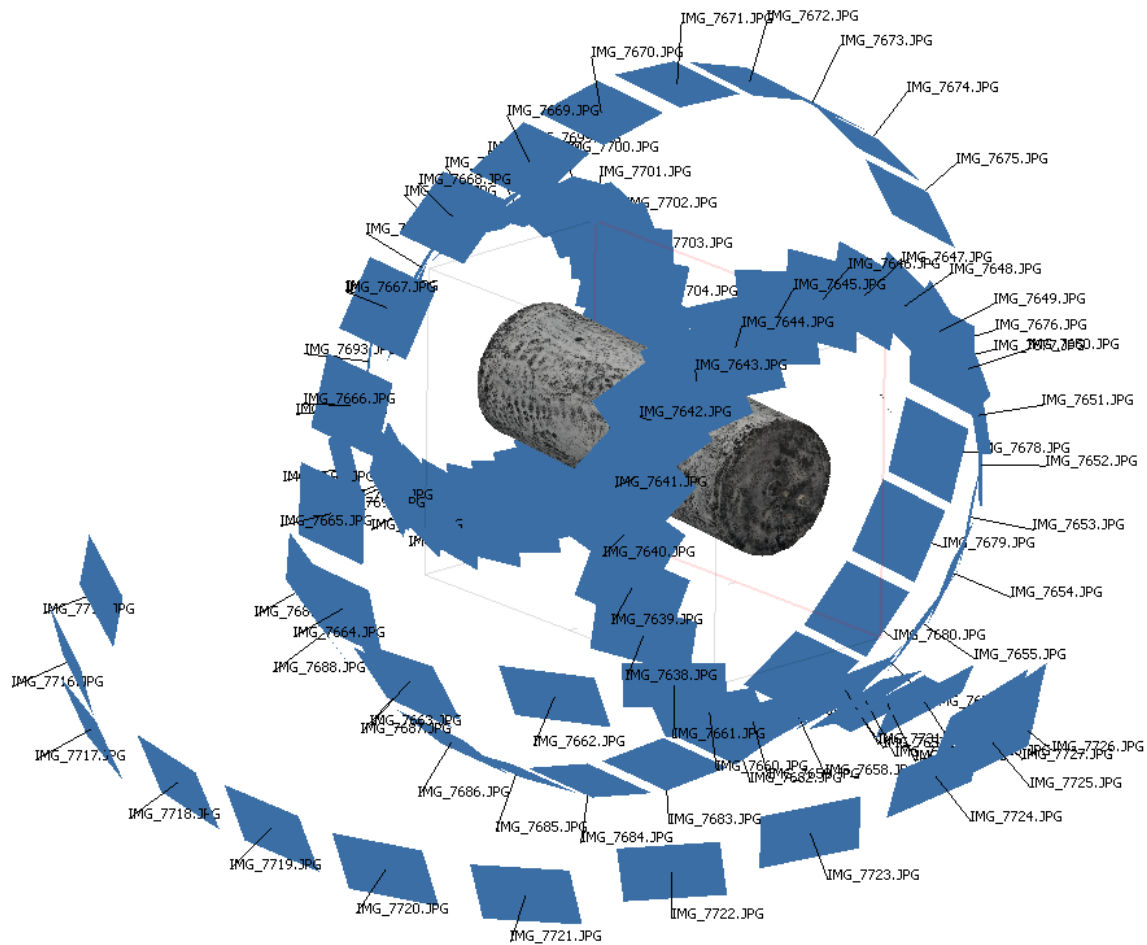
Figura 28 - Textura feita no cilindro: CDP-1 (esquerda) e CDP-2 (direita).



Fonte: Elaborada pelo autor

A câmera fotográfica utilizada para captura das imagens é do tipo comum, com 8 megapixels de resolução, equivalente à resolução de câmeras dos atuais celulares. Esta escolha não foi aleatória, quando comparadas com máquinas de alta resolução, de 12 a 24 megapixels, apresentam pouco foco, ideal para captura de imagem a serem concebidas por fotogrametria.

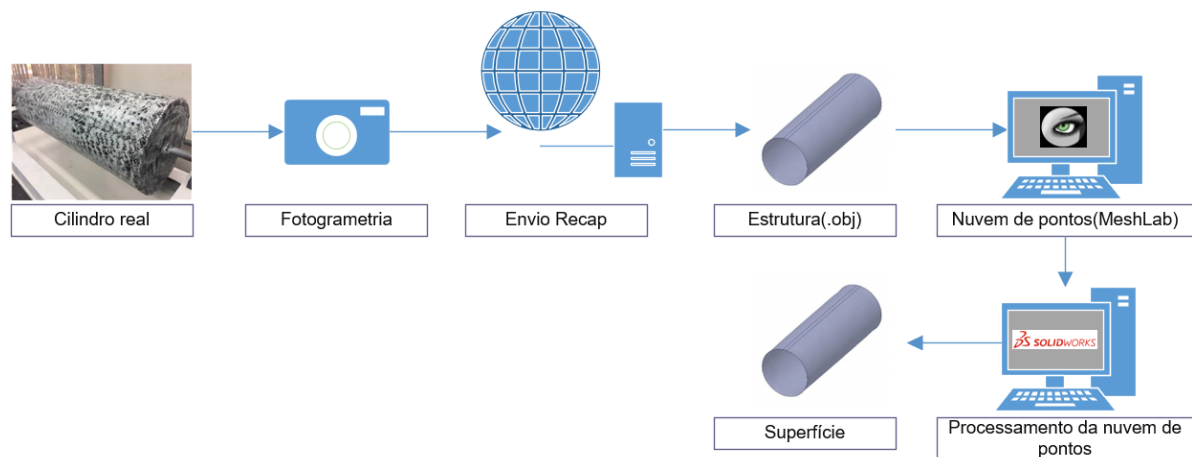
Figura 29 - Esquemático de captura de imagens para Fotogrametria



Fonte: Elaborada pelo autor

As imagens capturadas foram enviadas ao software Recap, da Autodesk, para que fossem processadas, retornando uma estrutura tridimensional. Depois, foi extraída uma nuvem de pontos desta estrutura com o software Meshlab. Este aglomerado foi processado pelo software Solidworks, gerando uma superfície que pode ser simulada. Isto ocorre porque as extensões do software Recap não geram uma superfície e, sim, um objeto com extensões. stl ou .obj. Estas extensões não são interpretadas pelo software utilizado na simulação numérica (Ansys), necessitando, assim, passá-las por este tratamento antes da simulação. Na Figura 30 um esquema deste tratamento é apresentado.

Figura 30 - Esquemático do tratamento da Fotogrametria



Fonte: Elaborada pelo autor

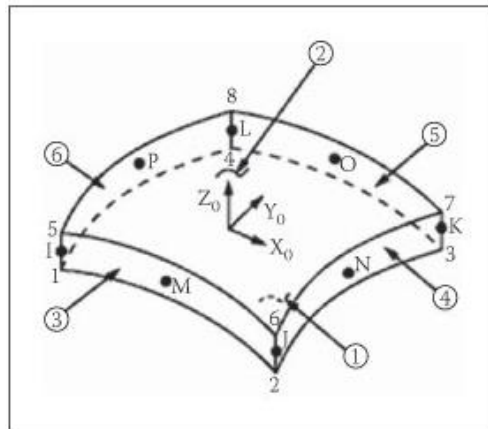
3.3 ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Na análise numérica computacional será utilizado o software comercial ANSYS® (ANSYS, 2013), um dos mais utilizados para análise numérica via Método dos Elementos Finitos, com aplicação ao problema da flambagem. O ANSYS® será utilizado para determinar as cargas críticas, tensões e os modos de flambagem, por meio da análise linear elástica por autovalores para o cilindro ideal (sem imperfeições geométricas) e análise não-linear para o cilindro real (com imperfeições geométricas).

O elemento finito utilizado para execução da simulação numérica foi o elemento Shell281 do ANSYS®, esse elemento é do tipo casca, contendo 8 nós e 6 graus de liberdade por nó, com 3 translações e 3 rotações (Figura 31).

A geração da malha no cilindro foi realizada automaticamente pelo software, porém, há o controle de sua densidade quanto à descontinuidade na superfície a ser simulada. Descontinuidades maiores apresentam maior densidade e vice-versa. A Tabela 3 mostra os dados da malha utilizada.

Figura 31 - Elemento finito Shell281 do ANSYS®



Fonte: ANSYS (2013).

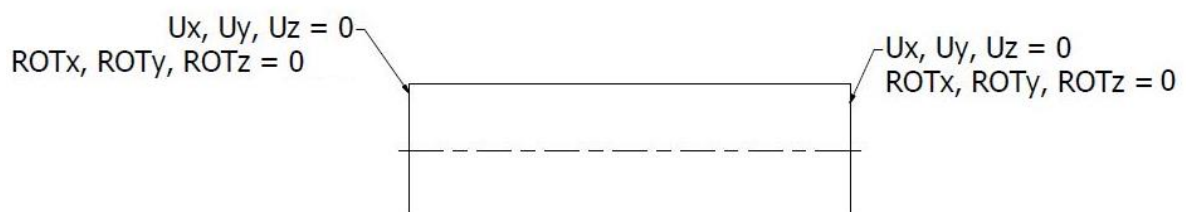
Tabela 3 - Malha de elementos finitos

Controle de Malha	Cilindro-Fotprocessado (CP01&02)	Cilindro - LVDT's (CP01)
Número de Elementos	42014	41914
Número de Nós	126356	126020
Espessura do Elemento[mm]	0,45	0,45
Jacobiano(meda)	1,11	1,08

Fonte: Elaborada pelo autor

As condições de contorno, também chamadas de restrições ao movimento, são proporcionadas pela bancada experimental e pela soldagem da superfície aos tampos da extremidade. Neste cenário, tem-se o cilindro restrito aos graus de liberdade de translação (U_x , U_y e U_z) e rotação (ROT_x , ROT_y e ROT_z), conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 - Condições de contorno

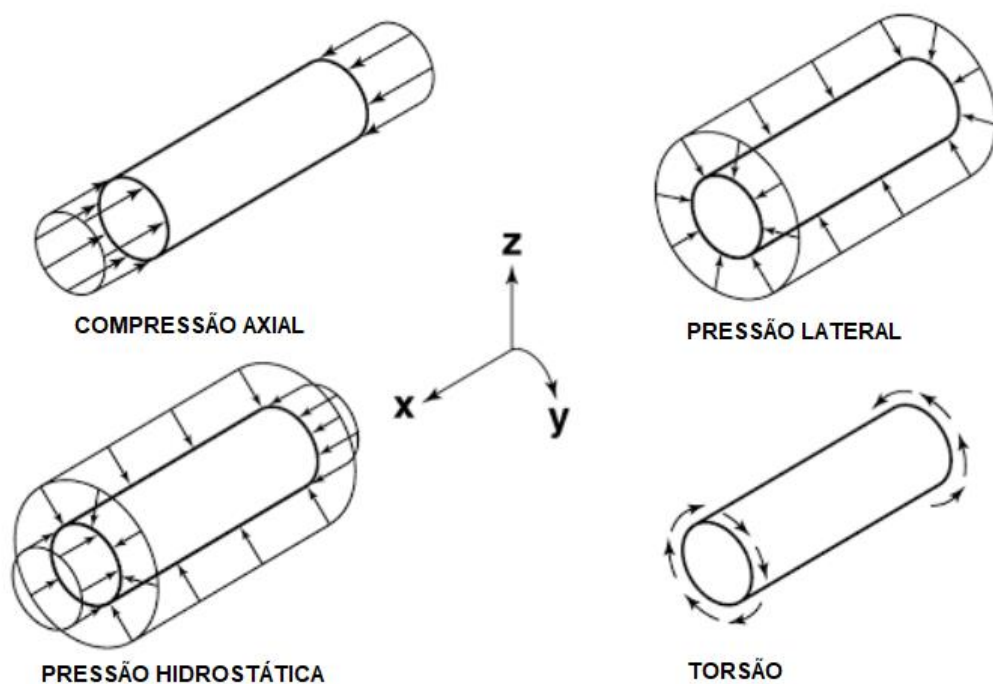


Fonte: Elaborada pelo autor

Utilizou-se uma bomba de vácuo como fonte de carregamento, esta é constituída de um estágio e capacidade de 1"1/2 CFM. A bomba de vácuo conectada ao interior do cilindro (corpo de prova) gera um vácuo em seu interior, proporcionando uma carga uniformemente distribuída externa à superfície devido a diferença de pressão interna e externa. Quando menor a pressão interna gerada pela bomba de vácuo, maior é a pressão externa devido à pressão atmosférica.

Ocorre, também, a pressão nos tampos laterais. Porém, eles foram confeccionados com elevada espessura, proporcionando rigidez elevada, e, portanto, não sofrem os efeitos de flambagem do vácuo gerado. Podem, assim, ser desconsiderados na análise numérica. Este tipo de carregamento é denominado "carregamento lateral" (Figura 33) e só é possível por conta da elevada espessura dos tampos laterais, nos quais não ocorre a flambagem. Caso a espessura dos tampos fosse a mesma que a da superfície, ocorreria a flambagem em todo o corpo de prova. Este tipo de carregamento é denominado "hidrostático" e não foi avaliado nesse trabalho.

Figura 33 - Tipos de carregamento



Fonte: Jones (2006).

3.4 ENSAIO EXPERIMENTAL DESTRUTIVO

Neste item, são detalhados os ensaios experimentais destrutivos realizados. Este ensaio consiste na geração de um vácuo interno até o total colapso da superfície do cilindro.

Como a flambagem leva a uma falha repentina da estrutura é necessário determinar o instante que ocorre a deformação instantânea (*snap-trough*) e relacionar com a pressão no cilindro para determinar a pressão máxima. Para se determinar esse instante foram utilizadas duas técnicas de inspeção de geometria, para simplificar, definidas como:

1. **Ensaio LVDT:** utilizando sensores LVDT posicionados em pontos estratégicos pré-determinados;
2. **Ensaio Fotovelocidade:** utilizando uma câmera de alta velocidade direcionada para uma região estratégica pré-determinada.

3.4.1 Ensaio LVDT

A flambagem é caracterizada pela ocorrência de um grande deslocamento radial na estrutura. Para capturar este deslocamento, três sensores LVDT, fixados na bancada por base magnética, foram posicionados em diferentes pontos do corpo de prova, todos apontando para a linha de centro do cilindro. Esses pontos estratégicos pré-determinados foram selecionados a partir da simulação numérica. A Figura 34 mostra essa situação de montagem.

Com o vácuo gerado no cilindro, os sensores LVDT medem os deslocamentos radiais de sua parede. Segundo JONES (2006), em estruturas com imperfeições geométricas, a flambagem não ocorre instantaneamente como nas estruturas perfeitas. As regiões em que as imperfeições coincidem com as possíveis ondas de flambagem atenuam a instabilidade e, durante o ensaio, apresentam um leve deslocamento antes da ocorrência da flambagem.

O sistema de aquisição dos sensores LVDT foi sincronizado com o manômetro. Esta sincronização foi feita por meio de uma filmagem. Ela se inicia exatamente no momento da ligação da bomba de vácuo. Com isto, foi possível comparar o tempo total de captura de deslocamento dos sensores LVDT, também iniciado com a ligação da bomba de vácuo, com a leitura do manômetro.

A ocorrência do deslocamento radial da parede do cilindro marca o início da flambagem, e, por conta da sincronização entre sensores LVDT e manômetro, a carga de flambagem pode ser lida no manômetro.

Figura 34 - Bancada experimental com sensores LVDT posicionados em pontos pré-determinados.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4.2 Ensaio fotovelocidade

Esta técnica permite eliminar do processo de experimentação todo o aparato por contato. Consiste em posicionar a câmera de alta velocidade (Figura 35) direcionada para uma região do cilindro no qual a flambagem ocorre, essa região estratégica pré-determinada foi selecionada a partir da simulação numérica.

Para determinar o instante que a flambagem ocorre utilizou-se a câmera PHOTRON FASTCAM SA3 com taxa de amostragem para o ensaio de 500 frames por segundo. Para determinar a pressão de flambagem utilizou-se o sensor digital de pressão absoluta DS 1701 acoplado ao interior do cilindro.

Por conta da alta amostragem, característica típica desta técnica, a sincronia utilizando filmagem externa torna-se impossível, já que qualquer defasagem entre as etapas do experimento (ligar a bomba, iniciar a filmagem do manômetro e iniciar a captura pela câmara de alta velocidade) poderia causar uma falta de sincronia. Para resolver este problema, foi confeccionado um sistema para aquisição do vácuo interno, utilizando um sensor de pressão absoluta acoplado ao corpo de prova. Com este aparatado foi possível obter a pressão máxima, anterior ao *snap-trough*, com confiabilidade.

Figura 35 – Bancada de fotovelocidade montada



Fonte: Elaborada pelo autor

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e comparados os resultados do mapeamento da geometria, análise do instante que ocorre a flambagem (snap-trough) e a determinação da carga de flambagem experimental e numérica.

Para realização dos ensaios experimentais e numéricos foram utilizados dois Corpos de Prova praticamente idênticos e as metodologias adotadas para cada um estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Metodologias utilizadas para os Corpos de Prova CDP-1 e CDP-2.

Metodologia	Corpo de Prova	CDP-1	CDP-2
Mapeamento da geometria	LVDT	✓	-
	Fotogrametria	✓	✓
Instante da flambagem (snap-trough)	LVDT	✓	-
	Fotovelocidade	-	✓
Pressão de flambagem (experimental)	Manômetro	✓	-
	Sensor Digital	-	✓
Pressão de flambagem (numérica)	ANSYS®	✓	✓

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1 MAPEAMENTO LVDT

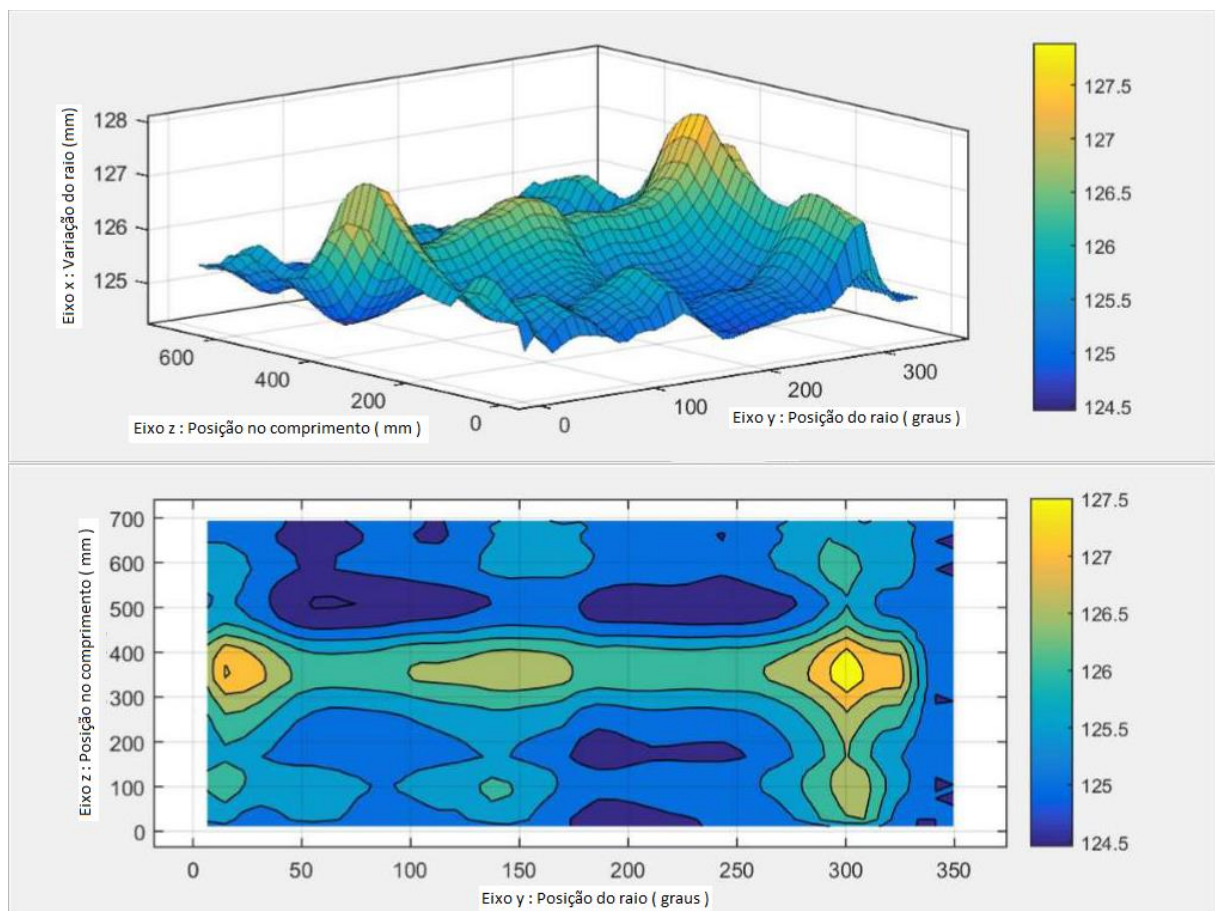
Considerando o raio do cilindro ideal, os deslocamentos lineares capturados pelos sensores LVDT foram adicionados a estes valores. A Figura 36 mostra as variações em resultados absolutos. Ou seja, o valor de 125 mm no eixo X desta imagem representa o raio ideal, com as variações somadas a este raio. O eixo Z representa o comprimento do corpo de prova. O eixo Y, os graus de rotação.

Ressalta-se que a captura total da circunferência do cilindro não pode ser executada devido a região em que há solda e vedação, o sensor LVDT apresenta medidas pouco confiáveis por conta da restrição que a substância vedante impõe à ponta do sensor LVDT. Por isso, a tomada da circunferência foi feita até 350°. Para conceber a estrutura tridimensional nestes 10° remanescentes, são considerados raios perfeitos, sem nenhuma variação dimensional.

Nas regiões próximas às soldas, entre 0° e 50° , 300° e 350° , e no comprimento entre 300 e 400mm, ocorrem as maiores variações nas medições de imperfeição. Isso indica a formação de um vinco no corpo de prova, decorrente do processo de conformação a frio, atenuada pelo processo de soldagem.

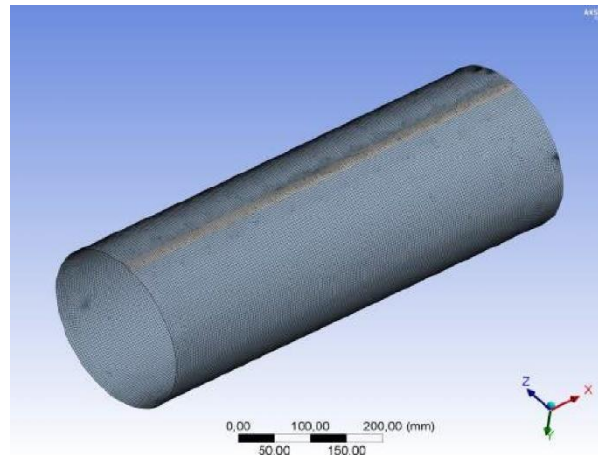
A geometria de casca tridimensional concebida a partir da nuvem de pontos obtida pelos sensores LVDT é mostrada na Figura 37. Somente o Corpo de Prova CDP-1 foi mapeado por meio dessa técnica.

Figura 36 - Imperfeições geométricas no CDP-1 com sensores LVDT.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 37- Geometria 3D obtida com sensores LVDT do CDP-1.

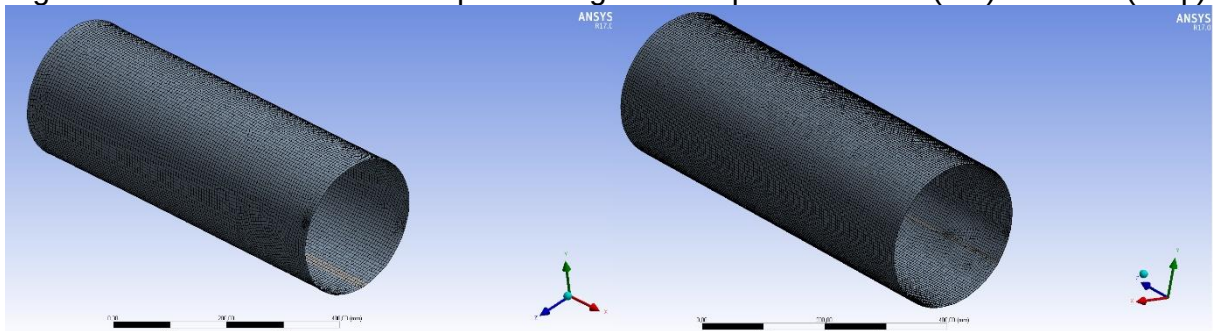


Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 MAPEAMENTO FOTOGRAMETRIA

Em contrapartida aos dados obtidos pelas técnicas de inspeção por contato com sensores LVDT a fotogrametria apresenta ganhos experimentais evidentes. Aqui, há a necessidade de tratamento dos dados capturados para se conceber a estrutura tridimensional a ser analisada. Porém, o tratamento destes dados limita-se à obtenção de extensão compatível com o software de análise numérica. Foi necessário, também, aplicar um fator de escala no cilindro, o que pode ser obtido com adesivos, fixados à superfície, de distâncias controladas. Estes mesmos adesivos são utilizados como controle para verificar se a estrutura idealizada pela fotogrametria está compatível com a estrutura real. A geometria concebida tridimensionalmente está mostrada na Figura 38 e os pontos de controle são apresentados nas Figuras 39 e 40.

Figura 38- Geometria 3D obtida pela Fotogrametria para o CDP-1 (dir.) e CDP-2(esq.).



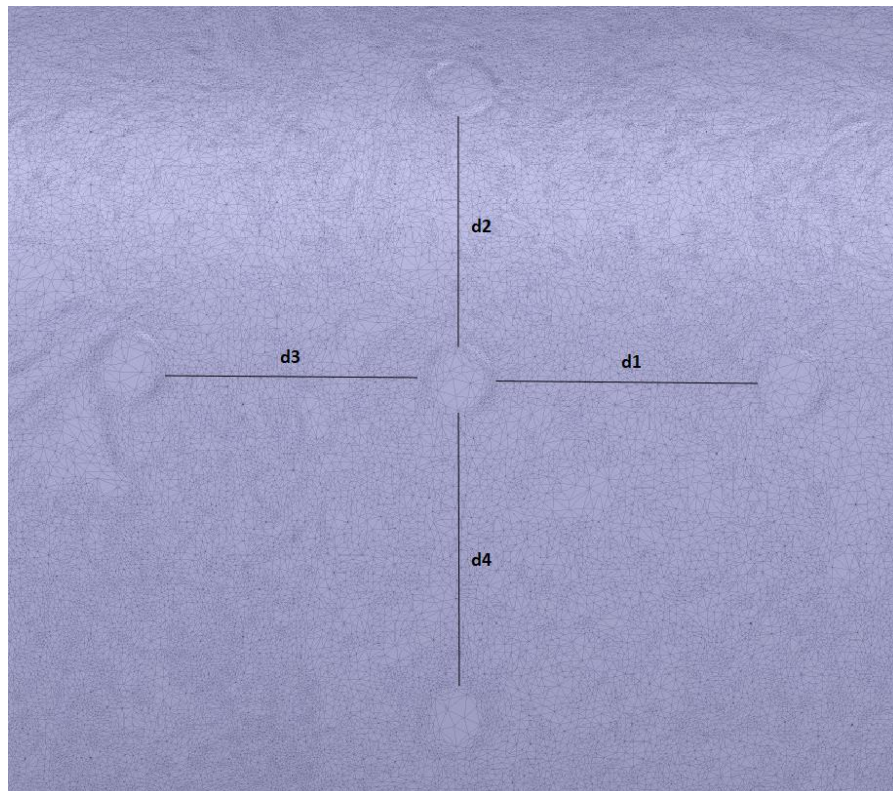
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 39 – Pontos de controle no cilindro CDP-2.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 40- Pontos de controle na malha após a fotogrametria do CDP-2.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 05, são apresentados os resultados do controle executado. Ressalta-se que este controle executado foi aprimorado apenas no CDP-2. No CDP-1, o controle foi apenas para aplicar o fator de escala na malha do cilindro fotoprocessado.

Tabela 5 – Comparação de controle estrutura real x Fotogrametria no CDP-2.

	D	d1	d2	d3	d4	Média
Cilindro Real[mm]	50	-	-	-	-	-
Cilindro Fotogrametria[mm]	-	45,3	46,35	45,8	47,8	-
Desvios[mm]	-	4,7	3,65	4,2	2,2	3,925

Fonte: Elaborada pelo autor

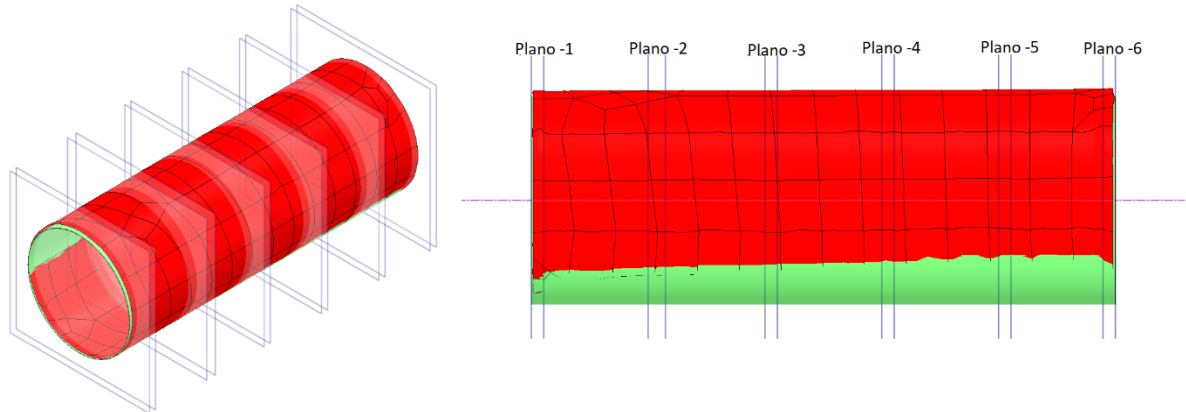
Nota-se, observando a Tabela 5, que os desvios são ínfimos quando comparados com as grandezas do corpo de prova, com diâmetro de 250 mm e comprimento de 705 mm. Pode-se dizer que os modelos fotoprocessados apresentam uma boa confiabilidade, e esta afirmação será corroborada com a comparação entre as pressões de flambagem obtidas numericamente e experimentalmente.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS GEOMETRIAS MAPEADAS

A comparação entre a geometria obtida a partir das duas técnicas deve ser executada para verificar os desvios geométricos que elas apresentam quando comparadas com uma geometria ideal. Este procedimento permite verificar a confiabilidade das técnicas para concepção dos modelos tridimensionais a serem analisados. Foi útil, também, para determinar se a bancada experimental confeccionada apresenta bons indicativos de tolerância geométrica em sua construção e montagem.

Na Figura 41, compara-se a geometria do CDP-1 obtida através da fotogrametria, representada pela cor vermelha, com uma geometria ideal, de cor verde, e executa-se o seccionamento para analisar os desvios geométricos que elas apresentam (Figura 43).

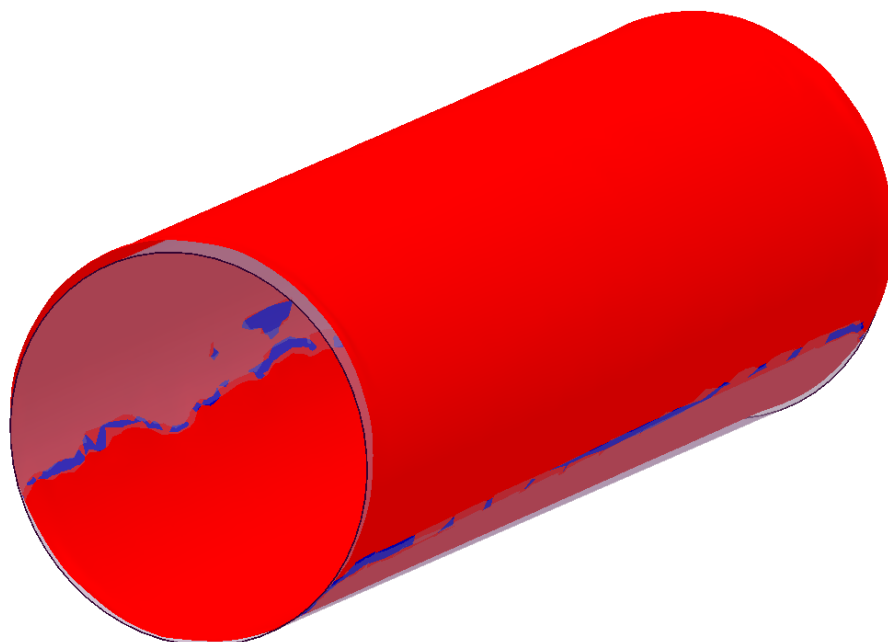
Figura 41- Comparação da geometria do CDP-1: Ideal (verde), Fotogrametria (vermelho).



Fonte: Elaborada pelo autor

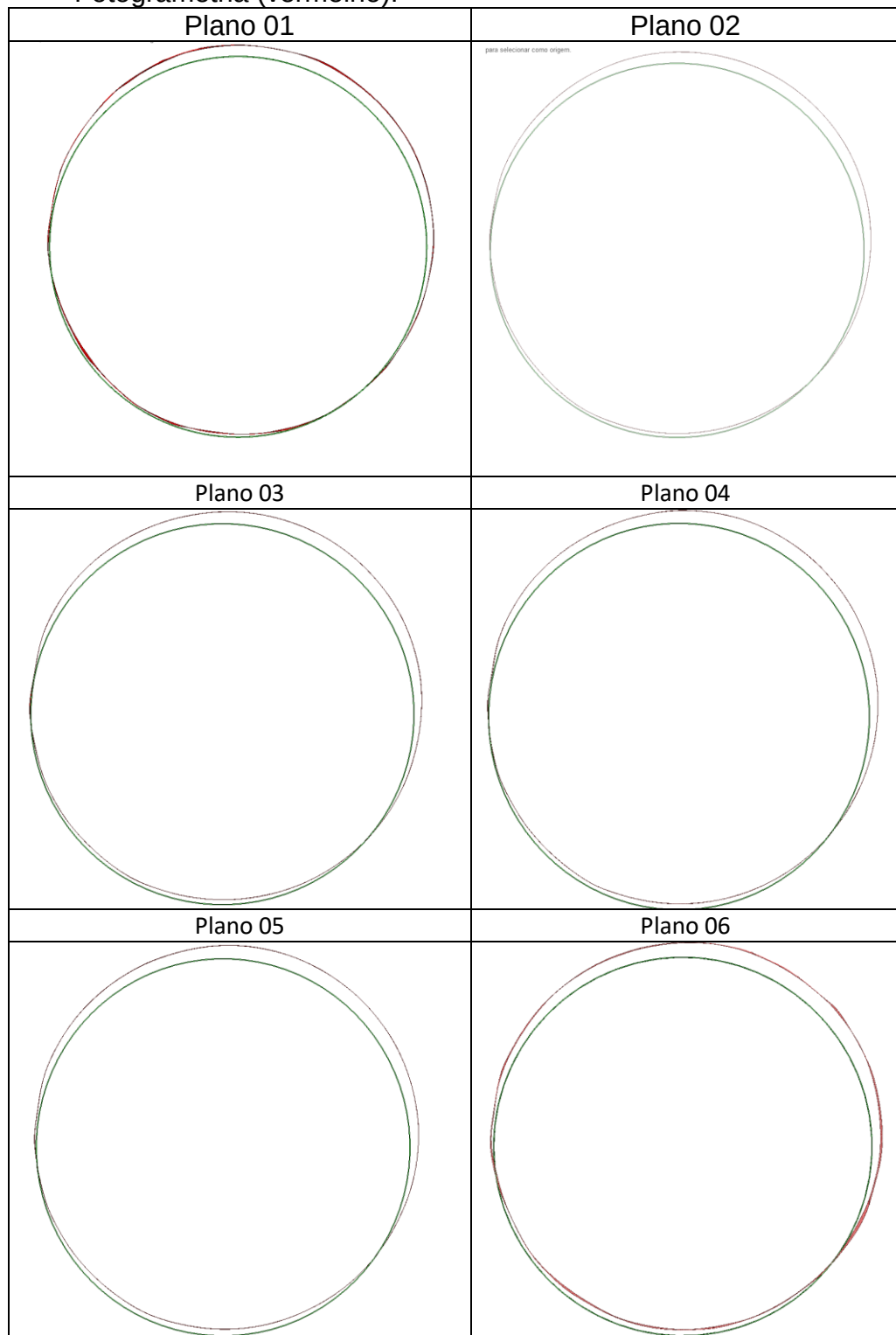
Analisando o seccionamento (Figura 43), nota-se que a geometria fotoprocessada do CDP-1 apresenta desvios quando comparada com uma geometria ideal, que fica na ordem de 0 a 11mm. Além disso, apresenta uma ovalicidade, apesar de as duas geometrias compartilharem do mesmo eixo. Estes desvios ficam mais claros na Figura 42, na qual somente a faixa hachurada representa a convergência entre as geometrias.

Figura 42 - Convergência da geometria do CDP-1.



Fonte: Elaborada pelo autor

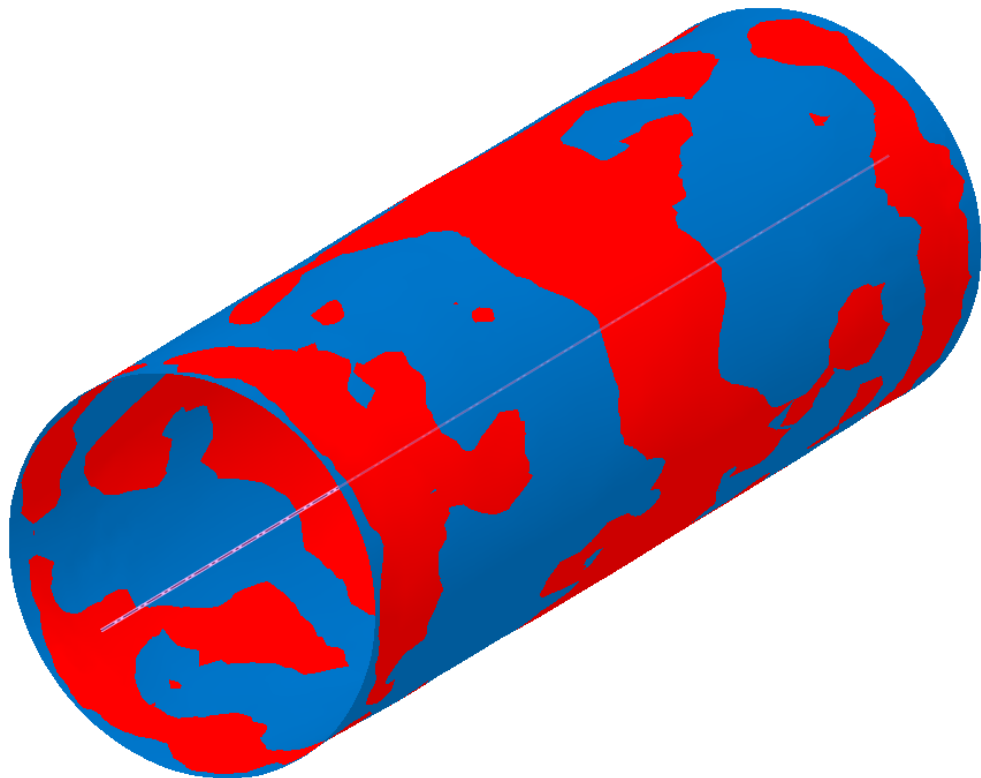
Figura 43 - Planos para comparação de geometria do CDP-1: ideal (verde), Fotogrametria (vermelho).



Fonte: Elaborada pelo autor

A comparação da geometria concebida por meio dos sensores LVDT com a geometria ideal não pode ser executada pelo seccionamento. Isto se dá porque os desvios, que estão na ordem de 0 a 2 mm, impossibilitam a visualização. A convergência entre as geometrias foi executada, qualitativamente, utilizando hachuras, mostradas na Figura 44, na qual a azul representa a convergência exata entre as geometrias. Situação semelhante ocorre no corpo de prova CDP-2, cuja geometria somente foi concebida pela fotogrametria. Neste caso, por conta da melhoria de controle, os desvios máximos caíram para 3,2 mm. Esta convergência é mostrada na Figura 45.

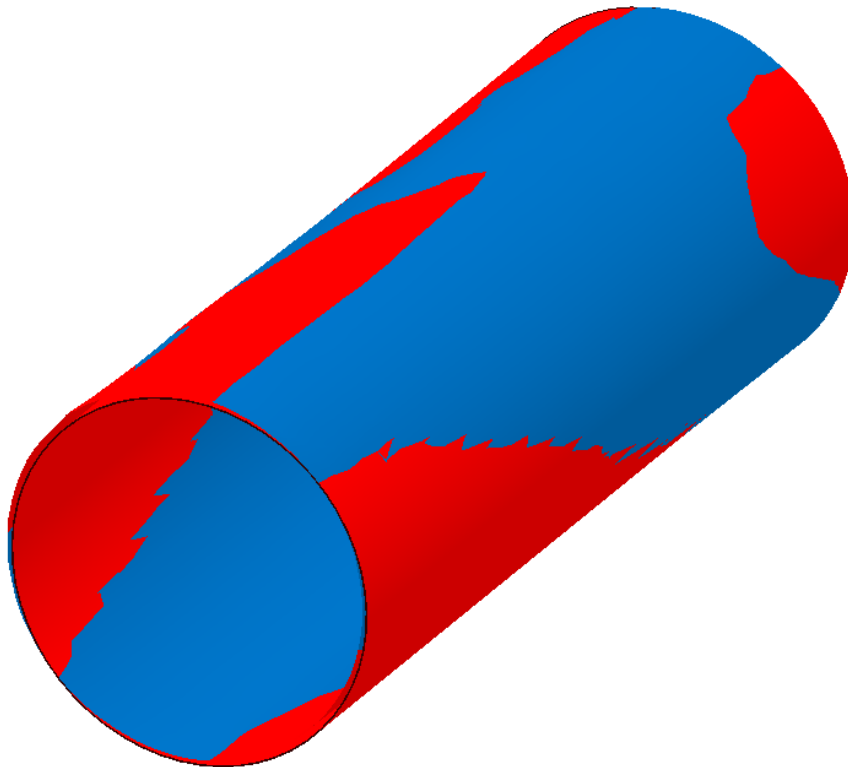
Figura 44 - Convergência do CDP-1 (Ideal x LVDT)



Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se que a convergência da geometria obtida com técnicas de contato (LVDT) foi melhor do que as obtidas com técnicas de não-contato (fotogrametria) no corpo de prova CDP-1. Este resultado era esperado, já que a segunda depende de uma manipulação de imagens para concepção da estrutura tridimensional, e a primeira foi a aferição exata do corpo de prova. Nota-se que a convergência no corpo de prova CDP-2, entre a estrutura ideal e a obtida através da fotogrametria, foi melhorada, isto em decorrência das situações de controle aprimoradas, mostradas no item 4.2.

Figura 45- Convergência Ideal x Fotogrametria para o CDP-2.



Fonte: Elaborada pelo autor

É importante ressaltar que os desvios obtidos pela técnica de contato, está na ordem de 0 a 2 mm. Este indicativo auxilia na determinação da confiabilidade da bancada experimental, na qual desvios acentuados indicariam a falta de tolerância geométrica de montagem na construção da bancada.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Análises numéricas computacionais utilizando o software comercial ANSYS® foram realizadas para determinar as pressões críticas, tensões máximas e os modos de flambagem. As análises numéricas foram realizadas antes dos ensaios experimentais para determinar as regiões com as deformações máximas com o objetivo de posicionar os sensores LVDT e a câmera de alta velocidade exatamente nessas regiões.

Na Tabela 6 são mostradas as pressões, tensões e modos de flambagem obtidos numericamente com o software ANSYS®. Para se obter as pressões de flambagem utilizou-se a análise não-linear para as geometrias com imperfeições geométricas e a análise de autovalor para a geometria ideal. As tensões são obtidas pelo critério da máxima energia de distorção de Von Mises.

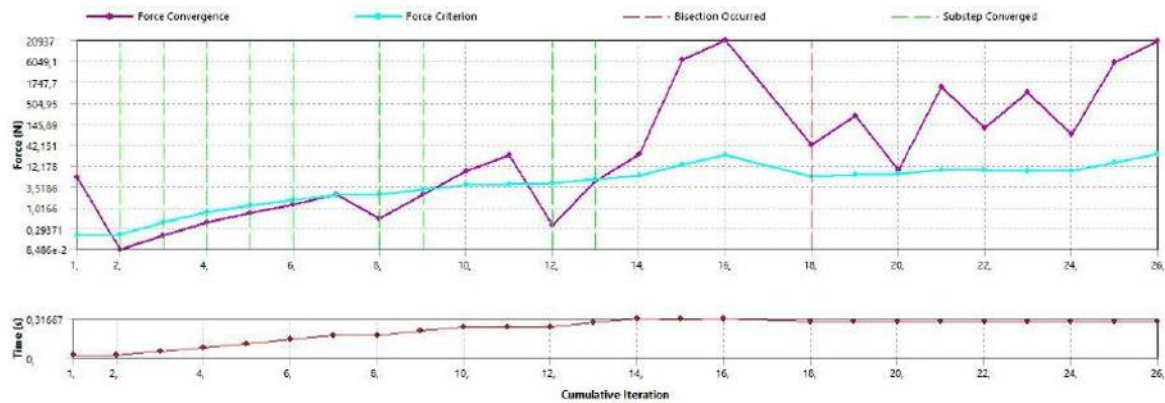
Para determinar a pressão de flambagem é necessário observar a curva de convergência da análise não-linear. No ponto em que o software não consegue convergir, os resultados mostram a ocorrência de instabilidade. A pressão inicial utilizada foi de 0,1 MPa e foi aumentada de forma gradual até a análise perder a convergência, obtendo-se a carga de instabilidade. As Figuras 46, 47 e 48 mostram as curvas de convergência obtida por meio do mapeamento da geometria utilizando sensor LVDT e fotogrametria. Consecutivamente, a perda de instabilidade é indicada pelo ponto denominado "bissecção". A análise do cilindro ideal não apresenta curva de convergência porque, na estrutura ideal, foi realizada uma análise por autovalor (*Eigenvalue Buckling*).

Tabela 6 – Pressão de flambagem e tensão máxima obtidas numericamente.

	Fotogrametria		LVDT	Ideal
Corpo de prova	1	2	1	-
Carga de flambagem [mmHg]	217,52	206,26	212,27	260,27
Tensão máxima	115,58	92,28	96,15	55,3

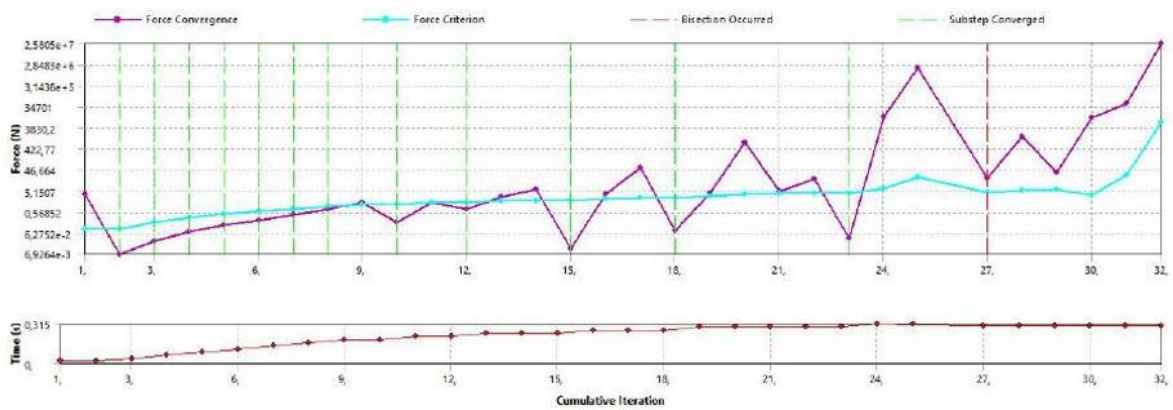
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 46 - Curva de convergência para o CDP-1 com Mapeamento LVDT.



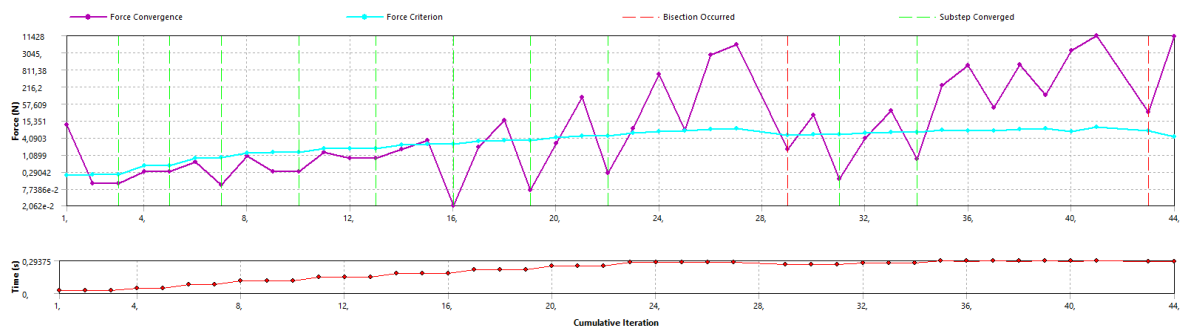
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 47 - Curva de convergência para o CDP-1 com Mapeamento Fotogrametria.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 48 - Curva de convergência para o CDP-2 com Mapeamento Fotogrametria

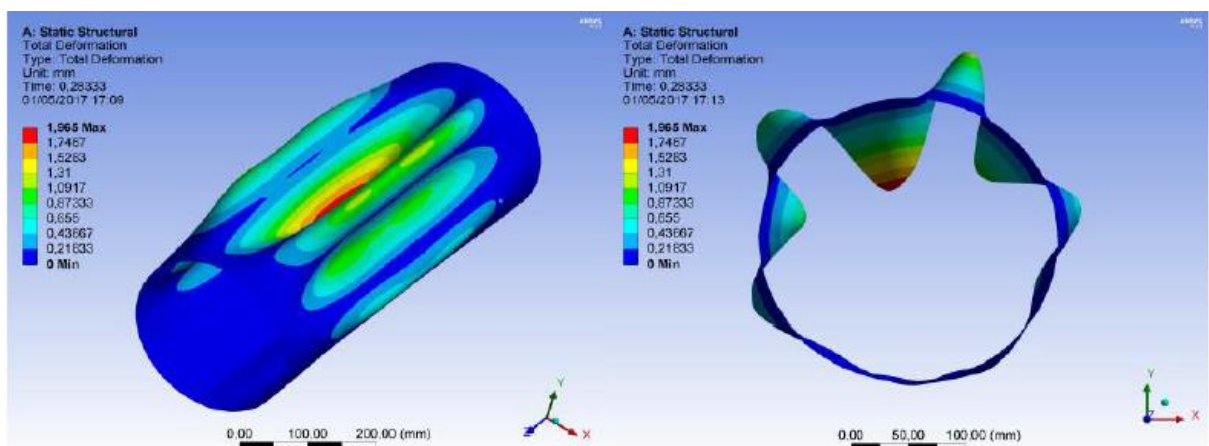


Fonte: Elaborada pelo autor

Observando-se os resultados da Tabela 6, nota-se que os modelos nos quais foram consideradas as imperfeições geométricas apresentam pressão de flambagem menor do que o modelo ideal. Outro ponto importante é a tensão máxima, que se encontra abaixo do limite de escoamento do material em todos os modelos analisados, o que caracteriza um regime de instabilidade elástica, no qual as equações clássicas de flambagem apresentam os melhores resultados. (EL-SAWY; NAZMY, 2001)

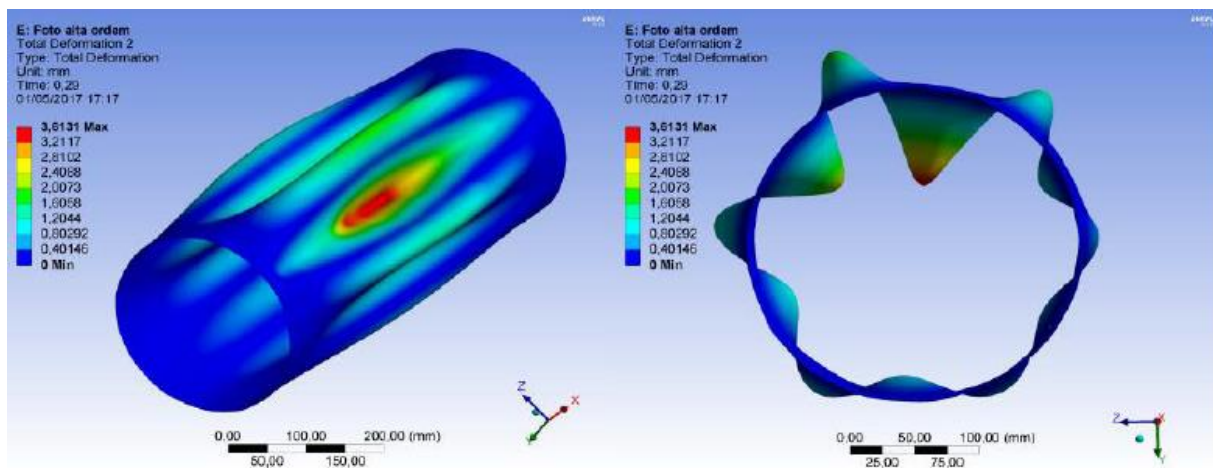
As Figuras 49, 50, 51 e 52 mostram os modos de flambagem obtidos numericamente. Na análise da geometria obtida por sensor LVDT pode-se observar quatro ondas de flambagem. Na obtida pela fotogrametria são observadas seis ondas no corpo de prova CDP-1 e quatro no CDP-2. No cilindro considerado ideal (sem imperfeição) observa-se seis ondas.

Figura 49 – Modo de flambagem do CDP-1 com Mapeamento LVDT.



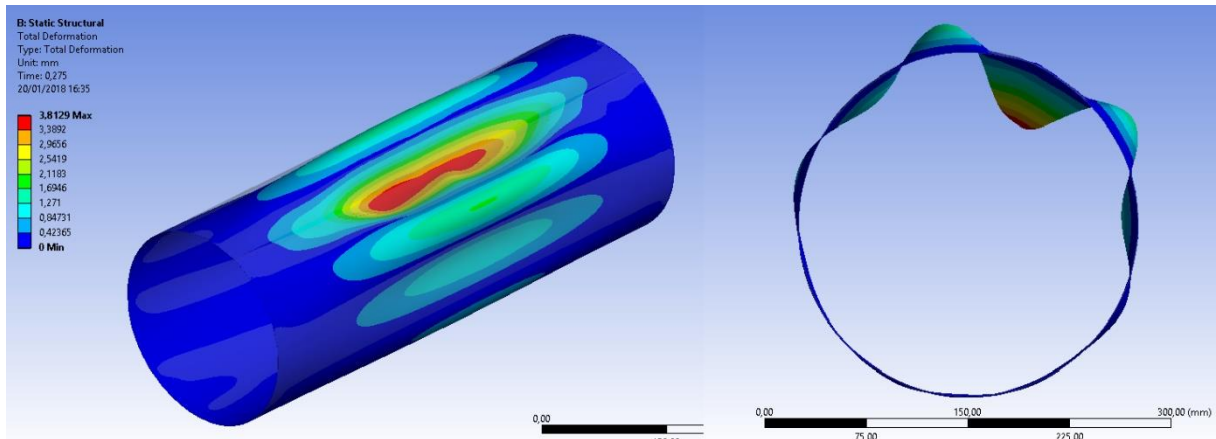
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 50 – Modo de flambagem do CDP-1 com Mapeamento Fotogrametria.



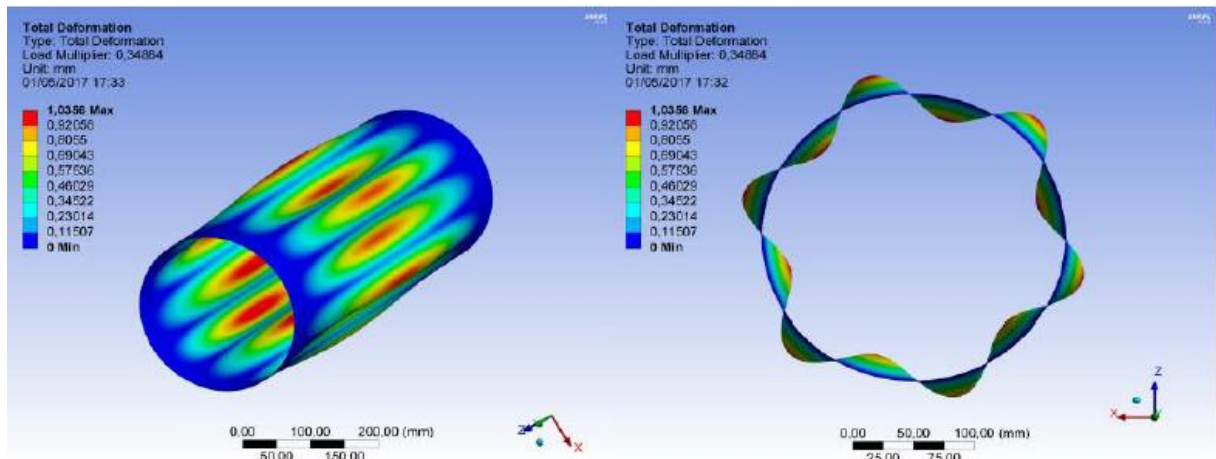
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 51 – Modo de flambagem do CDP-2 com Mapeamento Fotogrametria.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 – Modo de flambagem do cilindro com geometria ideal.



Fonte: Elaborada pelo autor

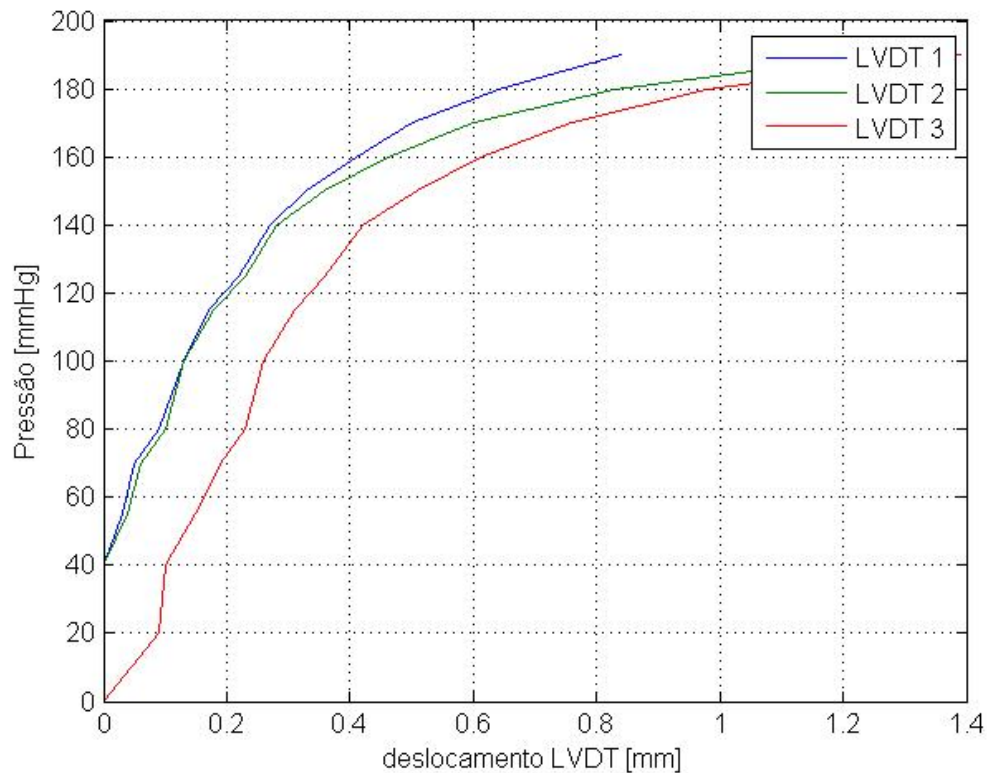
4.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais destrutivos. As seções serão subdivididas em resultados obtidos por meio das técnicas de captura de deslocamento com contato utilizando os sensores LVDT (Ensaio LVDT) e a técnica utilizando uma câmera de alta velocidade sem contato (Ensaio Fotovelocidade).

4.5.1 Ensaio LVDT

Para capturar os deslocamentos e determinar o instante que ocorre a flambagem três sensores LVDT foram posicionados em diferentes pontos do cilindro, todos apontando para a linha de centro. Com o vácuo gerado no interior do cilindro, os sensores LVDT medem os deslocamentos radiais em sua superfície. A Figura 53 mostra os resultados obtidos pelo sistema de aquisição durante o ensaio destrutivo do corpo de prova CDP-1.

Figura 53 – Curva de Pressão x Deslocamento dos sensores LVDT no ensaio do CDP-1.



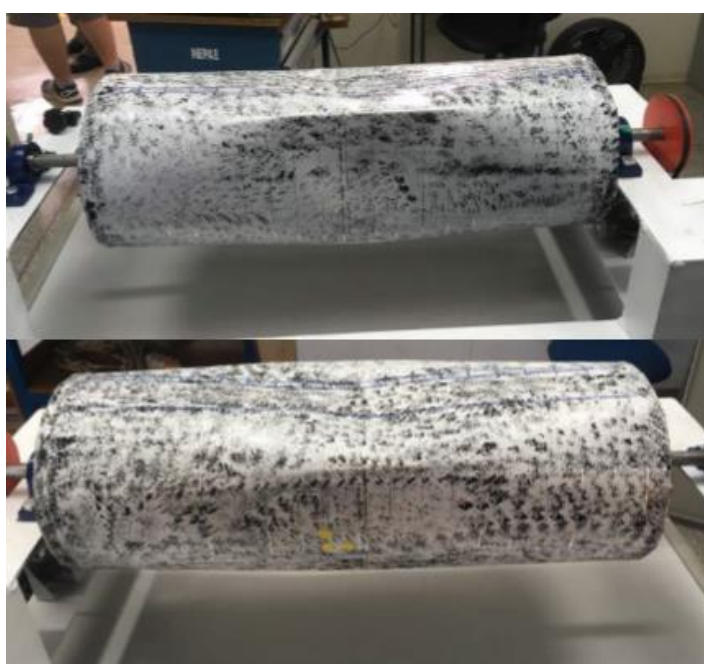
Fonte: Elaborada pelo autor

A curva da Figura 53 começa com uma grande inclinação, indicando um aumento de pressão e uma pequena variação do deslocamento no sentido radial do cilindro. Quando o vácuo gerado atinge 140 mmHg, a inclinação da curva se altera e o aumento do carregamento (proporcionado pelo vácuo interno) causa um aumento do deslocamento radial da estrutura. A característica da curva para este tipo de ensaio é que sua inclinação vá diminuindo até ficar paralela ao eixo da abscissa. Depois de um grande deslocamento, a inclinação da curva volta a subir. Esse comportamento, segundo Jones (2006), é associado ao joelho humano, semelhante a quando ocorre mudança de inclinação da curva. A pressão de flambagem é caracterizada pelo final do joelho, no qual a curva mostra uma grande variação de deslocamento em relação à pressão aplicada.

Nas curvas da Figura 53, o final do joelho coincide com o final da captação dos dados de deslocamento, por conta da limitação do cursor dos sensores LVDT. Isto acontece porque, no momento em que ocorre o colapso da estrutura, há um grande deslocamento em um curto intervalo de tempo, o que impede o registro dos dados após a instabilidade. Desta forma, a pressão de flambagem experimental obtida pelo ensaio foi de 190 mmHg.

O modo de flambagem do corpo de prova CDP-1 após o colapso apresentou quatro ondas, registradas na Figura 54.

Figura 54 – Modos de flambagem, experimental

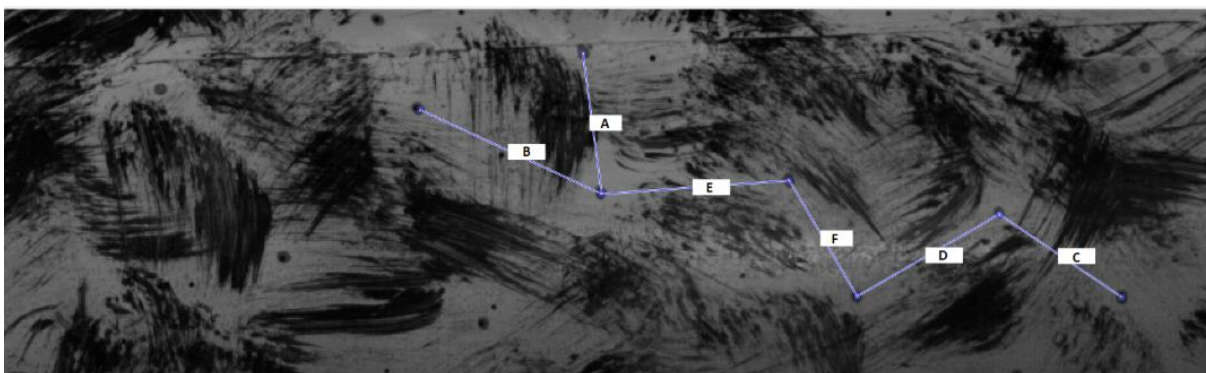


Fonte: Elaborada pelo autor

4.5.2 Ensaio fotovelocidade

No corpo de prova CDP-2, o sistema de captura dos deslocamentos foi feito por meio da fotovelocidade. Por conta da restrição angular da lente da câmera, ela foi posicionada focando em uma região em que o colapso ocorre. Este posicionamento foi obtido por meio da análise numérica prévia. Os pontos selecionados e a distância entre eles antes do colapso são mostrados na Figura 55, a distância entre esses pontos serão medidas durante o ensaio em cada intervalo de tempo capturado pela câmera de alta velocidade. As distâncias entre os esses pontos no decorrer do ensaio são mostradas na Figura 56. Ressalta-se que essas distâncias não podem ser utilizadas para determinar a deformação real da superfície do cilindro porque devido ao modo de captura bidimensional obtido pela câmera. Essas distâncias entre os pontos são utilizadas como indicativo para determinar o instante que a flambagem ocorre.

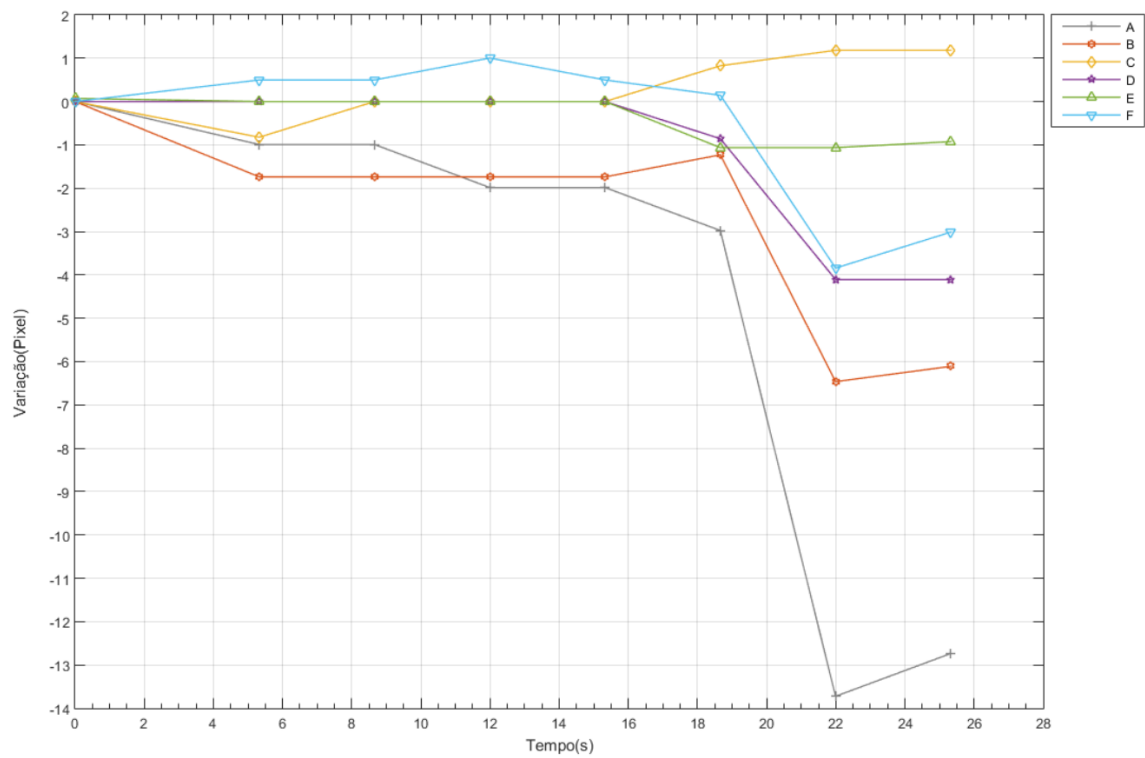
Figura 55 – Pontos selecionados no CDP-2 para o Ensaio Fotovelocidade.



Fonte: Elaborada pelo autor

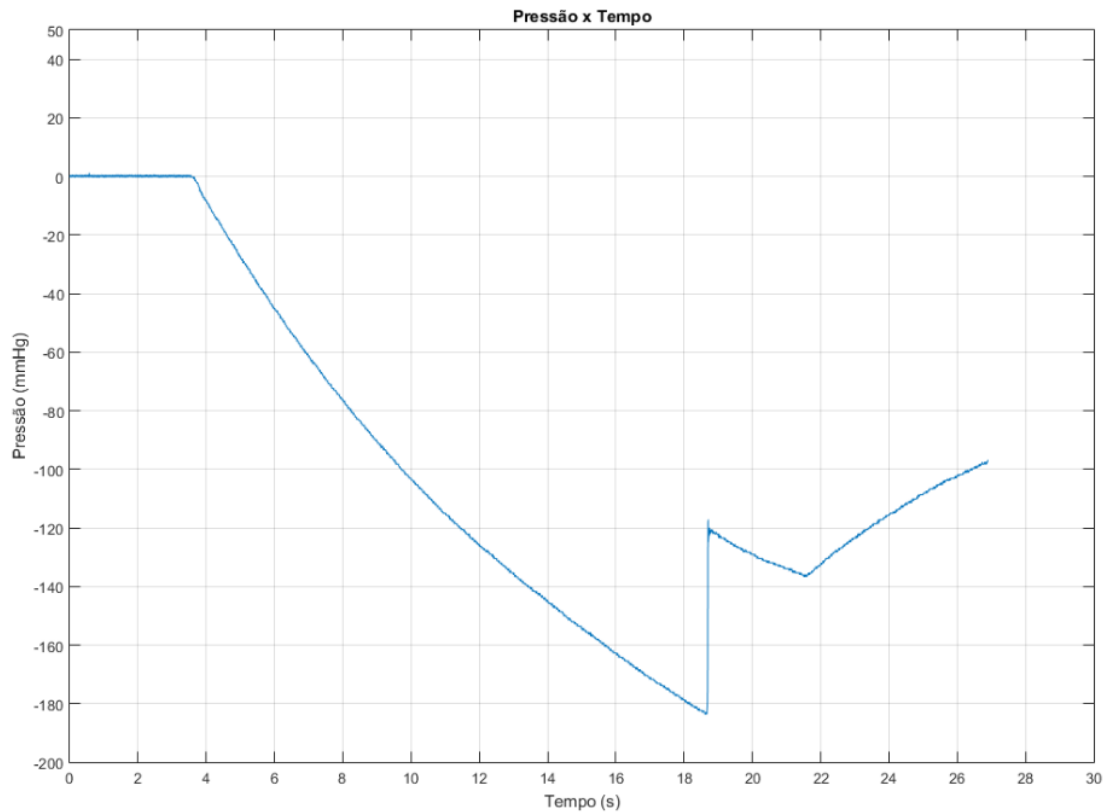
Analisando a Figura 56, nota-se que os pontos selecionados apresentaram uma grande variação a partir de 18 segundos, que indica o início do colapso (*snap-trought*) que ocorre a uma pressão de 183 mmHg. Esta pressão foi obtida, precisamente pela curva de carregamento mostrada Figura 57, adquirida pelo sensor digital de pressão absoluta no decorrer do ensaio experimental.

Figura 56 – Variação no tempo das distâncias no CDP-2 para o Ensaio Fotovelocidade.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 – Curva de carregamento no CDP-2 obtida pelo sensor digital de pressão absoluta.



Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se que há diferenças entre a captura dos deslocamentos utilizando LVDT e Fotovelocidade. Isso se dá porque a fotovelocidade não captura os deslocamentos radiais do corpo de prova, mas, apenas, deslocamentos de pontos pré-selecionados. Eles funcionam como um gatilho para identificação do início do colapso.

O modo de flambagem do corpo de prova CDP-2 colapsado apresentou quatro ondas, mostradas na Figura 58.

Figura 58 – Modo de flambagem apresentado pelo CDP-2 no ensaio experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados da pressão de flambagem numérica, clássica e experimental do corpo de prova CDP-1 e CDP-2, respectivamente.

Tabela 7 – Comparação entre a pressão de flambagem numérica, clássica e experimental no CDP-1.

	Numérica			Clássica		
	Fotogrametria	LVDT	Ideal	Cheng&Ho	Batdorf	Experimental
Carga de Flambagem [mmHg]	217,52	212,27	260,27	224,92	412,63	190
Desvio em relação ao experimental	14,48%	11,72%	36,98%	18,38%	117,17%	--

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 8 – Comparação entre a pressão de flambagem numérica, clássica e experimental no CDP-2.

	Numérica			Clássica	
	Fotogrametria	Ideal	Cheng&Ho	Batdorf	Experimental
Carga de Flambagem [mmHg]	206,26	260,27	224,92	412,63	183,53
Desvio em relação ao experimental	12,38%	41,81%	22,55%	124,83%	--

Fonte: Elaborada pelo autor

A menor variação entre os resultados numéricos e experimentais do corpo de prova CDP-1 foi obtida pela geometria concebida pela técnica de contato (sensores LVDT), com desvio de 11,72%. Tal desvio também foi observado na literatura em Showkati e Ghazijahani (2011). Utilizando a mesma técnica de contato, os desvios numéricos, quando comparados ao experimental, foram de 19,8%, 10,1% e 21,8%. Em Aghajari, Abedi e Showkati (2006), os desvios foram de 7 a 13%. Em Frano e Forasassi (2008), de 10 e 15%. Já no corpo de prova CDP-2, alcançou-se um desvio de 12,38% em relação ao experimental, utilizando somente técnicas de não-contato, tanto para mapeamento da superfície do corpo de prova como para a captura dos deslocamentos.

Quando se comparam as equações clássicas de obtenção da pressão de flambagem com o experimental, os desvios 18,38 e 117,17% no corpo de prova CDP-1 e 22,55 e 124,82% no corpo de prova CDP-2 mostram a acuracidade da equação de Cheng e Ho quando comparada a equação Batdorf. Esta última apresentou um desvio menor para previsão da carga crítica de flambagem. Ressalta-se que nenhuma das duas análises clássicas leva em consideração a imperfeição geométrica do corpo de prova. Já os desvios numéricos de 14,48 e 11,72% no corpo de prova CDP-1 e 12,38% no corpo de prova CDP-2 estão associados a um erro acumulativo na inspeção da geometria, no qual existem imperfeições geométricas relevantes que passam sem ser capturadas ou capturadas parcialmente. Isto se dá porque o processo de fabricação selecionado não foi rigidamente controlado, o software utilizado para fotogrametria limitava o número de pontos para concepção da geometria tridimensional, o aparato experimental apresentava desvios milimétricos no alinhamento do corpo de prova, enfim. Outros fatores podem ser apontados como a não linearidade da distribuição de pressão na superfície do cilindro, como possíveis pontos de variação na espessura do corpo de prova e qualidade da chapa utilizada.

A variação entre o número de ondas de flambagem experimentais e numéricas são apresentadas na Tabela 08.

A variação que ocorre quando se comparam as ondas de flambagem experimental e numérica justifica-se pôr a análise numérica realizada não ultrapassar o limite de flambagem, no qual as ondas de flambagem apresentadas mostram uma tendência e não o exato modo de flambagem.

Tabela 8 – Modos de flambagem

	Numérica			Experimental
	Fotogrametria	LVDT	Ideal	
Corpo de prova 01	6	4	6	4
Corpo de prova 02	4	-	6	4

Fonte: Elaborada pelo autor

Comparando os dois métodos para obtenção da geometria imperfeita, de contato e não-contato, foi possível observar que as cargas de flambagem obtidas apresentam poucas diferenças. Suas variações estão dentro daquelas obtidas pela literatura, e estão próximas da pressão de flambagem experimental. Desta forma, foi possível demonstrar que a fotogrametria é uma alternativa válida para trabalhos envolvendo instabilidade estrutural.

5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado investigou a instabilidade de um cilindro de paredes finas sobre carregamento de pressão lateral. Para tal, foram realizadas análises experimentais, numéricas e clássicas. Dois métodos foram empregados para concepção da geometria a ser analisada, CMM por contato (sensores LVDT) e CAI de não-contato (fotogrametria). Os resultados das análises numéricas, nas quais as imperfeições geométricas foram consideradas, apresentam resultados mais próximos do obtido experimentalmente, o que mostra a influência da imperfeição geométrica na ocorrência da instabilidade. Porém, mesmo com as imperfeições geométricas consideradas, houve desvios entre as análises numéricas e experimentais. Isso ocorre, principalmente, por erros cumulativos já detalhados nos capítulos anteriores.

Pode-se ressaltar, neste trabalho, que os dois métodos de concepção da geometria tridimensional obtiveram sucessos, já que, quando comparados os desvios com a literatura, eles apresentaram um comportamento dentro do esperado. Em especial, a fotogrametria se mostrou mais do que satisfatório para reprodução de imperfeições geométricas em experimentos de instabilidade. Isto se dá por conta da agilidade que esta técnica apresenta na concepção da estrutura tridimensional quando comparada à técnica de contato tradicional.

Cabe ressaltar, também, os dois ensaios destrutivos executados, com destaque para a Fotovelocidade, que se mostrou satisfatória na captura dos deslocamentos, proporcionando um bom gatilho para identificação da pressão crítica de flambagem.

6 TRABALHO FUTUROS

Para pesquisas futuras destaca-se a implementação apenas da fotogrametria para concepção da estrutura. Outro marco alcançado é a utilização da fotovelocidade para determinação das deformações da estrutura, sendo possível ampliar a pesquisa para concepção de algoritmos focado na área de visão computacional, uma área em expansão na agricultura nacional porém pouco explorada para controle e identificação de pré-deformações em estruturas.

Podemos destacar a necessidade para pesquisas futuras de algoritmo dedicado para determinação da carga crítica de flambagem em cilindros de parede fina, já que esta pesquisa se dedicou a utilizar um software comercial para tal análise.

REFERÊNCIAS

- AGHAJARI, S.; ABEDI, K.; SHOWKATI, H. Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 44, n. 6, p. 904-909, 2006.
- ANSYS. **Ansys mechanical APDL theory reference**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 909.
- BASSET, A. On the difficulties of constructing a theory of the collapse of boiler tubes. **Philosophical Magazine**, London, v. 34, n. 208, p. 221-233, 1892.
- BIACHUT, J.; IFAYEFUNM, O. Plastic buckling of conical shells. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Liverpool, v. 132, n. 4, p 1-12, 2010.
- BUSHNELL, D. Buckling of shells-pitfall for designers. **AIAA Journal**, Palo Alto, v. 19, n. 9, p. 1183-1226, 1981.
- CAMPOS, E.F. **Análise numérica e experimental de flambagem em cilindros de parede finas**. 2017. 79 f. Tese (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho- UNESP, Ilha Solteira, 2017.
- CARMAN, A. Resistance of tubes to collapse. **Bulletin nº 5 of The University of Illinois: Engineering Experiment Station**, v.3, n. 17, 1906.
- CASTRO, S. et al. Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 118-132, 2014.
- CHANDRA, Y. et al. Characterizing dynamic transitions associated with snap-through of clamped shallow arches. **Journal of Sound and Vibration**, Delft, v. 332, n. 25, p. 5837-5855, 2013.
- CHENG, S.; Ho, B. Stability of heterogeneous anisotropic, cylindrical shells under combined loading. **AIAA Journal**, New York, v. 1, n. 4, p. 892-900, 1963.
- DESEILLIGNY, P.; CLERY, I. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. **Isprs**, Snavely, v. 38, n. 1, p. 269-275, 2012.
- DONNELL, L. Stability of thin-walled tubes under torsion. **NACA**, Florida, v. 32, n. 479, p. 1-19, 1933.
- EGELS, Y; KASSER, M. **Digital photogrammetry**. New York: Taylor & Francis, 2002.
- EL-SAWY, K. M.; NAZMY, A. S. Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 983-998, 2001.

FAIRBAIRN, W. On the resistance of tubes to collapse. **The Royal Society**, London, v. 21, n. 25, p. 389-413, 1858.

FRANO, R.; FORASASSI, G. Buckling of imperfect thin cylindrical shell under lateral pressure. **Science and Technology of Nuclear Installations**, London, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2008.

FONSECA, E.; OLIVEIRA, C.; MELO, F. Fenômenos de instabilidade em elementos tubulares submetidos a compressão. **Revista de Mecânica Experimental**, Bragança, v. 1, n. 11, p.1-15, 2006.

GHAZIJAAMI, G.; SHOWKATI, H. Experiments on conical shell reducers under uniform external pressure. **Journal of Constructional Steel Research**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p.1506-1515, 2011.

HAIFENG, W. et al. Imperfection sensitivity of externally-pressurized, thin-walled, torispherical-head buckling. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 104-110, 2017.

JONES, R. M. **Buckling of bars, plates and shells**. Blacksburg: Bull Ridge, 2006.

JOHNS, T.; ROSS, C. T. F. Buckling and vibration of ring-stiffened cones under uniform external pressure. **Thin-Walled Structures**, Portsmouth, v. 6, n. 4, p. 321-342, 1988.

KHAKIMOVA, R. et al. Buckling of axially compressed cfrp truncated cones: Experimental and numerical investigation. **Composite Structures**, Amsterdam, v. 146, n. 32, p. 232-247, 2016.

LOVE, A. **A treatise on the mathematical theory of elasticity**. Cambridge: Cambridge, 1982.

MARTINS, J. P. et al. Imperfection sensitivity of cylindrically curved steel panels. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 89, n.1, p.101-115, 2015.

NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS- NACA.. **A simplified method of elastic-stability analysis for thin cylindrical shells**. [S.l.: s.n.], 1940. p. 285-309

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION- NASA. **Buckling of thin-walled circular cylinder**. Cabo Canaveral: Florida, 1965. p. 56.

NING, X. **Imperfection insensitive thin shells**. 2015. 144 f. Tese (Livre Docência)– California Institute of Technology Pasadena- CALTECH, University, California, 2015.

SANDERS, H.; WINDENBURG, D. Strength of thin cylindrical shells under external pressure. **American Society of Mechanical Engineers**, Nova York, v. 53, n. 1, p. 207-218, 1931.

SINGER, J.; ARBOCZ, J.; WELLER, T. **Buckling experiments**: experimental methods in buckling of thin-walled structures. New York: John Wiley & Son, 2002. v. 2,

SILVA, A. **Análise não linear assintótica modal da instabilidade de estruturas reticuladas**. 2009. 239 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil)– Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

SOUTHWELL, M. On the collapse of tubes by external pressure III. **Philosophical Magazine**, London, v. 6, n. 169, p. 67-77, 1915.

SUBRAMANI, T.; SUGATHAN, A. Finite element analysis of thin walled-shell structures by ansys and Is-dyna. **International Journal of Modern Engineering Research- IJMER**, India, v. 2, n. 1, p. 4, 2012.

STEWART, R. Collapsing pressures of bessemer steel lap-welded steel tubes. **Presented at the American Society of Mechanical Engineers**, Nova York, v. 27, n. 1116, p. 15-32, 1906.

STURM, R. A study of the collapsing pressure of thin-walled cylinders. **Bulletin nº 12 of The University of Illinois: Engineering Experiment Station**, v. 39, n. 329, 1941.