



MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DE FLAMBAGEM EM COLUNAS
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA
POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)**

LAVRAS-MG

2015

MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DE FLAMBAGEM EM COLUNAS UTILIZANDO A TÉCNICA
DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

Coorientadores

Dr. Roberto Braga Alves Júnior

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

LAVRAS – MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Maykmiller Carvalho.

Estudo de flambagem em colunas utilizando a técnica de
velocimetria por imagem de partículas (PIV) / Maykmiller
Carvalho Rodrigues. – Lavras : UFLA, 2015.

74p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Deformação. 2. Flambagem. 3. Colunas. 4. PIV. 5.
Elementos Finitos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

MAYKMILLER CARVALHO RODRIGUES

**ESTUDO DE FLAMBAGEM EM COLUNAS UTILIZANDO A TÉCNICA
DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções e Ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 7 de agosto de 2015.

Dr. Roberto Braga Alves Júnior UFLA

Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães UFLA

Dr. Renilson Luiz Teixeira IFES

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

**LAVRAS – MG
2015**

A DEUS.

*Pelas oportunidades e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas como
minha esposa Jéssica e meus pais, Juarez e Marilene.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu o dom da vida e colocou em meu caminho tantas pessoas especiais, que, de uma forma ou de outra, apoiaram-me para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEG), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola da UFLA, em especial o professor Dr. André Luiz Zangiacomo, pelos ensinamentos transmitidos e harmoniosa convivência.

Ao professor, Dr. Francisco Carlos Gomes, pela orientação, paciência, amizade, dedicação; seus ensinamentos que foram de grande relevância para a realização deste trabalho e meu crescimento profissional.

Aos professores, Dr. Roberto Braga Alves Júnior e Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães, pela coorientação, paciência, amizade, dedicação; seus ensinamentos foram de grande relevância para a realização deste trabalho e meu crescimento profissional.

À Jéssica Assaid Martins Rodrigues, pelo amor, compreensão, confiança e apoio em todos os momentos.

Aos amigos pós-graduandos Rodrigo Allan Pereira, Mariana de Oliveira e Silva, Ellem Waleska Nascimento da Fonseca Contado e Lucas Henrique Pedroso Abreu, pela preciosa ajuda na condução dos experimentos.

A toda a minha família, minha mãe, Marilene Aparecida de Carvalho Rodrigues, meu pai, Juarez José Rodrigues, em especial aos meus avós, pelo incentivo e exemplo de vida.

AUTOBIOGRAFIA

Maykmiller Carvalho Rodrigues, filho de Juarez José Rodrigues e Marilene Aparecida de Carvalho Rodrigues, nasceu na cidade de Perdões, MG, em 01 de agosto de 1987. Estudou na Escola Estadual Padre Pedro Machado, na Escola Municipal Otaviano Alvarenga, no Colégio Estadual João Melo Gomide e na Escola Cenecista Dulce Oliveira. Formou-se em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS-MG), em dezembro de 2009, pós-graduou MBA em Gestão de Projetos pelo Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS-MG), em setembro de 2013. Em março de 2014, iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola, realizando seus estudos na área de construções e estruturas.

RESUMO

Diante da complexa análise das deformações estruturais, foram estudados efeitos de flambagem em perfis tubulares retangulares metálicos, submetidos aos esforços de compressão axial. Buscou-se quantificar as deformações horizontais em pilares, utilizando uma técnica óptica, por meio de imagens para avaliação do comportamento estrutural. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de se empregar a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV) no estudo das estruturas como uso de um método não destrutivo. Os ensaios, utilizando corpos-de-prova metálicos, foram realizados no Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foi avaliado o comportamento de colunas metálicas solicitadas, exclusivamente, por uma carga de compressão axial que provocou um efeito de flambagem nos corpos de prova. Para quantificar essa deformação, foi aplicada a técnica PIV, que pela análise das imagens, forneceu medidas de deslocamento da estrutura. Com a aplicação da técnica PIV, foram obtidos mapas de deslocamento das colunas durante o ensaio. Verificaram-se os diferentes estágios de deformação e deslocamento máximo horizontal de 1,62mm no sentido da menor inércia e o deslocamento obtido por Elementos Finitos foi de 1,56mm neste mesmo sentido. Com base no módulo do vetor resultante, foi possível distinguir o estágio da coluna antes e depois da carga crítica de flambagem. Deste modo, concluiu-se que a técnica PIV pode ser utilizada na quantificação dos deslocamentos de colunas em um plano, o que certamente permitirá a sua aplicação em monitoramento de estruturas.

Palavras-chave: Deformação. Flambagem. Colunas. PIV. Elementos Finitos.

ABSTRACT

Faced to the complex analysis of structural deformation, buckling effects were studied in steel rectangular hollow bar subjected to axial compressive forces. It worked to quantify the horizontal column deformation using an optical technique, based on images to evaluate the structural behavior. The objective of this study was to use the particle image velocimetry (PIV) technique a non-destructive method to study the structures. The test using metallic specimens were performed in the Resistance of Materials and Mechanics of Structure Laboratory of the Federal University of Lavras (UFLA). It evaluated the behavior of metallic columns requested solely by an axial compressive load that caused a buckling effect on the columns. The PIV technique was applied to quantify the strain, based on the image analysis to provide and measure the displacement of the structure. With the application of PIV technique, buckling map was provided during the test. It show the different stages during the compressive teste and 1,62mm of the horizontal displacement towards lower inertia was obtained while the displacement obtained by Finite Element was 1,56mm in this same direction. From the resulting vector module was possible to differentiate the stage of the column before and after the critical load of buckling and breaking point thereof. Thus, it was concluded that the PIV technique can be used to measure the column displacement in a plane, which certainly permit its application to monitor structures in use.

Keywords: Deformation. Buckling. Columns. PIV. Finite Element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Detalhes geométricos das colunas de um silo elevado sem o efeito de flambagem.....	25
Figura 2	Detalhes geométricos das colunas de um silo elevado com o efeito de flambagem.....	26
Figura 3	Valores de coeficiente teóricos e recomendados de flambagem por flexão de elementos isolados	28
Figura 4	Esquema das Janelas de interrogação utilizadas para identificar o deslocamento de partículas de um instante t_0 para um instante t_1	33
Figura 5	Esquema do Sistema de velocimetria por luz pulsada onde, em destaque, as janelas de interrogação são utilizadas na identificação do deslocamento de partículas traçadoras em fluido	33
Figura 6	Vetores de velocidade que representam o fluxo de partículas externas semeadas como alvos de correlação das imagens do fluxo de água em um tubo após a aplicação do PIV.....	34
Figura 7	Partículas e campo de velocidade para experimento de rotação de corpo rígido com velocidade angular de 222 RPM.....	35
Figura 8	Representação do fluxo utilizando o <i>biospeckle</i> PIV, com base em janelas de interrogação de 64 x 64 pixels e uma correlação cruzada dentro da veia principal.....	36
Figura 9	Aplicação da técnica <i>Optical and Laser Scanning Technique</i> em viga de madeira com nó	37
Figura 10	Aplicação da técnica PIV em vigas de madeira. (A) Face iluminada com laser para aquisição das imagens e (B) Mapa de vetores deslocamento obtido pela aplicação do PIV	37

Figura 11	Aplicação da técnica PIV em vigas de madeira com nó. (A) Face da viga iluminada com Laser e (B) Face da viga pigmentada com tinta.....	38
Figura 12	Malha tetraédrica de primeira ordem para sólidos utilizados na Modelagem por Elementos Finitos	41
Figura 13	Etapas do Método de Análise por Elementos Finitos	42
Figura 14	Máquina universal de ensaios do Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do departamento de engenharia da UFLA	44
Figura 15	Detalhe dos corpos-de-prova adotados para a aplicação da técnica PIV e modelados pelo SolidWorks.....	45
Figura 16	Detalhe das demarcações nos corpos-de-prova que foram testadas na busca do melhor tamanho dos pontos a serem reconhecidos pelas janelas de interrogação da técnica PIV. (A) Pontos de 1,0mm alinhados na face de maior inércia, (B) Pontos de 2,0mm alinhados na face de maior inércia, (C) Pontos de 3,0mm alinhados na face de maior inércia, (D) Pontos de 1,0mm na face de menor inércia, (E) Pontos de 3,0mm na face de menor inércia, (F) Pontos de 2,0mm na face de menor inércia, (G) Pontos de 0,5mm em ambas as faces, (H) Limalha de aço espalhadas por todo o corpo-de-prova	46
Figura 17	Posicionamento do corpo de prova e aplicação da carga pela máquina universal de ensaio: (A) Barra sem aplicação de carga, (B) Barra com aplicação de Carga sob efeito de flambagem	47
Figura 18	Esquema do posicionamento da câmera em relação ao corpo-de-prova, durante a aquisição das imagens utilizadas na técnica PIV.....	49

Figura 19	Imagem coletada do corpo de prova posicionado na máquina de ensaios com a demarcação da região de interesse no instante t_0 e carga 0kN	52
Figura 20	Tratamento das imagens no ImageJ: (A) Imagem extraída da câmera, (B) Imagem recortada, (C) Imagem no formato RGB (8bits) com aplicação de Threshold Preto e Branco	53
Figura 21	Corpos de prova modelados no SolidWorks com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova reais	54
Figura 22	Esquema de fixação das extremidades do corpo-de-prova: (A) Fixação da face inferior do corpo-de-prova por meio de geometria fixa (Engaste), (B) Fixação da face superior por meio de ligação rotulada	55
Figura 23	Aplicação da carga de compressão e intensidade 40kN normal ao eixo longitudinal da coluna	56
Figura 24	Disposições e dimensões das marcações dos pontos na face de menor inércia do corpo – de – prova	57
Figura 25	Evolução do deslocamento durante o ensaio de compressão. (01-21) deslocamento dos pontos da imagem 01 para a imagem 21. (01-22) deslocamento da imagem 01 para a imagem 22. (01-23) deslocamento da imagem 01 para a imagem 23. (01-24) deslocamento da imagem 01 para a imagem 24	58
Figura 26	Representação das diferentes inclinações dos vetores. (01-09) deslocamento dos pontos da imagem 01 para a imagem 09. (01-24) deslocamento da imagem 01 para a imagem 24	59
Figura 27	Estagio de acomodação e deformação linear do corpo– de – prova antes da carga crítica	60

Figura 28	Acompanhamento do efeito de flambagem com base na comparação de imagens sucessivas após o estágio de acomodação e deformação linear	61
Figura 29	Vetores deslocamento: (A) Estágio da acomodação do corpo-de-prova, (B) Deformação linear vertical do corpo-de-prova, (C) Início do efeito de flambagem e (D) Deformação máxima do corpo de prova sob o efeito de flambagem	62
Figura 30	Amplitude máxima do deslocamento da coluna obtido por Elementos Finitos baseados na aplicação de uma carga de compressão de 40kN.....	63
Figura 31	Deslocamento indicado por vetores em vários nós da coluna obtido por Elementos Finitos com base na aplicação de uma carga de compressão de 40kN.....	64
Figura 32	Amplitude de deslocamento indicada por vetores em MEF na região de interesse	65
Figura 33	Mapa de vetores deslocamento representados em um único ponto: (A) Deslocamento vertical e horizontal representado por todos os vetores da região de interesse, (B) Deslocamento lateral por flambagem representado pela média da componente horizontal de todos os vetores deslocamento	66
Figura 34	Comparação do deslocamento obtido por MEF e o PIV	67
Figura 35	Comparação entre os vetores obtidos por MEF e PIV. (A) representa os vetores obtidos por MEF e (B) representa os vetores obtidos pelo PIV.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades mecânicas do aço.....	23
Tabela 2 Valores de ruptura por Flambagem para os 30 corpos-de-prova	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEF	Método de Ensaio por Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

N_{cr}	Carga crítica de flambagem
E	Módulo de elasticidade do material
I	Momento de inércia da seção transversal
l	Comprimento
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
χ	Fator de redução associado à resistência à compressão
Q	Fator de redução total associado à flambagem local
A_g	Área bruta da seção transversal da barra
f_y	Limite de escoamento do aço
γ_{a1}	Fator de segurança
k	Coefficiente de flambagem
r	Raio de giração
λ	Índice de esbeltez global
λ_0	Índice de esbeltez reduzido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Estruturas	20
2.2	Elementos estruturais	20
2.3	O aço	21
2.4	Propriedades mecânicas do aço	22
2.5	Colunas	24
2.6	Flambagem	24
2.7	Cálculo de flambagem por métodos convencionais	27
2.7.1	Cálculo Convencional (NBR 8800/2007)	28
2.8	Método de ensaios convencionais	31
2.9	Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)	31
2.10	Método de elementos finitos	38
2.10.1	Modelagem por MEF	39
2.10.2	Criação das malhas	40
2.10.3	Interpretação dos resultados por MEF	41
2.10.4	Etapas de modelagem por elementos finitos	42
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	Descrição do local de trabalho	43
3.2	PIV aplicado ao ensaio de flambagem	43
3.2.1	Apoios ou vínculos da Máquina Universal de Ensaios	43
3.2.2	Corpos-de-prova	45
3.2.3	Ensaios de flambagem e aplicação da técnica PIV	47
3.3	Elementos Finitos	53
3.3.1	Modelagem do corpo de prova	53
3.3.2	Aplicação da Modelagem por Elementos Finitos	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Marcações dos pontos	57
4.2	Mapas de deslocamentos fornecidos pelo PIV	58
4.3	Deslocamento obtido por Elementos Finitos	63
4.4	Comparação dos resultados do PIV com MEF	65
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de estruturas compostas por diferentes elementos estruturais denominados como colunas, vigas, lajes, blocos de fundação, estacas dentre outros. Estas partes, que compõem uma estrutura, estão sujeitas a diferentes tipos de esforços solicitantes, em que a estabilidade de cada um destes elementos é indispensável para manter a estabilidade estrutural. As colunas são partes de uma estrutura que estão sujeitas, principalmente, aos esforços normais axiais e sem elas não seria possível a elevação de um telhado metálico, de um edifício de múltiplos andares, de uma ponte ou até mesmo de um silo metálico, dentre outras várias estruturas.

Com base nesse conceito, para garantir a estabilidade estrutural adequada das colunas, devem ser feitas provisões para um excesso de carga e de uma menor resistência da sua seção transversal, pois existe a possibilidade de que os materiais como aço utilizado nas barras, parafusos e soldas tenham uma menor resistência do que a utilizada nos cálculos. Esta resistência pode, ocasionalmente, ter uma tensão de escoamento abaixo do valor mínimo especificado nos cálculos, mas ainda dentro dos limites estatísticos aceitáveis para sua produção.

Tem-se, então, a necessidade de estudar o comportamento das colunas de estruturas metálicas, visto que elas são solicitadas de várias maneiras durante a vida útil da estrutura.

As colunas confeccionadas em perfis de seções tubulares podem ser compostas por seções quadradas ou retangulares. Também são utilizados em colunas, perfis no formato de cartola, cantoneira, U, Z e I, porém, estes últimos não serão abordados neste estudo.

Para conhecer melhor o comportamento estrutural dos perfis tubulares utilizados nas colunas, é necessário conhecer a fundo as condições de contorno e

a matéria-prima que os compõem a fim de maximizar sua utilização e minimizar os problemas de aplicação. Para isso, necessita-se desenvolver uma metodologia eficiente, rápida e “não destrutiva” para contribuir durante a análise estrutural e para conhecer melhor o comportamento desses elementos estruturais.

Um dos principais agravantes, durante o estudo de colunas, é o efeito da flambagem. Esse efeito limita a resistência das colunas e é conhecido como o deslocamento lateral produzido por esforços de compressão.

No intuito de estudar a flambagem em peças comprimidas (Colunas), podem ser utilizados ensaios destrutivos, não destrutivos, métodos de cálculo convencionais e a técnica de análise estrutural por elementos finitos.

Os ensaios destrutivos mais comuns são aqueles que deixam algum sinal na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que estes não fiquem inutilizados. Estes ensaios podem ser de tração, compressão, cisalhamento, dobramento, flexão, embutimento, torção, dureza, fluência, fadiga e impacto em que, muitas vezes, é utilizada uma máquina universal de ensaios, equipamentos de medição, sistema de aquisição e processamento dos dados.

Dentre os vários ensaios não destrutivos, pode-se citar o ultrassom e o raio-x. A técnica de modelagem por elementos finitos pode ser utilizada para simular o comportamento das estruturas em serviço.

Além destes métodos já consagrados, a técnica de Velocimetria, por Imagem de Partículas (PIV), inicialmente adotada como um método de estudo de deslocamento de partículas de fluido, atualmente vem sendo usada no estudo aplicado a materiais sólidos. Dessa forma, propõe-se o emprego do PIV como um método de ensaio não destrutivo e baixo custo com base na mecânica das estruturas.

Portanto, considerando a hipótese de que a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), também, pode ser utilizada para estudar deslocamentos de colunas formadas por barras de aço, o objetivo deste trabalho

foi avaliar o emprego desta técnica em ensaios de compressão em colunas de perfis metálicos tubulares retangulares sujeitas à flambagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estruturas

Dá-se o nome de estrutura às partes resistentes de uma construção, de uma máquina, de um automóvel, de um navio, de um avião, de um objeto, dentre outros (NBR 8800/2007) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Segundo Bellei e Bellei (2011), para que uma estrutura trabalhe bem, as peças estruturais que as compõem devem resistir às ações que atuam sobre elas ao longo de sua vida útil. Dentre as várias ações, que solicitam a estrutura e podem levá-la à ruína, podem-se citar as ações, como o peso próprio da estrutura, o peso dos automóveis que passam por uma ponte, o peso de equipamentos, o peso de pessoas, a pressão do vento sobre um edifício, a carga movimentada por um guindaste, as variações de temperatura que mudam a forma da estrutura e podem provocar esforços internos e os deslocamentos de apoio que podem ser provocados por terremotos ou até mesmo quando os deslocamentos de apoio que ocorrem lentamente e podem introduzir esforços importantes na estrutura.

2.2 Elementos estruturais

As estruturas ou sistemas estruturais são constituídos por meio da disposição racional e adequada de diversos elementos estruturais. Os elementos estruturais são os responsáveis por receber e transmitir as solicitações na estrutura, sofrendo como consequência deformações (JANSSEUNE; CORTE; VANLMPE, 2013).

Os elementos estruturais podem ser:

Barras: possuem dimensões da seção transversal da mesma ordem de grandeza, e menores em relação ao seu comprimento e cujo eixo é uma linha reta ou curva aberta. As barras podem constituir diversos sistemas estruturais, onde os principais são:

Viga e Coluna: estrutura formada por barras alinhadas.

Arco: estrutura formada por barra cujo eixo é uma curva única.

Pórtico: estrutura formada de barras não-alinhadas.

Cabo: formado por uma barra flexível, sem resistência à flexão (resiste bem a esforços de tração).

Treliça: estrutura constituída por barras dispostas de modo a formar uma rede de triângulos.

Folhas ou estruturas de superfície - São elementos estruturais que apresentam grandes superfícies em relação a sua espessura.

Blocos: Os blocos possuem as três dimensões com a mesma ordem de grandeza. Para os blocos, não se pode desprezar nenhuma das três dimensões, por este motivo não deve ser considerado uma estrutura linear (barra) nem estrutura superficial (folha). Como exemplo de estrutura formada por bloco podem-se citar os blocos de fundações.

Estes elementos estruturais podem ser compostos de vários materiais como madeira, plástico, concreto armado e aço dentre outros.

2.3 O aço

É impossível imaginar o mundo atual sem o uso do aço. O nível de desenvolvimento econômico de um país pode ser medido quanto à utilização deste material de construção, pois seu consumo cresce proporcionalmente à construção de obras públicas, edifícios, produção de equipamentos e o crescimento dos meios de comunicação.

Segundo Bellei e Bellei (2011), são definidos como aços estruturais toda liga de ferro carbono que, em razão de sua resistência mecânica, resistência à corrosão, ductilidade, soldabilidade e outras propriedades, são adequados para uso em elementos que suportam cargas e transmitem esforços.

Cada tipo de aço produzido pode ser específico para determinada utilização. Por isso existe uma grande variedade de tipos e formas que decorrem da necessidade de atender às exigências das aplicações específicas do mercado, ou seja, novas formas e composições são necessárias para atender o mercado sendo elas chapas, perfis, tubos, barras, outros. Para atender estas exigências, existem mais de 3500 tipos diferentes de aços e cerca de 75% deles foram desenvolvidos nos últimos 20 anos. Isso mostra a grande evolução que o setor tem experimentado (BELLEI; BELLEI, 2011).

2.4 Propriedades mecânicas do aço

Na construção civil, rural e de armazenamento, há um grande interesse em se trabalhar com os chamados aços estruturais de média e alta resistência mecânica. Em função de sua resistência, ductilidade e outras propriedades, os aços são adequados para a utilização em elementos da construção sujeitos a vários tipos de carregamento.

Este material é muito utilizado nas estruturas por possuir elevada tensão de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade macroestrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em operações tais como corte, furação e dobramento, sem que se originem fissuras ou outros defeitos.

Os aços estruturais podem ser classificados em três grupos principais, conforme a tensão de escoamento mínima especificada:

Tabela 1 Propriedades mecânicas do aço

TIPO DE AÇO	LIMITE DE ESCOAMENTO MÍNIMO, MPa
Aço carbono de média resistência	195 a 259
Aço de alta resistência e baixa liga	195 a 259
Aços ligados tratados termicamente	630 a 700

Fonte: Bellei e Bellei (2011).

Dentre os aços estruturais existentes atualmente, o mais utilizado e conhecido é o ASTM A36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica. Entretanto, a tendência moderna, no sentido de se utilizar estruturas cada vez maiores, tem levado os engenheiros, projetistas e construtores a utilizar aços de maior resistência, os chamados aços de alta resistência e baixa liga, de modo a evitar estruturas cada vez mais pesadas.

Os aços de alta resistência e baixa liga são utilizados toda vez que se deseja aumentar a resistência mecânica permitindo um acréscimo da carga unitária da estrutura ou tornando possível uma diminuição proporcional da seção, ou seja, o emprego de seções mais leves, melhorar a resistência à corrosão atmosférica, melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga e elevar a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração, sem perda apreciável da ductilidade.

Segundo Bellei e Bellei (2011), para efeito de cálculo devem ser adotados para os aços A36, os seguintes valores, na faixa normal de temperaturas atmosféricas.

- a) Módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ Mpa}$.
- b) Módulo de elasticidade transversal $G = 77.200 \text{ Mpa}$.
- c) Coeficiente de Poisson $\nu_a = 0,3$.
- d) Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ por } 0^\circ \text{ C}$.

e) Peso específico $\gamma_a = 77 \text{ kN/m}^3$ ou 7850 kg/m^3 .

2.5 Colunas

Segundo a NBR 8800/2007, colunas são peças verticais sujeitas à compressão centrada. Estas peças são encontradas em componentes de treliça, sistemas de travejamento e, principalmente, em pilares de sistemas contraventados de silos e edifícios. Este tipo de estrutura, quando comprimido, sofre o efeito de flambagem que pode ser simplesmente definida como um tipo de instabilidade da peça em estudo.

2.6 Flambagem

De acordo com Ballio e Mazzolani (1983), os estudos teóricos de barras submetidas à compressão remontam ao ano de 75 (a.C.) com Erone d'Alexandria, havendo similares descrições encontradas em desenhos de Leonardo da Vinci (1452-1519) e estudos de P. Van Musschenbroek (1693-1761) e de Bernoulli (1700-1782).

Os primeiros resultados teóricos sobre instabilidade em colunas foram obtidos pelo matemático suíço Leonhardt Euler (1707-1783), que investigou o equilíbrio de uma coluna comprimida na posição deformada com deslocamentos horizontais, em que foi adotada uma coluna isenta de imperfeições geométricas e tensões residuais, material de comportamento elástico linear e carga perfeitamente centrada.

De acordo com a NBR 8800/2007, os sistemas mecânicos e estruturas, quando estão solicitados ou submetidos a carregamentos, podem falhar de várias formas. Portanto, quando se projeta um elemento, é necessário que ele satisfaça requisitos específicos de tensão, deflexão e estabilidade.

Quando se trata da estabilidade estrutural, o fenômeno de flambagem ocorre em elementos compridos e esbeltos sujeitos a uma força axial de compressão. Estas peças são chamadas de colunas e a deflexão lateral que sofrem é chamada de flambagem. Portanto, a flambagem leva a uma falha repentina e dramática da estrutura (JANSSEUNE; CORTE; VANLMPE2013).

Na Figura 1, pode-se observar um silo metálico sujeito a cargas que não excedem à carga axial máxima que a coluna pode suportar (carga crítica de flambagem).



Figura 1 Detalhes geométricos das colunas de um silo elevado sem o efeito de flambagem

Fonte: Jansseune, Corte e Vanlmpe (2013).

De acordo com a NBR 8800/2007, o efeito de flambagem só ocorre quando a carga axial aplicada sobre uma coluna excede a carga crítica de flambagem. Portanto qualquer carga adicional acima dessa, provocará flambagem na coluna como mostra a Figura 2.



Figura 2 Detalhes geométricos das colunas de um silo elevado com o efeito de flambagem

Fonte: Jansseune, Corte e VanImpe (2013).

É descrito na NBR 8800/2007 que o efeito de flambagem somente ocorre quando o esforço de compressão aplicado na coluna atinge a carga crítica de flambagem descrita pela Equação 1 (TIMOSHENKO; GERE, 1994).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (1)$$

em que:

N_{cr} é a carga crítica de flambagem;

E é módulo de elasticidade do material;

I é o momento de inércia da seção transversal;

l é comprimento da barra;

Com base nesta carga não é mais possível o equilíbrio na configuração retilínea do pilar.

2.7 Cálculo de flambagem por métodos convencionais

Os cálculos de flambagem por métodos convencionais seguem uma metodologia baseada, principalmente, na NBR 8800/2007, que trata principalmente dos projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Além da norma brasileira que será adotada, como base de comparação neste trabalho, existem outras técnicas que podem ser utilizadas para auxiliar no dimensionamento das estruturas como os métodos numéricos e a análise por simulação computacional por meio de elementos finitos, dentre outros.

Segundo a NBR 8800/2007, colunas solicitadas por esforços de compressão podem se comportar de várias maneiras dependendo de sua condição de contorno. Assim, a Figura 3 mostra que a carga crítica de flambagem deve ser calculada em função do coeficiente de flambagem (K) da peça em estudo.

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio		Rotação e translação impedidas				
		Rotação livre, translação impedida				
		Rotação impedida, translação livre				
		Rotação e translação livres				

Figura 3 Valores de coeficiente teóricos e recomendados de flambagem por flexão de elementos isolados

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007)

2.7.1 Cálculo Convencional (NBR 8800/2007)

A NBR 8800/2007 trata o estudo de barras comprimidas submetidas à força axial de compressão e, também, relaciona todos os parâmetros e equações necessários para dimensionar uma coluna ou barra sujeitos ao esforço de compressão.

Em geral, o fenômeno de flambagem relaciona a seção transversal à limitação da esbeltes, cujo comprimento total da peça e a ligação com o exterior faz toda a diferença. Portanto o primeiro passo é garantir que a condição representada pela Equação 2 seja satisfeita.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (2)$$

em que:

$N_{c,Ed}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo e

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo.

Para o cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, de uma barra, deve-se associá-la aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local.

Essa força axial resistente pode ser calculada baseada na Equação 3:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (3)$$

em que:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão;

Q é o fator de redução total associado à flambagem local;

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

f_y é o limite de escoamento do aço, valor nominal especificado pelo fabricante;

γ_{a1} é o fator de segurança.

Segundo Pinheiro (2005), para dimensionar uma barra sujeita à compressão, deve-se levar em conta as condições em que a barra se encontra vinculada em suas extremidades, pois estes vínculos determinam o parâmetro de flambagem “k” que consta da NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Portanto, para calcular o índice de esbeltes das barras comprimidas, deve-se tomar a maior relação entre o comprimento destravado e o menor raio de giração correspondente descrito pela Equação 4. Por fatores estatísticos, o índice de esbeltes ainda não deve ser superior a 200.

$$l/r \quad (4)$$

em que:

l é comprimento da barra;

r é o menor raio de giração.

Quando se trata de elementos estruturais isolados, conforme definição da NBR 8800, recomenda-se que o índice de esbeltes seja calculado pela Equação 5.

$$KL/r \quad (5)$$

em que:

K é o coeficiente de flambagem;

l é o comprimento da barra;

r é o menor raio de giração.

Portanto, para o cálculo de flambagem devem-se ser considerados dois índices de esbeltez, o global (λ) e o reduzido (λ_0), cujos coeficientes de flambagem, também, devem ser calculados considerando a seção transversal como um todo e os elementos que a compõem separadamente.

2.8 Método de ensaios convencionais

O fenômeno da flambagem ocorre somente quando o elemento estrutural em estudo está sobre um efeito de carga de compressão. Assim, o método de ensaio mais comum utiliza a máquina universal de ensaios, que pode aplicar cargas de compressão variadas ao corpo de prova. Deste modo o pesquisador pode avaliar em um ambiente controlado todos os fenômenos pertinentes do ensaio. Se o modelo em estudo foi bem projetado e trabalhado dentro das escalas de verossimilhança, os resultados poderão ser extrapolados para protótipos e posteriormente para estruturas reais.

2.9 Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

Comumente conhecida como PIV (*particle image velocimetry*), a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas é amplamente empregada na medição de fluxo de partícula em fluidos.

Segundo Almeida (1997), esta técnica foi muito utilizada nos laboratórios de pesquisa, sendo a base dos sistemas comerciais disponíveis. Portanto existe na literatura uma grande variedade de implementações que incluem diferentes modos de iluminação, equipamentos para captura de imagens e, principalmente, algoritmos para análise das imagens e extração do campo de velocidade.

Esta técnica é capaz de identificar o campo de velocidade em um único plano de projeção, numa dada região de interesse, por meio de partículas injetadas no fluxo.

Uma das primeiras aplicações do PIV foi realizada por Yeh e Cummins em 1964, em que foi utilizada a técnica *laser doppler velocimetry* (LDV) ou *laser doppler anemometry* (LDA), que consiste em um feixe simples de luz

dividido em dois de igual intensidade que foram focados em um mesmo ponto no campo do fluxo. Uma interferência padrão foi formada no ponto de encontro entre os feixes, definindo uma região onde o volume é conhecido. As partículas em movimento espalham a luz que é coletada por um fotodetector. A velocidade da partícula está diretamente relacionada à frequência resultante de saída do fotodetector (MIRANDA, 2004).

Van Dyke, em 1982, utilizando a técnica conhecida como *particle tracking velocimetry* (PTV), coletou o rastro de partículas semeadas em um fluxo. O tamanho do rastro, o tempo de abertura da câmera e a resolução da imagem fornecem os dados para o cálculo da velocidade. Em 1985, foi utilizada a técnica PIV e o *laser speckle velocimetry* (LSV) para determinar as bases do espalhamento de vários tipos de partículas pela luz pulsada. Desde então a técnica sofreu avanços enormes e, nos últimos anos, vem sendo aprimorada, à medida que os métodos analógicos de armazenamento e processamento das imagens são substituídos por métodos digitais. Com o intuito de melhorar cada vez mais a ferramenta, metodologias e aplicações diferentes são propostas a cada dia (MIRANDA, 2004).

A técnica PIV utiliza pequenas partículas que são adicionadas a um determinado fluxo, e seus movimentos são medidos pela comparação entre duas imagens em tempos distintos. A primeira imagem é dita num tempo t_0 (inicial) enquanto a segunda é parecida com a primeira, mas com as partículas em posições diferentes em um tempo $t_1 = t_0 + \Delta t$. Com este deslocamento e intervalo de tempo entre as duas imagens, pode-se calcular a velocidade das partículas injetadas (MIRANDA, 2004).

As imagens, em tempos distintos, são divididas em janelas de interrogação de tamanhos distintos que dependem do tamanho das partículas em análise, como mostra a Figura 4.

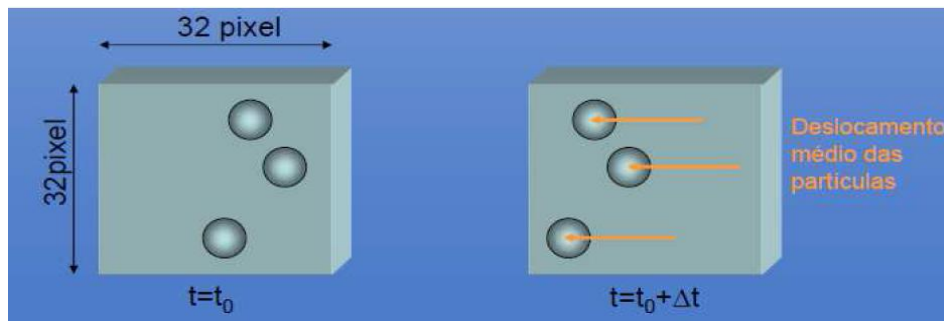


Figura 4 Esquema das Janelas de interrogação utilizadas para identificar o deslocamento de partículas de um instante t_0 para um instante t_1

Fonte: Souza (2013).

Almeida (1997) descreve a utilização de janelas de interrogação e a metrologia de luz pulsada para quantificar o deslocamento de partículas traçadoras injetadas em um fluxo demonstrado na Figura 5.

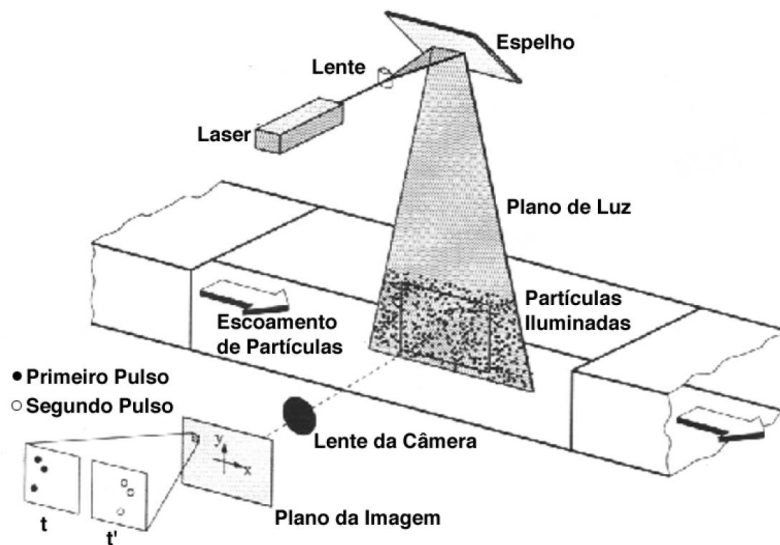


Figura 5 Esquema do Sistema de velocimetria por luz pulsada onde, em destaque, as janelas de interrogação são utilizadas na identificação do deslocamento de partículas traçadoras em fluido

Fonte: Raffael, Willert e Kompenhans (1998).

O *biospeckle* PIV foi utilizado para medir o fluxo de partículas externas semeadas como alvos de correlação das imagens de fluxo. Na Figura 6 pode-se observar o fluxo d'água em um tubo após a aplicação do PIV (SOARES et al., 2013).

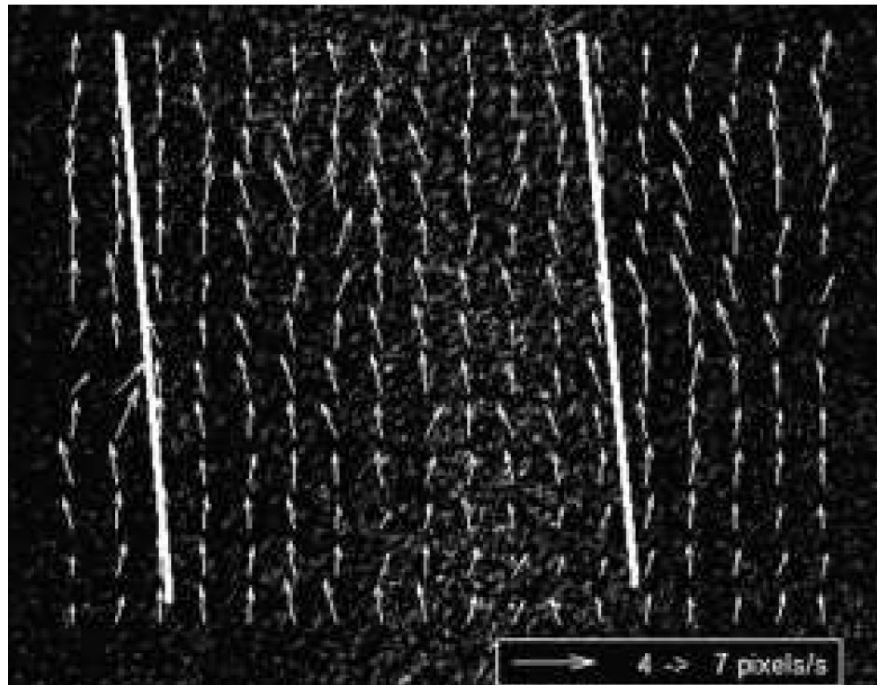


Figura 6 Vetores de velocidade que representam o fluxo de partículas externas semeadas como alvos de correlação das imagens do fluxo de água em um tubo após a aplicação do PIV

Fonte: Soares et al. (2013).

Almeida (1997), também, descreve o movimento circular em um fluido, provocado pela rotação de um corpo rígido onde foi aplicado o PIV com o intuito de comparar os resultados medidos e valores teóricos, obtendo-se resultados semelhantes, ilustrados pela Figura 7.

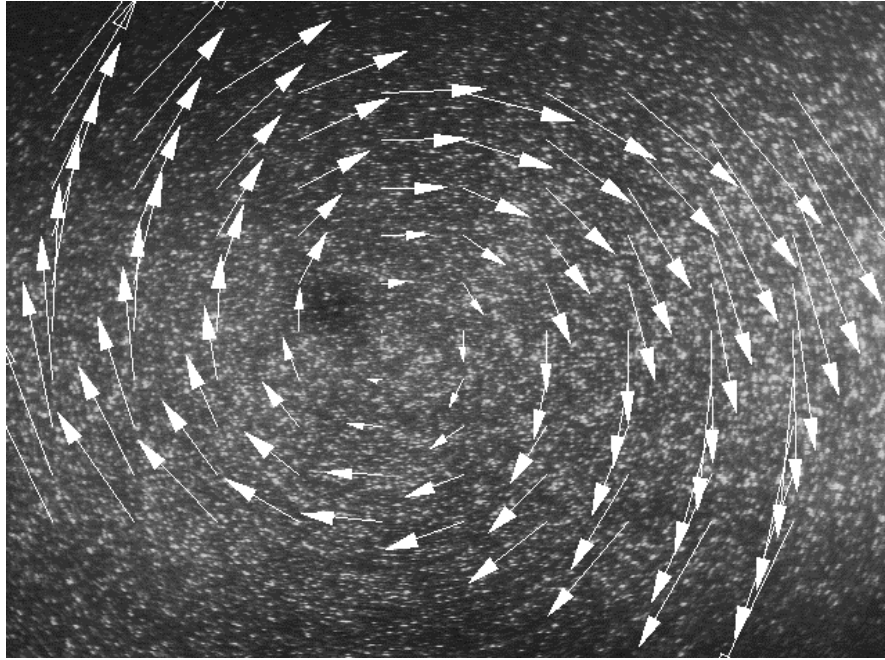


Figura 7 Partículas e campo de velocidade para experimento de rotação de corpo rígido com velocidade angular de 222 RPM

Fonte: Almeida (1997).

Soares et al. (2013) descrevem o fluxo, utilizando o *biospeckle* PIV, com base em janelas de interrogação de 64 x 64 pixels e uma correlação cruzada. O experimento foi capaz de obter o movimento descrito pela Figura 8.

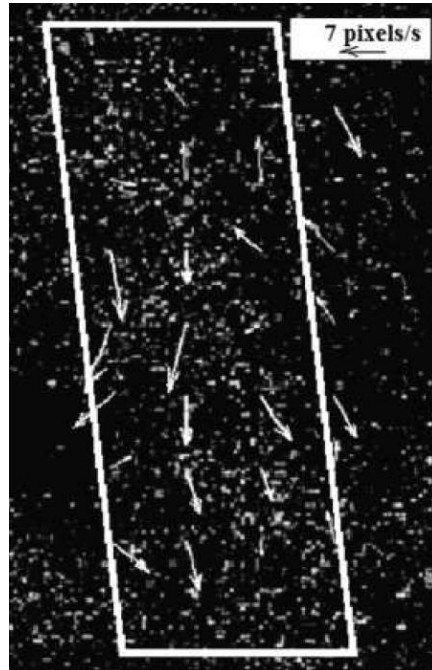


Figura 8 Representação do fluxo utilizando o *biospeckle* PIV, com base em janelas de interrogação de 64 x 64 pixels e uma correlação cruzada dentro da veia principal

Fonte: Soares et al. (2013).

Petersson (2010) utilizou uma técnica similar ao PIV, conhecida como *Optical and Laser Scanning Technique*, no estudo de madeiras com nós, iluminadas por luz fluorescente e laser. Neste estudo, foi possível detectar imperfeições e caracterizar peças de madeira, ilustrados na Figura 9.

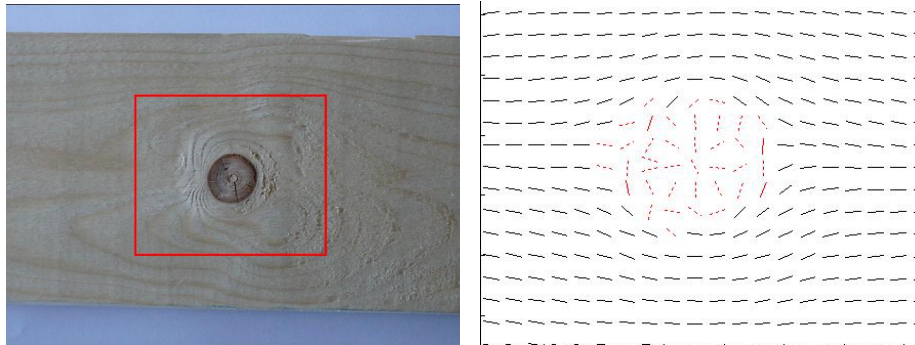


Figura 9 Aplicação da técnica *Optical and Laser Scanning Technique* em viga de madeira com nó

Fonte: Petersson (2010).

Souza (2014) utilizou a técnica PIV, associada ao *speckle laser*, ilustrados na Figura 10, para avaliar de forma qualitativa, a elasticidade da madeira, por meio da técnica óptica do sunset laser, onde foi possível analisar o comportamento de vigas de madeira das espécies *Hymenolobium sericim*, *Eucaliptus* e *Pinus*. Com esta aplicação, foi possível descrever a linha neutra de vigas de madeira demonstrando quais partes sofreram maior e menor deformação.

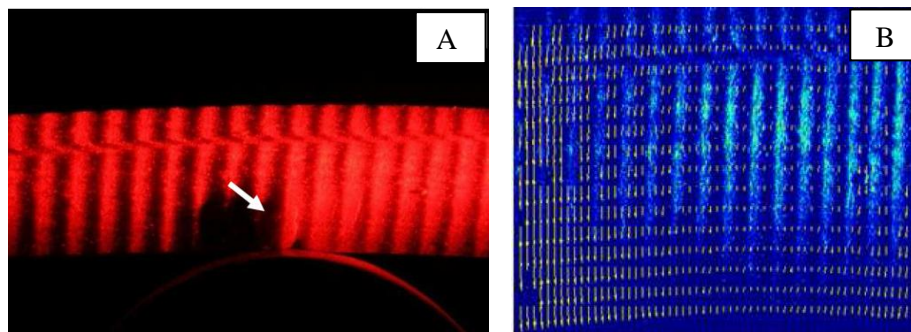


Figura 10 Aplicação da técnica PIV em vigas de madeira. (A) Face iluminada com laser para aquisição das imagens e (B) Mapa de vetores deslocamento obtido pela aplicação do PIV

Fonte: Sousa (2014).

Pereira (2014) aplicou a técnica PIV, associada ao sunset laser e à pigmentação artificial da superfície, ilustrados na Figura 11, no ensaio de flexão estática em vigas de madeira com nó, onde foi possível monitorar o deslocamento da viga de madeira, utilizando tanto o laser quanto a pigmentação, conforme Figura 10. Além disso, foi possível identificar pelo método PIV, sinais de ruptura do material ensaiado, antes que os mesmos fossem identificados pela Máquina Universal de Ensaio por meio da dispersão dos vetores.

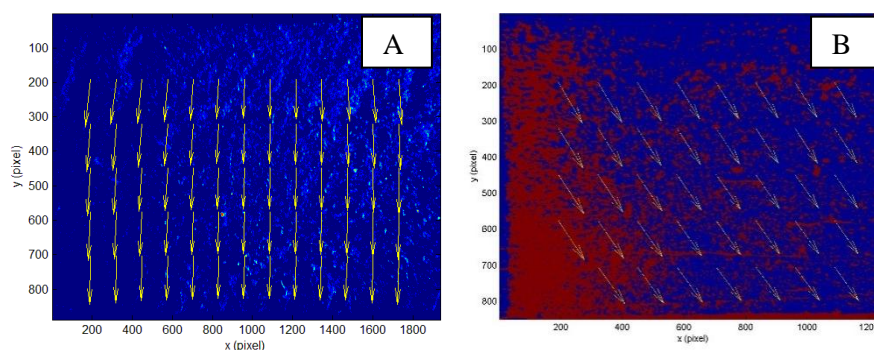


Figura 11 Aplicação da técnica PIV em vigas de madeira com nó. (A) Face da viga iluminada com Laser e (B) Face da viga pigmentada com tinta

Fonte: Pereira (2014).

2.10 Método de elementos finitos

O método de análise estrutural por elementos finitos (MEF) se destaca atualmente pela sua precisão e realidade dos resultados obtidos. Com isso, o aumento da velocidade e da capacidade de processamento dos computadores tem alavancado os estudos, utilizando o MEF, propiciando o seu uso em várias áreas da engenharia (KNIGHT, 1993; NORTON, 1992).

Esta ferramenta, que trabalha com simulação, surgiu em 1955 com a evolução da análise matricial de modelos reticulados, com a disponibilidade de

computadores digitais e em razão da necessidade de projetar estruturas de modelos contínuos.

Os primeiros elementos foram modelados por engenheiros aeronáuticos, para a análise de distribuição de tensões em chapas de asa de avião e tratada como pioneira por Argiris e Kelsey, em 1955 e por Turner, Clough, Martin e Topp, em 1956. Assim, a técnica vem sendo estudada e melhorada constantemente com a evolução dos sistemas operacionais.

Este método é uma eficiente ferramenta numérica de resolução para vários problemas num meio contínuo, que utiliza a modelagem matemática, com base em malhas criadas nas superfícies das peças modeladas para analisar aplicações práticas na engenharia, muito mais econômicas que os modelos físicos de teste em laboratório (SORIANO; LIMA, 2003).

Segundo Chodraui e Malite (2006), a técnica de análise por elementos finitos pode ser utilizada para simular o comportamento de barras sujeitas a diversos tipos de carregamentos.

Deste modo, pode-se dividir um corpo-de-prova criando uma malha constituída por várias partes ou elementos formados por nós. Essa técnica resolve equações para descrever o comportamento das variáveis envolvidas em um processo de análise por simulação, com o objetivo de gerar resultados de tensão, deslocamento e deformação em uma estrutura, utilizando um software específico para simulação.

2.10.1 Modelagem por MEF

Sempre que se utiliza um software para a criação e simulação de uma estrutura, é necessário seguir os seguintes conceitos (IST SISTEMAS, 2011):

- a) Construção do modelo matemático.

- b) Construção do modelo de elementos finitos;
- c) Resolução dos modelos de elementos finitos;
- d) Análise dos resultados.

Primeiramente deve-se criar a geometria de uma peça ou montagem que represente exatamente o modelo em estudo. Posteriormente devem-se criar as malhas que gerem o melhor resultado possível. Em seguida, faz-se a vinculação e a aplicação das cargas para posteriores análises dos resultados.

Segundo IST Sistemas (2011), a etapa de análise e interpretação dos resultados deve ser bem criteriosa, pois devem ser levadas em conta as suposições e simplificações na criação do modelo matemático, construção do modelo de elementos finitos e resolução do modelo.

2.10.2 Criação das malhas

As malhas são criadas a partir de elementos sólidos e podem ser de vários formatos que dependem da peça ou superfície em análise (IST SISTEMAS, 2011).

Estes elementos chamados “finitos”, pelo fato de serem infinitamente pequenos, podem ser tetraédricos de primeira ou de segunda ordem, elementos de casca de primeira ou de segunda ordem, elementos de graus de liberdade e elementos de viga.

A Figura 12 ilustra a malha tetraédrica de primeira ordem que melhor se adapta a peças com superfícies paralelas bem definidas.

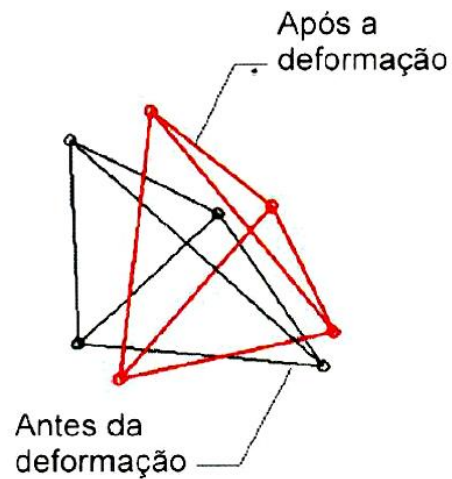


Figura 12 Malha tetraédrica de primeira ordem para sólidos utilizados na Modelagem por Elementos Finitos

Fonte: IST Sistemas (2011).

De acordo com IST Sistemas (2011), deve-se escolher dentre esses modelos de malhas, o que melhor proporcionará a simulação real da estrutura em estudo.

2.10.3 Interpretação dos resultados por MEF

Os resultados fornecidos pelo MEF são na forma de tensões, deformações ou deslocamentos. Na maioria dos softwares que trabalham com MEF, os resultados são expressos de acordo com o Sistema internacional de medidas sendo essas o kg, m, s e outros (IST SISTEMAS, 2011).

2.10.4 Etapas de modelagem por elementos finitos

Para uma análise significativa das peças em estudo, deve-se seguir as etapas básicas de análise de modelos, independente da complexidade do que esteja estudando (IST SISTEMAS, 2011).

Na Figura 13, podem-se observar as etapas principais do MEF:

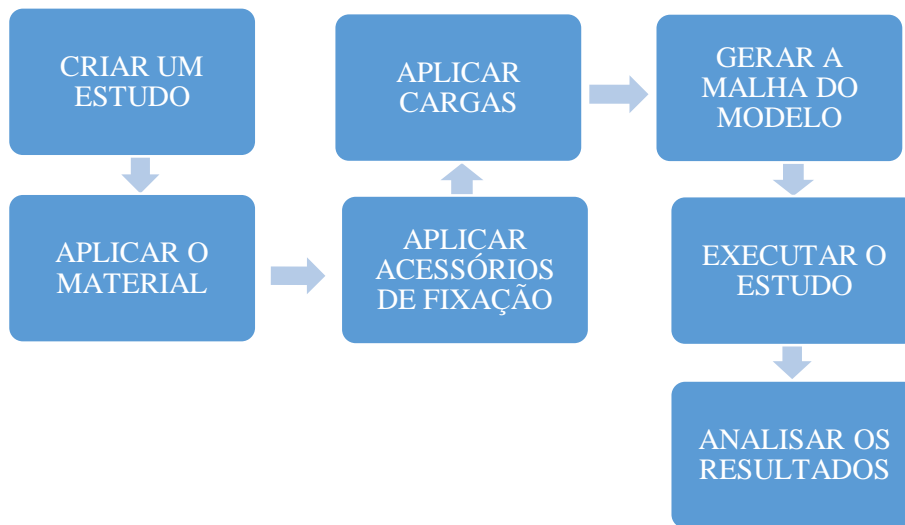


Figura 13 Etapas do Método de Análise por Elementos Finitos

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local de trabalho

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do departamento de engenharia da UFLA (DEG). Neste laboratório foram realizados os ensaios utilizando a máquina universal de ensaios com a aplicação do PIV e as simulações por elementos finitos.

3.2 PIV aplicado ao ensaio de flambagem

Os equipamentos utilizados para realizar os ensaios de flambagem e medição do deslocamento, utilizando a técnica PIV, foram uma máquina universal de ensaios mecânicos, 30 corpos-de-prova para os ensaios finais, 20 corpos-de-prova para os ensaios preliminares, caneta de retroprojektor, uma Câmera digital de alta resolução, um computador para aquisição de dados e um notebook para processamento das imagens e obtenção dos resultados pela técnica PIV.

3.2.1 Apoios ou vínculos da Máquina Universal de Ensaios

A máquina universal de ensaios utilizada está instalada no Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do departamento de engenharia da UFLA (DEG) com capacidade para realizar ensaios de tração, flexão e compressão que exijam um carregamento máximo de 30t (trinta toneladas).

As condições de contorno do corpo-de-prova foram adotadas, segundo o Coeficiente de flambagem, por flexão de elementos isolados definidos pela

NBR8800/2007 e pelos elementos de fixação da Máquina Universal de Ensaios ilustrados pela Figura 14.

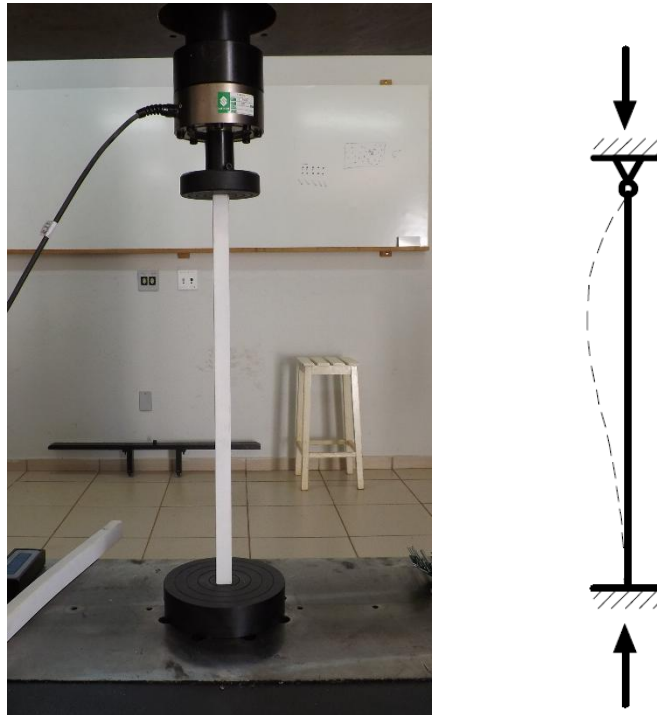


Figura 14 Máquina universal de ensaios do Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica das Estruturas do departamento de engenharia da UFLA

A face inferior do corpo de prova foi engastada e a face superior foi rotulada. A partir destes vínculos determinou-se o Coeficiente de flambagem $k = 0,7$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

3.2.2 Corpos-de-prova

Os corpos-de-prova adotados nos ensaios mecânicos foram confeccionados com base no perfil tubular retangular de aço estrutural ASTM A36 nas dimensões de seção transversal de 20mm x 30mm, espessura de chapa 1,2mm e comprimento de 500mm, conforme observado na Figura 15.

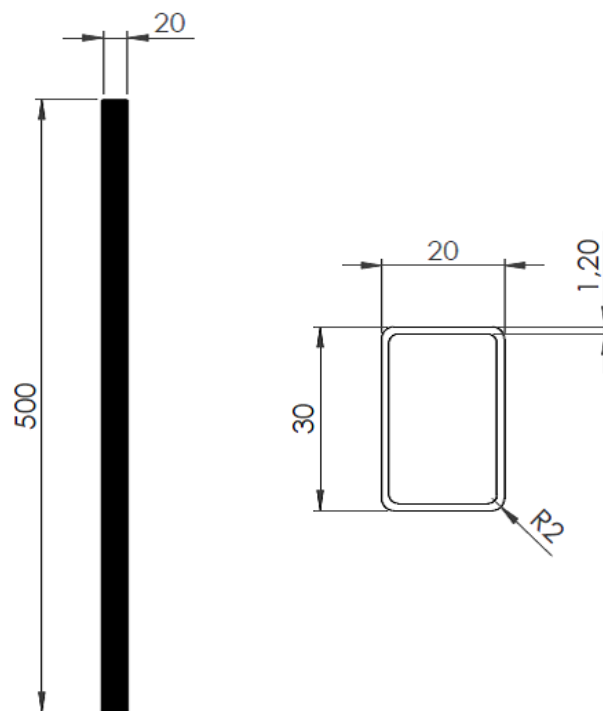


Figura 15 Detalhe dos corpos-de-prova adotados para a aplicação da técnica PIV e modelados pelo Solid Works

Por ser a primeira aplicação da técnica PIV no estudo de flambagem, o corpo de prova retangular foi adotado por possuir quatro faces paralelas que não sofrem flambagem local, além de ser um material de produção padronizada de

fácil aquisição no mercado. A flambagem local, que ocorre em perfis I, C, L e Z, poderiam interferir nos resultados da aplicação da técnica PIV.

Foi aplicada uma pintura branca nos corpos-de-prova e, posteriormente, definidas as marcações equidistantes de referência para origem dos vetores de deslocamento. Essas marcações foram feitas na região de interesse, ou seja, na região onde se previu calcular o deslocamento máximo da coluna. Os vários tipos de marcações, testados neste trabalho, podem ser visualizados na Figura 16.

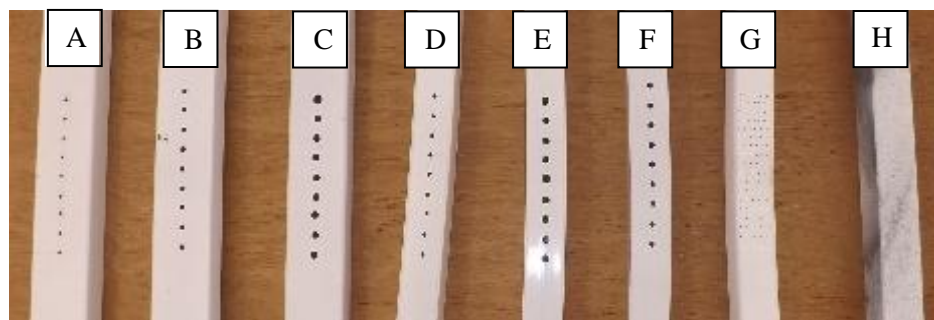


Figura 16 Detalhe das demarcações nos corpos-de-prova que foram testadas na busca do melhor tamanho dos pontos a serem reconhecidos pelas janelas de interrogação da técnica PIV. (A) Pontos de 1,0mm alinhados na face de maior inércia, (B) Pontos de 2,0mm alinhados na face de maior inércia, (C) Pontos de 3,0mm alinhados na face de maior inércia, (D) Pontos de 1,0mm na face de menor inércia, (E) Pontos de 3,0mm na face de menor inércia, (F) Pontos de 2,0mm na face de menor inércia, (G) Pontos de 0,5mm em ambas as faces, (H) Limalha de aço espalhadas por todo o corpo-de-prova

Foram realizados pré-testes com 20 corpos-de-prova, em que foi possível analisar qual o melhor tamanho dos pontos demarcados a ser adotado. Estes pontos testados foram de 0,5mm, 1,0mm, 2,0mm, 3,0mm e limalha de aço espalhada sobre a tinta branca. Também foram testados os posicionamentos dos marcadores, podendo ser alinhados ou não.

3.2.3 Ensaios de flambagem e aplicação da técnica PIV

Para aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) foram seguidos os seguintes passos:

Os corpos-de-prova foram posicionados na Máquina Universal de Ensaio e submetidos a esforços de compressão, os quais proporcionaram um efeito de flambagem nas peças metálicas, conforme Figura 17.

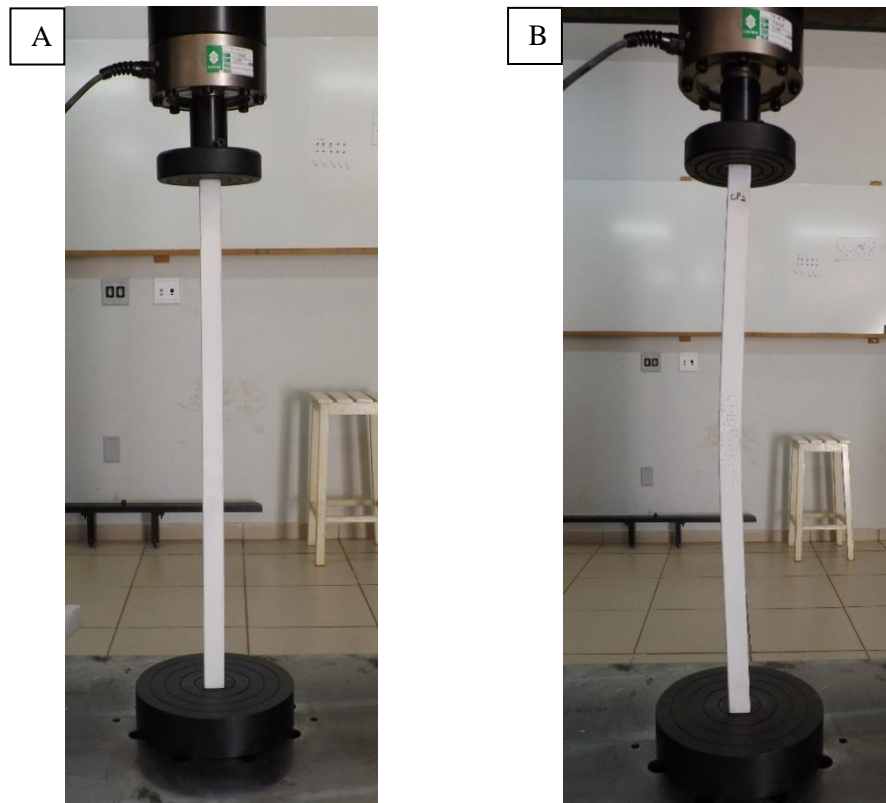


Figura 17 Posicionamento do corpo de prova e aplicação da carga pela máquina universal de ensaio: (A) Barra sem aplicação de carga, (B) Barra com aplicação de Carga sob efeito de flambagem

Durante o ensaio de compressão e flambagem, os corpos-de-prova foram solicitados por uma carga de compressão, aplicada longitudinalmente e centralizada no seu eixo. Assim, quando se atingiu o limite de rigidez à flambagem, ou seja, a carga crítica de flambagem, ocorreu a flexão na direção dos eixos transversais. Deste modo, foi possível medir a amplitude do deslocamento no plano de menor momento de inércia.

Para registrar o movimento da coluna, uma câmera digital de alta resolução foi fixada sobre um tripé paralelamente à face da coluna em estudo, garantindo que as imagens registradas pudessem descrever exatamente o deslocamento da coluna durante o ensaio. A Figura 18 representa o esquema da disposição da câmera em relação ao corpo-de-prova.

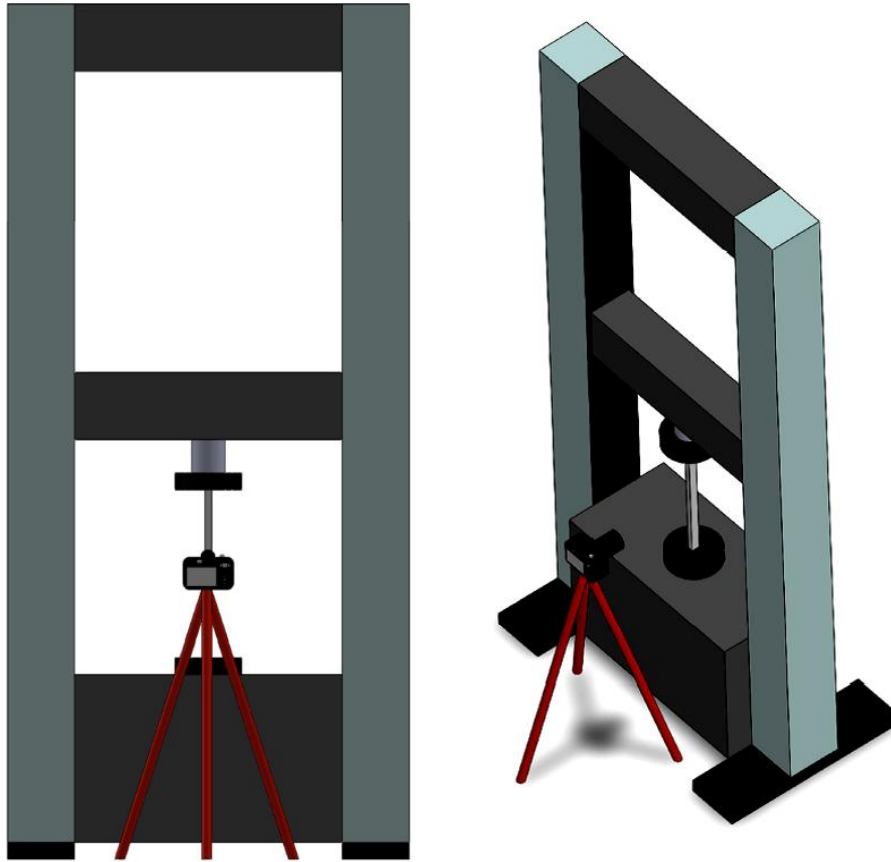


Figura 18 Esquema do posicionamento da câmera em relação ao corpo-de-prova, durante a aquisição das imagens utilizadas na técnica PIV

Durante o ensaio, foram obtidos valores de ruptura para cada corpo de prova descrito na Tabela 2, baseado nos dados extraídos da Máquina Universal de Ensaio que serviram como parâmetro de carregamento para a modelagem.

Tabela 2 Valores de ruptura por Flambagem para os 30 corpos-de-prova

Corpo de Prova	$N_{c,Rd}$(kN)
CP01	40.1760
CP02	35.3640
CP03	35.7120
CP04	38.7120
CP05	38.7120
CP06	36.9120
CP07	35.5680
CP08	37.8720
CP09	36.5760
CP10	33.5400
CP11	38.1840
CP12	36.3360
CP13	38.8080
CP14	36.3600
CP15	35.2440
CP16	36.2400
CP17	36.3960
CP18	38.3880
CP19	34.9560
CP20	36.4560
CP21	37.2960
CP22	37.5360
CP23	37.3680
CP24	37.6200

“Tabela 2, conclusão”

Corpo de Prova	Nc,Rd (kN)
CP25	35.6280
CP26	35.7600
CP27	35.8800
CP28	37.5480
CP29	36.9960
CP30	37.9080

Foi coletada uma imagem no tempo inicial (t_0), quando o corpo-de-prova se encontrava sujeito a uma carga de intensidade de 0kN. Depois de iniciado o ensaio, a carga de compressão foi aplicada gradativamente a fim de observar o deslocamento máximo da coluna antes de sua ruptura. Durante a aplicação da carga, foram tomadas imagens em intervalos de tempo de 10 segundos, totalizando 23 imagens que ilustram a deformação do corpo-de-prova até o seu colapso.

Um exemplo das imagens coletadas está ilustrado pela Figura 19.

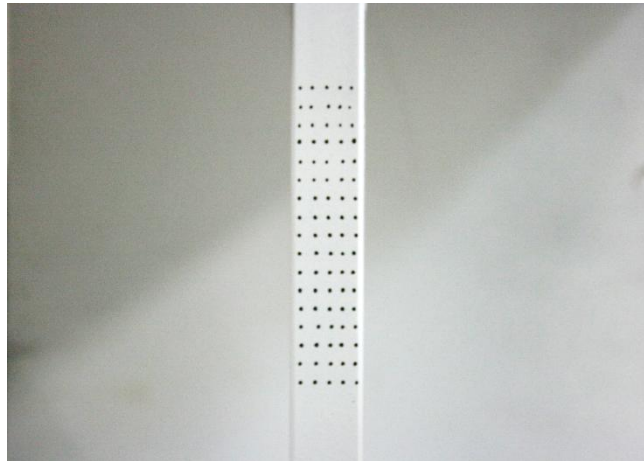


Figura 19 Imagem coletada do corpo de prova posicionado na máquina de ensaios com a demarcação da região de interesse no instante t_0 e carga 0kN

Após a captura das imagens, elas foram tratadas no software livre ImageJ, em que foram redimensionadas e transformadas em imagem com qualidade 8bits. Em seguida foi aplicado um threshold para transformá-las em imagem preto e branco e salvas no formato RGB e analisadas posteriormente no software comercial Matlab, seguindo os padrões de script e programação do PIV que propiciaram os resultados dos deslocamentos. A Figura 20 ilustra os processos de tratamento das imagens no software livre ImageJ.

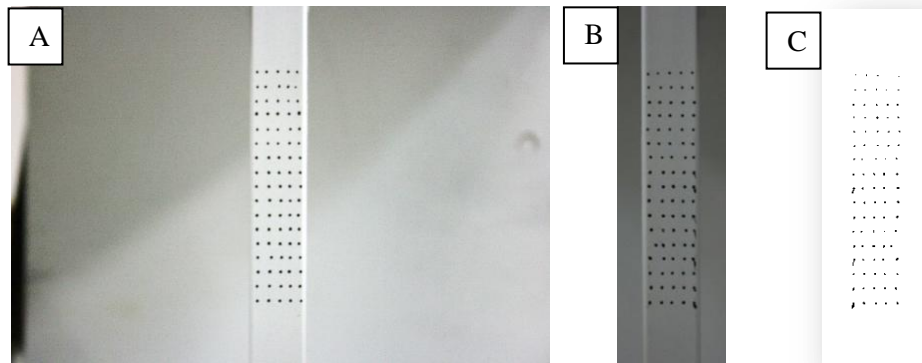


Figura 20 Tratamento das imagens no ImageJ: (A) Imagem extraída da câmera, (B) Imagem recortada, (C) Imagem no formato RGB (8bits) com aplicação de Threshold Preto e Branco

3.3 Elementos Finitos

O método de análise por elementos finitos seguiu as etapas básicas para o seu desenvolvimento iniciando-se pela modelagem do corpo de prova.

3.3.1 Modelagem do corpo de prova

Além do corpo-de-prova utilizado nos ensaios mecânicos, também foi modelado um corpo-de-prova no software comercial SolidWorks® EDU Edition 2012/2013 STAND-ALONE, com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova reais, conforme Figura 21.

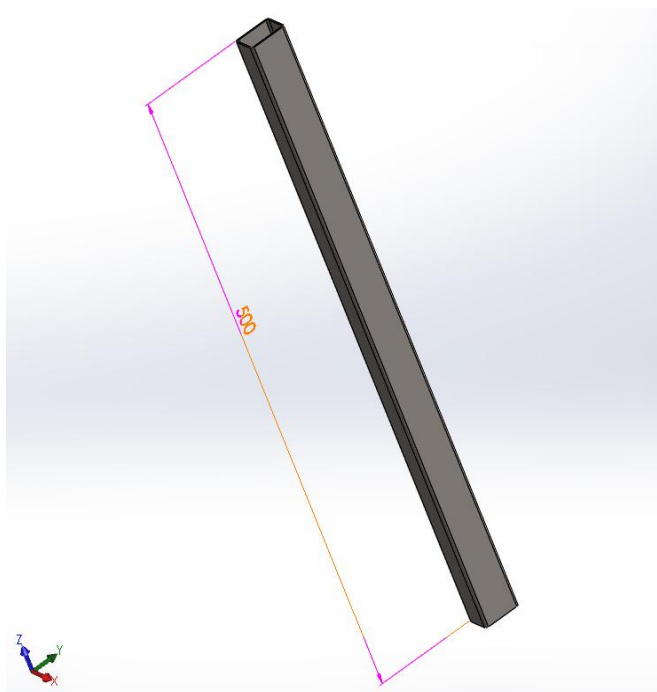


Figura 21 Corpos de prova modelados no SolidWorks com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova reais

3.3.2 Aplicação da Modelagem por Elementos Finitos

A criação do estudo de flambagem foi realizada por meio da janela estudo, onde foi escolhido o ícone de flambagem. No SolidWorks foi necessário escolher este estudo, pois a análise estática não considera os efeitos de flambagem. Além disso, material utilizado na modelagem por elementos finitos foi o mesmo material utilizado nos ensaios físicos, portanto, o aço adotado foi o ASTM A36.

Para garantir a mesma condição de contorno da Máquina Universal de Ensaio à extremidade inferior da coluna à qual foi vinculada com acessório de fixação denominado geometria fixa, que corresponde a uma ligação engastada com o exterior, com o intuito de simular uma coluna engastada a uma base de

fundação. A extremidade superior foi restrita de movimento nos dois eixos horizontais de translação e liberados os movimentos no sentido de aplicação da carga vertical e a rotação, simulando, assim, uma ligação rotulada, ilustrados pela Figura 22.

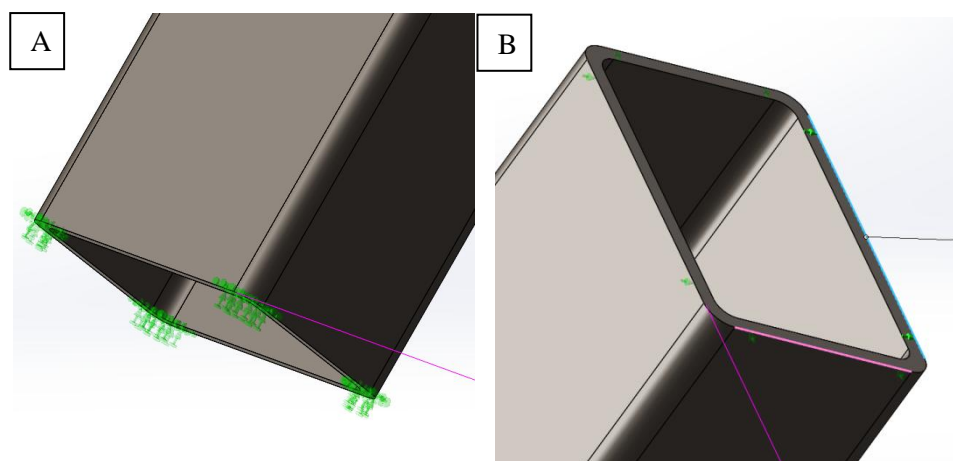


Figura 22 Esquema de fixação das extremidades do corpo-de-prova: (A) Fixação da face inferior do corpo-de-prova por meio de geometria fixa (Engaste), (B) Fixação da face superior por meio de ligação rotulada

A intensidade de carga de compressão axial aplicada foi de 40kN, ilustrada pela Figura 23, que corresponde à carga máxima suportada pela coluna, num instante antes de sua ruptura, extraídas da Tabela 2. Esta carga foi definida pela carga máxima aproximada suportada pelos 30 corpos-de-prova ensaiados pela Máquina Universal de Ensaio.

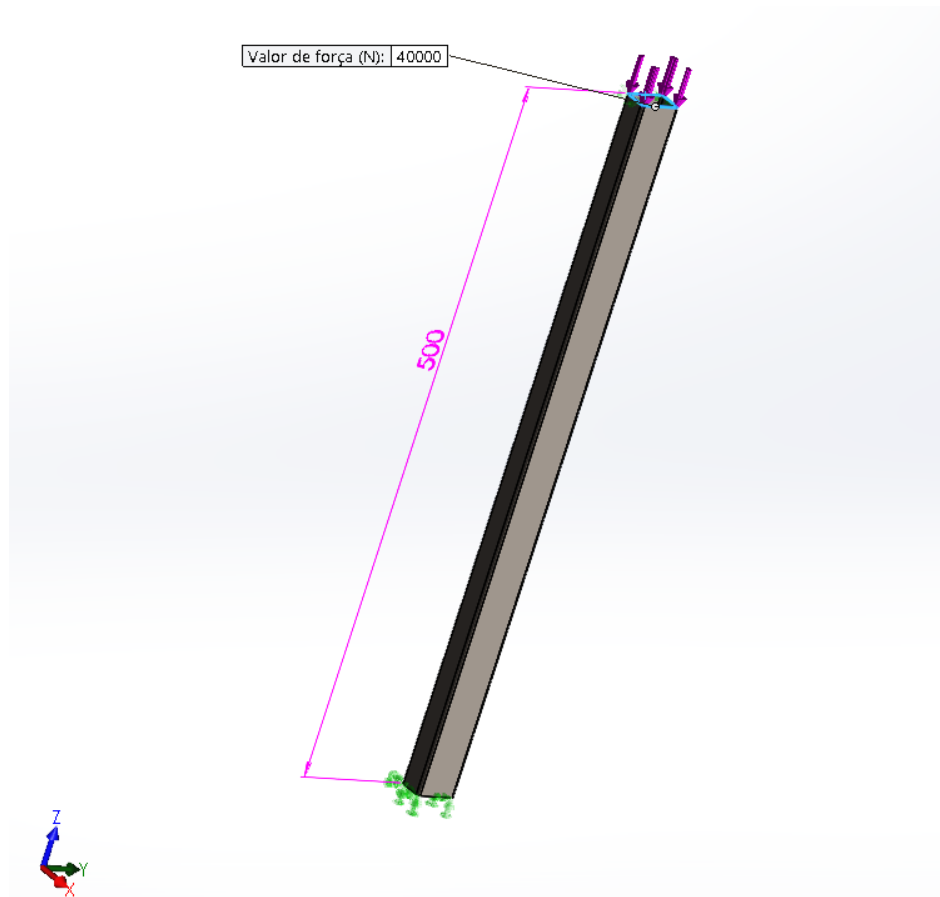


Figura 23 Aplicação da carga de compressão e intensidade 40kN normal ao eixo longitudinal da coluna

Foram geradas malhas tetraédricas de primeira ordem e de alta qualidade e densidade média, obedecendo à malha automática criada para superfícies planas que foram definidas por 6,0mm e nas superfícies curvas (Filetes) por 0,3mm. A malha triangular foi escolhida pela sua adaptabilidade às geometrias das fronteiras, à sua simplicidade e à facilidade na sua geração. Já, a densidade média de malha foi adotada por ter uma boa precisão e não exigir grande quantidade de memória durante o processamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Marcações dos pontos

Com base nos vários tamanhos e disposições de pontos avaliados no pré-teste dos corpos-de-prova, pode-se observar que os pontos devem ter um espaçamento mínimo entre si e tamanhos definidos que proporcionem uma boa correlação durante a comparação das imagens par a par. Deste modo, verificou-se que a melhor disposição das marcações para os corpos-de-prova ocorreu para pontos com diâmetro de, aproximadamente, 1,0mm e espaçamentos de 2,0mm a 3,0mm entre si, ilustrados pela Figura 24.

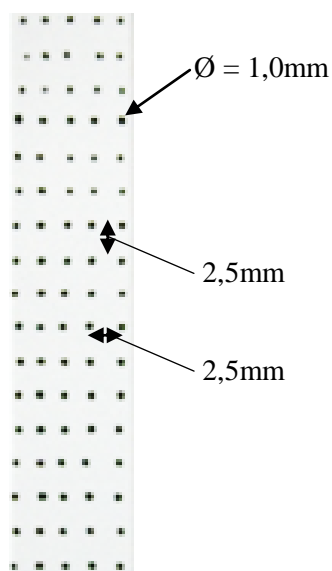


Figura 24 Disposições e dimensões das marcações dos pontos na face de menor inércia do corpo – de– prova

4.2 Mapas de deslocamentos fornecidos pelo PIV

Na Figura 25 é ilustrado o mapa de deslocamento, referente ao ensaio de compressão, obtido pela comparação entre 4 imagens, em que os pontos se deslocam vertical e horizontalmente, formando os vetores resultantes. Cada vetor representa o deslocamento de um ponto de um instante inicial para um instante distado de 10 segundos.

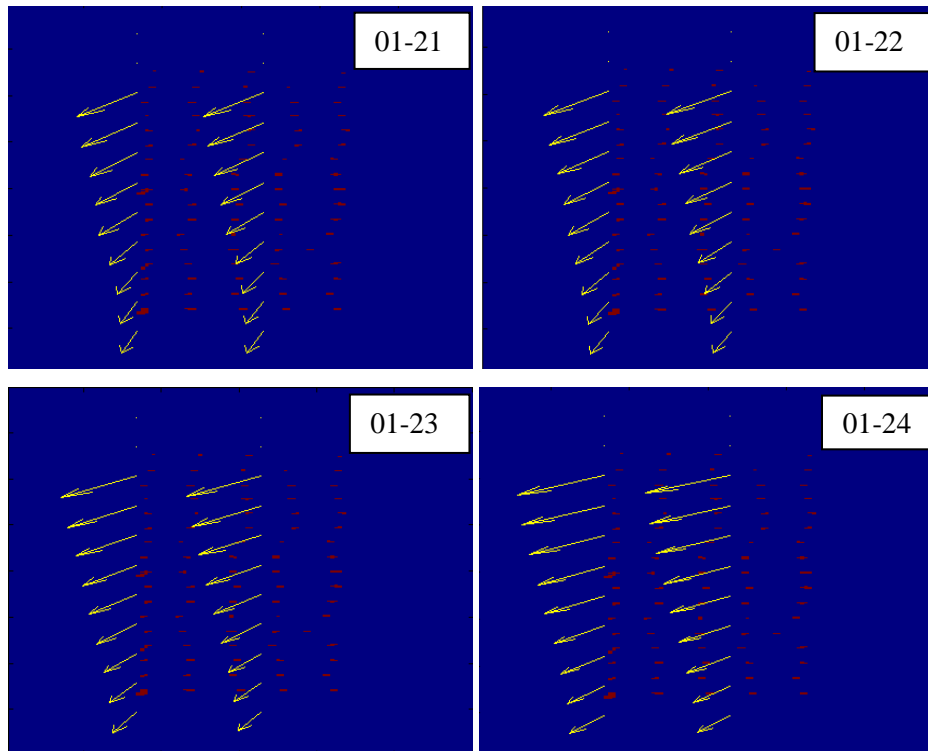


Figura 25 Evolução do deslocamento durante o ensaio de compressão. (01-21) deslocamento dos pontos da imagem 01 para a imagem 21. (01-22) deslocamento da imagem 01 para a imagem 22. (01-23) deslocamento da imagem 01 para a imagem 23. (01-24) deslocamento da imagem 01 para a imagem 24

Pode-se observar, também, na figura anterior a evolução do deslocamento em função das imagens coletadas em tempos diferentes. Desta forma, o deslocamento ocorre quando se comparam imagens sucessivas, onde se visualizam as inclinações dos vetores. A mudança de orientação e o aumento do módulo descrevem o efeito de flambagem. Este fenômeno pode ser observado na Figura 26.

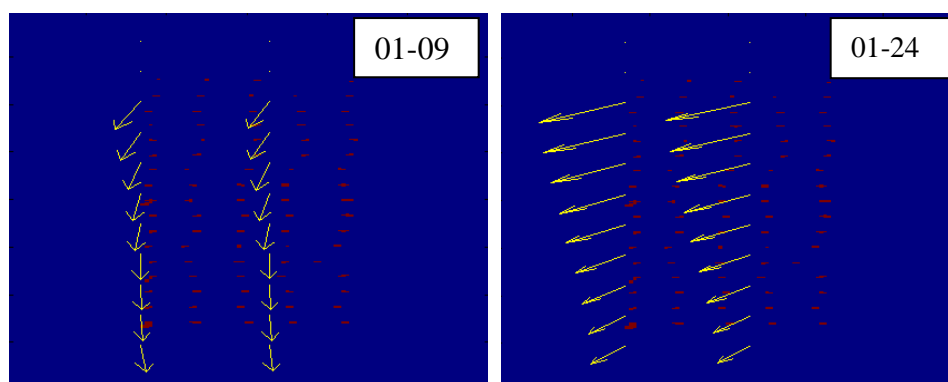


Figura 26 Representação das diferentes inclinações dos vetores. (01-09) deslocamento dos pontos da imagem 01 para a imagem 09. (01-24) deslocamento da imagem 01 para a imagem 24

Analisando-se todas as comparações entre as imagens geradas por esta técnica, pode-se observar que as imagens de 01 a 08 não representam o fenômeno de flambagem, ou seja, estas imagens representam uma acomodação do corpo de prova e a deformação que ocorre nos instantes que antecedem a carga crítica. A acomodação do corpo de prova e a deformação linear vertical podem ser observadas na Figura 27, que representa os deslocamentos comparando-se as imagens 01 e 02, 01e 03, 01e 04, 01e 05, 01e06, 01e 07, 01e 08.

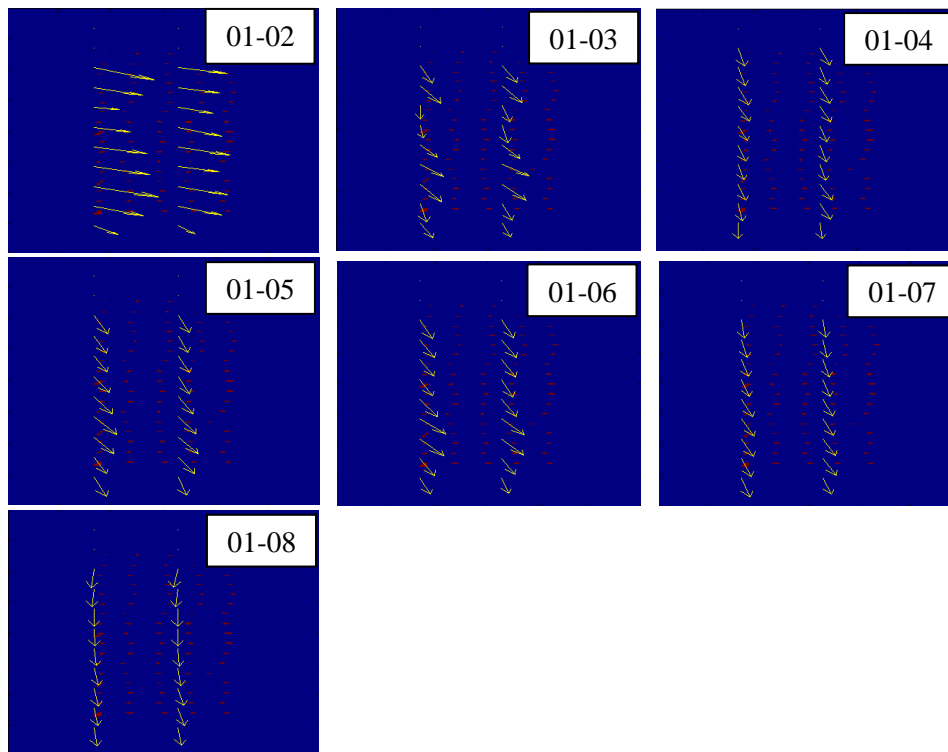


Figura 27 Estágio de acomodação e deformação linear do corpo-de-prova antes da carga crítica

Além das imagens anteriores demonstrarem o estágio inicial do teste, onde o efeito de flambagem não ocorre, pode-se verificar que com base na comparação entre as imagens 01 e 08 o efeito da flambagem se inicia. Com isso, obtiveram-se os deslocamentos do corpo-de-prova até seu limite de ruptura ilustrado na Figura 28.

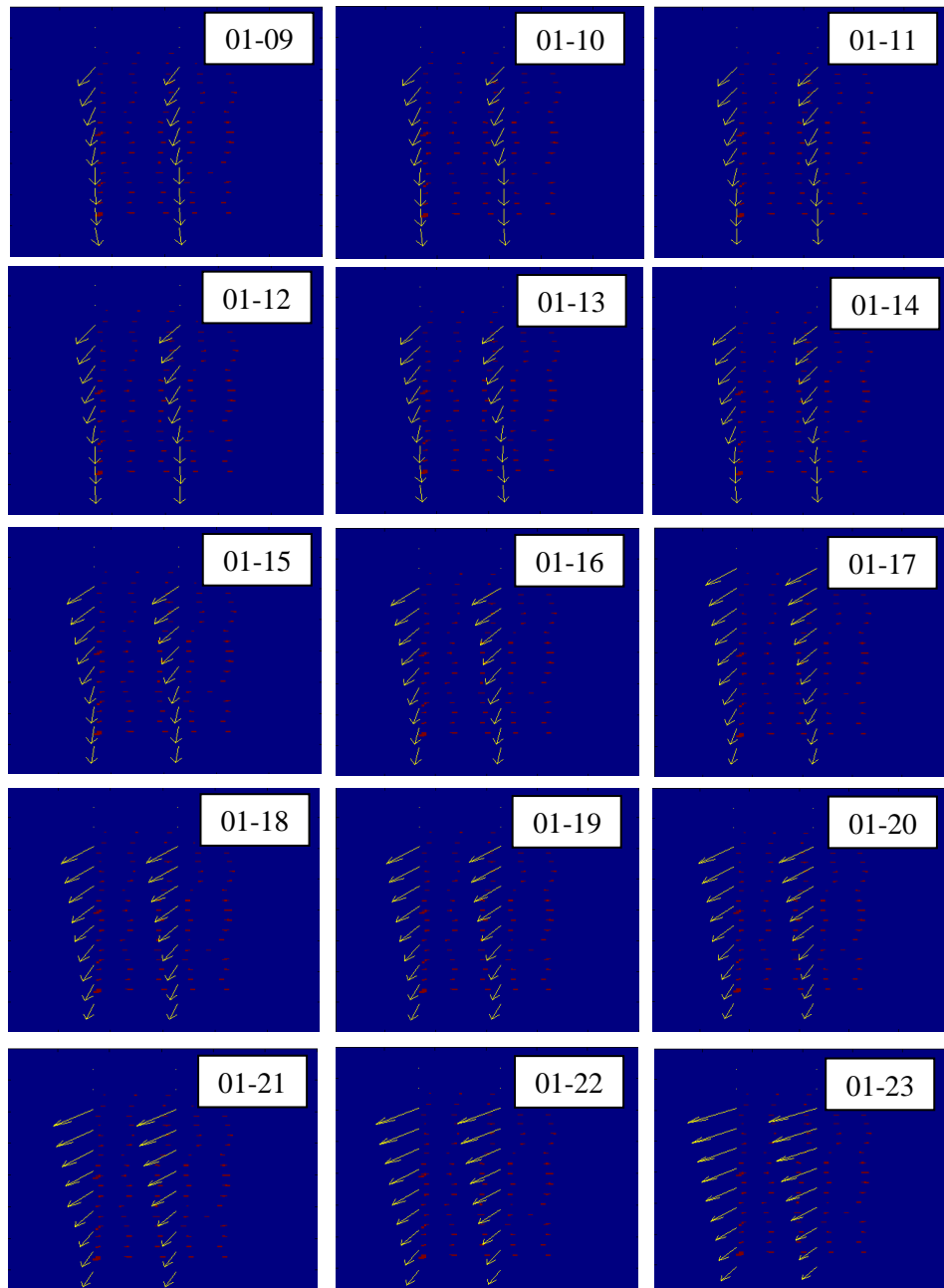


Figura 28 Acompanhamento do efeito de flambagem com base na comparação de imagens sucessivas após o estágio de acomodação e deformação linear

A representação dos vetores da região de interesse em um único ponto é ilustrada pela Figura 29, que descreve exatamente a direção e o sentido do deslocamento, onde é possível analisar o estágio de deformação por meio do cálculo da média do módulo e da inclinação dos vetores.

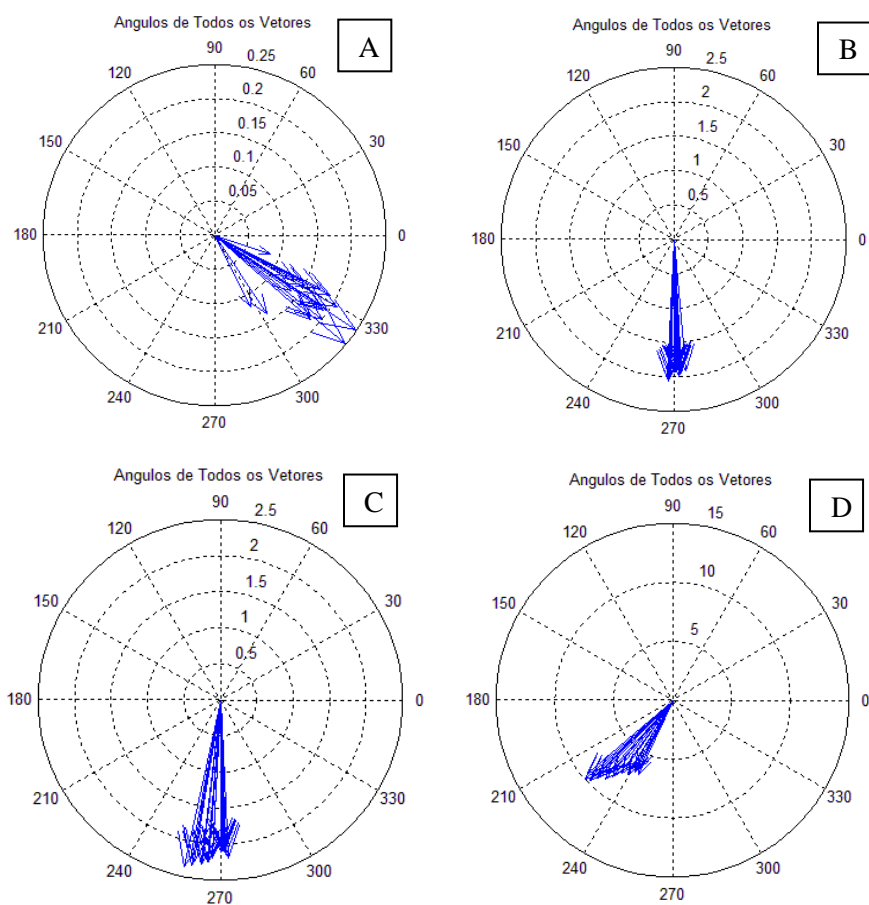


Figura 29 Vetores deslocamento: (A) Estágio da acomodação do corpo-de-prova, (B) Deformação linear vertical do corpo-de-prova, (C) Início do efeito de flambagem e (D) Deformação máxima do corpo de prova sob o efeito de flambagem

4.3 Deslocamento obtido por Elementos Finitos

A Figura 30 ilustra o ponto de maior deslocamento horizontal da coluna obtido por meio de simulações por Elementos Finitos.

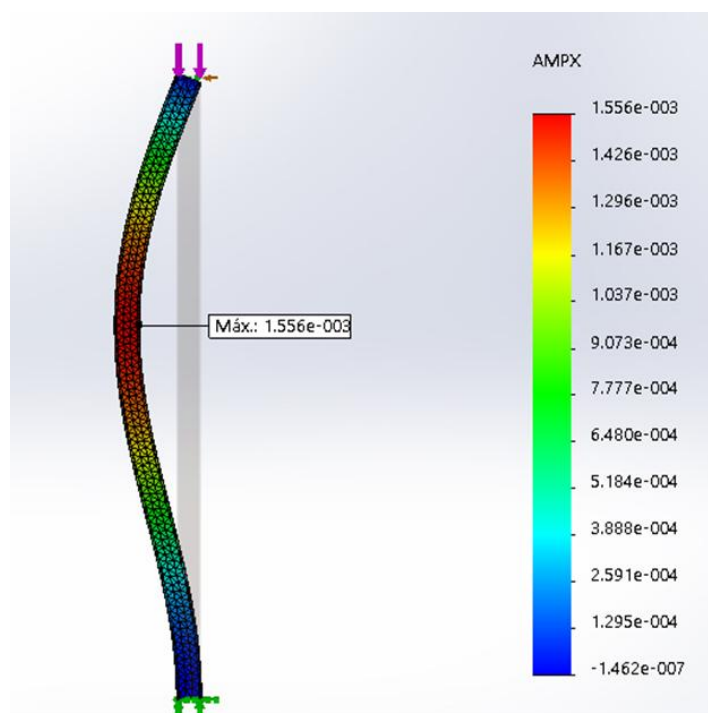


Figura 30 Amplitude máxima do deslocamento da coluna obtido por Elementos Finitos baseada na aplicação de uma carga de compressão de 40kN

Pode-se observar que a maior amplitude de deslocamento (AMPX), obtida por elementos finitos, é de 1.556×10^{-3} m, ou seja, 1,56mm.

Pode-se observar, também, que, com a técnica de simulação por elementos finitos, é possível quantificar o deslocamento de qualquer ponto (nó) pertencente à malha ao longo da estrutura, conforme ilustrado na Figura 31.

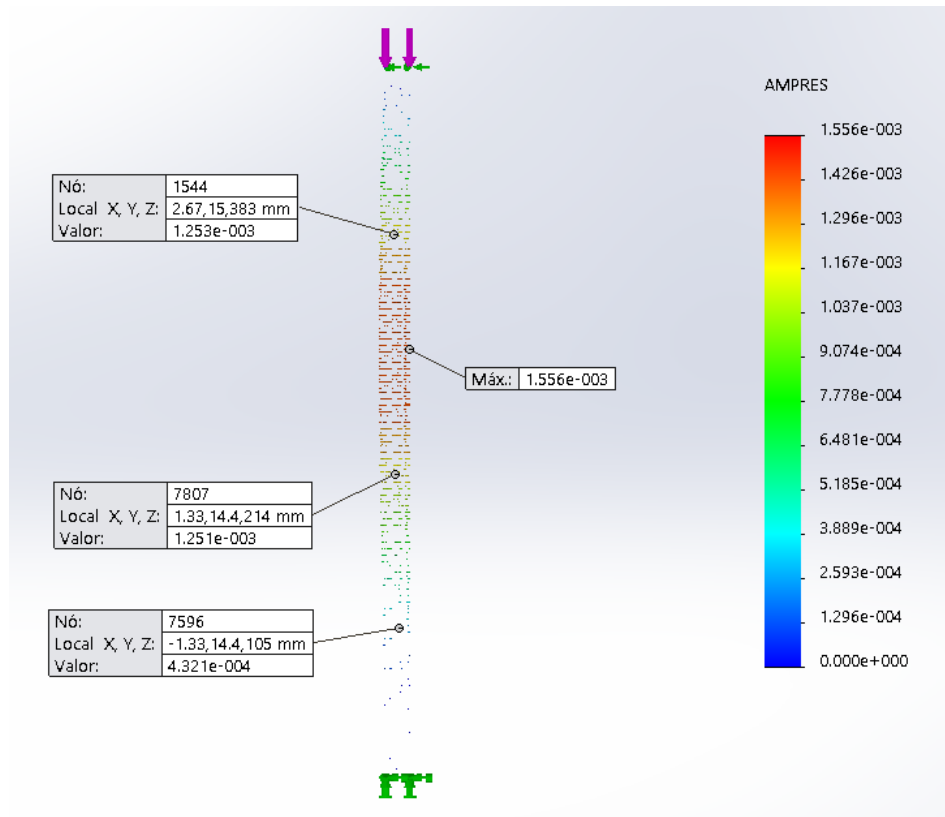


Figura 31 Deslocamento indicado por vetores em vários nós da coluna obtido por Elementos Finitos com base na aplicação de uma carga de compressão de 40kN

Na Figura 32, pode-se observar, em destaque, a região de interesse cujos vetores representam o maior deslocamento em função do efeito de flambagem.

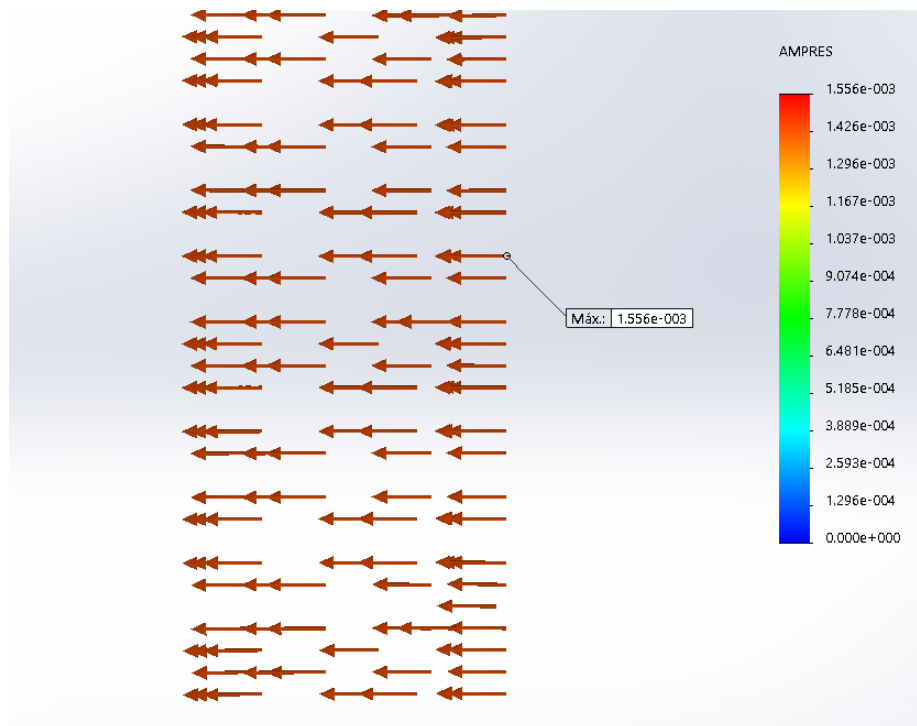


Figura 32 Amplitude de deslocamento indicada por vetores em MEF na região de interesse

4.4 Comparação dos resultados do PIV com MEF

Para validar a técnica PIV pela comparação com a modelagem, foi possível extrair a média dos vetores de deslocamento representados na região de interesse, onde a média da componente horizontal dos vetores representa o deslocamento lateral da coluna sob o efeito de flambagem, ilustrados pela Figura 33.

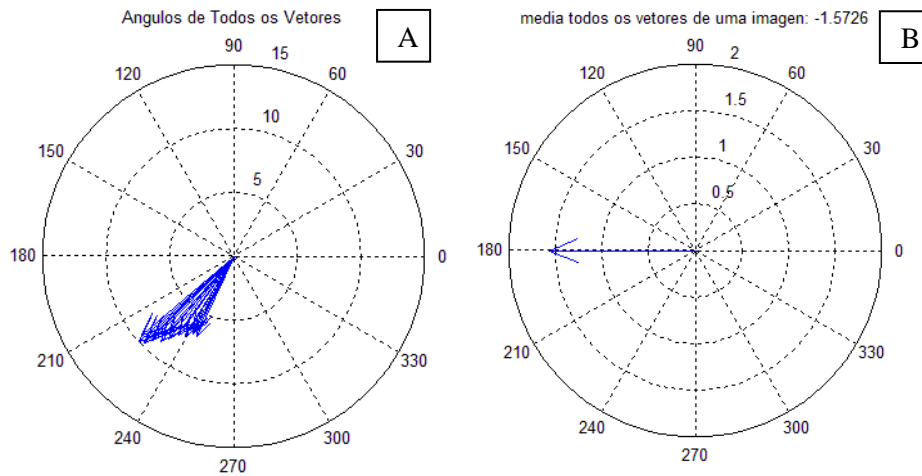


Figura 33 Mapa de vetores deslocamento representados em um único ponto: (A) Deslocamento vertical e horizontal representado por todos os vetores da região de interesse, (B) Deslocamento lateral por flambagem representado pela média da componente horizontal de todos os vetores deslocamento

Os resultados, obtidos em unidade de mm, são iguais considerando-se uma casa decimal, resultando em um deslocamento de 1,6mm tanto pelo MEF quanto pelo PIV. Este deslocamento está ilustrado na Figura 33.

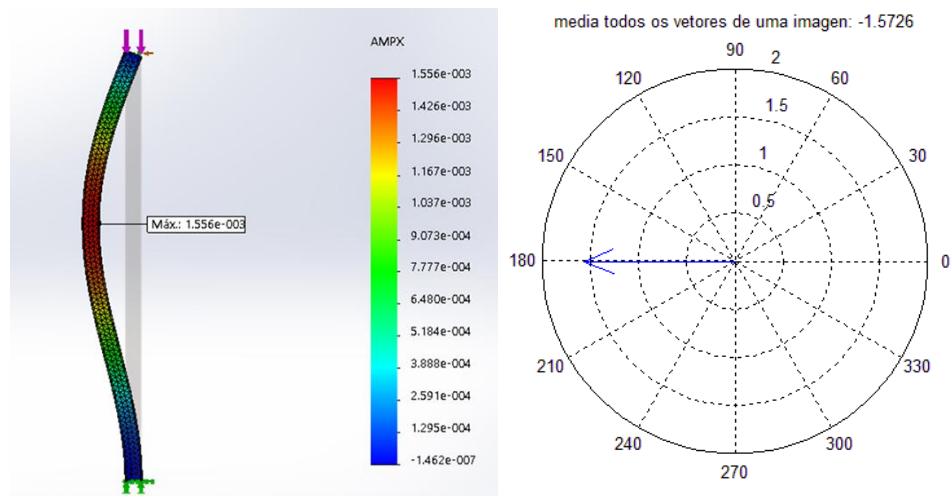


Figura 34 Comparação do deslocamento obtido por MEF e o PIV

Pode-se verificar, também, uma semelhança entre as imagens dos vetores obtidas pelo MEF e pelo PIV. Os vetores inclinados da técnica PIV descrevem o deslocamento da coluna, enquanto o MEF descreve somente o deslocamento horizontal. A Figura 33 ilustra lado a lado os vetores de deslocamento obtidos pelo MEF e os vetores deslocamento obtidos pelo PIV quanto se comparou a imagem 01 com a imagem 24.

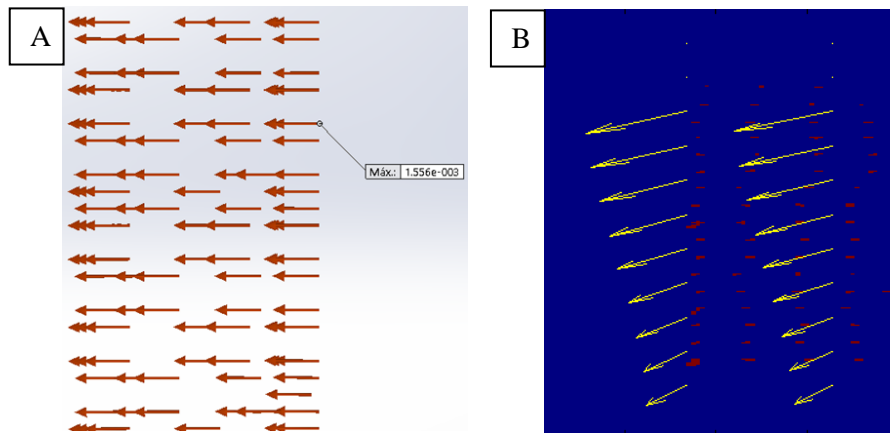


Figura 35 Comparação entre os vetores obtidos por MEF e PIV. (A) representa os vetores obtidos por MEF e (B) representa os vetores obtidos pelo PIV

Os mapas de deslocamento, obtidos neste trabalho, podem ser correlacionados aos mapas de deformação para caracterização e determinação das características mecânicas, de resistência e de elasticidade da madeira realizados por Pereira (2014), Petersson (2010) e Souza (2014). Também traçaram mapas de deslocamento utilizando a técnica PIV, com corpos – de – prova de madeira iluminados com laser.

5 CONCLUSÃO

A técnica de velocimetria por imagem de partículas, associada aos pontos demarcados na coluna, gerou mapas de deformação bidimensionais na região de interesse, com uma melhor definição do comportamento da estrutura durante o ensaio.

Os marcadores com diâmetro aproximado de 1,0mm e espaçamento entre 2,0mm e 3,0mm apresentaram a melhor correlação nas janelas de interrogação e descreveram o comportamento da coluna durante o ensaio.

De maneira análoga, com o emprego da técnica PIV, foram obtidos vetores de deslocamento que equivalem aos vetores criados pelo MEF.

Os resultados demonstram que a técnica PIV pode ser utilizada, para o estudo de deslocamentos de colunas, quando comparada com os deslocamentos obtidos pelo MEF. Na técnica PIV foi obtido um deslocamento horizontal de 1,572mm enquanto pelo MEF obtiveram -se 1,556mm.

A técnica PIV permitiu identificar os estágios de acomodação, deformação linear e flambagem, durante o ensaio, o que, certamente, permite uma avaliação além de quantitativa, mais qualitativa das deformações, o que torna o método vantajoso, quando comparado aos métodos convencionais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. A. **Sistemas de velocimetria por imagem de partículas**. 1997. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5004**: chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- AZEVEDO, L. F. A.; ALMEIDA, J. A. Velocimetria por imagem de partículas. In: ESCOLA DE PRIMAVERA EM TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 3., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Editora da UFSC, 2002. p. 191-215.
- BALLIO, G.; MAZZOLANI, F. M. **Theory and design of steel structures**. London: Chapman and Hall, 1983. 632 p.
- BELLEI, I. H.; BELLEI, H. N. **Manual de construção em aço**: edifícios de pequeno porte estruturados em aço. 4. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2011. 107 p.
- CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 184 p. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.
- CALIL JÚNIOR, C. et al. Cylindrical steel silos: study of cases of deformation. **Powder Handling & Processing**, Germany, v. 8, n. 2, p. 147-151, 1996.
- CHODRAUI, G. M. B. **Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão**. 2006. 294 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CHODRAUI, G. M. B.; MALITE, M. Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e flexão. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 37, p. 27-47, 2007.

DOERICH, C.; ROTTER, J. M. Behavior of cylindrical steel shells supported on local brackets. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 134, p. 1269-1277, Aug. 2008.

DOERICH, C.; ROTTER, J. M. Generalized capacity curves for stability and plasticity: application and limitations. **Thin-Walled Structures**, Essex, v. 49, n. 9, p. 1132-1140, Sept. 2011.

GOMES, B. A. A.; THOMPSON, R. L.; AZEVEDO, L. F. A. "Solid-body rotation flow for particle image velocimetry calibration". In: CONGRESSO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICA, 8., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ENCIT, 2000. 1 CD ROM.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A história do Aço**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/introducao.asp>>. Acesso em: 10 set. 2014.

IST SISTEMAS. **Apostilasolidworks®, solidworks® simulation**. Americana: [s.n.], 2011. 490 p.

IWICKI, P.; WÓJCIK, M.; TEJCHMAN, J. Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair methods using a sensitivity analysis. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 18, p. 2064-2083, 2011.

JANSSEUNE, A.; CORTE, W. D.; VANLMPE, R. Column-supported silos: elasto-plastic failure. **Thin-Walled Structures**, Essex, v. 73, p. 158-173, 2013.

KNIGHT, C. E. **The finite element method in mechanical design**. Boston: PWS-KENT, 1993. 326 p.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1252-1258, jul./ago. 2008.

MIRANDA, M. A. C. **Utilização de velocimetria por imagem de partícula na visualização e caracterização de escoamento bifásico.** 2004. 110 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NORTON, R. V. **Design of machinery:** an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines. New York: McGraw-Hill, 1992. 714 p.

NOWZARTASH, F.; MOHAREB, M. Column curves for elliptical hollow section members. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 67, p. 1525–1536, 2011.

PEREIRA, R. A. **Análise de esforços de flexão estática em madeira (*Pinus Taeda*) pelo método de velocimetria por imagem de partículas.** 2014. 74 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PETERSSON, H. Use of optical and laser scanning techniques as tools for obtaining improved fe-input data for strength and shape stability analysis of wood and timber. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL CECHANICS, 5., 2010, Paris. **Anais...** Paris: ECCM, 2010. 1 CD ROM.

PINHEIRO, A. C. F. B. **Estruturas metálicas:** cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 301 p.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry:** a practical guide. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

RODRIGUES, R. E. S. **Arrastamento de partículas submetidas a variações de velocidade.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ROTTER, J. M.; TENG, J. G. **Elastic stability of lap-jointed cylindrical shells under axial compression.** Sydney: The University of Sydney, 1988a. (Research Report, n°562).

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Buckling of very slender metal silos under eccentric discharge. **Engineering Structures**, Guildford, v. 33, p. 1187–1194, 2011.

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Steel silos with different aspect ratios: I - Behavior under concentric discharge. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 67, p. 1537–1544, 2011.

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Steel silos with different aspect ratios: II - behavior under eccentric discharge. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 67, p. 1545–1553, 2011.

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Structural behavior of thin-walled metal silos subject to different flow channel sizes under eccentric discharge pressures. **Journal of Structure Engineering**, Amsterdam, v. 138, p. 922-931, 2012.

SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, Ithaca, v. 47, n. 3, p. 193-210, Jan. 1998.

SILVA, E. P. da. **Elementos finitos como ferramenta auxiliar na análise estrutural estática de uma colhedora de café do tipo automotriz**. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SOARES, R. R. et al. *Biospeckle* PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, Guilford, v. 30, p. 90-98, Apr. 2013.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. S. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**: volume 48. São Paulo: Editora da Edusp, 2003. 579 p.

SOUZA, T. M. de. **Análise do mecanismo de ruptura em flexão estática em madeira por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas**. 2013. 85 p. Tese. (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SOUZA, T. M. et al. Non-destructive technology associating PIV and Sunset laser to create wood deformation maps and predict failure. **Biosystems Engineering**, London, v. 126, p. 109-116, 2014.

TENG, J. G.; CHAN, F. Elastic buckling strength of T-section transition ringbeams in steel silos and tanks. **Journal of Constructional Steel Research**, Oxford, v. 56, p. 69–99, 2000.

TENG, J. G.; CHAN, F. Plastic buckling strength of T-section transition ringbeams in steel silos and tanks. **Engineering Structures**, Guildford, v. 23, p. 280–297, 2001.

TENG, J. G.; ROTTER, J. M. Recent research on the behavior and design of steel silo hoppers and transition junctions. **Journal of Construction Steel Research**, Oxford, v. 23, p. 313- 343, 1992.

TENG, J. G.; ZHAO, Y.; LAM, L. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. **Thin-Walled Structures**, Essex, v. 39, p. 685–707, 2001.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**: volume 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994.

TOPKAYA, C.; ROTTER, J. Ring beam stiffness criterion for column-supported metal silos. **Journal of Engineering Mechanics**, New York, v. 137, n. 12, p. 846-853, 2011.

ZHAO, Y.; TENG, J. G. Buckling experiments on steel silo transition junctions I: Experimental results. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 60, p. 1783–1801, 2004.