

INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO DURANTE O IÇAMENTO CONSIDERANDO O EFEITO DAS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS E PRESENÇA DE ARMADURAS ATIVAS

Lateral instability of precast beams considering the effects of geometric imperfections and prestress effect at lifting

Igor Gabriel Ribeiro Cardoso Evangelista¹; Maria Cristina Vidigal de Lima²



PALAVRAS CHAVE:

Instabilidade Lateral;
Içamento;
Vigas pré-moldadas;
Excentricidade lateral.

KEYWORDS:

Lateral Instability;
Lifting;
Precast Beams;
Lateral Eccentricity.

RESUMO: O estudo da instabilidade de vigas pré-moldadas de concreto tem merecido maior atenção devido à vasta aplicabilidade em obras de grande porte e aos preocupantes acidentes registrados com a ruptura de vigas durante a montagem. A geometria da viga influencia diretamente no problema de instabilidade, por se tratar de elementos estruturais longos e esbeltos. Neste contexto, este trabalho analisa o comportamento estrutural de vigas durante o içamento por meio de cabos de aço, levando-se em conta a excentricidade lateral inicial e o posicionamento dos cabos de suspensão, considerando o comprimento dos balanços e os desvios de posicionamento das alças na seção transversal. Estes resultados são analisados com modelos teóricos disponíveis na literatura técnica para verificação das condições de segurança e pelo modelo numérico desenvolvido no programa Ansys. As análises abrangem a comparação dos fatores de segurança, bem como a comparação dos ângulos de giro, tensões e efeito da protensão em vigas pré-moldadas durante o içamento. Constata-se que as condições de içamento são mais seguras quando o manuseio é realizado com balanços e com alças posicionadas com desvios no sentido contrário à curvatura, devendo-se tomar maior cautela no caso de vigas protendidas, especialmente com relação às tensões críticas. O efeito da presença de excentricidade lateral mostrou-se tão indesejável quanto os desvios de posicionamento das alças no sentido da curvatura, para os casos analisados.

ABSTRACT: *The study of the instability of precast concrete beams has deserved more attention due to broad applications in large projects and concerning accidents with beam rupture by lateral instability. The geometry of the beam influences directly in instability problem, due to long and slender structural elements. In this context, this research analyzes the structural behavior of beams during the lifting phase by steel cables, taking into account the initial lateral eccentricity and positioning of the suspension cables, considering the length of the balances and the positioning deviations of the handles in the cross-section. These results are analyzed by theoretical models available in the technical literature to verify the safety conditions and by the numerical model developed in the Ansys program. The analyzes compare safety factor, roll angle, strain and the effect of prestress in precast beams during lifting. The studies shows that lifting conditions are safer when the handling is performed with balances and with handles in the opposite direction to the curvature, but care must be taken in prestressed beams, especially in relation to critical strains. The effect of lateral instability proved to be as undesirable as the positioning deviations of the handles in the direction of curvature, for the cases analysed.*

* Contato com os autores:

Publicado em 27 de dezembro de 2022

¹ e-mail: igorgabrielr@icloud.com (I.G.R.C. EVANGELISTA)

Aluno do curso de graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

² e-mail: macris@ufu.br (M.C.V. LIMA)

Doutora, Professora Associada 4, Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

1. INTRODUÇÃO

As vigas pré-moldadas de concreto armado demonstram uma vasta aplicação em obras de grande porte, com o objetivo destas vencerem grandes vãos, não só no Brasil como no mundo. Assim, existe a crescente necessidade de que estas estruturas, tais como pontes e viadutos, permitam uma facilidade executiva que esteja acompanhada de tempos de execução cada vez menores. Tudo isso culmina para que uma grande variedade de seções seja estudada e desenvolvida para vigas de concreto pré-moldado.

O aumento do comprimento dos vãos foi possível devido ao avanço tecnológico dos materiais de concreto, dos processos de fabricação e dos equipamentos de transporte e içamento, implicando em vigas mais esbeltas, com menor rigidez e mais susceptíveis aos riscos de instabilidade lateral (El Debs, 2000).

A esbelteza é uma característica importante dos elementos lineares e que coloca em evidência um problema que tem se tornado recorrente no projeto e na construção das estruturas de grande porte: a instabilidade lateral durante as fases transitórias, que constituem as fases de transporte e içamento. A excentricidade lateral é decorrência direta da curvatura da viga, variação entre o projeto e a execução, constituem imperfeições geométricas desenvolvidas no processo fabricação das vigas pré-moldadas.

Os problemas ocasionados pela instabilidade lateral de vigas durante as fases transitórias são, muitas vezes, desprezados, sendo apenas considerados os problemas relacionados durante a fase de serviço. Sendo assim, uma grande quantidade de acidentes ocorre devido à excessiva deformação ocasionada pela instabilidade lateral destas vigas (Cojocarú, 2012).

Diante da vasta aplicabilidade e levando-se em conta os acidentes registrados com a ruptura de vigas por instabilidade lateral durante as fases de manuseio e montagem, dá-se a importância do estudo do comportamento destas, não só na fase de serviço, como também nas fases transitórias.

Este artigo analisa as condições de içamento, considerando as imperfeições geométricas decorrentes da excentricidade lateral inicial e dos desvios de posicionamento das alças para suspensão, a resistência do concreto, bem como a presença de armaduras ativas. Para tanto, criou-se um modelo numérico, baseado no método dos elementos finitos, no programa computacional Ansys. Os resultados numéricos são finalmente comparados com alguns modelos teóricos disponíveis na literatura técnica.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é estudar o comportamento de vigas pré-moldadas de concreto armado e pretendido durante o içamento, com relação aos riscos de instabilidade lateral.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

Para o estudo do tema desse trabalho, fez-se uma breve revisão bibliográfica de alguns trabalhos já publicados que tratam da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas, tais como Mast (1993), Zhang (2017) e Evangelista e Lima (2018).

Em linhas gerais, Mast (1993) propõe um fator de segurança considerando o estudo do equilíbrio de momento atuante e resistente. Os estudos desenvolvidos por Mast (1993) limitam-se aos problemas de instabilidade antes da fissuração da viga, e o ângulo de giro descreve uma posição de equilíbrio. O trabalho de Zhang (2017), baseado no modelo de Mast (1993), limita o ponto de tensão de tração máxima, e estabelece seu valor igual a resistência média do concreto à tração (f_{ctm}).

O estudo numérico de Evangelista e Lima (2018) foi baseado em uma simulação de içamento de viga pré-moldada utilizando o programa Ansys, com foco na influência das variáveis: geometria da seção transversal do elemento estrutural, a excentricidade lateral inicial, o posicionamento dos cabos de

suspensão e os desvios laterais das alças de içamento. Foram analisadas as vigas PCI BT-77 e PCI BT-72, sendo a primeira com excentricidade lateral inicial de 3,18 cm (BT-77/3,18) e a segunda com as excentricidades de 3,15 cm (BT-72/3,15) e 6,3 cm (BT-72/6,30). No modelo proposto, o içamento é controlado, e representa a posição de equilíbrio da viga. O processo é o mesmo que será realizado neste artigo. Neste trabalho, os autores concluem que o aumento da excentricidade lateral inicial pode provocar acréscimos de tensões de até 30%, nos casos críticos sem balanços.

3.1 PROPOSTA DE MAST (1993)

O equacionamento apresentado por Mast (1993) serviu de base para a elaboração do PCI Bridge Design Manual (PCI, 2003) na análise da instabilidade lateral de vigas nas fases de içamento e transporte.

Mast (1993) propôs uma análise mais abrangente considerando, além do deslocamento vertical, a rotação máxima a que uma viga pode estar submetida em condições seguras. Assim, ao analisar o içamento, verificou-se que, durante a suspensão da viga, não existe impedimento contra rotações, de forma que as seções apresentam deslocamentos laterais e giro.

Em síntese, a proposta de Mast (1993) descreve o esquema de uma viga suspensa por dois cabos verticais. Devido às imperfeições geométricas, o centro de massa da viga se desloca em relação ao eixo longitudinal. Durante a suspensão da viga, não existe impedimento contra rotações, de forma que as seções apresentam deslocamentos laterais e giro. Desta forma, o eixo de giro da viga passa pela linha que une os pontos de ligação do cabo ao elemento estrutural (Figura 1).

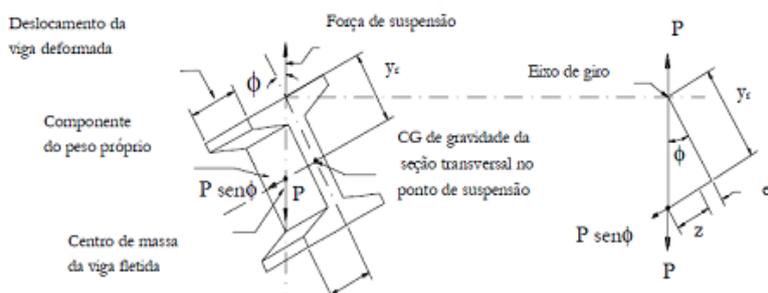


FIGURA 1: Diagrama de equilíbrio de uma viga suspensa por cabos verticais.

FONTE: Adaptado de Mast (1993).

Em que:

ϕ = rotação em relação à posição inicial; $P \text{ sen } \phi$ = peso da estrutura aplicada sobre o eixo de menor inércia; z = deslocamento lateral da viga; e_i = a excentricidade lateral inicial; y_r = a distância do ponto de suspensão da viga ao centro de gravidade da seção transversal.

Assim, o modelo de Mast (1993) propõe um fator de segurança considerando o estudo do equilíbrio de momento atuante e resistente, e considera a rotação máxima de uma viga em condições seguras.

O modelo de Mast (1993) estuda o modelo de içamento na condição de fissuração, ou seja, antes do aparecimento da primeira fissura. O ângulo de giro na fissuração representa o ângulo descrito pela viga, e é obtido da relação entre o momento atuante (M_a) gerado pelo peso próprio no sentido da curvatura e o momento resistente (M_r) (Equação 1). O fator de segurança é dado pela Equação 2.

$$\theta_{max} = \frac{M_r}{M_a} \quad \text{Eq. [1]}$$

$$FS_{fiss} = \frac{1}{\frac{z_0}{y_r} + \theta_{max}} \quad \text{Eq. [2]}$$

3.2. PROPOSTA DE ZHANG (2017)

O trabalho desenvolvido por Zhang (2017) pautou-se na análise das equações de fatores de segurança e ângulo de giro durante o içamento, baseadas no modelo de Mast (1993). Zhang (2017) estabeleceu as mesmas condições que Mast (1993) em seu trabalho: (1) a viga é restrita ao giro em relação aos cabos dos apoios, (2) a viga descreve o arco de uma circunferência e seu maior encurvamento se dá na seção de meio do vão, (3) a viga é içada por dois cabos localizados na mesma distância a do final da viga e, (4) a deformação por torção é desprezada e o problema é reduzido a flexão lateral.

Por ser curva e ter seu centro de massa deslocado em relação ao eixo vertical, a viga, ao ser içada, descreve um giro em relação ao eixo formado entre os pontos de içamento (Figura 2).

Assim, com a seção transversal da viga inclinada, o peso próprio pode ser decomposto em duas direções na seção de meio de vão – perpendicular e paralelo ao eixo do centroide. A viga gira até encontrar uma posição de equilíbrio, isto é, quando o centro de gravidade se alinha ao plano do eixo de giro. Ressalta-se que as únicas forças atuantes são o peso próprio da viga, a força de protensão e a força nos cabos de içamento. Para seções transversais I, Zhang (2017) observa que o ponto crítico que apresenta maior tensão de tração está localizado no topo do lado esquerdo da mesa superior na seção de meio de vão (Figura 3). Neste ponto, Zhang (2017) limita a tensão de tração máxima à resistência à tração média do concreto ($\sigma_t \leq f_{ctm}$).

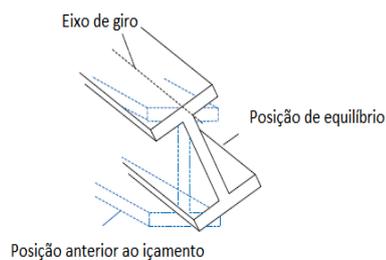


FIGURA 2: Comportamento durante o içamento
FONTE: Adaptado de Zhang (2017).

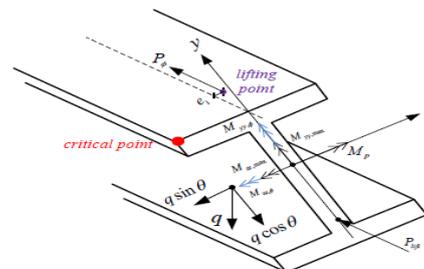


FIGURA 3: Forças e Momentos aplicados
FONTE: Zhang (2017).

Neste sentido, o ângulo proposto por Zhang (2017) representa o limite máximo que a viga pode girar até atingir a tensão máxima neste ponto e é representado pela Equação 3. O fator de segurança, por sua vez, obedece à mesma expressão de Mast (1993) – Equação 4.

$$\theta_{cr} = \left[f_{ctm} - \frac{M_p(h - y_{cg})}{I_{zz}} + \frac{M_{zz,max} \cdot (h - y_{cg})}{I_{zz}} + \frac{P_{lift}}{A_c} \right] \times \frac{16I_{yy}}{b_1 q l_a^2} \quad \text{Eq. [3]}$$

$$FS = \frac{y_r \cdot \theta_{cr}}{z_0 \cdot \theta_{cr} + e_i} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

P_{lift} = Força de compressão gerado pela força de protensão (kN); M_p = Momento causado pela força de protensão. (kN); $M_{zz,max}$ = Momento causado pela componente do peso próprio ($q \cos \theta$). (kN); f_{ctm} = Resistência à compressão média do concreto; (kN/cm²); I_{zz} = Maior momento de inércia da seção (cm⁴); I_{yy} = Menor momento de inércia da seção (cm⁴); l_a = Comprimento da viga entre cabos de içamento (cm); b_1 = Comprimento da mesa superior (cm); q = Peso próprio atuando linearmente. (kN/cm); y_{cg} = Altura do centroide da seção (cm); A_c = Área da seção transversal (cm²); h = Altura total da viga (cm).

4. MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta seção são descritas as variáveis que são objeto de análise deste artigo. São consideradas situações em que o içamento é feito com vigas de 35 e 50 MPa. Para esta resistência, foram simuladas

situações na presença de protensão, a fim de observar seu efeito.

Salienta-se que o limite da excentricidade inicial permitida pela norma do PCI (2003) é de $L/1000$, onde L é o comprimento total da viga. No entanto, neste projeto serão analisadas situações ainda mais críticas, com relação em torno de $L/1350$, $L/675$ e $L/300$. Estas condições representam, para a viga em análise, o içamento feito com excentricidades de 3,15, 6,3 e 14 cm, respectivamente.

Para a consideração dos desvios laterais do posicionamento dos cabos na seção transversal, são simuladas três situações, a saber: sem desvio lateral, com desvio de 2 cm no sentido a favor e contrário a curvatura da viga (Figura 4). Salienta-se que quanto aos desvios das alças de içamento, observou-se a recomendação do PCI (2000), em que as variações das alças devem ser limitadas a 1 polegada (2,54 cm) do centro da seção. A Figura 5 ilustra as tolerâncias conforme o PCI (2003) para desvios das alças e excentricidade lateral inicial (Cardoso, 2017).

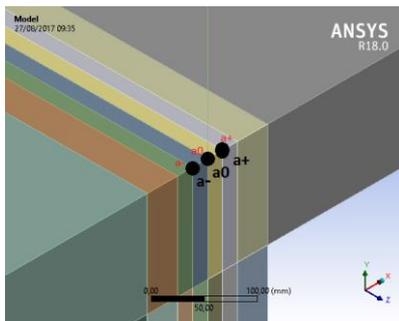


FIGURA 4: Desvio do Posicionamento das Alças de Içamento
FONTE: Autoria Própria.

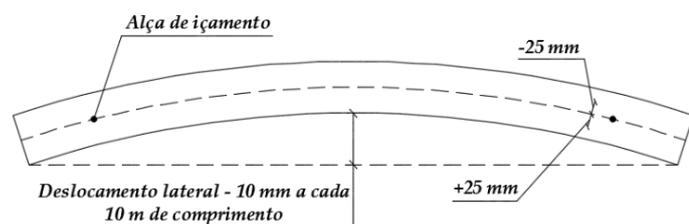


FIGURA 5: Tolerâncias Para Posicionamento das Alças e Deslocamento Lateral da Viga conforme o PCI (2000)
FONTE: Cardoso (2017).

Com o intuito de simplificar a notação dos resultados, escolheu-se a notação “C” para os cabos, e “a” para as alças. As variações dos cabos foram C0%, C5% e C10%, e das alças a+, a0 e a-, sendo que estas representam a situação contrária a curvatura, ou seja, favorável ao içamento da viga (a+), no centro da seção transversal ou sem desvio (a0) e no sentido da curvatura e desfavorável ao içamento da viga (a-), respectivamente.

4.1 Características das vigas

Nesta subseção são abordadas as características físicas e geométricas da viga PCI BT-72, com comprimento de 42,4 m, modelada numericamente no programa computacional Ansys. São analisados os casos de içamento sem balanços e com balanços de 5 e 10% do comprimento do vão, com excentricidade lateral inicial de 3,15 cm (BT-72/3,15), 6,3 cm (BT-72/6,30) e 14 cm (BT-72/14).

O módulo de elasticidade secante do concreto considerado nas análises foi calculado de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, para f_{ck} de **35 MPa¹** (vigas BT-72/3,15 e BT-72/6,3) e **50 MPa²** (viga BT-72/14). Considerou-se a utilização de: granito como agregado graúdo ($\alpha E=1$), coeficiente de Poisson ($\nu=0,2$); densidade ($\gamma=25 \text{ kN/m}^3$). Assim, o módulo de elasticidade secante obtido foram de: **30 GPa¹** e **37 GPa²**.

A viga em estudo possui seção transversal I como mostrada na Figura 6, tendo sido a geometria simplificada para as análises deste artigo (Figura 7) e dimensões aproximadas discriminadas na Tabela 1.

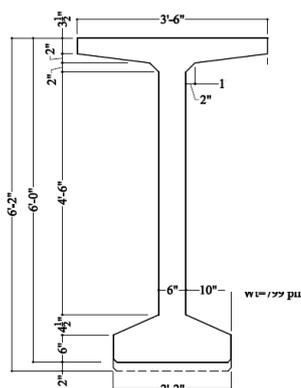


FIGURA 6: Representação da Seção Real com Mísulas (Dimensões em polegadas)
FONTE: Cojocarú (2012).

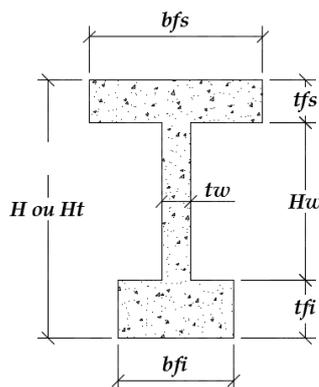


FIGURA 7: Seção I Aproximada
FONTE: Autoria Própria.

TABELA 1: Dimensões da Viga PCI BT-72			
Dimensões	Sistema Ingles (in)	Dimensão (cm)	Dimensão Adotada (cm)
Altura total (<i>H</i>)	72	182,88	184
Altura da alma (<i>Hw</i>)	58,25	147,96	148
Largura da mesa inferior (<i>bfi</i>)	26	66,04	66
Largura da mesa superior (<i>bfs</i>)	42	106,68	108
Espessura da mesa inferior (<i>tfi</i>)	8,25	20,96	22
Espessura da mesa superior (<i>tfs</i>)	5,5	13,97	14
Espessura da alma (<i>tw</i>)	6	15,24	16
Obs.: Não foram consideradas as mísulas na seção transversal aproximada utilizada nas análises numéricas.			

FONTE: Autoria Própria.

As forças de protensão consideradas nas análises desenvolvidas neste trabalho foram obtidas de acordo com a Equação 5, que corresponde à força estimada de protensão descrita em Zhang (2017), aplicada no centro de gravidade da mesa inferior. No programa computacional, a força de protensão foi aplicada linearmente distribuída ao longo do comprimento curvo da viga no centro de gravidade da mesa inferior.

$$P_o = \frac{f_{ctm}}{\left[\frac{e_p(h - y_{cg})}{I_{zz}} - \frac{1}{A_c} \right]} \quad \text{Eq. [5]}$$

Em que:

e_p = excentricidade da barra protendida ao centro de gravidade (cm); P_{lift} = Força de compressão gerado pela força de protensão (kN). Se a força de protensão aplicada é P_o , o valor de P_{lift} será= $P_{lift}=(1-\psi) P_o$. Onde $\psi=0,15$. Esta redução da força é devido às perdas de protensão;

- Viga BT-72/3,15 e 6,3 (f_{ck} : 35 MPa): $P_{lift} = 5163,49$ kN;
- Viga BT-72/14 (f_{ck} : 50 MPa): $P_{lift} = 6549,55$ kN.

4.2 Modelo e discretização da malha

A fim de representar fidedignamente o comportamento da viga curva, quanto a excentricidade lateral, utilizou-se a função SWEEP (Recurso geométrico do Ansys, em que a seção transversal percorre um segmento de arco traçado). A seção transversal foi desenhada no plano XY e o caminho longitudinal é traçado no plano XZ. Nas análises numéricas desenvolvidas, desenhou-se um arco de uma circunferência passando pelos pontos extremos da viga, a partir do raio de circunferência que resulta na excentricidade lateral. Os raios das circunferências dos arcos percorridos pela viga são: $R = 7,14 \cdot 10^5$ cm para a BT-72/3,15; $R = 3,57 \cdot 10^5$ cm para a BT-72/6,30; e $R = 1,61 \cdot 10^5$ cm para a BT-72/14.

O estudo de refinamento da malha segue o disposto por Evangelista e Lima (2018). Para este caso, objetivou-se a obtenção de uma malha densa com elementos quadrados regulares, buscando-se trabalhar

numericamente com discretização bem elaborada e bom refinamento A eficiência da discretização da malha produz uma resposta mais eficiente se obedecidos tais critérios (Gesualdo, 2015). A escolha da malha mais adequada para as análises foi feita analisando o máximo deslocamento resultante, combinação entre os deslocamentos vertical e horizontal, da seção transversal dos nós do meio do vão. A situação de refinamento que apresentou diferença em torno de 0,08% é a discriminada na Tabela 2.

TABELA 2: Malha escolhida PCI BT-72		
Local	Número de Divisões	Comprimento (mm)
Altura Mesa Superior	2	140
Largura da Mesa Superior	6	460
Largura da Mesa Inferior	3	250
Largura da alma	1	20
Comprimento da Alma	16	1480
Altura da Mesa Inferior	4	220
Seção Longitudinal	80	42400

FONTE: Autoria Própria.

Ressalta-se que antes de escolher as malhas para a análise, observou-se, primeiramente, a convergência dos resultados das malhas escolhidas estrategicamente e, por fim, escolheu-se a malha que apresentou menor erro em relação ao nó de maior deslocamento. Mais informações são encontradas em Evangelista e Lima (2018).

4.3 Vinculações

Os cabos utilizados para o içamento foram simulados numericamente em aço, com seção transversal circular de 20 mm de diâmetro e 10 m de comprimento, por meio do elemento finito LINK180.

Na extremidade superior, os cabos de içamento foram impedidos de deslocar nas direções X, Y e Z, conforme mostra a Figura 8 [a] representado pelo apoio E. Na seção transversal do meio do vão, para garantir a simetria do problema, foram aplicados em todos os nós dessa seção o impedimento de deslocamentos na direção longitudinal da viga (Z), apoio B da Figura 8.

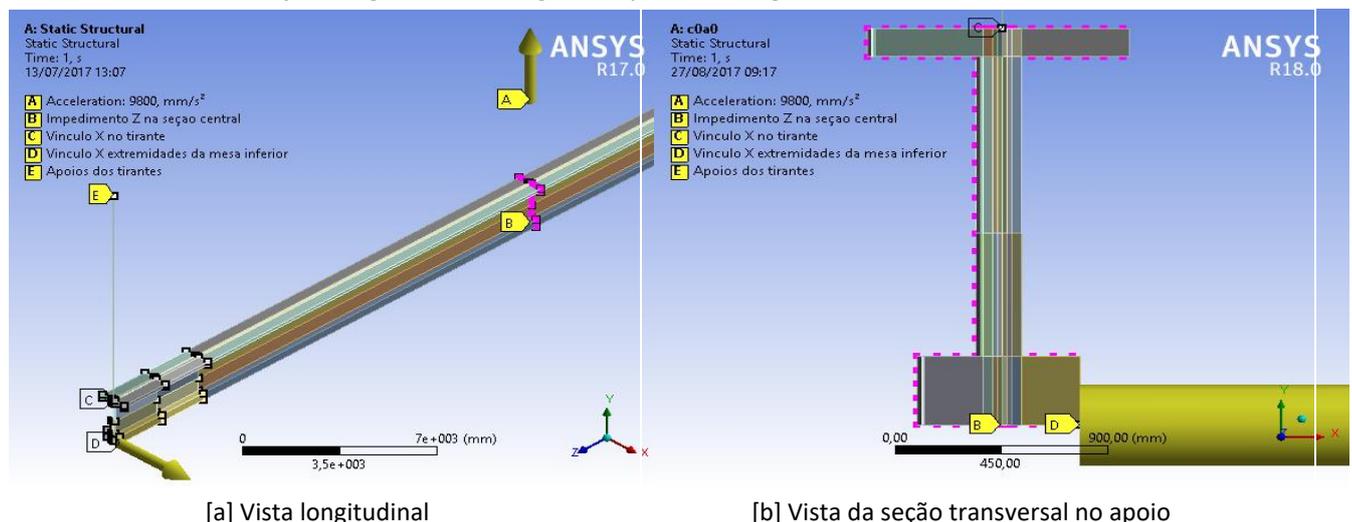


FIGURA 8: Representação dos Apoios na Viga BT-72

FONTE: Autoria Própria.

A fim de encontrar a posição de equilíbrio da viga curva (decorrente da excentricidade lateral inicial), o problema, a princípio hipostático, foi resolvido incluindo apoios laterais na direção X. Para isso, foram incluídos dois apoios impedindo o deslocamento lateral da seção de fixação dos cabos de içamento, sendo um na extremidade inferior do cabo (apoio C) e outro no nó da extremidade da mesa inferior da viga (apoio D). No vínculo apoio D incluído foi imposto, gradualmente, um deslocamento lateral, até que se encontrasse uma posição de equilíbrio da viga, ou seja, deslocou-se até o ponto que resultasse em uma

reação de apoio nula nos vínculos adicionais C e D introduzidos. Assim, uma vez nulas as reações de apoio, tem-se a posição de equilíbrio da viga curva suspensa pelos cabos de içamento. Ressalta-se que, durante toda a fase de içamento, os cabos permanecem no plano vertical (YZ).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação numérica de três vigas PCI BT-72 com diferentes excentricidades, desenvolvidas no programa Ansys, considerando-se como variável, os comprimentos de balanço, a excentricidade lateral, os desvios de posicionamento da alça de içamento e a resistência do concreto. Para tanto, são feitas as verificações de ângulo de giro e fatores de segurança, bem como serão realizadas análise da tensão normal (z) e do efeito da protensão. Salienta-se que os resultados do modelo teórico são comparados aos mesmos casos com a aplicação das equações de cálculo, propostas pelos modelos teóricos de: Mast (1993) e Zhang (2017).

As análises são divididas em dois blocos, sendo o primeiro referente à análise do içamento sem considerar os desvios das alças e, o segundo, refere-se à verificação considerando, exclusivamente, os resultados dos desvios. Isto se dá, pois, os desvios das alças de içamento apenas são considerados na análise numérica de Evangelista e Lima (2018), não sendo variável nos estudos de Mast (1993) e Zhang (2017).

5.1 ÂNGULO DE GIRO

O ângulo de giro representa um dos mais importantes resultados na análise do içamento, haja vista que é determinante para que a viga seja içada em situações de segurança. Não obstante isso, por não existir uma convenção, o ângulo de giro é tratado de maneira diferenciada em cada um dos modelos.

No modelo de fissuração de Mast (1993), o ângulo de fissuração representa o ângulo descrito pela viga até o aparecimento da primeira fissura. Contudo, de acordo com Lima (2002), à medida que se adicionam balanços na estrutura, o modelo de Mast (1993) apresenta a limitação de melhora infinita de estabilidade, divergindo dos demais modelos. O significado deste parâmetro se aproxima mais ao modelo de Evangelista e Lima (2018), em que o ângulo de giro representa o ângulo descrito pela viga, sendo, então, o valor que este atinge ao chegar na posição final de equilíbrio, pois é imposto um deslocamento lateral controlado até se chegar na posição de equilíbrio da viga (reação nula).

No modelo de Zhang (2017), por sua vez, é estabelecido que a tensão de tração máxima em uma viga de concreto protendido está localizada no ponto superior do canto esquerdo da mesa superior (Figura 3) e, neste ponto, a tensão de tração é limitada à resistência a tração média do concreto (f_{ctm}). Neste sentido, o ângulo proposto por Zhang (2017) representa o limite máximo que a viga poderá girar até atingir a tensão máxima limite deste ponto.

5.1.1 Influência da excentricidade lateral, resistência do concreto e balanço na rotação da viga

Nesta subseção são analisadas quatro situações para o içamento da viga BT-72: com excentricidade lateral no meio do vão de: 3,15 cm, 6,3 cm e 14 cm sem incluir o efeito da protensão (Casos 1-9), e a viga BT-72/14 é analisada também com a inclusão da protensão (casos 10-12). Os resultados comparativos de ângulo de giro para os modelos teóricos e numéricos, com o içamento realizado sem a consideração de desvios, estão dispostos na Tabela 3 e ilustrados na Figura 9.

Os resultados apresentados por Mast (1993) e Zhang (2017) referem-se à aplicação das equações (1) e (3). Salienta-se que o modelo de Mast (1993) não considera o efeito da protensão em suas análises, por este motivo, não há resultados para os casos 10-12. Ademais, este artigo representa uma continuação de Evangelista e Lima (2018), assim, as simulações se dão sob as mesmas condições de contorno.

TABELA 3: Ângulo de Giro (graus)						
	Casos		Mast (1993)	Zhang (2017)	Evangelista e Lima (2018)	Autores
BT-72/3,15 sem Protensão 35 MPa	1	C0% a0	6,1155	12,7332	3,5441	-
	2	C5% a0	5,7395	13,9095	1,526	-
	3	C10% a0	5,2139	15,5541	0,6824	-
BT-72/6,3 sem Protensão 35 MPa	4	C0% a0	6,1155	12,7332	7,0019	-
	5	C5% a0	5,7395	13,9095	3,0479	-
	6	C10% a0	5,2139	15,5541	1,542	-
BT-72/14 sem Protensão 50 MPa	7	C0% a0	5,4905	14,0794	-	11,6581
	8	C5% a0	4,9679	15,5715	-	6,0938
	9	C10% a0	4,6974	17,6575	-	3,2874
BT-72/14 com Protensão 50 MPa	10	C0% a0	-	8,6725	-	9,6703
	11	C5% a0	-	8,8963	-	5,4443
	12	C10% a0	-	9,2092	-	3,0629

FONTE: Autoria Própria.

Vale ressaltar que, pelo fato de os ângulos significarem coisas distintas, enquanto para Evangelista e Lima (2018), Mast (1993) e neste artigo, resultados mais favoráveis para o içamento resultam em menores valores para o ângulo de equilíbrio. A proposta de Zhang (2017) permite obter o máximo ângulo de rotação para o qual a seção transversal do meio do vão não atingirá tensões de tração maior que o valor limite para fissuração. Assim, para Zhang (2017), melhores resultados implicam em maiores limites para o ângulo crítico.

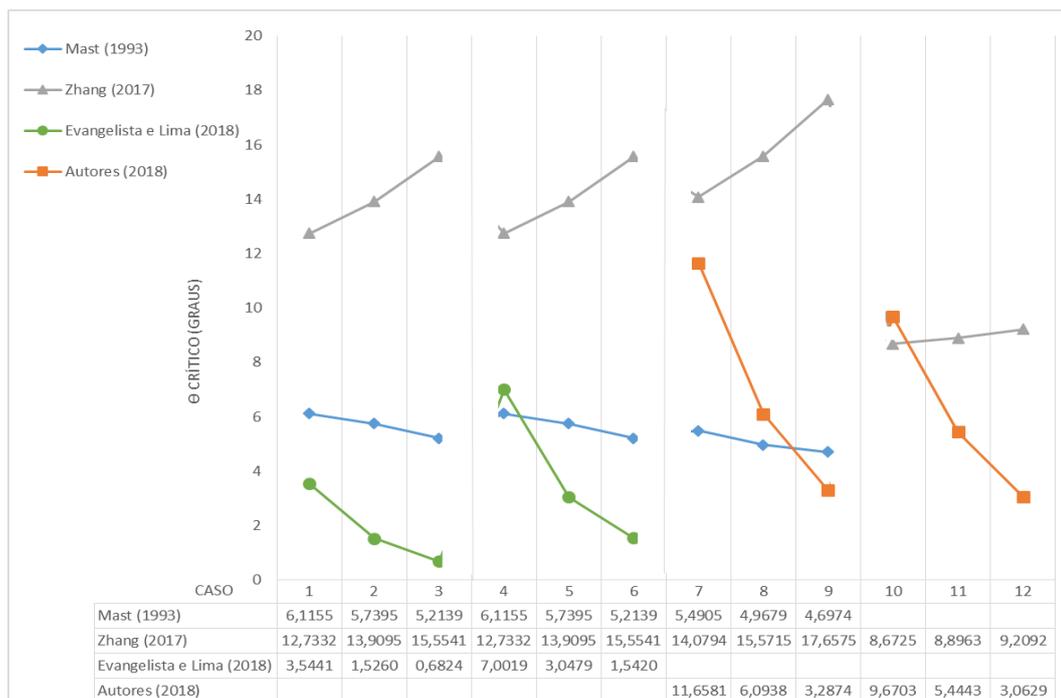


FIGURA 9: Comparação Ângulo de Giro

FONTE: Autoria Própria.

Conforme a Figura 9, nota-se que a presença de balanços, em todos os modelos, é sempre favorável no problema da estabilidade, uma vez que reduzem as rotações e aumentam o limite destas. Em todos os casos analisados, o içamento sem balanços gerou resultados críticos. Os resultados de todos os modelos mostram que as condições de içamento são mais seguras quando o manuseio é realizado com balanços.

Ademais, analisando-se os casos 1 a 3 (BT-72/3,15) com 4 a 6 (BT-72/6,3), percebe-se que, tanto para Mast (1993) quanto para Zhang (2017), o ângulo crítico não sofre qualquer influência com a variação das imperfeições laterais. Este comportamento pode ser deduzido da Equação (3), em que a variável da

excentricidade não aparece na expressão do ângulo crítico. Este fato representa uma limitação dos modelos teóricos, e isto não se repete na análise numérica, já que a presença de maiores excentricidades faz com que a viga apresente maior ângulo de giro, o que é prejudicial à estrutura. Salienta-se que esta invariabilidade do ângulo de giro não se repete nos demais casos, pois altera-se a resistência do concreto

Comparando-se os casos 4 a 6 (BT-72/6,3) e 7 a 9 (BT-72/14), verifica-se que a imperfeição lateral é tão crítica durante o içamento que o aumento da resistência do concreto de 35 para 50 MPa é insuficiente para melhorar o ângulo de giro, diante do aumento da imperfeição lateral de 6,3 para 14 cm. Este fato, inclusive, é corroborado por Lima (2002), em que o aumento da resistência do concreto não provoca uma melhora significativa do ângulo de rotação crítica da viga.

A Figura 9 permite observar a situação crítica do caso 10, onde o ângulo de equilíbrio é maior que o limite definido por Zhang (2017). Assim, neste caso, a viga para a situação de equilíbrio está fissurada. O caso 11, com inclusão da presença de balanços mostra que é possível encontrar uma posição de equilíbrio com rotação menor que a rotação limite.

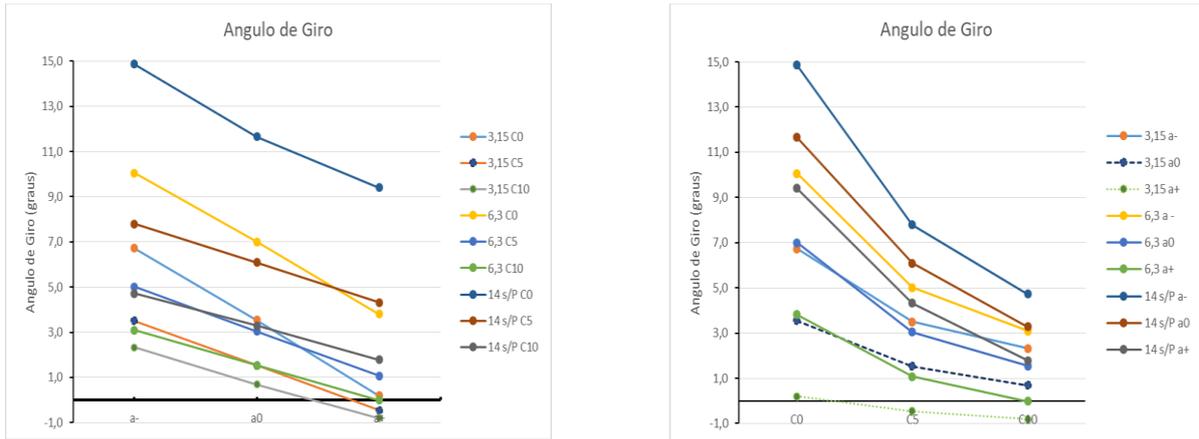
5.1.2 Influência dos Desvios das Alças de Içamento

São consideradas as vigas BT-72/3,15, BT-72/6,3 e BT-72/14 sem a inclusão da protensão para análise da influência dos desvios de posicionamento das alças de içamento. Os resultados do ângulo de giro de equilíbrio obtidos nas análises numéricas desenvolvidas neste trabalho estão condensados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 10.

TABELA 4: Ângulo de Giro – Desvio das Alças					
Casos	Evangelista e Lima (2018)		Autores	Análise Percentual	
	BT-72/3,15	BT-72/6,3	BT-72/14	Aumento	Aumento
	S/ Protensão (35 MPa)	S/ Protensão (35 MPa)	S/ Protensão (50 MPa)	(3,15 → 14)	(6,3 → 14)
C0% a-	6,7265	10,0549	14,8676	121,03%	47,86%
C0% a0	3,5441	7,0019	11,6581	228,94%	66,50%
C0% a+	0,1936	3,8118	9,4129	4762,06%	146,94%
C5% a-	3,501	5,0071	7,7921	122,57%	55,62%
C5% a0	1,526	3,0479	6,0938	299,33%	99,93%
C5% a+	-0,4528	1,0753	4,3177	1053,56%	301,54%
C10% a-	2,3241	3,0966	4,7231	103,22%	52,52%
C10% a0	0,6824	1,542	3,2874	381,74%	113,19%
C10% a+	-0,8052	-0,0116	1,7879	322,04%	15512,82%

FONTE: Autoria Própria.

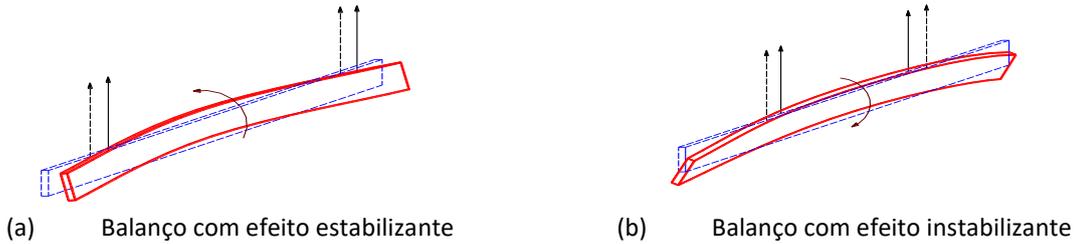
Pela Tabela 4 nota-se que, mesmo com o aumento da resistência do concreto (Viga BT-72/14 com f_{ck} de 50 MPa), o aumento do ângulo de equilíbrio da viga é bastante significativo para a excentricidade crítica. Nos casos com desvios mais desfavoráveis para o içamento (a-), atesta-se um incremento de 2 vezes do ângulo de rotação, chegando a um aumento de até 4 vezes maior nas condições com alças no centro da seção (a0). Os casos com içamento feito por alças contrárias à curvatura (a+) apresentaram o maior aumento significativo, pois esta situação, geralmente, é a mais segura para o içamento - a viga ao encontrar sua posição de equilíbrio, apresenta um giro muito pequeno e situações com maiores imperfeições laterais apresentam um aumento percentual discrepante, mesmo que o ângulo descrito não seja crítico.



[a] Variação das Alças [b] Variação do Balanço
FIGURA 10: Comparação Ângulo de Giro – Desvio das Alças

FONTE: Autoria Própria

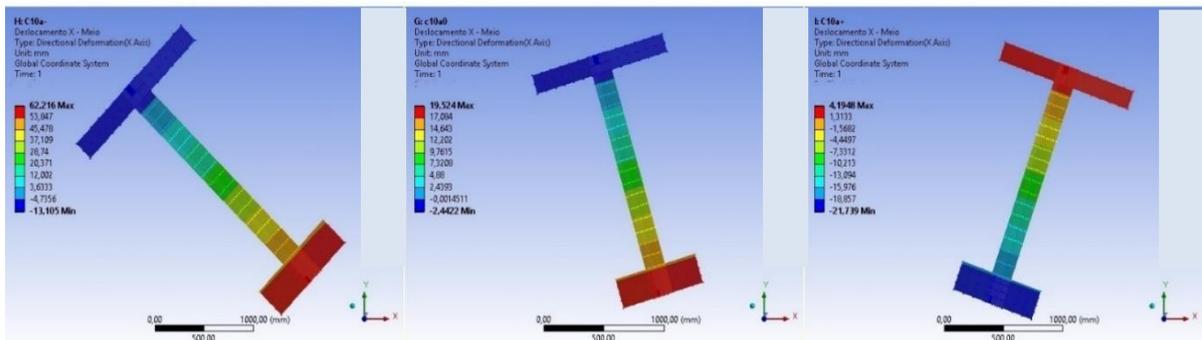
Ao analisar a Figura 10, nota-se que os resultados dos desvios das alças de içamento observam um padrão de comportamento e as situações apresentam menor giro à medida que a alça migra para o sentido contrário à curvatura (a-→a0→a+). Observa-se, ainda, que nas situações com balanços maiores, existe a possibilidade do giro contrário na seção do meio do vão (Figura 11[b]). Este fato ocorreu na viga BT-72/3,15 com 5% e 10% de balanços (C5%a+ e C10%a+), e se repete na viga BT-72/6,30, na situação com 10% de balanço e desvios contrários à curvatura.



(a) Balanço com efeito estabilizante (b) Balanço com efeito instabilizante
FIGURA 11: Influência do comprimento dos balanços no comportamento da viga

FONTE: Autoria Própria.

A Figura 12 mostra os deslocamentos laterais na seção central da viga BT-72/3,15, com uma escala ampliada em 25 vezes (deformação) para fins de visualização da rotação.



[a] C10%a-; [b] C10%a0; [c] C10%a+

FIGURA 12: Deslocamento lateral da seção central da viga PCI BT-72-3,15

FONTE: Evangelista e Lima (2018).

5.2 FATOR DE SEGURANÇA

A Tabela 5 apresenta os fatores de segurança calculados segundo as Equações 2 e 4, para as vigas BT-72/3,15 e BT-72/6,30 sem protensão e para a viga BT-72/14 com e sem protensão. A validação de segurança é obtida quando (FS ≥ 1). Ressalta-se que os desvios das alças de içamento não são considerados

na análise teórica de Mast (1993) e Zhang (2017) e, por este motivo não representa variável para o fator de segurança. Segundo os resultados obtidos na Tabela 5, tem-se que a viga, nas condições descritas, poderia ser içada, em perfeitas condições de segurança, apenas nos casos com imperfeição lateral pequena (3,15 e 6,30 cm). Ressalta-se que valores muito próximos de 1, como os casos de 5 e 10 por cento da BT-72/14 com protensão, não são recomendáveis.

TABELA 5: Fator de Segurança				
	Resultados	Mast	Zhang	Verificação
		Fator de Segurança	Fator de Segurança sem Protensão	
BT-72/3,15 sem Protensão 35 MPa	C0% a0	1,3434	1,6272	Válido para todos os Casos
	C5% a0	1,8207	2,5449	Válido para todos os Casos
	C10% a0	2,3206	4,2342	Válido para todos os Casos
BT-72 6,3 sem Protensão 35 MPa	C0% a0	1,0059	1,3615	Válido para todos os Casos
	C5% a0	1,2265	1,9891	Válido para todos os Casos
	C10% a0	1,3815	2,9908	Válido para todos os Casos
BT-72 14 sem Protensão 50 MPa	C0% a0	0,6108	1,1323	Inválido para Mast.
	C5% a0	0,6266	1,5027	Inválido para Mast.
	C10% a0	0,7673	2,015	Inválido para Mast.
BT-72 14 com Protensão 50 MPa	C0% a0	-	0,8448	Inválido para Zhang.
	C5% a0	-	1,0075	Válido para todos os Casos
	C10% a0	-	1,178	Válido para todos os Casos

FONTE: Autoria Própria.

Para maiores valores da excentricidade lateral inicial, como o caso de 14 cm para a viga BT-72/14, as condições de içamento tornam-se inseguras. Para a análise dos fatores de segurança, atestou-se que estes aumentam à medida que se adicionam balanços. O fator de segurança é inversamente proporcional à excentricidade e, assim, quanto menor a excentricidade, mais seguras são as condições de içamento. Por fim, o aumento da resistência do concreto não provoca aumento expressivo do fator de segurança, pois mesmo com o aumento da resistência, o aumento da excentricidade levou a viga a condições inseguras.

5.3 PROTENSÃO

A análise da tensão normal na seção de meio de vão foi feita para quantificar a influência das armaduras ativas (protensão) no içamento. Desta maneira, a análise baseou-se na comparação do modelo numérico das vigas BT-72/14 sem e com protensão. A Tabela 6 apresenta os pontos da seção transversal com os pontos de maior tração e compressão, e a Figuras 13 ilustra o resultado referentes à tensão normal no meio do vão ilustrada na posição indeformada. Força de protensão estimada: 6549,55 kN (seção 4.1).

TABELA 6: Tensão Normal (Z) na Seção do Meio do vão			
Situações		BT-72/14 sem Protensão	BT-72/14 com Protensão
		Tensão Normal (MPa)	Tensão Normal (MPa)
C0% a-	Tração	22,572	56,159
	Compressão	-30,214	-66,178
C0% a0	Tração	20,205	49,13
	Compressão	-26,097	-58,805
C0% a+	Tração	18,49	41,861
	Compressão	-23,179	-51,227
C5% a-	Tração	13,85	25,505
	Compressão	-16,8	-46,064
C5% a0	Tração	12,77	20,121
	Compressão	-15,009	-40,501
C5% a+	Tração	11,643	15,365
	Compressão	-13,177	-35,626
C10% a-	Tração	8,9663	6,2025
	Compressão	-10,141	-37,884
C10% a0	Tração	8,2607	3,0802
	Compressão	-8,998	-34,692
C10% a+	Tração	7,5211	-0,061712
	Compressão	-7,7937	-31,495

FONTE: Autoria Própria.

Quanto às tensões normais, observa-se que com a aplicação da força de protensão, a Figura 13 mostra que, em relação à situação sem protensão, que a viga tem sua seção transversal aproveitada, permitindo que toda ou a maior parte da seção transversal da peça trabalhe sob compressão, de forma que o aproveitamento da capacidade resistente é muito maior. A Tabela 6 demonstra aumento significativo da tensão normal na seção de meio de vão quando aplica-se a força de protensão.

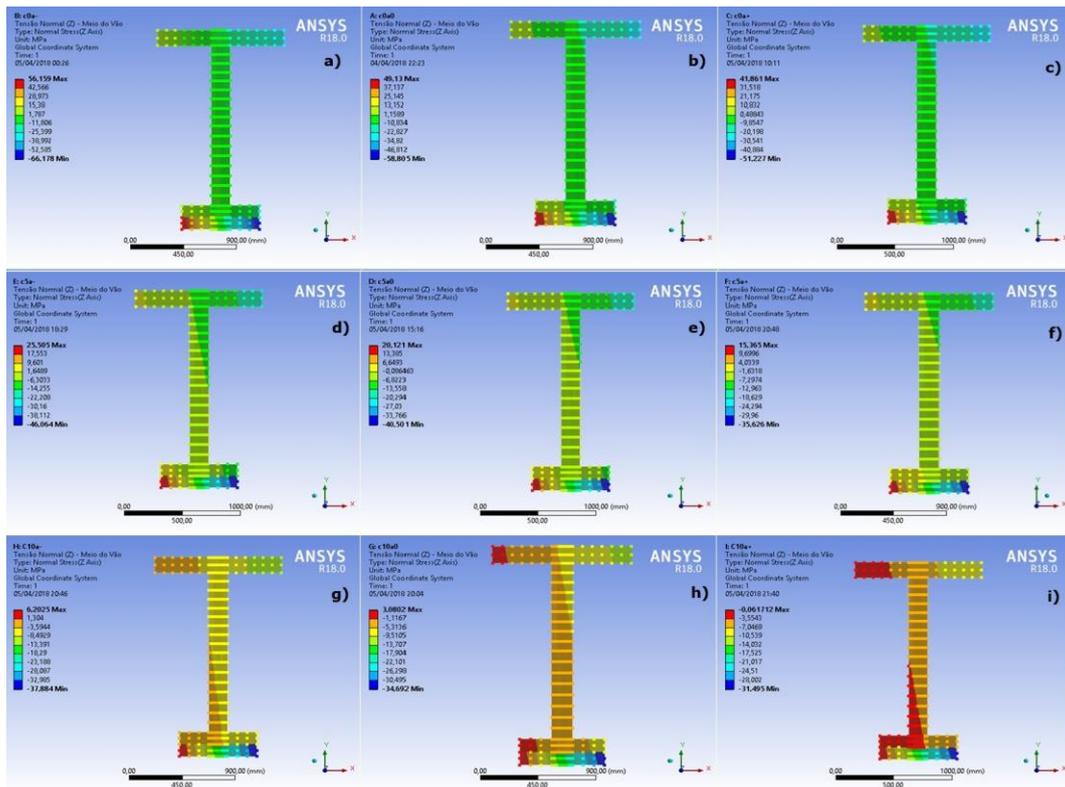


FIGURA 13: Tensão Normal (Z) – Meio do Vão - BT-72 14 com protensão
 [a] C0%a-; [b] C0%a0; [c] C0%a+; [d] C5%a-; [e] C5%a0; [f] C5%a+; [g] C10%a-; [h] C10%a0; [i] C10%a+
FONTE: Autoria Própria.

Diante disso, o içamento de vigas protendidas deve ser observado com cautela, pois, apesar de promover o melhor aproveitamento da seção transversal, ocorre um aumento significativo de tensões, podendo levar a viga à ruptura. O fator de segurança de Zhang (2017) também demonstra uma redução de seu valor na presença de protensão, provocando situações críticas. Desta maneira, a força de protensão, para esta viga, foi prejudicial ao içamento.

5.3.1 Tensões críticas devido à protensão

A Figura 13 mostra que, quando a viga é protendida, o ponto de maior tensão normal de tração está posicionada, na maioria dos casos, no extremo esquerdo da mesa inferior, não estando localizado no extremo esquerdo da mesa superior (Figura 3). A Tabela 7 mostra os valores de tensão normal (Z), obtidos no Ansys, para o ponto de Zhang (2017) e para o ponto de maior tração na peça.

TABELA 7: Tensão Normal (Z) - Pontos Críticos		
Posição dos Cabos	Tensão – Extremo Mesa Superior (MPa)	Tensão máxima da seção (Mesa Inferior) (MPa)
C0% a-	8,5334	56,159
C0% a0	6,2698	49,13
C0% a+	3,9419	41,861
C5% a-	2,7991	25,505
C5% a0	1,1056	20,121
C5% a+	-0,37353	15,365
C10% a-	0,81317	6,2025
C10% a0	-0,14232	3,0802
C10% a+	-1,0986	-0,061712

FONTE: Autoria Própria.

Pela Tabela 7 nota-se que, com exceção do içamento feito a 10% do vão, o ponto de maior tensão não coincide com o ponto do modelo de Zhang (2017), e este comportamento pode ser explicado através da inclinação da linha neutra. A Figura 14 demonstra, esquematicamente, o que ocorre com a linha neutra com a introdução da força de protensão. Atesta-se que a aplicação da força de protensão aumentou a inclinação da linha neutra e, ainda, deslocou a sua posição para baixo. Quando isso ocorre, nem sempre o ponto mais distante da linha neutra (ponto de maior tração) está localizado conforme Zhang (2017). A região de maior tração apenas coincidiu com Zhang (2017) quando o içamento foi feito a 10% do vão.

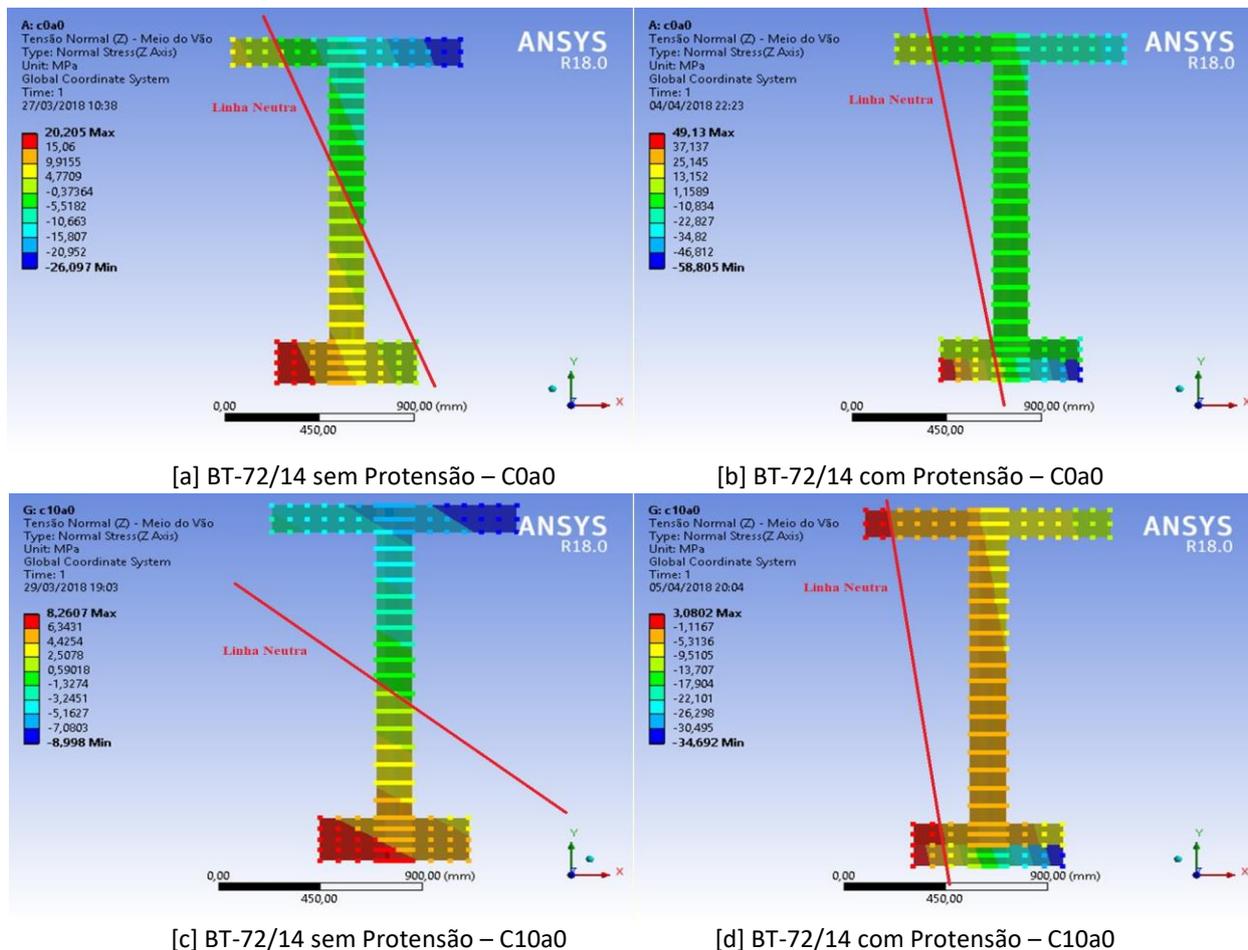


FIGURA 14: Inclinação Linha Neutra – Efeito da Protensão

FONTE: Autoria Própria.

5.3.2 Efeito das Alças de içamento

O efeito da variação da posição das alças de içamento também demonstrou influência nas tensões normais no meio do vão da seção transversal. Desta maneira, a Figura 15, com base na Tabela 7, ilustram o comportamento das tensões com a variação das alças de içamento, para a viga BT-72/14 com protensão.

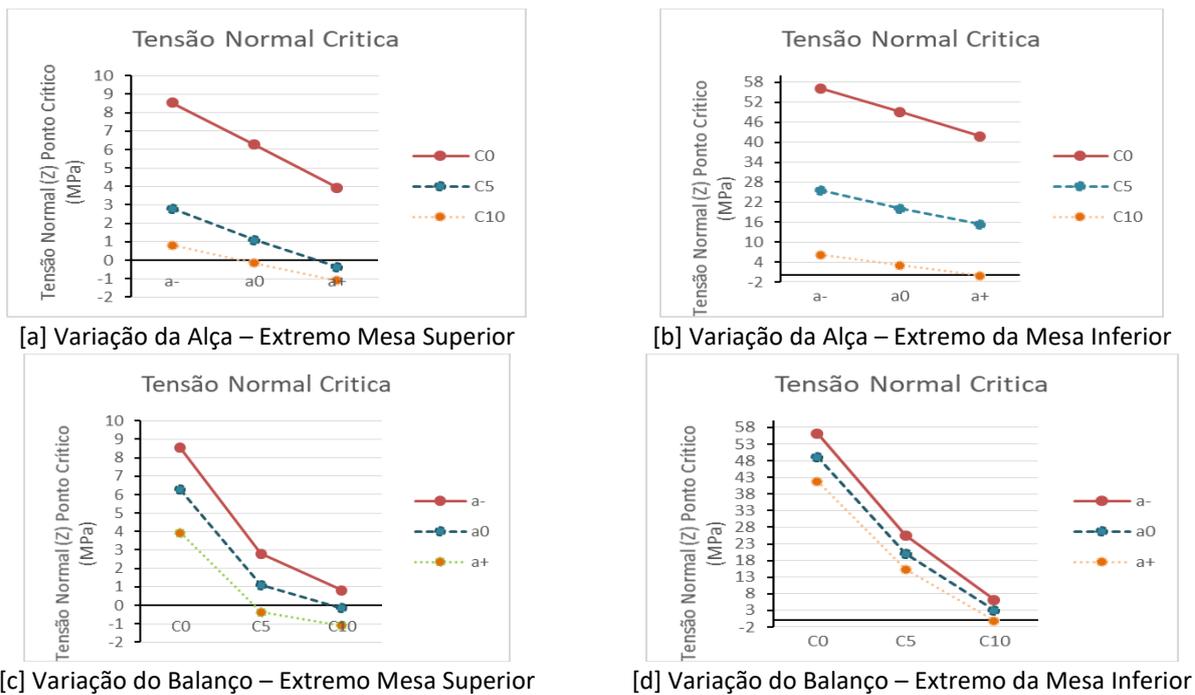


FIGURA 15: Comparação Ângulo de Giro – Desvio das Alças

FONTE: Autoria Própria.

A Figura 15 mostra que o aumento do comprimento dos balanços, bem como a alteração da alça para o sentido contrário à curvatura ($a \rightarrow a_0 \rightarrow a_+$), produzem o efeito de reduzir as tensões de tração e compressão da seção transversal e, assim, melhorar o desempenho e aproveitamento estrutural da peça.

6. CONCLUSÕES

As análises desenvolvidas neste trabalho mostram a influência do posicionamento dos cabos e seus desvios, bem como do efeito da protensão, na rotação da seção transversal associada à posição final de equilíbrio da viga. Baseado nas análises, as principais conclusões podem ser agrupadas como segue:

- A presença de balanços é sempre favorável no problema da estabilidade, uma vez que reduzem os deslocamentos e rotações, além das tensões. Em todos os casos analisados, o içamento sem balanços gerou resultados críticos. Para os casos analisados neste trabalho, as condições mais seguras de içamento foram obtidas quando os cabos estão posicionados com balanços de 10% e alça de içamento na posição contrária à curvatura (a_+). Entretanto, o comprimento do balanço deve ser estudado com cautela no caso de vigas protendidas.
- Os modelos de Mast (1993), Evangelista e Lima (2018) e deste artigo, que avaliam o ângulo descrito pela viga, mostram que este reduz à medida que se colocam balanços. Ao reduzir o valor da excentricidade, o ângulo também respeitou comportamento semelhante à introdução de balanços.
- A consideração dos desvios de posicionamento das alças de içamento mostrou a importância da verificação desse tipo de desvio no processo de fabricação, bem como sua influência nas rotações e deslocamentos da posição de equilíbrio. Os desvios influenciam de forma mais significativa na rotação de equilíbrio da viga do que a variação da resistência do concreto (f_{ck}), haja vista que o posicionamento na situação contrária à curvatura melhora o ângulo de giro significativamente, tornando o processo mais seguro. O posicionamento contrário à curvatura (a_+) apresentou tendência de compensar a instabilidade lateral causada pela excentricidade lateral, uma vez que provoca reduções no ângulo de equilíbrio.
- O aumento da excentricidade lateral deve ser visto com cautela, podendo provocar acréscimos de

ângulos de giro e causar colapso da estrutura, levando à queda. Desta maneira, a obtenção de uma situação segura de içamento deve ser observada e, dependerá, sobretudo, da excentricidade inicial.

- e) A introdução da força de protensão permite que toda ou a maior parte da seção transversal da peça trabalhe sob compressão, no içamento. No entanto, o aumento significativo das tensões nas situações com balanços pode provocar o colapso da estrutura e situações inseguras de içamento.

Finalmente, as análises desenvolvidas permitem assegurar que as excentricidades laterais iniciais devem ser consideradas no içamento, bem como a possibilidade de desvios desfavoráveis do posicionamento das alças. Recomenda-se, em caráter necessário de segurança, que esses erros sejam quantificados antes do manuseio, a fim de avaliar a possibilidade de movimentação e decidir medidas preventivas para a segurança durante o manuseio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo de iniciação científica no nível de Graduação a mim, Igor Gabriel Ribeiro Cardoso Evangelista. Os autores agradecem também à FAPEMIG (Edital Demanda Universal 01/2015 Projeto TEC APQ 00099/15) pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- CARDOSO, M. T. S. A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas sobre apoios elastoméricos considerando o efeito das imperfeições geométricas**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- COJOCARU, R. **Lifting Analysis of Precast Prestressed Concrete Beams**. Thesis (Master). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 2012.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- EVANGELISTA, I. G. R. C.; LIMA, M. C. V. **Instabilidade Lateral de Vigas Pré-Moldadas de Concreto: Influência da Excentricidade Lateral Inicial e Posicionamento das Alças de Içamento**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC), v. 14, Nº2, Julho –Dezembro, 2018.
- GESUALDO, F. A. R. **Método dos elementos finitos - Notas de aula**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- LIMA, M. C. V. **Contribuição ao estudo da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- MAST, R. F. Lateral stability of long prestressed concrete beams – Part 2. **PCI JOURNAL**, 1993.
- ZHANG, F. **Lateral Stability of Long Precast Prestressed Concrete Girders During Transient Load Situations**. Escola de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona TECH, 2017.