

INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO: INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE LATERAL INICIAL E POSICIONAMENTO DAS ALÇAS DE IÇAMENTO

Lateral Instability of precast concrete beams: influence of lateral instability eccentricity and positioning of lifting handles

Igor Gabriel Ribeiro Cardoso Evangelista¹, Maria Cristina Vidigal de Lima²

Recebido em 16 de setembro de 2017; aceito em 11 de maio de 2018; disponível on-line em 26 de julho de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Instabilidade Lateral;
Içamento;
Vigas pré-moldadas;
Seção transversal;
Excentricidade.

KEYWORDS:

Lateral Stability;
Lifting;
Precast concrete;
Cross section;
Eccentricity.

RESUMO: O estudo da instabilidade de vigas pré-moldadas de concreto tem merecido maior atenção devido aos preocupantes acidentes registrados com a ruptura de vigas por instabilidade lateral. A importância do estudo deve ser considerada além da fase de montagem, mas também durante o transporte e içamento. A geometria da viga influencia diretamente no problema de instabilidade, por se tratar de elementos estruturais longos e esbeltos. Neste contexto, este trabalho analisa numericamente o comportamento estrutural de vigas durante a fase de 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. Assim, para vigas com seção transversal I padronizadas são calculados os deslocamentos, tensões e ângulos de giro para diferentes comprimentos de balanço e desvios laterais das alças. Os resultados dos estudos numéricos mostram que as condições de içamento são mais seguras quando o manuseio é realizado com balanços e com alças no sentido contrário à curvatura. Além disso, deve-se observar o efeito favorável decorrente do aumento da altura da mesa inferior, deslocando para baixo o centro de gravidade do elemento estrutural, favorecendo o equilíbrio, chegando a 15% de redução nos deslocamentos e tensões, e diminuição de até 25% no valor da rotação da viga, na situação mais crítica sem balanços e com desvios desfavoráveis das alças de içamento. O aumento da excentricidade lateral inicial deve ser observado com cautela, podendo provocar acréscimos de tensões de até 30%, nos casos críticos sem balanços.

ABSTRACT: The study of the instability of precast concrete beams has deserved more attention due to concerning accidents with beam rupture by lateral instability. The importance of the study should be considered beyond the transitory phase, but also transportation and lifting. The geometry of the beam influences directly in instability problem, due to long and slender structural elements. In this context, this research analyzes, numerically, the structural behavior of beams during the lifting phase by steel cables, taking into account the initial lateral eccentricity and positioning of the handles in the cross-section. Thus, for beams with standardized cross-section I, displacements, stresses and angles of rotation for different balance lengths and lateral deviations of the handles are evaluated. The results of the numerical studies show that lifting conditions are safer when the handling is performed with balances and with handles in the opposite direction to the curvature. Furthermore, the favorable effect of dislocating down the center of gravity reduces by 15% the displacements and tensions, and induces a decrease up to 25% in the value of the rotation of the beam, in the most critical situation without balances and with unfavorable deviations of the lift loops. The increase in the initial lateral eccentricity should be observed with caution, which may increase tensions up to 30% in critical cases without balances.

* Contato com os autores:

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

Aluno do curso de graduação em Engenharia Civil, Estudante, 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 são amplamente utilizadas em obras de grande porte, com o objetivo de vencerem grandes vãos. É notório que 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. Podem ser listadas algumas vantagens da utilização de longos vãos, dentre elas:

- A diminuição na quantidade de elementos que compõem a infraestrutura torna o processo vantajoso economicamente (KRAHL, 2014);
- As longas vigas pré-moldadas protendidas são econômicas quando comparadas às vigas metálicas utilizadas para o mesmo fim, além de tipicamente exigirem menos manutenção (HILL et al, 2009);

A produção de vigas pré-moldadas em fábrica permite maior controle de qualidade e, conseqüentemente, a execução de elementos mais esbeltos com vãos maiores (EL DEBS, 2000). No entanto, vários acidentes são relatados na literatura técnica devido ao tombamento lateral e excessiva deformação ocasionada pela instabilidade lateral destas vigas nas fases transitórias de manuseio e montagem (COJOCARU, 2012). Um destes acidentes ocorreu no Brasil em 2009, com a queda de três vigas de 85 toneladas e cerca de 45 m de comprimento, na obra de um viaduto que passa sobre a Rodovia Régis Bittencourt em São Paulo.

Vale ressaltar que em vigas muito longas e esbeltas a ruptura por instabilidade ou giro de corpo rígido ocorre antes da resistência à flexão ser alcançada. Além da fase temporária de içamento, o colapso, com apoios flexíveis, pode ocorrer durante o transporte, merecendo estudo do trajeto em rodovia, e também em situação transitória anterior à execução do tabuleiro, antes da execução do contraventamento nos apoios (LIMA, 1995; LIMA, 2002).

Neste contexto, este trabalho apresenta o

estudo do comportamento de vigas pré-moldadas durante o içamento, levando-se em conta a influência da geometria da seção transversal do elemento estrutural, a excentricidade lateral inicial, o posicionamento dos cabos de suspensão no eixo longitudinal e os desvios laterais das alças de içamento. Salienta-se que a excentricidade lateral inicial é decorrência direta da curvatura da viga. Trata-se, pois, de imperfeições geométricas desenvolvidas no processo fabricação das vigas pré-moldadas, visto que o processo de moldagem não produz vigas perfeitamente retas.

São consideradas nas análises as vigas padronizadas PCI BT-72 e PCI BT-77 cujas variações de excentricidades laterais iniciais foram medidas e confirmadas em campo por Cojocarú (2012). As análises numéricas são desenvolvidas no programa computacional *Ansys Workbench* versões 17 e 18, utilizando o método dos elementos finitos. Ressalta-se que a única ação considerada nas análises é o peso próprio da viga. As análises numéricas consideram comportamento elástico linear para os materiais envolvidos, visando, a princípio, obter a posição de equilíbrio da viga curva no espaço, a fim de quantificar no problema da instabilidade a influência das variáveis escolhidas para estudo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste artigo consiste em estudar o comportamento de vigas pré-moldadas de concreto durante o içamento, com relação aos riscos de instabilidade lateral, levando-se em conta a influência da geometria da seção transversal da viga, a excentricidade lateral inicial e os desvios de posicionamento das alças de içamento, por meio da pesquisa da posição de equilíbrio do elemento estrutural.

3. METODOLOGIA E MODELAGEM NUMÉRICA

A Figura 1 ilustra a nomenclatura utilizada para algumas variáveis analisadas neste trabalho, levando-se em conta a excentricidade lateral inicial,

a curvatura da viga, a posição dos pontos de içamento e as rotações das seções, conforme Plaut e Moen (2013) onde: θ é o ângulo que indica a posição ao longo de metade do comprimento da viga no içamento; γ é o ângulo associado ao ponto de içamento; α é o ângulo associado à extremidade da viga no içamento; ψ é o ângulo de inclinação dos cabos de içamento; β é o ângulo de giro de corpo rígido da viga; ϕ é o giro de torção da viga; δ é a excentricidade da viga, medida entre o meio do vão e as extremidades; e é a distância horizontal entre o centro de gravidade e o eixo de giro da viga; R é o raio de curvatura do arco da viga; U é o deslocamento ao longo do comprimento da viga; V

é o deslocamento na direção do eixo de maior inércia da viga (vertical); S é o deslocamento na direção do eixo de menor inércia da viga (lateral).

Nesta seção são abordadas as características físicas e geométricas nas vigas BT-72 e BT-77, ambas com comprimento de 42,4 m, modeladas numericamente no programa computacional *ANSYS Workbench*. São analisados os casos de içamento sem balanços e com balanços de 5 e 10% do comprimento do vão.

Salienta-se que o limite da excentricidade inicial permitida pelo PCI Tolerance Manual é de $\frac{L}{1000}$, onde L é o comprimento total da viga (PCI, 2000).

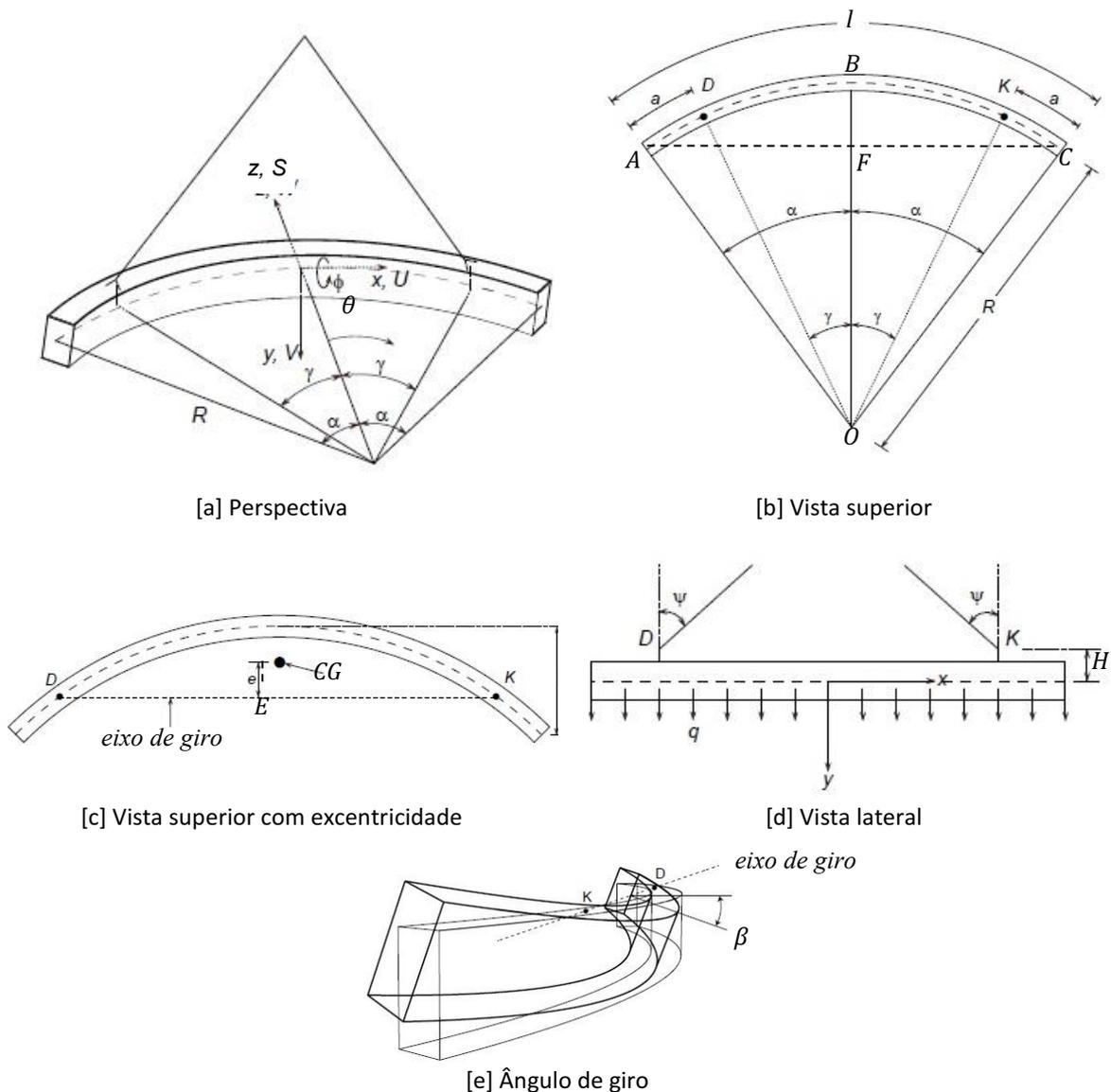


FIGURA 1: Viga curva e simbologia das variáveis.

FONTE: Adaptado de Plaut e Moen (2013).

Para a consideração dos desvios laterais do posicionamento dos cabos na seção transversal, são simuladas três situações, tais como: sem desvio lateral, com desvio de 2 cm no sentido a favor e contrário a curvatura da viga (Figura 2). Vale ressaltar que quanto aos desvios das alças de içamento, observou-se a recomendação do PCI (2000), que recomenda que as variações das alças devem ser limitadas a 1 polegada (2,54 cm) do centro da seção. A Figura 3 ilustra as tolerâncias conforme o PCI (2000) para desvios das alças e excentricidade lateral inicial (CARDOSO, 2017).

A fim 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.

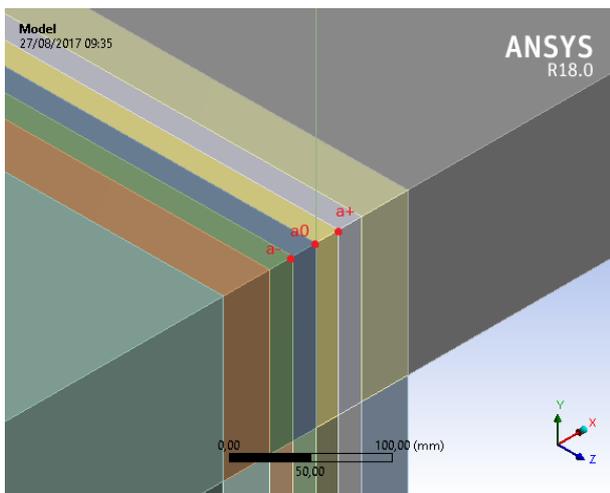


FIGURA 2: Desvio do Posicionamento das Alças de içamento. **FONTE:** Autoria Própria (2017).

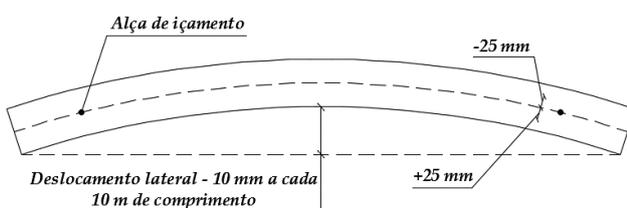


FIGURA 3: Tolerâncias para posicionamento das alças e deslocamento lateral da viga segundo o PCI (2000). **FONTE:** Cardoso (2017).

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

São analisadas, numericamente, as vigas pré-moldadas 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 viga com as excentricidades de 3,15 cm (BT-72-3,15) e 6,3 cm (BT-72-6,30). A diferença entre as duas vigas escolhidas é a altura da mesa inferior da BT-77, que é 12 cm maior que da BT-72 (alterando a altura total da viga), com centro de gravidade da BT-72 deslocado para baixo.

O módulo de elasticidade secante do concreto considerado nas análises foi de 30.000 MPa, o coeficiente de Poisson de 0,2 e a densidade de 25 kN/m³.

As vigas analisadas neste trabalho possuem seções transversais I e sua geometria real possui mísulas (Figura 4), tendo sido simplificadas conforme ilustra a Figura 5 e dimensões discriminadas na Tabela 1.

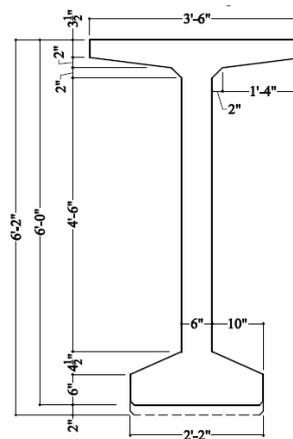


FIGURA 4: Representação da Seção Real com Mísulas (Dimensões em polegadas). **FONTE:** Cojocarú (2012).

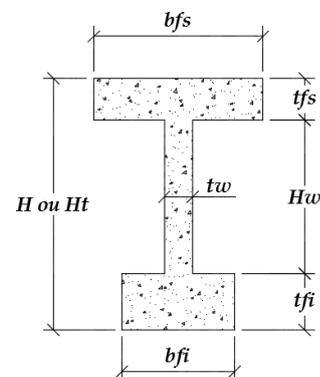


FIGURA 5: Seção I aproximada. **FONTE:** Autor (2017).

TABELA 1: Dimensões das Vigas.

	BT-72			BT-77		
	Sistema Inglês (in)	SI (cm)	SI (adotado) (cm)	Sistema Inglês (in)	SI (cm)	SI (adotado) (cm)
Altura total (H)	72,00	182,88	184,00	77,00	195,58	196,00
Altura da alma (H_w)	58,25	147,96	148,00	58,25	147,96	148,00
Largura da mesa inferior (b_{fi})	26,00	66,04	66,00	26,00	66,04	66,00
Largura da mesa superior (b_{fs})	42,00	106,68	108,00	42,00	106,68	108,00
Espessura da mesa inferior (t_{fi})	8,25	20,96	22,00	13,25	33,66	34,00
Espessura da mesa superior (t_{fs})	5,50	13,97	14,00	5,50	13,97	14,00
Espessura da alma (t_w)	6,00	15,24	16,00	6,00	15,24	16,00

Obs.: Não consideradas as mísulas na seção transversal aproximada utilizada nas análises numéricas.

FONTE: Autoria Própria (2017).

3.2 MODELO E DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

Para que a modelagem represente de forma satisfatória o comportamento da viga curva, quanto a excentricidade lateral, se fez necessária a utilização da função SWEEP (a seção transversal percorre um segmento de arco traçado). Sendo assim, a seção transversal foi desenhada no plano XY (Figura 6) e o caminho desta feita no plano XZ. Este caminho foi feito da seguinte maneira: desenhou-se um arco de uma circunferência passando pelos pontos extremos da viga. Nas análises numéricas desenvolvidas, para a viga curva, foi considerado o raio da circunferência $R = 706.668,2567 \text{ cm}$ para a BT-77-3,18; $R = 713.398,4004 \text{ cm}$ para a BT-72-3,15 e $R = 356.701,563 \text{ cm}$ para a BT-72-6,30.

Para a definição da malha transversal e longitudinal em elementos finitos, tendo em vista a importância das proporcionalidades, dimensões regulares, evitando-se elementos distorcidos, busca-se trabalhar numericamente com discretização bem elaborada e bom refinamento, elementos mais precisos (de alta ordem) e mais complexos do ponto de vista de sua formulação matemática. A eficiência da discretização da malha produz uma resposta mais eficiente se obedecidos tais critérios (GESUALDO, 2015).

O estudo da malha da viga BT-77-3,18 foi

feito na direção transversal e longitudinal. Objetivou-se, neste trabalho, não apenas a obtenção de uma malha densa com elementos quadrados regulares, mas uma malha que melhor representasse o comportamento da viga. Assim, a escolha foi feita analisando o máximo deslocamento resultante, combinação entre os deslocamentos vertical e horizontal, da seção transversal dos nós do meio do vão. Ressalta-se que antes de ser escolhida as malhas para a análise, foi observada, primeiramente, a convergência dos resultados das malhas escolhidas estrategicamente, e por fim escolheu-se a malha que apresentou menor em relação ao nó maior deslocamento.

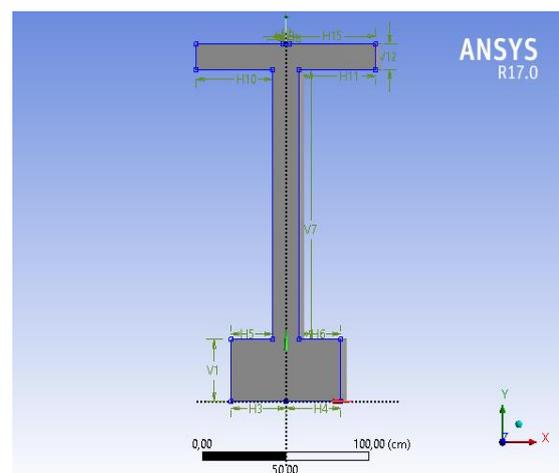


FIGURA 6: Seção Transversal Simplificada da Viga PCI BT-77. FONTE: Autoria Própria (2017).

A *priori*, foi analisada a malha na seção transversal e, para isto, segmentou-se a área em três: o retângulo da alma, o retângulo da mesa inferior e o retângulo da mesa superior. Vale observar que devido ao interesse da consideração numérica dos desvios de posicionamento das alças de içamento, é necessário o garantir a subdivisão na mesa e na alma, de forma coincidente.

Para a mesa superior e inferior fixou-se o número de divisões na altura da mesa superior, e o restante das divisões destas foram obtidas de maneira proporcional a suas dimensões. Para o comprimento da alma, foram impostos números de divisões, de maneira proporcional às demais divisões, haja vista que frente ao comprimento longitudinal da viga, o extremo refinamento da malha apenas levaria a uma perda de qualidade da mesma. Concomitante a estas análises, foram impostos três valores de divisão longitudinal da viga. Nas seções a 5% e a 10% do vão da viga, onde

serão considerados os balanços no içamento, garantiu-se nós e elementos nessas posições, totalizando, seis análises da malha. A Tabela 2 apresenta as hipóteses das divisões da malha na seção transversal e a Tabela 3 mostra as considerações para a divisão longitudinal.

A Figura 7 mostra as malhas na seção transversal, sem elementos distorcidos, cujos resultados foram levados em consideração para ponderação da escolha da malha mais adequada. Para a notação das diversas possibilidades, chamou-se a combinação da malha seção transversal hipótese 1 com seção longitudinal hipótese 1 de ST 1, SL 1 e, assim, sucessivamente. Os resultados das análises, bem como a escolha da malha, estão indicados na Tabela 4. A malha final escolhida para esta viga foi ST 1 e SL 2, tendo 80 divisões longitudinais, por apresentar menor erro em relação à opção de maior deslocamento (Tabela 4).

TABELA 2: Análise da Malha da Seção Transversal da Viga BT-77-3,18.

Local	1ª HIPÓTESE DE DIVISÕES		2ª HIPÓTESE DE DIVISÕES	
	Número de Divisões	Comprimento (mm)	Número de Divisões	Comprimento (mm)
Altura Mesa Superior	2,0	140,0	3,0	140,0
Largura da Mesa Superior	6,0	460,0	10,0	460,0
Largura da Mesa Inferior	3,0	250,0	5,0	250,0
Largura da alma	1,0	20,0	1,0	20,0
Comprimento da Alma	16,0	1480,0	20,0	1480,0
Altura da Mesa Inferior	5,0	340,0	7,0	340,0

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 3: Análise da Malha Longitudinal da viga BT-77.

Local	Tamanho dos elementos (mm)	Comprimento (mm)
Seção Longitudinal - 1º Hipótese de divisões	1060,0 (40 divisões)	42400,0
Seção Longitudinal - 2º Hipótese de divisões	530,0 (80 divisões)	42400,0
Seção Longitudinal - 3º Hipótese de divisões	424,0 (100 divisões)	42400,0

FONTE: Autoria Própria (2017).

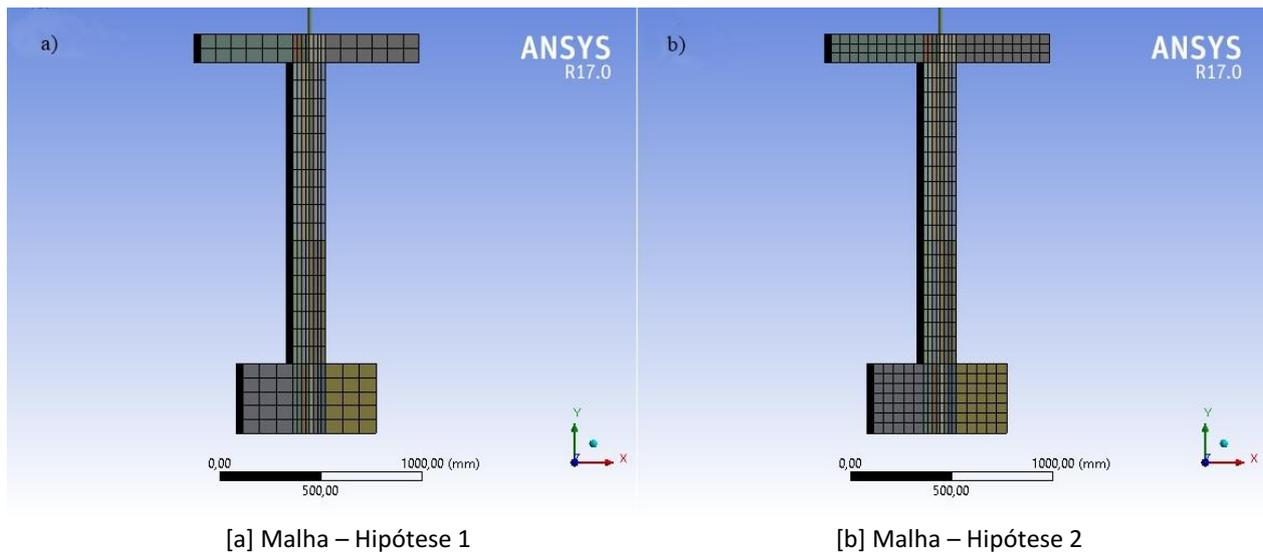


FIGURA 7: Malha da seção transversal da viga BT-77-3,18.

FONTE: Autoria Própria (2017).

O estudo da malha da viga BT-72-3,15 foi feito de maneira semelhante ao da viga BT-77-3,18, buscando a menor variação na resposta do deslocamento resultante (Tabela 4). Ambas as vigas possuem o mesmo comprimento longitudinal e praticamente a mesma seção transversal, variando apenas a altura. Assim, utilizou-se a mesma divisão longitudinal e transversal da mesa superior e da alma. Quanto à divisão da mesa inferior, essas

foram feitas de maneira proporcional (BT-77 possui 340 mm e 5 divisões), e a viga BT-72, que possui 220 mm, foi modelada com 4 divisões. Como a malha ST1, SL2 já apresenta um erro menor que 0,08% em relação à malha ST2, SL3, adotou-se a opção ST1, SL2 com 80 divisões longitudinais para as análises deste trabalho.

$$\text{erro}(\%) = \frac{(152,439 - 152,31)}{152,439} \cong 0,08\%$$

TABELA 4: Análise da Malha da viga BT-77 .					
Malha	Deslocamento imposto no apoio (mm)	Reação na Base do Cabo (N) (Apoio C)	Reação na extremidade da mesa inferior (N) (Apoio D)	Deslocamento resultante do nó de maior deslocamento (mm)	Escolha
ST 1, SL 1	89,720	0,584	-1,734	152,048	ST 1, SL 2
ST 1, SL 2	89,950	-0,931	-0,094	152,310	
ST 1, SL 3	89,960	-0,242	-0,813	152,364	
ST 2, SL 1	89,830	-0,006	-1,079	152,120	
ST 2, SL 2	90,050	-0,793	-0,383	152,383	
ST 2, SL 3	90,060	-0,121	-1,167	152,439	

FONTE: Autoria Própria (2017).

3.3 CABOS DE IÇAMENTO E 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 dos cabos de içamento, foram impedidos os deslocamentos nas direções X, Y e Z, conforme mostra a Figura 8 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.

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, 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. É necessário compreender que, durante toda a fase de içamento, os cabos permanecem no plano vertical (YZ), decorrência da ação única do peso-próprio. Todas as análises desenvolvidas neste trabalho são em regime elástico-linear.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos para as variações dos parâmetros escolhidos para cada valor de excentricidade, sendo analisados: a rotação, os deslocamentos e as tensões normais da seção transversal do meio do vão e as reações nos vínculos impostos. Finalmente, os resultados dessas vigas são correlacionados visando compreender melhor o comportamento da viga durante a fase de içamento.

4.1 VIGA PCI BT-77-3,18

4.1.1 Reações nos Vínculos

A condição de equilíbrio da viga é atingida numericamente para um deslocamento imposto lateral no vínculo inferior que resulte em reação de apoio nula neste vínculo. Assim, a Tabela 5 apresenta os

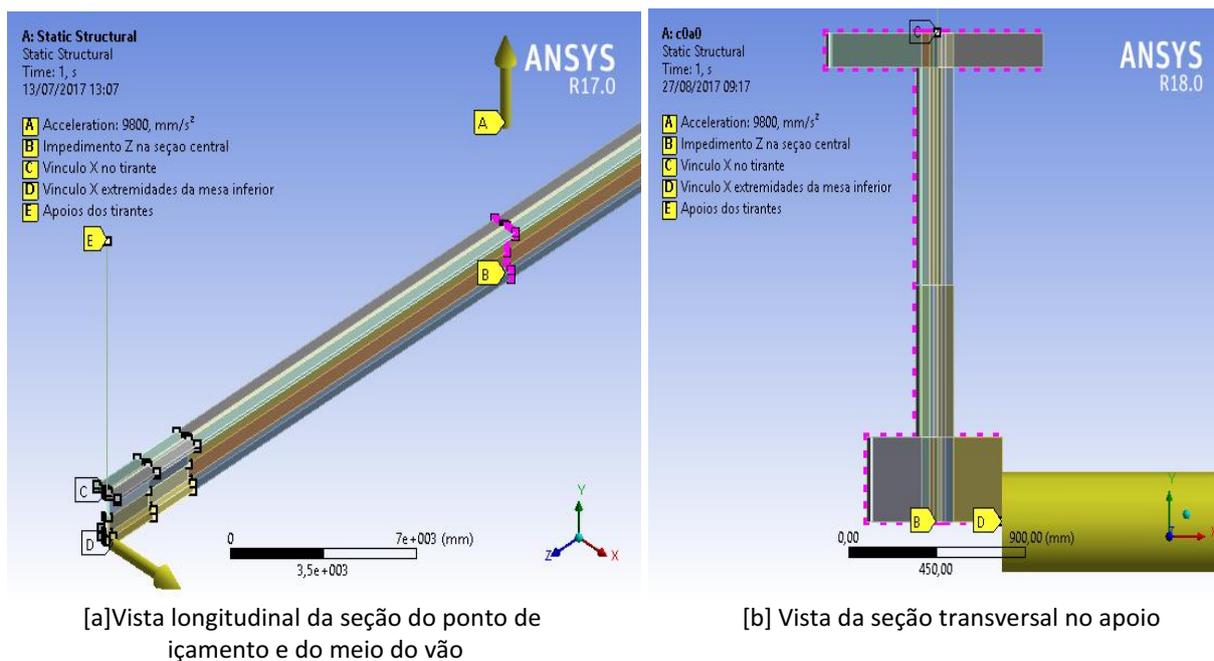


FIGURA 8: Representação dos Apoios na Viga BT-77.

FONTE: Autoria Própria (2017).

valores dos deslocamentos impostos, bem como as reações nestes apoios, para cada situação de içamento. A força normal e a tensão no cabo estão indicadas na Tabela 6, sendo nulas as reações de apoio horizontais e laterais no ponto de fixação do cabo com o meio externo.

4.1.2 Ângulo de Giro e Deslocamentos

De acordo com Plaut e Moen (2013), durante o içamento, uma viga descreve um ângulo

em torno do eixo longitudinal, sendo parte devido ao giro de corpo rígido e parte devido à torção da viga. A rotação total da seção transversal do meio do vão em relação ao eixo longitudinal da viga é apresentada neste trabalho como o resultado da soma de duas parcelas ($\beta + \phi$), sendo β a parcela decorrente do giro de corpo rígido e ϕ a parcela devido à torção (Tabela 7). A rotação total (Equação 1) é calculada pela relação entre os deslocamentos ΔA e ΔB na seção transversal do meio do vão e a altura da seção transversal (Figura 9).

TABELA 5: Análise das Reação nos Apoios (BT-77-3,18).

Posição dos Cabos	Reação na Base do Cabo (N)	Reação na extremidade de mesa inferior (N)	Deslocamento imposto no Apoio (mm)
C0% a-	0,1670	0,3843	166,94
C0% a0	-0,9305	-0,0938	89,95
C0% a+	3,9578	2,9732	4,19
C5% a-	0,0541	-0,3895	97,3
C5% a0	0,0628	-0,1038	42,01
C5% a+	19,3990	20,9278	-12,25
C10% a-	-0,1556	-0,0005	67,2
C10% a0	0,4942	15,2247	19,84
C10% a+	-101,4076	112,2973	-31,199

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 6: Reação de apoio e Tensão nos Cabos (BT-77-3,18).

Reação vertical em cada Cabo (N)	Tensão no Cabo (MPa)
318325,00	1013,2599

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 7: Ângulo de giro (graus) (BT-77-3,18).

Posição dos Cabos	Deslocamento Lateral Ponto inferior (mm)	Deslocamento Lateral Ponto superior (mm)	Angulo de giro (Graus)
C0% a-	97,961	-73,616	-5,0221
C0% a0	52,614	-40,351	-2,7186
C0% a+	3,0632	-2,7329	-0,1694
C5% a-	71,353	-27,496	-2,8908
C5% a0	30,918	-12,174	-1,2598
C5% a+	-9,1157	2,2524	0,3323
C10% a-	56,761	-11,042	-1,9824
C10% a0	17,971	-2,3562	-0,5942
C10% a+	-28,566	2,1133	-0,8969

FONTE: Autoria Própria (2017).

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{|\Delta A - \Delta B|}{\text{altura}}\right) \quad \text{Eq. [01]}$$

O deslocamento crítico observado nas análises deste trabalho é o deslocamento lateral, em virtude da presença de excentricidade lateral inicial na viga. A Tabela 8 apresenta os valores

máximos e mínimos dos deslocamentos obtidos. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os resultados de deslocamento lateral na seção do meio do vão, com um aumento de deformação de escala de 25 vezes, a fim de destacar a visualização dos resultados numéricos (rotação) em cada situação analisada.

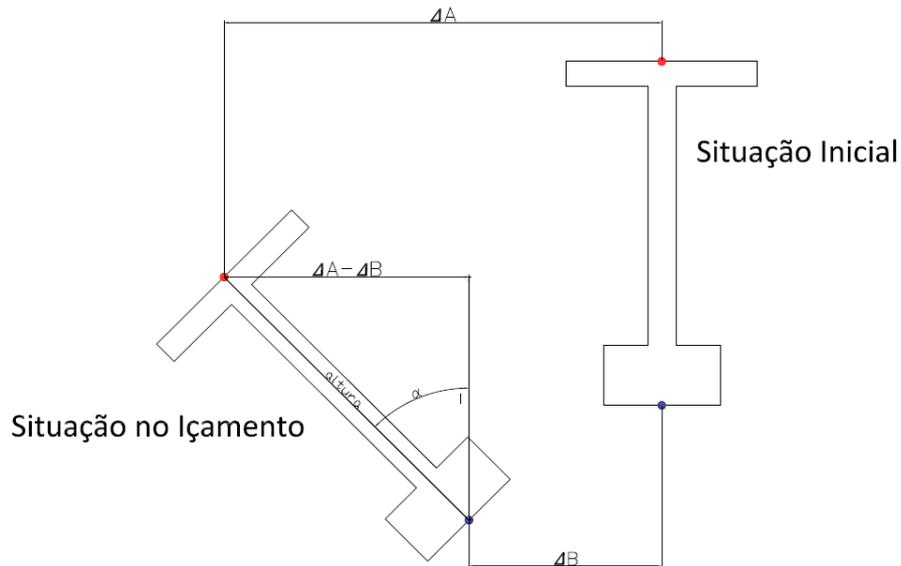


FIGURA 9: Esquema representativo de medição do ângulo de giro.

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 8: Análise Comparativa de resultados PCI BT-77 (e=3,18cm).									
	a-			a0			a+		
	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%
Deslocamento Horizontal (meio do vão) (mm)									
Máximo	99,251	71,792	56,973	53,009	31,016	18,002	3,0867	2,2744	2,1548
Mínimo	-75,64	-28,147	-11,338	-40,913	-12,271	-2,3605	-2,7694	-9,1392	-28,62
Deslocamento Vertical (meio do vão) (mm)									
Máximo	-81,082	-70,651	-59,658	-95,598	-83,316	-71,276	-116,44	-91,25	-68,287
Mínimo	-176,25	-125,33	-97,118	-147,03	-107,11	-82,486	-119,65	-97,518	-85,204
Deslocamento Vertical Centróide (meio do vão) (mm)									
-	-125,05	-96,801	-77,831	-120,26	-94,995	-76,838	-118,05	-94,38	-76,638
Deslocamento Horizontal Centróide (meio do vão) (mm)									
-	15,154	23,64	24,029	7,7497	10,12	8,1592	0,27075	-3,6233	-13,749

FONTE: Autoria Própria (2017).

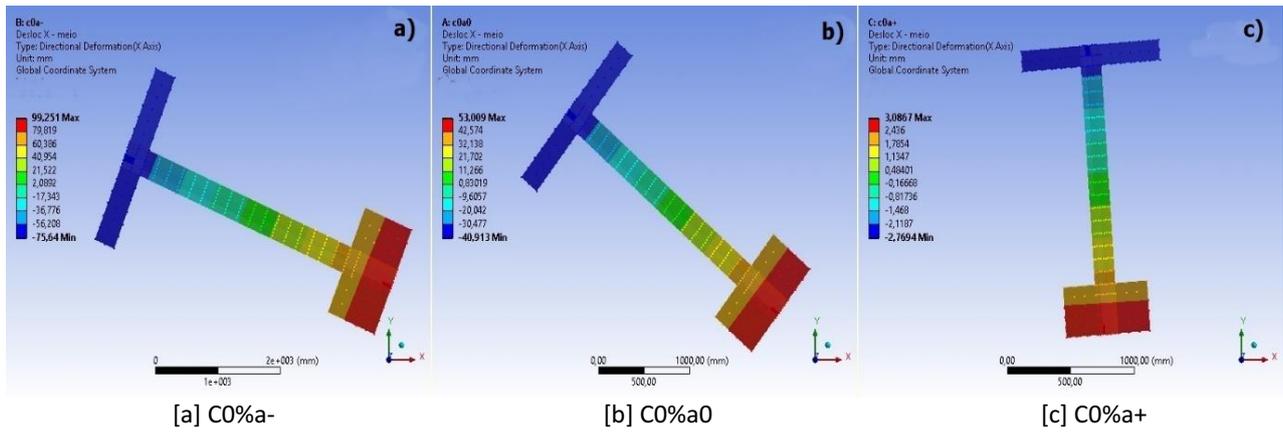


FIGURA 10: Deslocamentos laterais da viga BT-77-3,18 sem balanços.
 FONTE: Autoria Própria (2017).

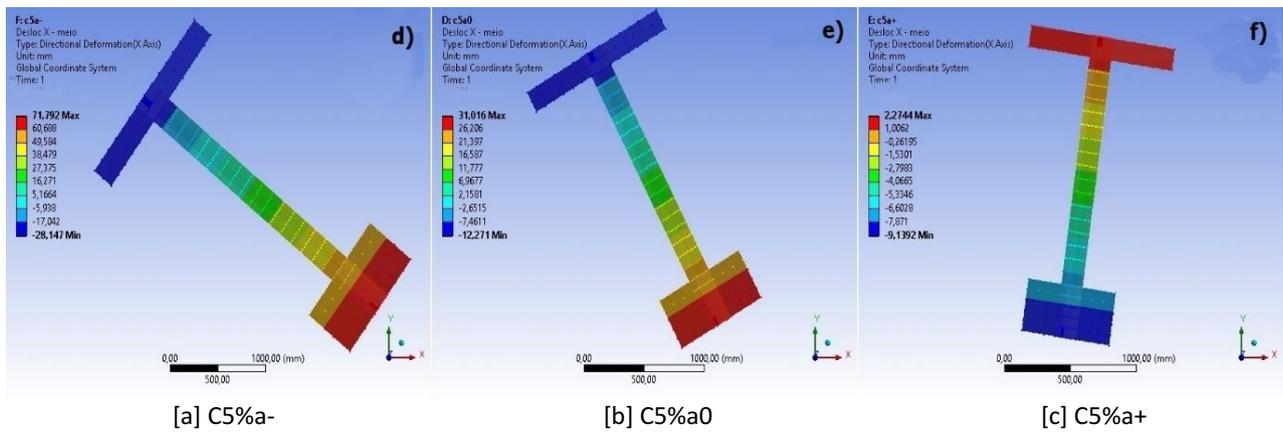


FIGURA 11: Deslocamentos laterais da viga BT-77-3,18 com balanços de 5% do vão
 FONTE: Autoria Própria (2017).

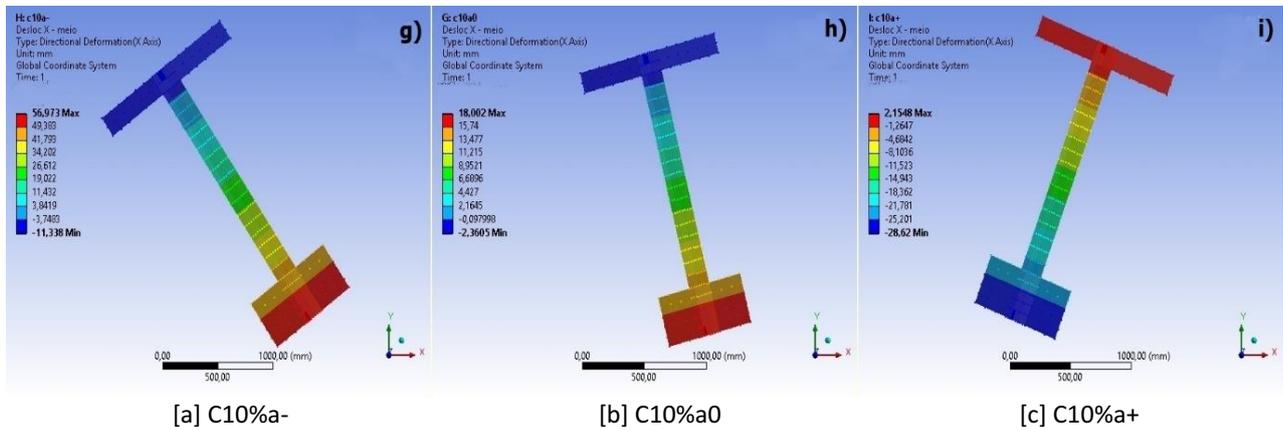


FIGURA 12: Deslocamentos laterais da viga BT-77-3,18 com balanços de 10% do vão
 FONTE: Autoria Própria (2017).

4.1.3 Tensão Normal

As forças e os momentos que atuam em determinado ponto na área da seção de um corpo podem ser analisados por meio das tensões. Desta

maneira, como a seção transversal foi desenhada no plano XY, a tensão normal é na direção Z. As Figuras 13, 14 e 15 ilustram a distribuição das tensões normais no eixo longitudinal da viga (Z), na configuração indeformada.

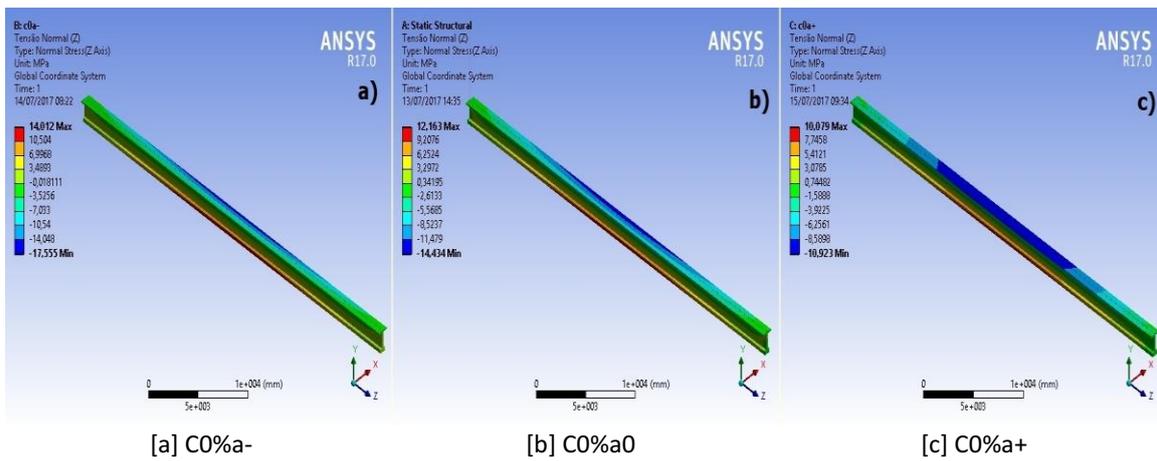


FIGURA 13: Tensão normal na direção longitudinal da viga BT-77-3,18 (sem balanços)
FONTES: A autoria Própria (2017).

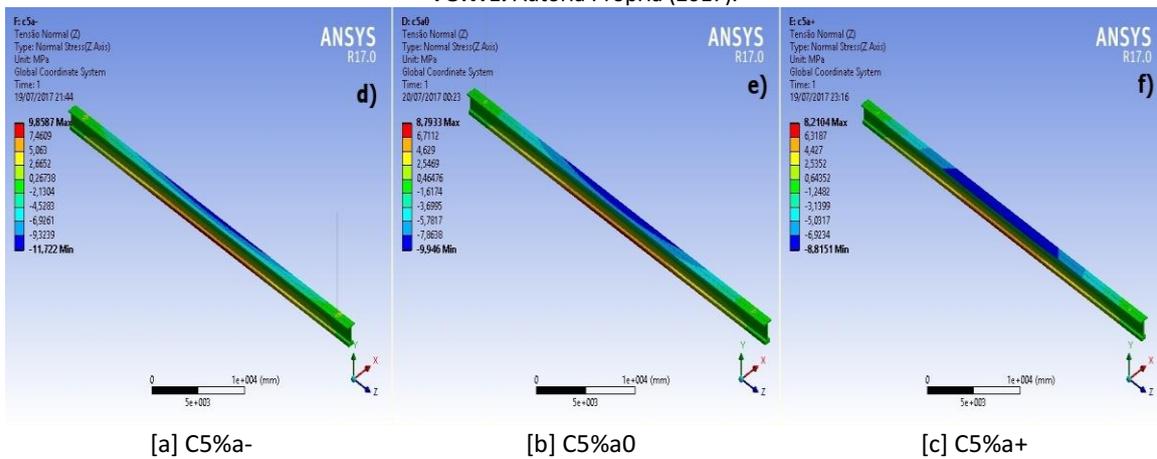


FIGURA 14: Tensão normal na direção longitudinal da viga BT-77-3,18 (balanços de 5%)
FONTES: A autoria Própria (2017).

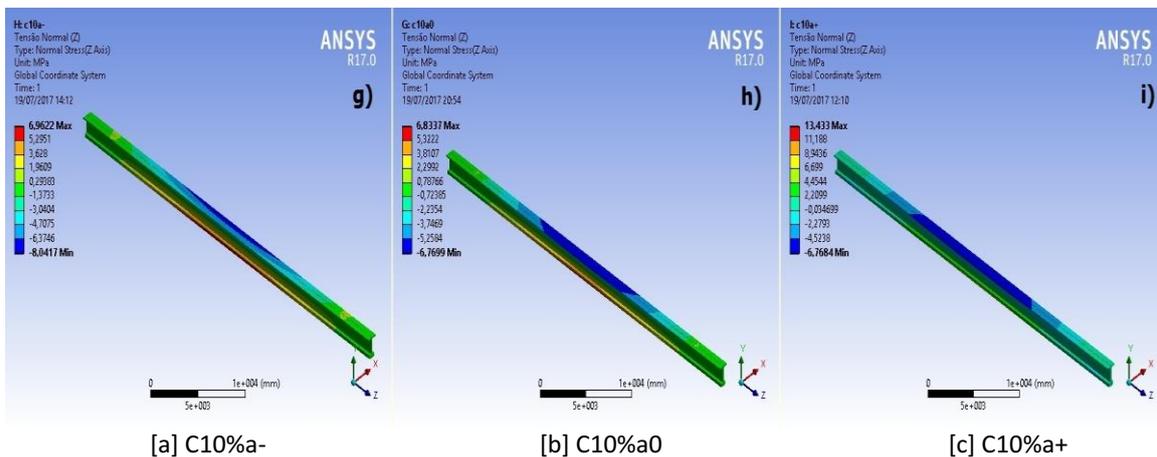


FIGURA 15: Tensão normal na direção longitudinal da viga BT-77-3,18 (balanços de 10%)
FONTES: A autoria Própria (2017).

As Figuras 16, 17 e 18 apresentam os resultados numéricos das tensões normais na seção transversal do meio vão, podendo-se perceber a

inclinação da linha neutra nas situações de içamento com presença de excentricidade lateral inicial e desvios dos cabos de içamento.

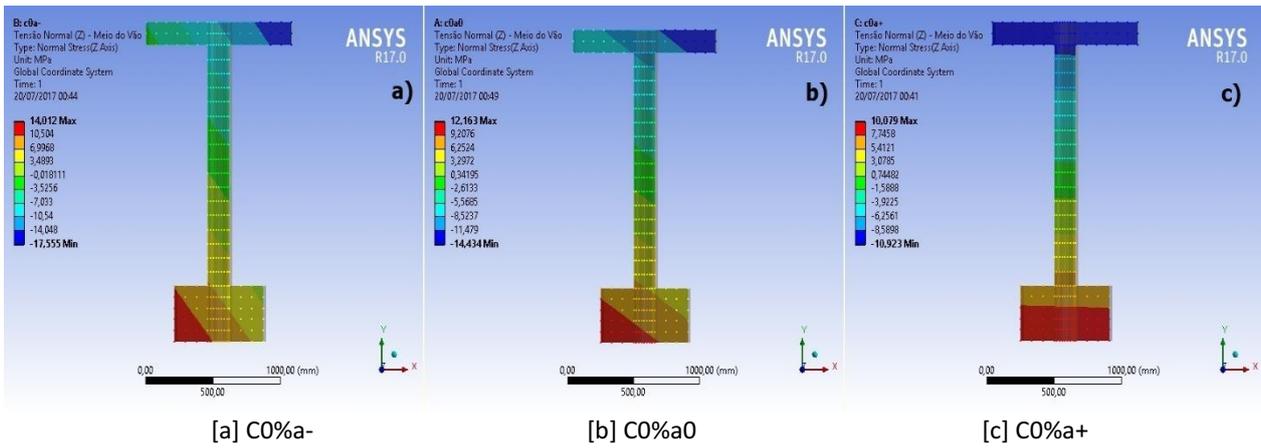


FIGURA 16: Tensão normal na seção transversal do meio do vão da viga BT-77-3,18 (sem balanços).
FONTE: Autoria Própria (2017).

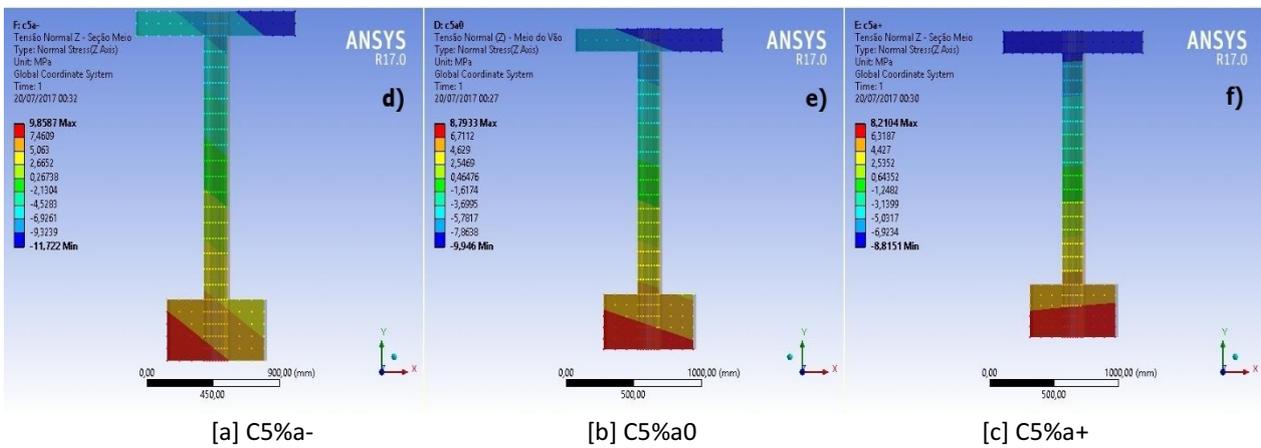


FIGURA 17: Tensão normal na seção transversal do meio do vão da viga BT-77-3,18 (balanços de 5%)
FONTE: Autoria Própria (2017).

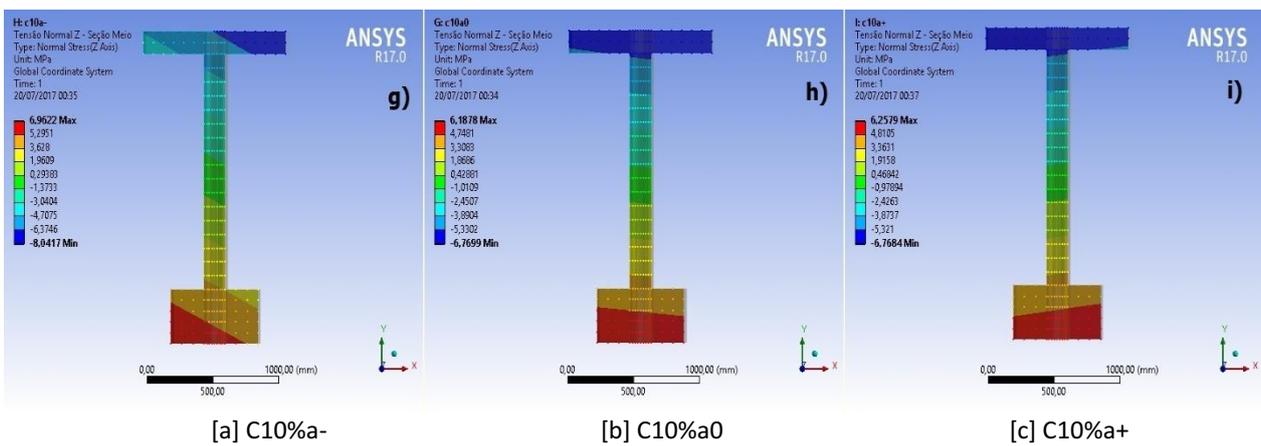


FIGURA 18: Tensão normal na seção transversal do meio do vão da viga BT-77-3,18 (balanços de 10%).
FONTE: Autoria Própria (2017).

4.2 VIGA PCI BT-72-3,15

4.2.1 Reações nos vínculos

Nas situações de içamento analisadas para a viga BT-72 com 3,15 cm de excentricidade lateral

inicial, a força normal no cabo, bem como a tensão estão indicadas na Tabela 9, sendo nulas as reações de apoio horizontais e laterais no ponto de fixação do cabo com o meio externo.

TABELA 9: Reação de apoio e Tensão nos Cabos (BT-72-3,15).	
Reação vertical em cada cabo (N)	Tensão no Cabo (MPa)
277185,00	882,3073

FONTE: Autoria Própria (2017).

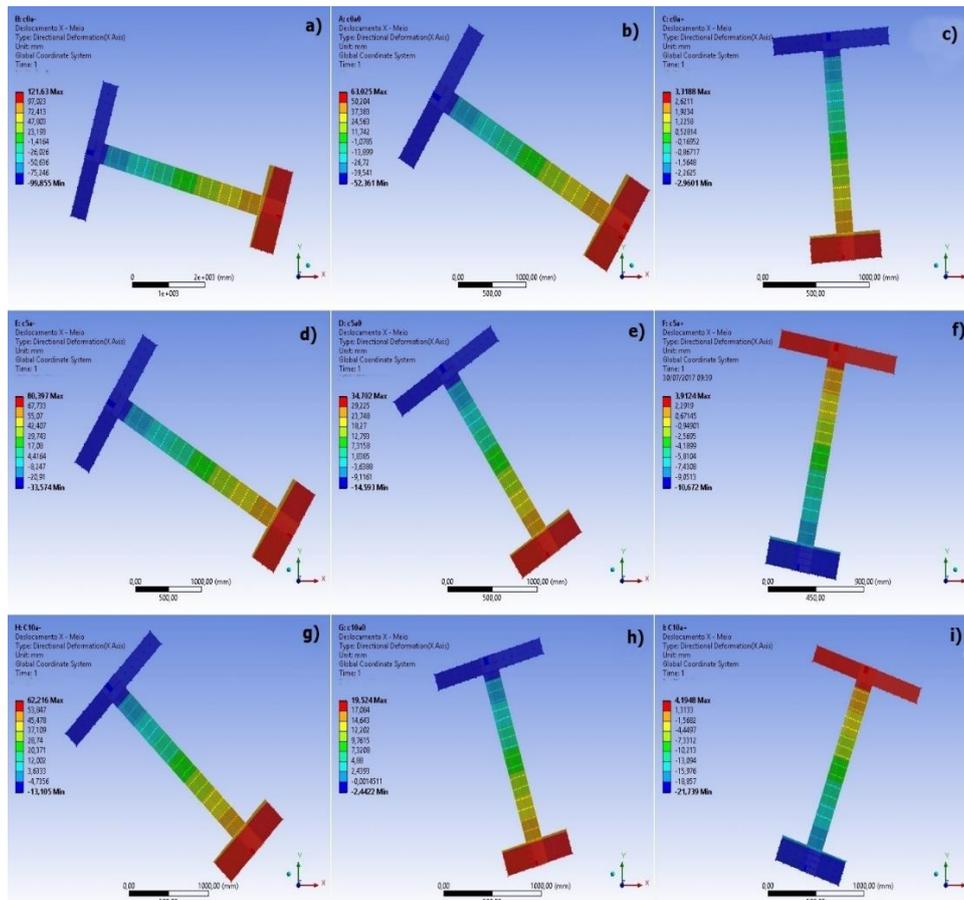
4.2.2 Ângulo de Giro e Deslocamentos Laterais

A rotação total da seção transversal central do meio do vão da viga BT-72-3,15, para cada situação de balanços e desvios das alças, está apresentada na Tabela 10.

Os deslocamentos laterais na seção central estão ilustrados na Figura 19, com um aumento de deformação em 25 vezes para fins de visualização, sendo os deslocamentos verticais e laterais máximos e mínimos discriminados na Tabela 11.

TABELA 10: Ângulo de giro (graus) (BT-72-3,15).				
Posição dos Cabos	Deslocamento imposto no Apoio (mm)	Deslocamento Lateral Ponto inferior (mm)	Deslocamento Lateral Ponto superior (mm)	Angulo de giro (Graus)
C0% a-	208,25	119,330	-96,189	-6,7265
C0% a0	109,38	62,367	-51,375	-3,5441
C0% a+	4,11	3,292	-2,925	-0,1936
C5% a-	110,23	79,759	-32,603	-3,5010
C5% a0	47,52	34,564	-14,436	-1,5260
C5% a+	-15,72	-10,641	3,899	0,4528
C10% a-	73,85	61,928	-12,687	-2,3241
C10% a0	21,23	19,486	-2,428	-0,6824
C10% a+	-26,64	-21,691	4,166	0,8052

FONTE: Autoria Própria (2017).



[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+

FIGURA 19: Deslocamento lateral da seção central da viga PCI BT-72-3,15.

FONTE: Autoria Própria (2017).

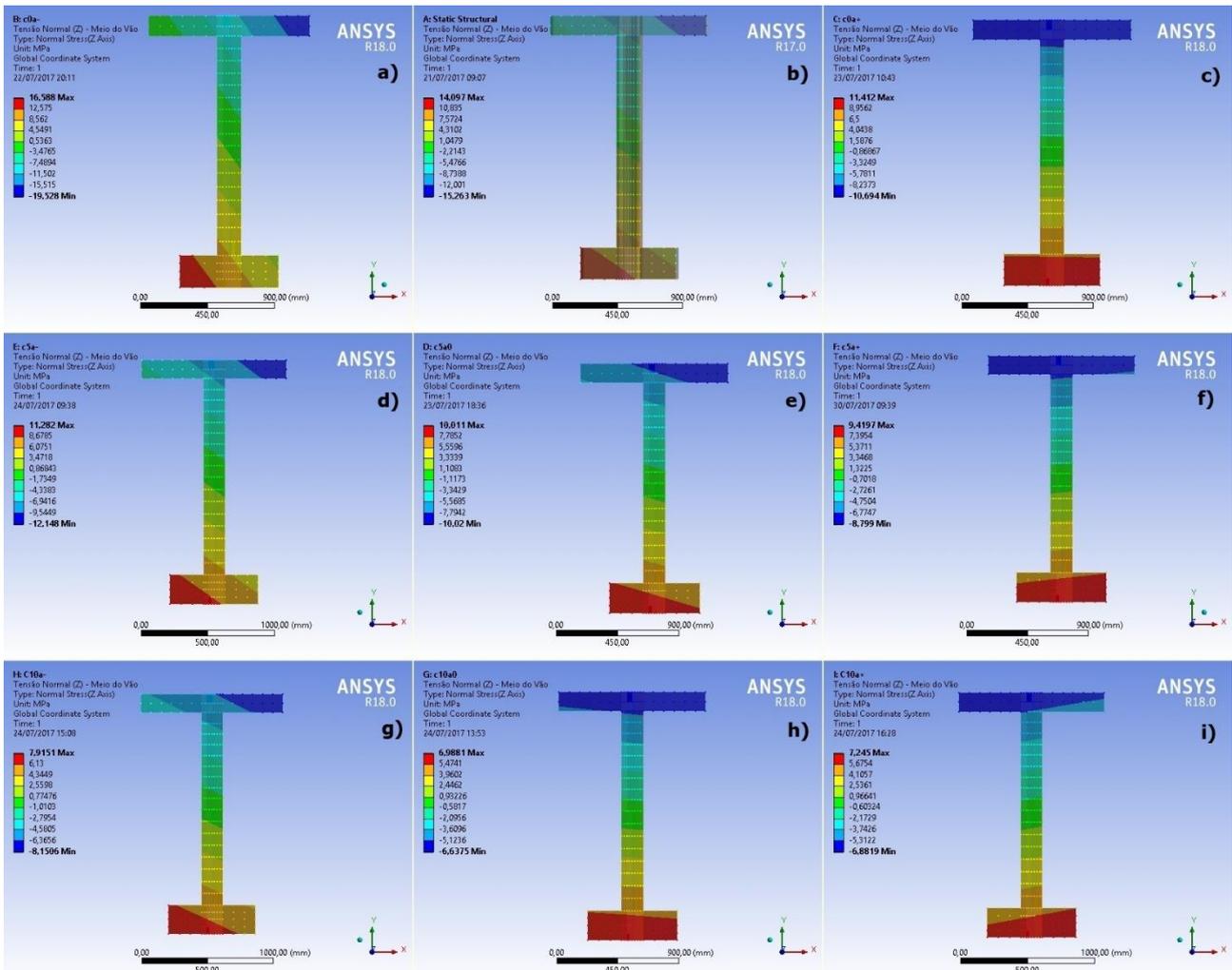
TABELA 11: Análise Comparativa de Resultados PCI BT-72 (e=3,15cm).									
	a-			a0			a+		
	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%
Deslocamento Horizontal (meio do vão) (mm)									
Máximo	121,63	80,397	62,216	63,025	34,702	19,524	3,0867	3,9124	4,1948
Mínimo	-99,855	-33,574	-13,105	-52,361	-14,593	-2,4422	-2,7694	-10,672	-21,739
Deslocamento Vertical (meio do vão) (mm)									
Máximo	-72,297	-64,381	-53,121	-90,698	-79,506	-66,824	-116,44	-88,608	-65,465
Mínimo	-199,85	-130,63	-97,046	-157,77	-108,33	-79,695	-119,65	-97,151	-80,657
Deslocamento Vertical Centróide (mm)									
-	-130,49	-95,993	-74,419	-122,69	-93,634	-73,206	-118,05	-92,861	-72,984
Deslocamento Horizontal Centróide (mm)									
-	7,1446	21,264	23,08	3,1598	9,0577	8,0761	0,27075	-3,0702	-8,2274

FONTE: Autoria Própria (2017).

4.2.3 Tensão normal (Z) na seção do meio do vão

A Figura 20 apresenta os resultados

referentes a tensão normal na seção do meio do vão, evidenciando a inclinação da linha neutra em cada caso.



[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+

FIGURA 20: Tensão normal na seção transversal do vão central da viga BT-72-3,15.

FONTE: Autoria Própria (2017).

4.3 VIGA PCI BT-72-6,3

4.3.1 Ângulo de Giro, Deslocamentos e Tensões

As rotações e os deslocamentos máximos e mínimos na seção central obtidos para cada uma das situações de içamento estão discriminados nas

Tabelas 12 e 13, respectivamente. Nas Figuras 21, 22 e 23 estão apresentados os deslocamentos laterais da seção central (escala: ampliados em 25 vezes). A Figura 24 apresenta os resultados referentes a tensão normal no meio do vão ilustrada na posição indeformada.

TABELA 12: Ângulo de giro (graus) (BT-72-6,3).

Posição dos Cabos	Deslocamento imposto no Apoio (mm)	Deslocamento Lateral Ponto inferior (mm)	Deslocamento Lateral Ponto superior (mm)	Ângulo de giro (Graus)
C0% a-	308,07	179,62	-141,63	-10,0549
C0% a0	214,6	123,9	-100,4	-7,0019
C0% a+	115,68	66,679	-55,644	-3,8118
Posição dos Cabos	Deslocamento imposto no Apoio (mm)	Deslocamento Lateral Ponto inferior (mm)	Deslocamento Lateral Ponto superior (mm)	Ângulo de giro (Graus)
C5% a-	156,54	114,07	-46,525	-5,0071
C5% a0	94,66	69,095	-28,738	-3,0479
C5% a+	31,95	23,974	-10,556	-1,0753
C10% a-	97,81	82,423	-16,974	-3,0966
C10% a0	48,14	40,842	-8,6727	-1,5420
C10% a+	-1,75	-0,67702	-0,30403	0,0116

FONTE: Autorial Própria (2017).

TABELA 13: Análise Comparativa de Resultados PCI BT-72-6,3.

	a-			a0			a+		
	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%	C0%	C5%	C10%
Deslocamento Horizontal (meio do vão) (mm)									
Máximo	184,71	115,35	82,921	126,39	69,583	40,977	67,436	24,053	-0,28052
Mínimo	-149,87	-48,526	-17,735	-104,38	-29,465	-8,8424	-56,791	-10,628	-0,69224
Deslocamento Vertical (meio do vão) (mm)									
Máximo	-62,3	-55,427	-47,78	-72,287	-68,182	-59,728	-89,61	-83,513	-72,895
Mínimo	-253,14	-150,27	-106,35	-205,08	-125,83	-88,849	-161,76	-103,82	-73,12
Deslocamento Vertical Centróide (mm)									
-	-145,25	-99,754	-75,88	-132,63	-95,863	-73,998	-123,9	-93,528	-73,012
Deslocamento Horizontal Centróide (mm)									
-	12,395	30,465	30,673	7,1409	18,165	15,063	3,0067	5,9949	-0,48118

FONTE: Autorial Própria (2017).

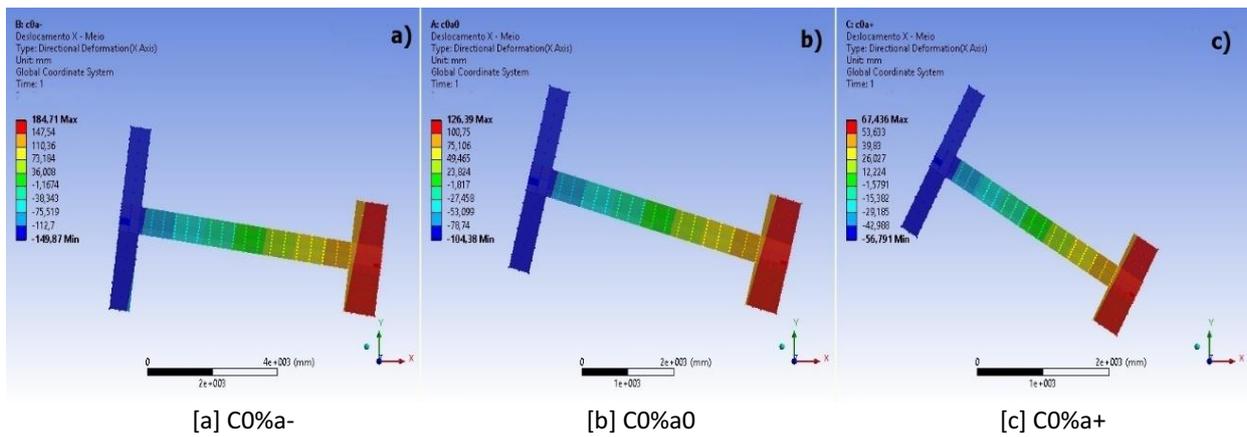


FIGURA 21: Deslocamentos laterais da viga BT-72-6,30 (sem balanços).
 FONTE: Autoria Própria (2017).

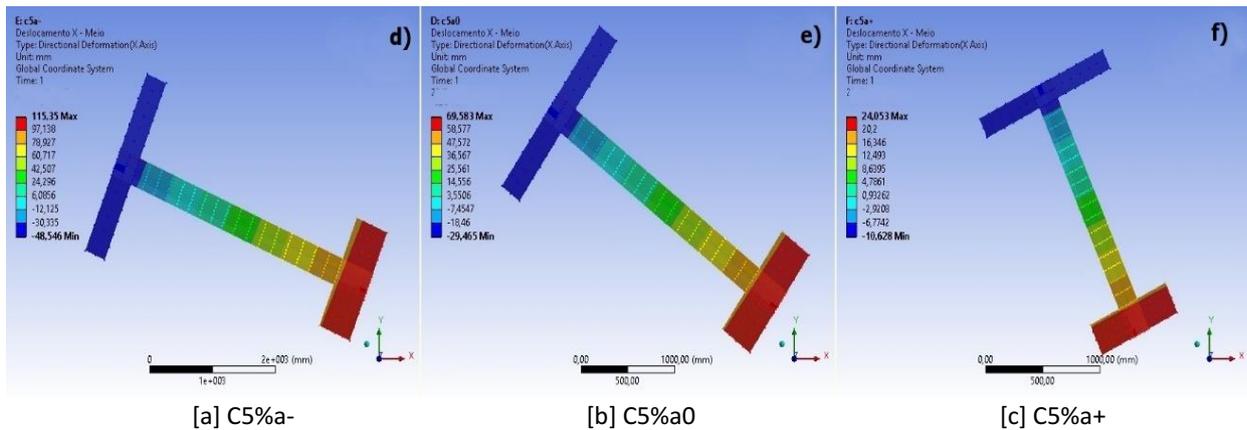


FIGURA 22: Deslocamentos laterais da viga BT-72-6,30 (balanços de 5%)
 FONTE: Autoria Própria (2017).

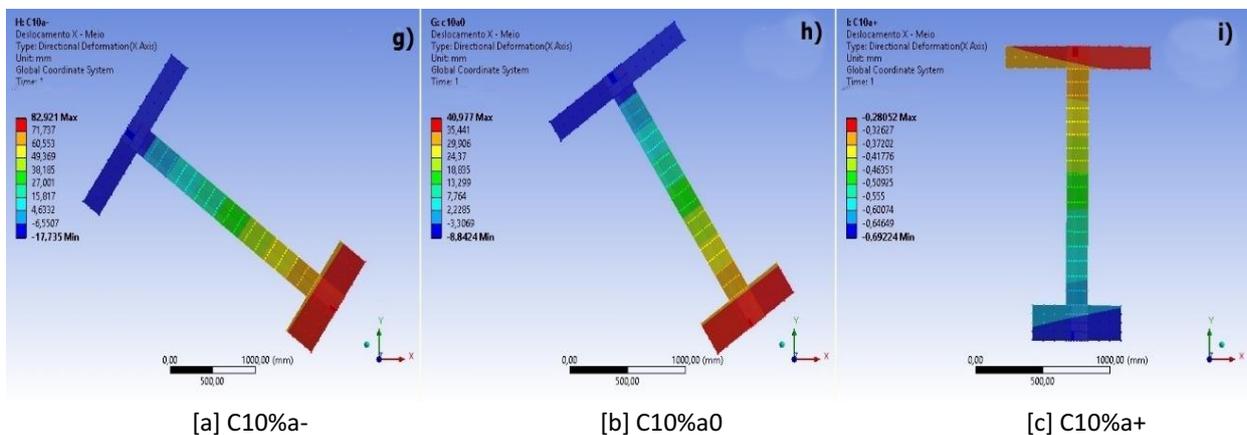


FIGURA 23: Deslocamentos laterais da viga BT-72-6,30 (balanços de 10%)
 FONTE: Autoria Própria (2017).

4.4 ANÁLISE DA RESPOSTA NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS VIGAS

Quanto aos deslocamentos laterais, acentuados pela rotação da seção transversal da viga, decorrente de excentricidade lateral, observa-se que nas situações com balanços maiores, existe a possibilidade do giro contrário na seção do meio

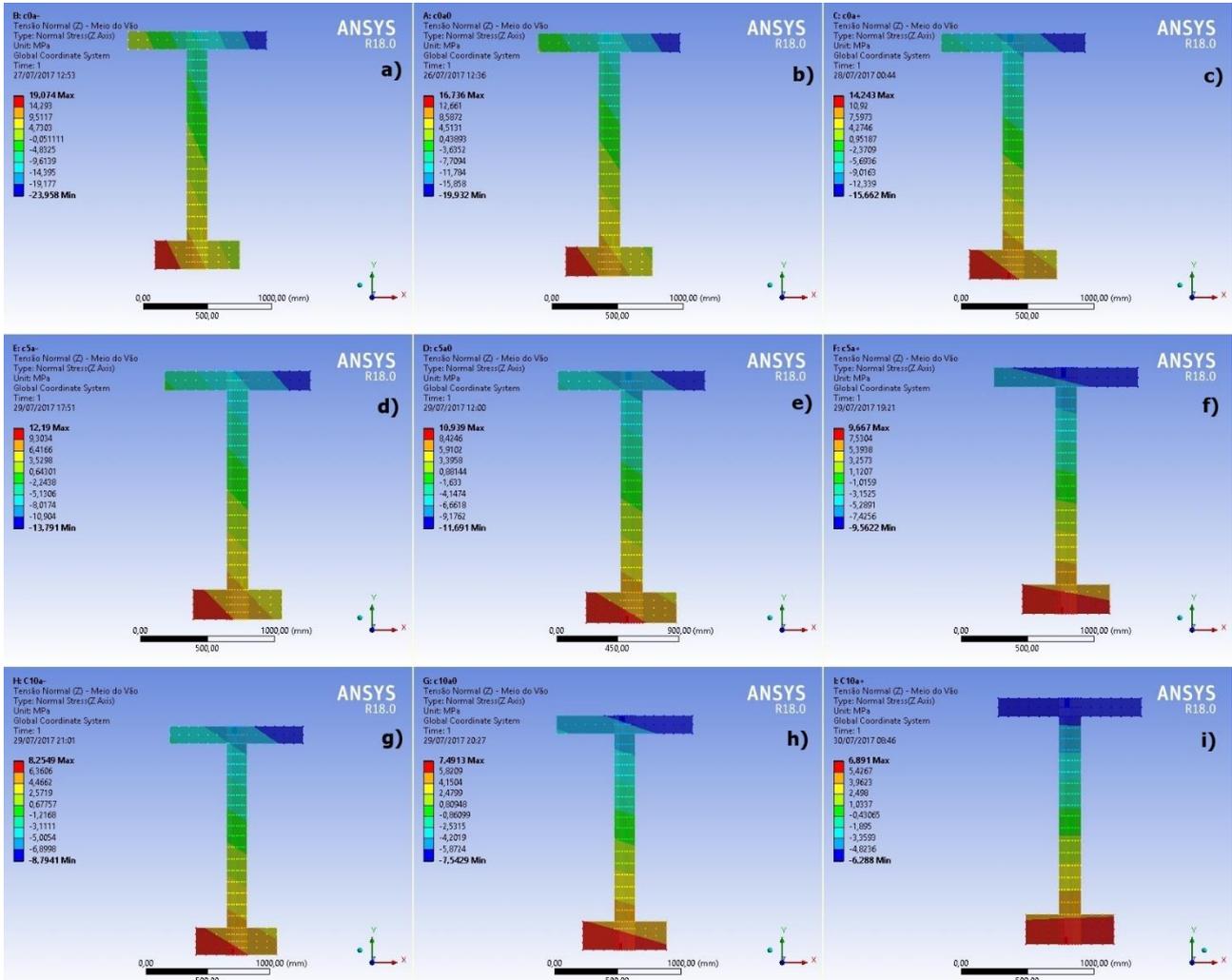
do vão (Figura 25b) ao que ocorre na situação sem balanços ou com pequenos valores do comprimento dos mesmos. Este fato ocorreu na viga BT-77-3,18 com 5% e 10% de balanços (C5%a+ e C10%a+), para as situações desfavoráveis dos desvios das alças de içamento. Também ocorreu para as mesmas situações na viga BT-72-3,15.

Na viga BT-72-6,30, de maior excentricidade, apenas na situação com 10% de balanço e desvios desfavoráveis das alças, ocorreu o giro conforme a Figura 25b.

A linha neutra em quase todos os casos analisados, exceto nas situações que geram configuração deformada, como a classificada como

balanços instabilizantes (Figura 25b) por Lima (2002), encontram-se com grande inclinação na seção transversal do meio do vão. Nos demais casos, a linha neutra tende à horizontal.

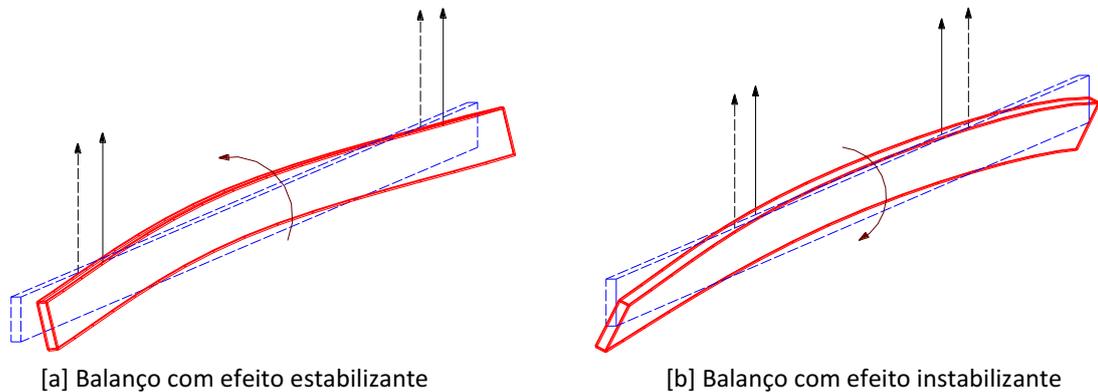
Conforme esperado, os deslocamentos verticais são significativamente reduzidos na presença de balanços durante o içamento.



[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+

FIGURA 24: Tensão Normal na Seção do Meio do Vão da Viga BT-72-6,3

FONTE: Autoria Própria (2017).



[a] Balanço com efeito estabilizante

[b] Balanço com efeito instabilizante

FIGURA 25: Influência do comprimento dos balanços no comportamento da viga.

FONTE: Lima (2002).

4.5 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E DIMENSÕES DA MESA INFERIOR NO COMPORTAMENTO GLOBAL PARA MESMA EXCENTRICIDADE LATERAL INICIAL

Conforme já mencionado, as vigas BT-77-3,18 e BT-72-3,15, possuem praticamente as mesmas características geométricas, inclusive excentricidades próximas. A altura da mesa inferior da viga BT-77 é 12 cm maior que da viga BT-72, alterando a posição do centro de gravidade da viga, que na BT-77-3,18 está em 94,654 cm e na BT-72-3,15 a 95,822 cm a partir da base da viga.

De acordo com Herrando (2015), o aumento da altura da mesa inferior contribui satisfatoriamente para a estabilidade lateral, pois o efeito de abaixar a posição do centro de gravidade da peça contribui para diminuir o efeito de rotação de corpo rígido da viga, além de aumentar o momento de inércia lateral. A observação de Herrando (2015) foi constatada neste trabalho, pois o aumento da altura da mesa inferior gerou resultados menos críticos que os alcançados pela viga BT-72.

Quanto à rotação da seção do meio do vão (Tabela 14), os desvios de posicionamento das alças de içamento na seção transversal do apoio influenciam significativamente no giro (com e sem

balanços). Entretanto, a variação é maior na situação crítica sem balanços, chegando a apresentar rotação cerca de 10 vezes maior na situação C0% em relação a C10%. Os resultados da Tabela 14 mostram a pequena variação da mudança do CG da peça no caso analisado. A variação das tensões normais na seção do meio do vão sugere a importância do posicionamento dos cabos, especialmente quanto às variações nas tensões de tração, que são críticas para o concreto (Tabela 15).

4.6 INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE LATERAL INICIAL NO COMPORTAMENTO GLOBAL

A viga BT-72 foi analisada neste trabalho com duas excentricidades laterais iniciais, no valor de 3,15 cm e 6,3 cm, representando valores entre L/1350 e L/670. Vale observar que o PCI (2000) recomenda considerar excentricidades iniciais em torno de L/1000 nas análises de estabilidade lateral.

Quanto aos deslocamentos impostos a fim de obter a posição de equilíbrio da viga, observa-se que no caso de excentricidade maior a rotação da seção transversal no apoio é maior. Os deslocamentos resultantes são em torno de 10% a 30% maiores nos casos com o dobro da excentricidade lateral (Tabela 18).

TABELA 14: Ângulo de giro e deslocamento resultante para as vigas BT-72-3,15 e BT-77-3,18.

Caso	BT-72-3,15		BT-77-3,18		Redução do ângulo de giro	Redução do deslocamento resultante
	Ângulo de giro (Graus)	Deslocamento resultante (mm)	Ângulo de giro (Graus)	Deslocamento resultante (mm)		
C0% a-	-6,7265	224,78	-5,0221	190,22	25,34%	15,38%
C0% a0	-3,5441	165,61	-2,7186	152,31	23,29%	8,03%
C0% a+	-0,1936	121,19	-0,1694	119,67	12,48%	1,25%
C5% a-	-3,501	139,76	-2,8908	133,2	17,43%	4,69%
C5% a0	-1,526	109,26	-1,2598	107,79	17,44%	1,35%
C5% a+	0,4528	97,227	0,3323	97,539	26,60%	0,32%
C10% a-	-2,3241	106,95	-1,9824	105,38	14,70%	1,47%
C10% a0	-0,6824	79,731	-0,5942	82,519	12,92%	3,50%
C10% a+	0,8052	80,762	0,8969	86,541	11,39%	7,16%

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 15: Tensão Normal na Seção do Meio do vão.				
Situações		BT-72-3,15	BT-77-3,18	Redução
		Tensão Normal (MPa)	Tensão Normal (MPa)	
C0% a-	Tração	16,5880	14,0120	15,53%
	Compressão	-19,5280	-17,5550	11,24%
C0% a0	Tração	14,0970	12,1630	15,90%
	Compressão	-15,2630	-14,4340	5,74%
C0% a+	Tração	11,4120	10,0790	13,23%
	Compressão	-10,6940	-10,9230	2,10%
C5% a-	Tração	11,2820	9,8587	14,44%
	Compressão	-12,1480	-11,7220	3,63%
C5% a0	Tração	10,0110	8,7933	13,85%
	Compressão	-10,0200	-9,9460	0,74%
C5% a+	Tração	9,4197	8,2104	14,73%
	Compressão	-8,7990	-8,0151	9,78%
C10% a-	Tração	7,9151	6,9622	13,69%
	Compressão	-8,1506	-8,0417	1,35%
C10% a0	Tração	6,9881	6,1878	12,93%
	Compressão	-6,6375	-6,7699	1,96%
C10% a+	Tração	7,2450	6,2579	15,77%
	Compressão	-6,8819	-6,7684	1,68%

FONTE: Autoria Própria (2017).

TABELA 18: Deslocamento resultante BT-72			
Situações	BT-72-3,15	BT-72-6,3	Aumento
	Deslocamento resultante (mm)	Deslocamento resultante (mm)	
C0% a-	224,7800	327,1400	31,29%
C0% a0	165,6100	230,5100	28,15%
C0% a+	121,1900	170,6900	29,00%
C5% a-	139,7600	176,5800	20,85%
C5% a0	109,2600	131,8700	17,15%
C5% a+	97,2270	104,3500	6,83%
C10% a-	106,9500	124,0600	13,79%
C10% a0	79,7310	92,1220	13,45%
C10% a+	80,7620	73,1210	10,45%

FONTE: Autoria Própria (2017).

Quanto às tensões normais, nas vigas BT-72-3,15 e BT-72-6,30, observa-se um aumento de seu valor nas análises com maior excentricidade, como esperado. Vale ressaltar que esse aumento ficou em torno de 10 a 20%, para a maioria dos casos, exceto na situação crítica sem balanços e com desvios favoráveis no

posicionamento das alças. Entretanto, nos casos com balanços, dependendo de sua magnitude e da combinação com os desvios, caso o efeito dos balanços seja instabilizante, é possível ocorrer redução das tensões no meio do vão, cuja influência é importante quantificar.

TABELA 19: Tensão Normal na Seção do Meio do Vão da Viga BT-72.

Situações		BT-72-3,15	BT-72-6,3	Aumento
		Tensão Normal (MPa)	Tensão Normal (MPa)	
C0% a-	Tração	16,5880	19,0740	13,03%
	Compressão	-19,5280	-23,9580	18,49%
C0% a0	Tração	14,0970	16,7360	15,77%
	Compressão	-15,2630	-19,9320	23,42%
C0% a+	Tração	11,4120	14,2430	19,88%
	Compressão	-10,6940	-15,6620	31,72%
C5% a-	Tração	11,2820	12,1900	7,45%
	Compressão	-12,1480	-13,7900	11,91%
C5% a0	Tração	10,0110	10,9390	8,48%
	Compressão	-10,0200	-11,6910	14,29%
C5% a+	Tração	9,4197	9,6670	2,56%
	Compressão	-8,7990	-9,5622	7,98%
C10% a-	Tração	7,9151	8,2549	4,12%
	Compressão	-8,1506	-8,7941	7,32%
C10% a0	Tração	6,9881	7,4913	6,72%
	Compressão	-6,6375	-7,5429	12,00%
C10% a+	Tração	7,2450	6,8910	-5,14%
	Compressão	-6,8819	-6,2880	9,44%

FONTE: Autoria Própria (2017).

Para a viga BT-72-3,15, nas situações das alças na posição C5%a+ e C10%a+, a posição de equilíbrio encontrada foi em sentido contrário à curvatura. Entretanto, este comportamento para a viga com maior excentricidade (BT-72-6,3) se verificou apenas na situação com maior balanço, no caso C10%a+.

Observa-se que a excentricidade lateral influencia diretamente no comportamento da viga durante o içamento, sugerindo verificar criteriosamente a posição final das alças após a moldagem da viga, a fim de quantificar o efeito dos desvios destas na rotação das seções durante o manuseio.

5. CONCLUSÃO

As análises desenvolvidas neste trabalho mostram a influência do posicionamento dos cabos e seus desvios na rotação da seção transversal associada a posição final de equilíbrio da viga.

O cerne do trabalho consiste em encontrar a configuração deformada da viga que equilibra os momentos dados pelas porções da viga

que estão fora do plano vertical de posicionamento dos cabos. A rotação das seções transversais resulta em uma posição de equilíbrio que equilibra os momentos gerados pela curvatura da viga.

Este trabalho considera, por meio da obtenção da posição de equilíbrio, a influência do posicionamento do centro de gravidade da seção transversal (viga I com mesas inferiores de alturas diferentes), a presença de excentricidade lateral inicial, o comprimento dos balanços e o desvio de posicionamento das alças de içamento. São obtidos numericamente as rotações, deslocamentos e tensões normais. Baseado nas análises desenvolvidas, as principais conclusões podem ser agrupadas como segue:

- a) 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. Os resultados dos estudos numéricos mostram que as condições de içamento são mais seguras quando o manuseio é realizado com balanços e com alças no sentido contrário à curvatura.

Entretanto, o comprimento do balanço deve ser estudado com cautela no caso de vigas protendidas;

- b) A consideração dos desvios das alças de içamento mostrou a importância da consideração desse tipo de erro de posicionamento, bem como sua influência nas rotações e deslocamentos da posição de equilíbrio. Como esperado, os desvios podem gerar efeitos favoráveis e desfavoráveis, devendo ser levados em conta nas análises de içamento. Nas análises, as variações decorrentes destes desvios na rotação provocam aumentos superiores ao dobro do giro na seção do meio do vão comparadas a situação sem desvios;
- c) Com relação ao deslocamento do centroide da seção transversal da viga, com o aumento da altura da mesa inferior, pode-se perceber que o consequente aumento do momento de inércia lateral provoca a redução dos deslocamentos e rotações, chegando a 15% de redução nos deslocamentos e tensões, e diminuição de até 25% no valor da rotação da viga, na situação mais crítica sem balanços e com desvios desfavoráveis das alças de içamento;
- d) O aumento da excentricidade lateral inicial deve ser observado com cautela, podendo provocar acréscimos de tensões de até 30%, nos casos críticos sem balanços.

Destaca-se, nesse trabalho, a preocupação com a segurança estrutural de vigas nas fases transitórias. As análises apresentadas mostram que as tensões, deslocamentos e ângulos são críticos, podendo, inclusive, em casos extremos, levar a viga ao colapso. No mais, a reduzida rigidez lateral é uma característica de vigas longas e esbeltas que precisa ser considerada durante o manuseio, quando os vínculos são incapazes de impedir as rotações nos apoios, desencadeando a possibilidade de tombamento.

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 como a modificação dos pontos de içamento.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudo de iniciação científica no nível de Graduação a mim, Igor Gabriel Ribeiro Cardoso Evangelista. Agradeço também a Prof. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima pela excelente orientação e contribuição, não somente neste trabalho como na vida profissional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARDOSO, M.T.S.A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas sobre apoios elastoméricos considerando o efeito das imperfeições geométricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- COJOCARU, R. **Lifting Analysis of Precast Prestressed Concrete Beams**. 94p. 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.
- GESUALDO, F. A. R. **Método dos elementos finitos - Notas de aula**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- HERRANDO, V. G. **Lateral Stability Analysis of Long Precast Prestressed Concrete Beams**. Dissertação (Mestrado) – Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2015.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais – 5ª Edição**. Tradução: Joaquim Pinheiro Nunes, Revisão Técnica: Wilson Carlos da Silva. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HILL, C. D.; DICK, J. S.; TADROS, M. K. (2009). **PCI Advisory on I-Girder Stability during Handling and Construction.** Safety and Serviceability, Aspire Magazine, Winter 2009.

KRAHL, P. A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas em situações transitórias.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

LIMA, M. C. V. **Instabilidade lateral das vigas pré-moldadas em serviço e durante a fase transitória.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

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.

PLAUT, R. H.; MOEN, C. D. **Analysis of Elastic, Doubly Symmetric, Horizontally Curved Beams during Lifting.** Journal of Structural Engineering, v. 139, n. 1, p. 39-46, jan., 2013

PCI Committee on Tolerances. **PCI Tolerance Manual for Precast and Prestressed Concrete Construction.** 1st ed. Chicago, IL: PCI, 2000.