

EFEITO DAS FORMAS DE IÇAMENTO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO

Luiz Flávio de Queiroz¹, Maria Teresa Santos do Amaral Cardoso²,

Maria Cristina Vidigal de Lima³

RESUMO

Uma das características próprias de elementos pré-moldados de concreto é a existência de fases transitórias durante sua vida útil. Os esforços próprios dessas fases podem gerar problemas relacionados à estabilidade lateral especialmente em vigas longas, esbeltas e que apresentam imperfeições iniciais. Nesse sentido pretende-se, neste trabalho, avaliar a influência de variáveis adotadas numa das fases transitórias: o içamento. Conhecendo as características mecânicas e geométricas de vigas padronizadas e também o valor, medido em campo, de suas imperfeições iniciais, analisaram-se: esforços, deslocamentos e rotações, para diferentes comprimentos de balanço e inclinação dos cabos de içamento, utilizando a planilha eletrônica VT Lifting Analysis (2013). As análises mostraram que a suspensão na ausência de balanços interfere consideravelmente nos esforços, deslocamentos e rotações. Verificou-se, ainda, uma tendência no comportamento estrutural das diferentes vigas quando foram analisados em conjunto todos os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidade lateral. Vigas pré-moldadas. Içamento.

¹Aluno do curso de graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), lzfoqz@gmail.com

²Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, FECIV, UFU, mariateresasacardoso@gmail.com

³Doutora, Professora Associada 4, FECIV, UFU, macris@ufu.br

1. INTRODUÇÃO

A grande preocupação envolvendo vigas de concreto pré-moldado envolve sua estabilidade lateral durante as fases transitórias: içamento, transporte e sobre apoios, antes de serem executadas as ligações permanentes e sem nenhum contraventamento. Atuam na estrutura esforços próprios dessas fases não previstos no seu dimensionamento. Deve-se considerar ainda, na maioria dos casos, que esses esforços ocorrem quando o concreto não atingiu sua resistência de projeto e as elevadas tensões de tração podem comprometer sua capacidade estrutural, prejudicando o desempenho da viga durante sua vida útil.

Para vigas longas e esbeltas a situação é mais crítica. Destinadas a vencer grandes vãos, como em pontes, viadutos e estruturas de grande porte, elas apresentam elevada altura e grande comprimento. A fim de reduzir seu peso e atender às especificações dos dispositivos de içamento e dos veículos de transporte, as seções transversais cada vez mais otimizadas tem apresentado considerável esbeltez. Sabe-se que vigas de moderada e elevada esbeltez estão sujeitas aos efeitos de instabilidade lateral próprios das dimensões de sua seção transversal (GIRIJA; MENON, 2011).

É importante ressaltar também a influência das imperfeições geométricas da viga na sua estabilidade lateral. Erros ou falhas inevitáveis na concretagem, na aplicação da protensão e no posicionamento das alças de içamento podem dar origem a essas imperfeições, que contribuem para a instabilidade lateral das vigas esbeltas, pois criam excentricidades adicionais que intensificam os efeitos decorrentes das fases transitórias. Inicialmente, a viga apresenta fissuras devido a maiores esforços de tração na mesa superior, reduzindo sua rigidez. Em casos mais graves, a presença das imperfeições geométricas em conjunto com algumas solicitações (como o vento) pode conferir à viga uma configuração muito instável e, possivelmente, levar ao colapso. Nesse sentido, tendo em vista o registro na literatura de acidentes relacionados à estabilidade

lateral de vigas pré-moldadas, pretende-se avaliar a influência de variáveis do içamento, a saber: comprimento dos balanços e inclinação dos cabos de suspensão. Do trabalho de Cojocarú (2012), foram obtidas as medidas de imperfeições geométricas iniciais em 124 vigas utilizadas na análise.

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência de diferentes formas de içamento no comportamento estrutural de vigas. Foram considerados diferentes comprimentos de balanço e ângulo de inclinação dos cabos de suspensão. São comparados os esforços, deslocamentos e rotações entre as situações e condições impostas, a fim de conhecer a variável que mais influencia o comportamento da viga na fase de suspensão.

Para avaliar os parâmetros e sua influência na estabilidade da viga, foi utilizada a planilha VT Lifting Analysis (2013), desenvolvida a partir dos estudos de Plaut e Moen (2013), que fornece os esforços (forças e momentos), deslocamentos (horizontal e vertical) e rotações (giro de corpo rígido e torção) no içamento, de acordo com as propriedades físicas dos materiais e dimensões da viga.

3. JUSTIFICATIVA

Embora a verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas não seja um dos principais pontos, quando do seu dimensionamento, alguns problemas aconteceram e colocaram em evidência a necessidade de novos estudos acerca do assunto (MASSEY; WALTER, 1969).

Um evento marcante no cenário regional ocorreu em 2014 no km 608 da BR-365 próximo à cidade de Uberlândia/MG. O acidente levou à morte um trabalhador que auxiliava a montagem das vigas. Uma viga que media 35 m e pesava 60 t caiu no momento em que outra foi colocada sobre os apoios (Figura 1). Na literatura encontram-se outros relatos de acidentes, como os apresentados por Tremblay e Mitchell (2006), Oesterle et al. (2007) e Bairán e Cladera (2014).

Figura 1 – Queda de vigas na BR-365

Fonte: Jornal Correio de Uberlândia (2015).

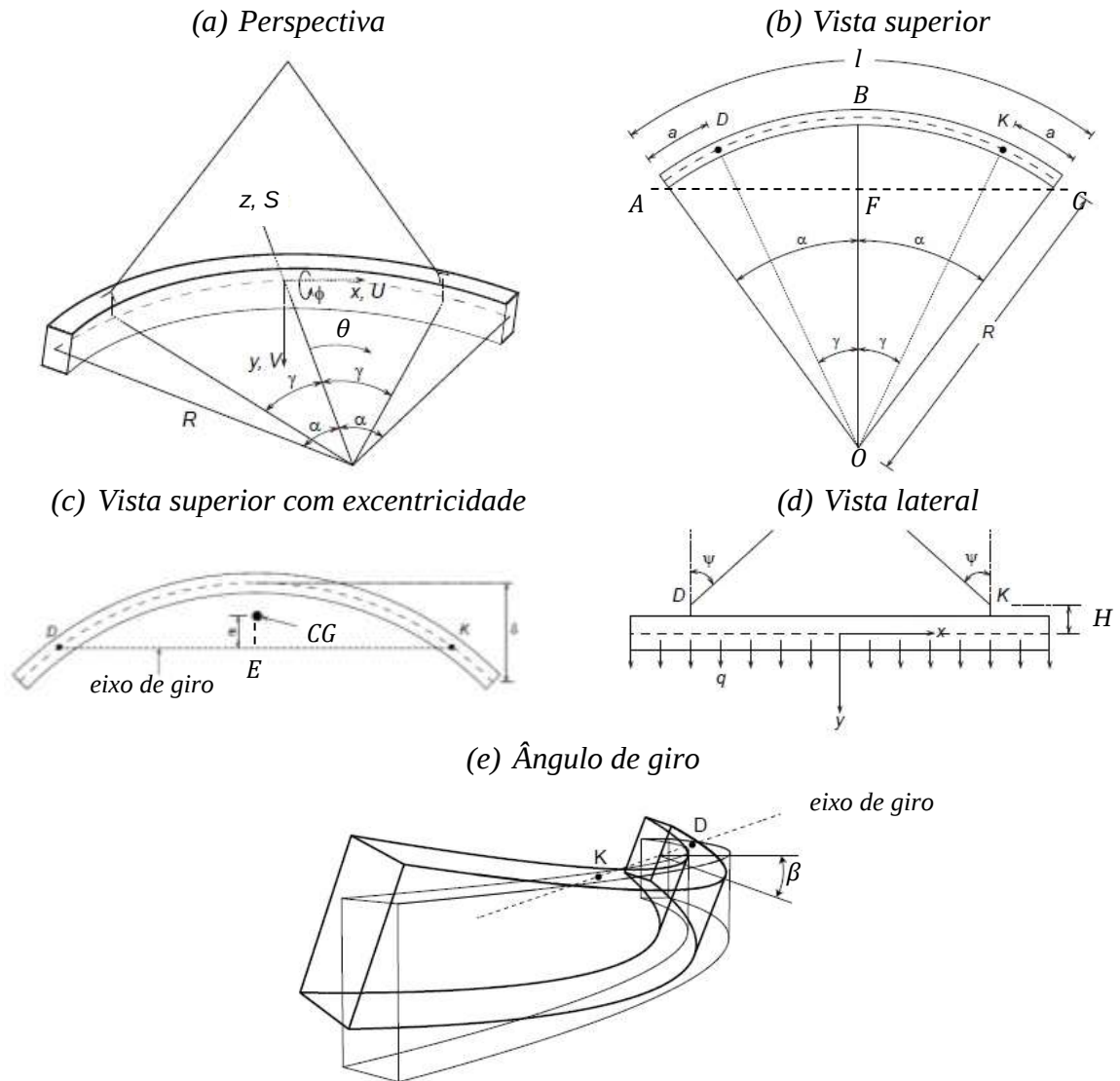
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos tomados como referência deste artigo foram desenvolvidos por Plaut e Moen (2013), com o objetivo de conhecer os esforços, deslocamentos e rotações que atuavam em vigas durante o içamento. A preocupação dos autores era a suspensão de vigas curvas com o uso de cabos retos e inclinados na presença e ausência de balanços. Em seu estudo, os autores consideraram a viga horizontalmente curva com raio de curvatura muito grande. Inicialmente, Plaut e Moen (2013) consideraram a seção transversal duplamente simétrica e com centro de gravidade e de cisalhamento na mesma posição. O material foi admitido homogêneo e com comportamento elástico linear. Não foram considerados esforços de protensão.

A análise conduzida por Plaut e Moen (2013) considerou o problema simétrico em relação à metade do vão da viga, como mostrado na Figura 2. Na Figura 2(a), tem-se a viga em perspectiva. A vista superior pode ser observada na Figura 2(b) e, na Figura 2(c), tem-se a viga curva com destaque à sua excentricidade. Na Figura 2(d), está ilustrada a vista lateral com a definição da inclinação dos cabos e, na Figura 2(e), o ângulo de giro de corpo rígido em perspectiva.

Cojocarú (2012) apresenta em seu trabalho os valores de imperfeição geométrica inicial medida em campo em 128 vigas e de desvios das alças de içamento em 10 vigas. Os valores das imperfeições iniciais medidos são utilizados neste trabalho.

Figura 2 – Viga curva e apresentação das variáveis adotadas



Fonte: Adaptado de 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 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 menor inércia da viga; S é o deslocamento na direção do eixo de maior inércia da viga.

Na literatura nacional, destacam-se os trabalhos de Lima (1995), Lima (2002) e Krahll (2014). Lima (1995) trabalhou com a formulação analítica para a carga crítica de instabilidade e estimou seus valores para a fase de içamento e para a viga sobre apoios deformáveis e indeformáveis à torção. Lima (2002) analisou numérica e experimentalmente vigas sujeitas a tombamento lateral, simulando o comportamento dessas vigas sob flexão bi-lateral e torção. Krahll (2014) apresentou formulações para o cálculo da carga crítica de instabilidade lateral, do momento crítico e do fator de segurança.

5. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM O IÇAMENTO

Para avaliar a influência de diferentes características no içamento de vigas, foram considerados diferentes comprimentos de balanço (sem balanços e com balanços de 5%, 7,5%, 10% e 12,5% do comprimento total da viga) e ângulo de inclinação dos cabos (cabos retos – 0° – e cabos inclinados a 15° , 30° e 45°). As variáveis foram analisadas separadamente. Foi considerada uma situação inicial (situação 0) como referência (Tabela 1). Nesse sentido, as situações 1, 2 e 3 têm como objetivo avaliar a influência da inclinação dos cabos no içamento e as de número 4, 5, 6 e 7, o efeito do comprimento dos balanços nos esforços, deslocamentos e rotações.

Considerando todas as variáveis e os valores adotados, as diferentes seções transversais e os valores medidos em campo de imperfeição inicial, foram obtidos 992 resultados para cada esforço, deslocamento e rotação.

Tabela 1 – Variáveis adotadas nas situações analisadas

Variável em análise	Ref.	Inclinação dos cabos			Comprimento dos balanços			
Situação	0	1	2	3	4	5	6	7
Inclinação dos cabos (graus)	0°	15°	30°	45°	0°	0°	0°	0°
Comprimento dos balanços (a/L)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0	0,075	0,10	0,125

Fonte: Autores (2017).

Tabela 2 – Vigas e imperfeições geométricas iniciais

N.	Viga Tipo	Comp. ($\cdot 10^{-2}$ m)	Imp. inicial ($\cdot 10^{-2}$ m)	N.	Viga Tipo	Comp. ($\cdot 10^{-2}$ m)	Imp. inicial ($\cdot 10^{-2}$ m)
1	77 in. Bulb Tee	4239,5	1,85	65	72 in. Bulb Tee	4239,5	6,30
2	77 in. Bulb Tee	4239,5	0,97	66	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,25
3	77 in. Bulb Tee	4239,5	3,18	67	72 in. Bulb Tee	4239,5	0,97
4	77 in. Bulb Tee	4239,5	1,96	68	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,35
5	77 in. Bulb Tee	4239,5	2,84	69	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,24
6	77 in. Bulb Tee	4239,5	2,11	70	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,90
7	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	1,12	71	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,57
8	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	2,67	72	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,62
9	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	4,34	73	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,10
10	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	2,34	74	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,24
11	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	5,61	75	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,41
12	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	3,40	76	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,17
13	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	0,97	77	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,88
14	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	3,53	78	72 in. Bulb Tee	4239,5	5,87
15	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	5,21	79	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,09
16	74 in. Bulb Tee (Modified)	3782	1,30	80	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,54
17	72 in. Bulb Tee	3721	3,00	81	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,19
18	72 in. Bulb Tee	3721	3,66	82	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,87
19	72 in. Bulb Tee	3721	3,99	83	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,54
20	72 in. Bulb Tee	3721	1,32	84	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,22
21	72 in. Bulb Tee	3721	3,40	85	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,46
22	72 in. Bulb Tee	3721	0,61	86	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,34
23	72 in. Bulb Tee	3782	2,49	87	72 in. Bulb Tee	4239,5	5,77
24	72 in. Bulb Tee	3873,5	2,13	88	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,30
25	72 in. Bulb Tee	3873,5	3,73	89	72 in. Bulb Tee	4239,5	5,84
26	72 in. Bulb Tee	3873,5	4,39	90	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,56
27	72 in. Bulb Tee	3934,5	4,67	91	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,08
28	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,27	92	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,02
29	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,40	93	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,96
30	72 in. Bulb Tee	3934,5	2,46	94	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,54
31	72 in. Bulb Tee	3934,5	5,08	95	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,35
32	72 in. Bulb Tee	3934,5	7,11	96	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,79
33	72 in. Bulb Tee	3934,5	4,80	97	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,06
34	72 in. Bulb Tee	3934,5	2,08	98	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,18
35	72 in. Bulb Tee	3934,5	4,62	99	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,39
36	72 in. Bulb Tee	3934,5	3,48	100	72 in. Bulb Tee	4239,5	0,76
37	72 in. Bulb Tee	3934,5	8,33	101	72 in. Bulb Tee	4239,5	0,84
38	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,45	102	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,63
39	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,09	103	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,42
40	72 in. Bulb Tee	3934,5	7,42	104	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,62
41	72 in. Bulb Tee	3934,5	2,13	105	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,35
42	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,78	106	72 in. Bulb Tee	4239,5	5,66
43	72 in. Bulb Tee	3934,5	4,45	107	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,21
44	72 in. Bulb Tee	3934,5	3,51	108	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,38
45	72 in. Bulb Tee	3934,5	0,56	109	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,90
46	72 in. Bulb Tee	3934,5	3,00	110	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,27
47	72 in. Bulb Tee	3934,5	0,61	111	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,86
48	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,22	112	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,40
49	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,09	113	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,55
50	72 in. Bulb Tee	3934,5	2,51	114	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	2,49
51	72 in. Bulb Tee	3934,5	3,02	115	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	2,31
52	72 in. Bulb Tee	3934,5	1,88	116	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	2,21
53	72 in. Bulb Tee	3934,5	5,23	117	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,17
54	72 in. Bulb Tee	3934,5	2,97	118	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,12
55	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,15	119	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,91
56	72 in. Bulb Tee	4239,5	5,28	120	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,65
57	72 in. Bulb Tee	4239,5	2,72	121	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,07
58	72 in. Bulb Tee	4239,5	0,91	122	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,85
59	72 in. Bulb Tee	4239,5	3,94	123	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	2,41
60	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,34	124	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,76
61	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,30	125	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,91
62	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,60	126	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,84
63	72 in. Bulb Tee	4239,5	4,88	127	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	0,91
64	72 in. Bulb Tee	4239,5	1,14	128	72 in. Bulb Tee (Modified)	3690,5	1,96

Fonte: Autores (2017).

Para as imperfeições geométricas iniciais, foram utilizados os valores medidos por Cojocarú (2012) e apresentados em seu trabalho. O autor mediu a imperfeição inicial das 128 vigas apresentadas na Tabela 2. Foram desprezadas apenas quatro vigas (23 a 26) que não apresentariam comparações dentro do mesmo grupo.

As variáveis foram aplicadas a diferentes vigas (cujas geometrias estão agrupadas na Tabela 3) utilizando a planilha eletrônica VT Lifting Analysis (2013). Adotou-se concreto de resistência característica igual a 45 MPa, módulo de elasticidade $3,74 \times 10^7$ kPa, coeficiente de Poisson 0,25 e módulo de rigidez $1,56 \times 10^7$ kPa.

Tabela 3 – Características geométricas e mecânicas das vigas medidas por Cojocarú (2012)

PROPRIEDADES	TIPO DE VIGA					
	72 in PCI Bulb Tee 122 ft	72 in PCI Bulb Tee 129 ft	72 in PCI Bulb Tee 139 ft	72 in PCI Bulb Tee (Modified)	74 in PCI Bulb Tee (Modified)	77 in PCI Bulb Tee
Número de vigas medidas	6	28	56	18	10	6
Altura (h) (m)	1,83	1,83	1,83	1,83	1,88	1,96
Altura do centroide (y_{CG}) (m)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,965
Comprimento (L) (m)	37,2	39,3	42,4	36,9	37,8	42,4
Área (A) (m ²)	0,494	0,494	0,494	0,537	0,528	0,626
Maior momento de inércia (I_x) (m ⁴)	0,227	0,227	0,227	0,237	0,256	0,329
Menor momento de inércia (I_y) (m ⁴)	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$
Constante de empenamento (C_w) (m ⁶)	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$8,86 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-3}$	0,00
Constante de torção (J) (m ⁴)	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$5,46 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$
Peso próprio (w) (kN/10 ⁻² m)	0,124	0,124	0,124	0,134	0,132	0,157
Altura do CG ao eixo de giro (H) (m)	0,90	0,90	0,90	0,90	0,96	0,99

Fonte: Autores (2017).

Com as propriedades iniciais definidas, foram obtidos no meio do vão da viga: ângulo de giro de corpo rígido (β); ângulo de torção (φ); momento fletor na direção da menor inércia (M_y); momento fletor na direção da maior inércia (M_z); deslocamentos vertical (V) e horizontal (W). Na seção do ponto de içamento, foi calculada a força normal (N_x).

5.1 Inclinação dos cabos de içamento

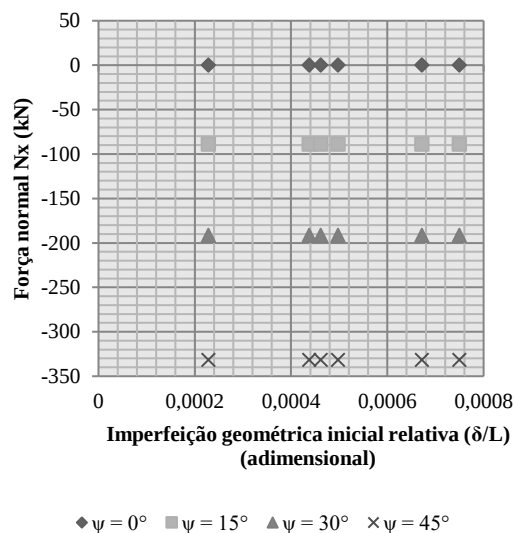
Nesta Seção, são analisadas as situações 0, 1, 2 e 3 da Tabela 1, ou seja, mantidos fixos o comprimento dos balanços ($a/L = 5\%$), variando apenas a inclinação dos cabos de içamento. Para as 124 vigas com suas respectivas excentricidades iniciais (Tabela 2), combinadas com as

inclinações dos cabos, totalizam 496 resultados.

Percebeu-se, ao analisar cada grupo, que o comportamento dentro de um mesmo conjunto de vigas manteve-se semelhante aos demais, com diferenças na magnitude dos esforços, deslocamentos e rotações.

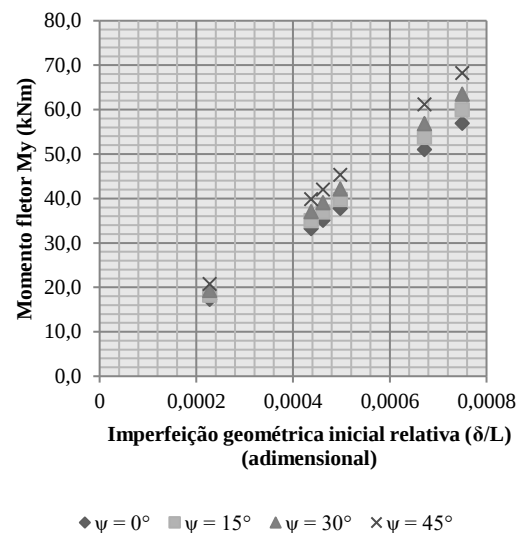
Assim, tomando como base o grupo de vigas de maior comprimento de vão e maior altura da seção transversal (seis vigas 77 in PCI Bulb Tee), verificou-se que a inclinação dos cabos apresentou maior influência na força normal e no momento fletor M_y , como é apresentado nas 24 situações das Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

Figura 3 – Força normal $N_x \times$ ângulo de inclinação dos cabos no içamento



Fonte: Autores (2017).

Figura 4 – Momento fletor $M_y \times$ ângulo de inclinação dos cabos no içamento



Fonte: Autores (2017).

Da Figura 3, percebe-se que a magnitude da imperfeição geométrica inicial não influenciou consideravelmente a força normal quando se compara uma mesma inclinação dos cabos no içamento. No entanto, o içamento com cabos inclinados a 45° pode conferir à viga forças normais até 3,5 vezes maiores em relação ao içamento com cabos inclinados a 15° . Sabe-se que, quanto maior a inclinação dos cabos, maior será o valor da componente horizontal da sua força de tração, comprimindo ainda mais a viga.

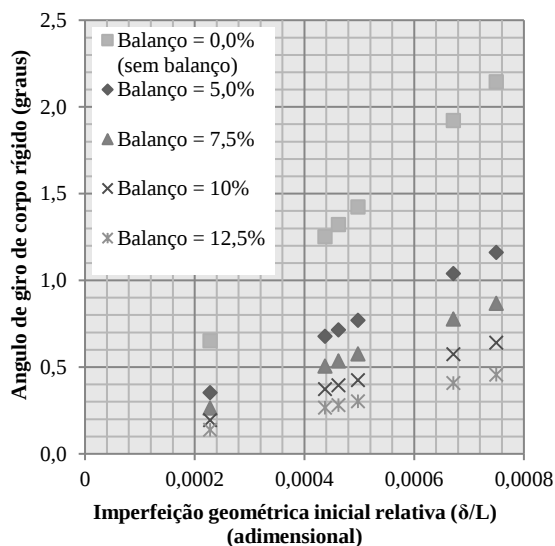
Com relação ao momento fletor M_y , apresentado na Figura 4, o aumento das imperfeições geométricas iniciais da viga elevou esse esforço para todas as inclinações de cabos no içamento. Para a maior imperfeição registrada para a viga 77 in PCI Bulb Tee, a suspensão com cabos inclinados a 45° é capaz de aumentar o momento fletor M_y de $56 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (na suspensão com cabos retos) para $68 \text{ kN}\cdot\text{m}$, ou seja, em torno de 20% maior.

5.2 Comprimento dos balanços no içamento

A influência do comprimento dos balanços no içamento é representada pelas situações 0, 4, 5, 6 e 7 da Tabela 1, totalizando 620 resultados para as 124 vigas (Tabela 2). Assim, o içamento é realizado com cabos retos.

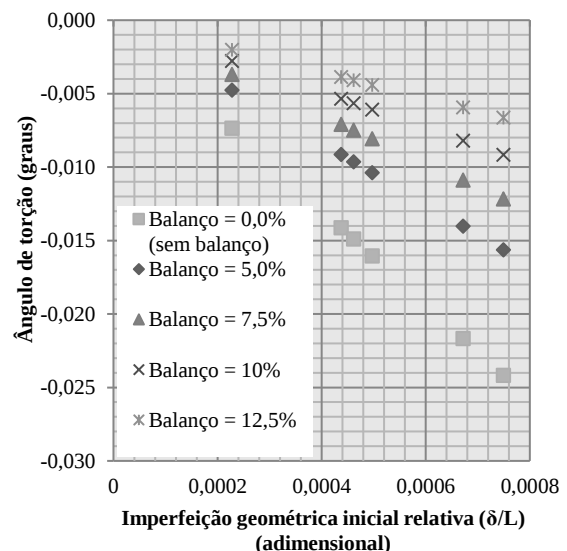
Para a análise das seis vigas 77 in PCI Bulb Tee são apresentados os ângulos de giro de corpo rígido (Figura 5) e de torção (Figura 6), embora todos os esforços e deslocamentos tenham sido influenciados pelo comprimento dos balanços.

Figura 5 – Ângulo de giro de corpo rígido β × comprimento do balanço



Fonte: Autores (2017).

Figura 6 – Ângulo de torção φ × comprimento do balanço



Fonte: Autores (2017).

Na Figura 5, verifica-se que o içamento na ausência de balanços é a situação mais crítica, que apresenta maior ângulo de giro de corpo rígido da seção transversal. Na medida em que se

trabalha com comprimentos de balanços maiores, o giro de corpo rígido diminui e observa-se uma variação menor desse ângulo em relação às imperfeições geométricas iniciais analisadas. A diferença do ângulo de giro de corpo rígido entre o içamento sem balanços e com balanços de 12,5% do comprimento total da viga pode chegar a até 4,8 vezes maior para a viga com maior imperfeição inicial.

Percebe-se a mesma tendência verificada para o giro de corpo rígido no ângulo de torção, apresentado na Figura 6. As imperfeições iniciais na viga e a redução do comprimento dos balanços no içamento aumentaram o giro de torção na seção transversal do meio do vão da viga. Para a menor imperfeição inicial, o içamento com balanços de 12,5% do comprimento total da viga gerou um giro de torção correspondente a um quarto do giro de torção produzido pelo içamento sem balanços. É importante destacar que giro de corpo rígido é bem superior à rotação por torção quando as análises consideram a variação do comprimento do balanço.

5.3 Momentos de inércia da seção transversal

Nesta Seção, são consideradas duas vigas com mesmo comprimento (4236,7 cm) e mesma imperfeição geométrica inicial relativa ($\delta/L = 0,0007$), mas momentos de inércia diferentes. Uma viga pertence ao grupo 77 in PCI Bulb Tee e a outra ao grupo de 72 in PCI Bulb Tee 139 ft.

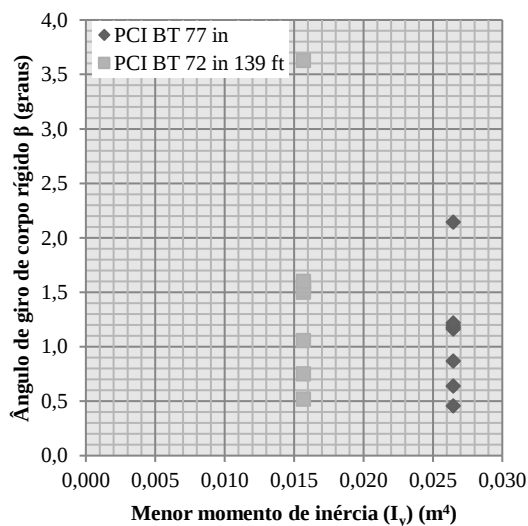
A análise das duas vigas, com as oito situações descritas na Tabela 1, totalizam 16 resultados, ou seja: variação do comprimento dos balanços e da inclinação dos cabos.

As variáveis mais expressivas para essa análise foram o ângulo de giro de corpo rígido da seção transversal e o deslocamento horizontal. Para o giro de corpo rígido (Figura 7), em casos de inércia maior, o ângulo é proporcionalmente menor. O maior ângulo de giro para os dois valores de momento de inércia analisados, ocorre no içamento sem balanços com cabos retos. Para a viga de menor inércia (72 in PCI Bulb Tee 139 ft), a variação do giro de corpo rígido no meio do vão foi em torno de sete vezes maior comparada à situação de cabo reto com balanço de 12,5%

do comprimento da viga. Para a viga de 77 in PCI Bulb Tee (maior inércia) a diferença é de quatro vezes. A diferença do valor do momento de inércia das duas vigas é de 1,7. Assim, pode-se concluir que o aumento do momento de inércia é praticamente igual à redução do ângulo de giro de corpo rígido.

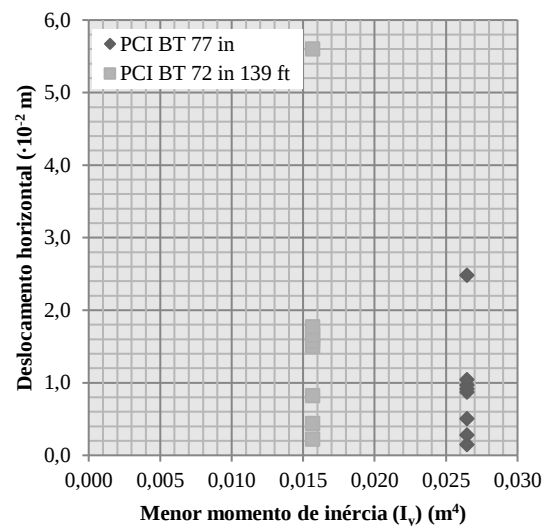
Para o deslocamento horizontal (Figura 8), a viga de maior inércia (77 in PCI Bulb Tee) apresenta menores deslocamentos. Semelhante ao observado para o giro de corpo rígido, o maior deslocamento horizontal ocorreu no içamento sem balanços com cabos retos. Finalmente, comparando a contribuição do aumento do momento inércia, resulta uma diminuição do deslocamento horizontal em 2,3 vezes.

Figura 7 – Ângulo de giro de corpo rígido β $\times$ menor momento de inércia (I_y)



Fonte: Autores (2017).

Figura 8 – Deslocamento horizontal $\times$ menor momento de inércia (I_y)



Fonte: Autores (2017).

5.4 Comprimento das vigas

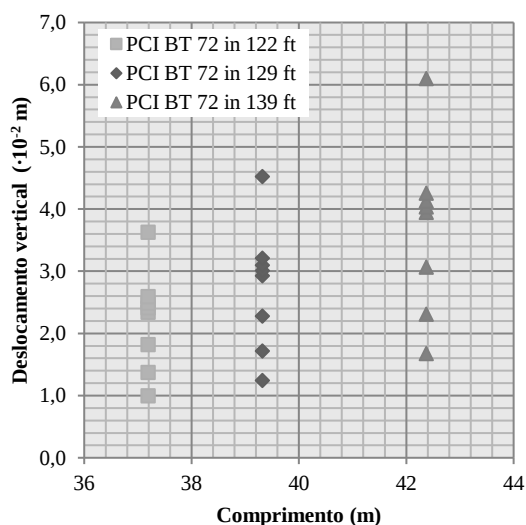
Nesta Seção, é analisada a viga 72 in PCI Bulb Tee (mesmo momento inércia) com comprimentos diferentes (122, 129 e 139 ft ou 37,19 m, 39,32 m e 42,37 m, respectivamente) e

mesmo valor de imperfeição inicial relativa ($\delta/L = 0,0009$). A análise dessa viga, com as oito situações descritas na Tabela 1, totalizam 24 resultados, considerando a variação do comprimento dos balanços e da inclinação dos cabos.

O deslocamento vertical (Figura 9) é diretamente proporcional ao comprimento da viga. Assim, como em situações anteriores, a situação mais crítica é encontrada no içamento com cabos retos e sem balanços. Entre a maior e a menor viga, tem-se um deslocamento vertical 1,7 vezes maior.

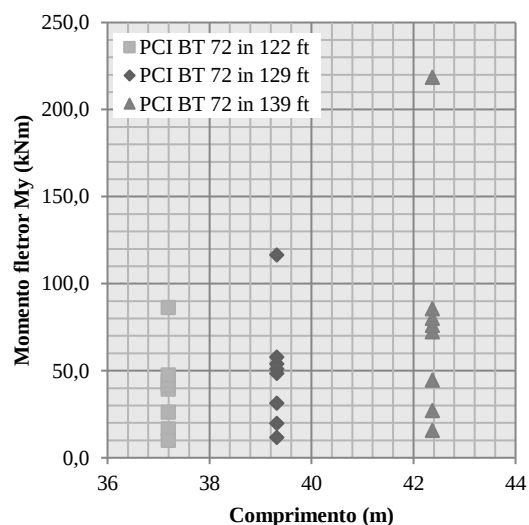
O momento fletor na direção da menor inércia M_y (Figura 10) é também diretamente afetado pela variação de comprimento da viga, encontrando-se os maiores valores para a viga de comprimento superior. Para os casos analisados, o içamento que gera menores momentos fletores é o realizado com cabos retos e balanços de 12,5% do comprimento do vão total (situação 7). Os maiores momentos fletores foram verificados para a suspensão com cabos retos sem balanços (situação 4). Para a viga de 37,19 m, o momento fletor M_y na situação 4 superou em, aproximadamente, nove vezes o da situação 7. Analogamente, para a viga de 42,37 m, esse aumento foi em torno de 14 vezes.

Figura 9 – Deslocamento vertical $\times$ comprimento da viga



Fonte: Autores (2017).

Figura 10 – Momento fletor $M_y \times$ comprimento da viga



Fonte: Autores (2017).

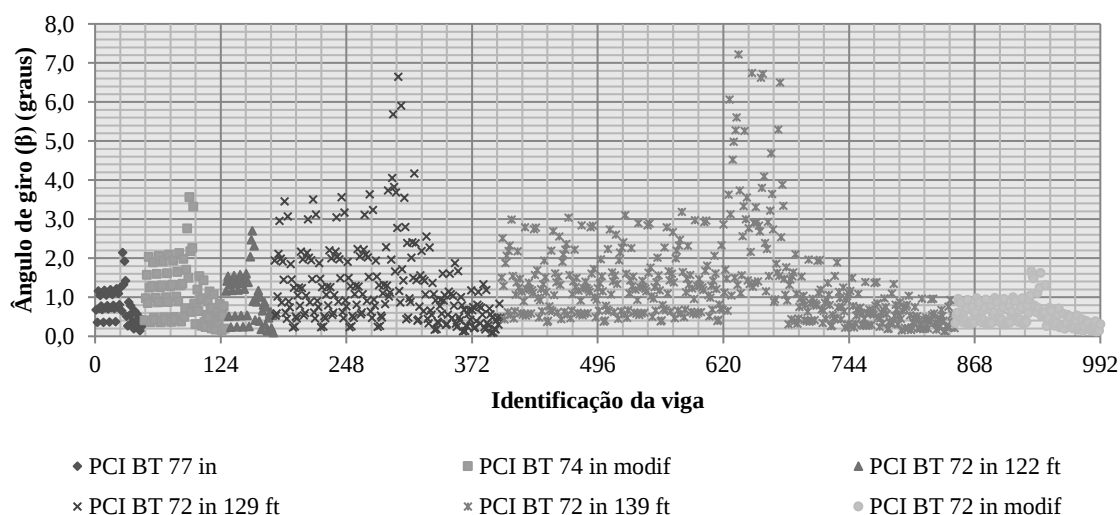
5.5 Análise global

Na análise global, consideraram-se em conjunto todos os casos analisados que somam 992 resultados. É possível perceber pelos gráficos apresentados nas Figura 11 a Figura 16, que existe uma tendência no comportamento de cada conjunto de vigas, diferenciando apenas a magnitude dos esforços, deslocamentos ou rotações analisadas.

O ângulo de giro de corpo rígido da seção transversal no meio do vão, apresentado na Figura 11, possui um valor máximo em cada conjunto de vigas. Esses valores máximos correspondem às simulações feitas para o içamento na ausência de balanços com cabos retos e para as vigas com maiores imperfeições geométricas iniciais medidas.

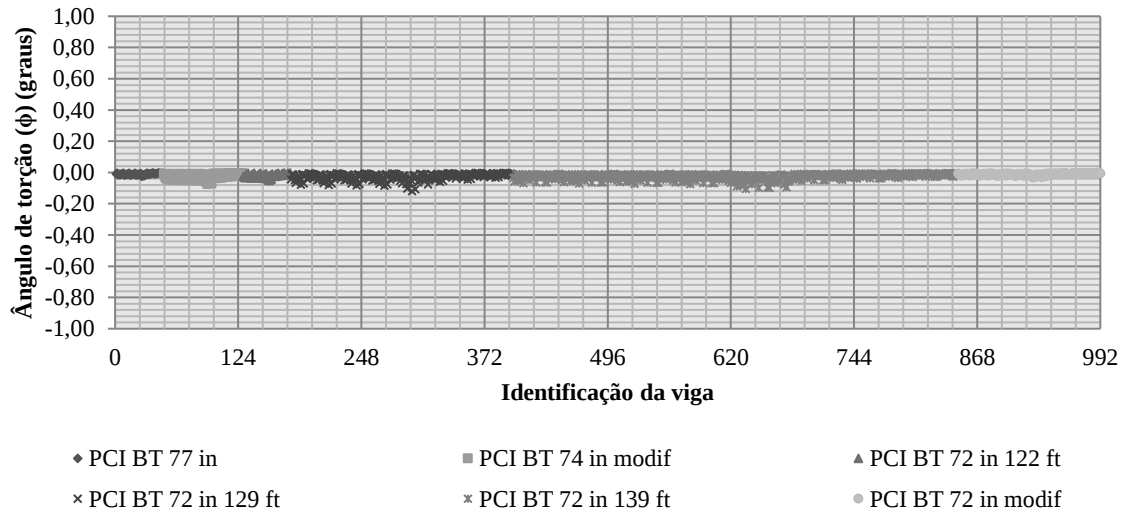
Na Figura 12, é apresentado o ângulo de torção da seção transversal no meio do vão da viga. As análises do ângulo de giro de torção foram desenvolvidas para as situações de cabos retos e inclinados, com e sem balanços. Todos os casos analisados geraram um ângulo de torção muito pequeno e próximo de zero, o que já havia sido verificado por Stratford e Burgoyne (1999). Segundo os autores, a rigidez à torção relativamente alta das vigas de concreto permite afirmar que a viga apresenta um giro de corpo rígido com uma variação muito pequena de torção ao longo do seu comprimento.

Figura 11 – Ângulo de giro de corpo rígido (β) no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

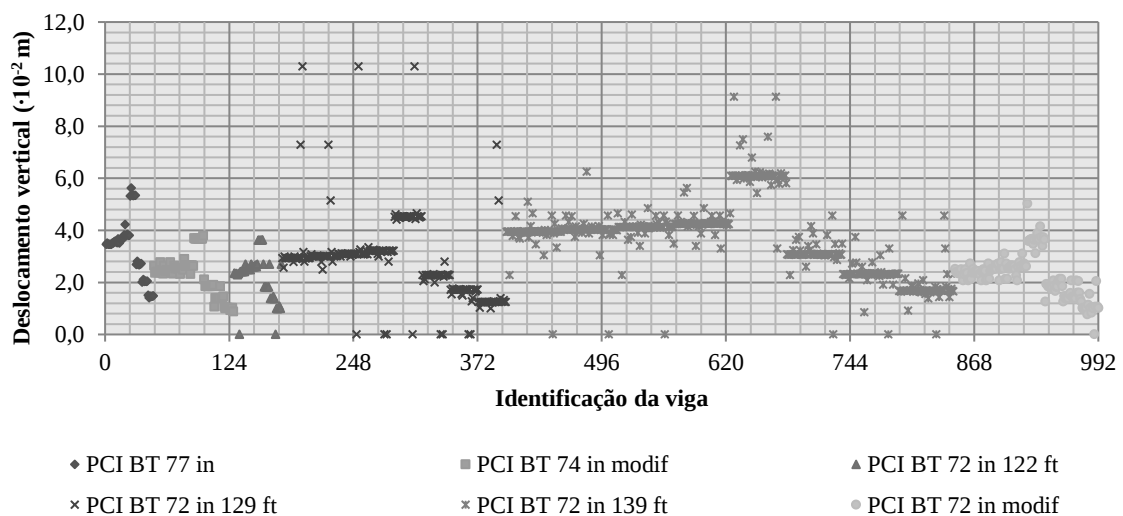
Figura 12 – Ângulo de torção (ϕ) no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

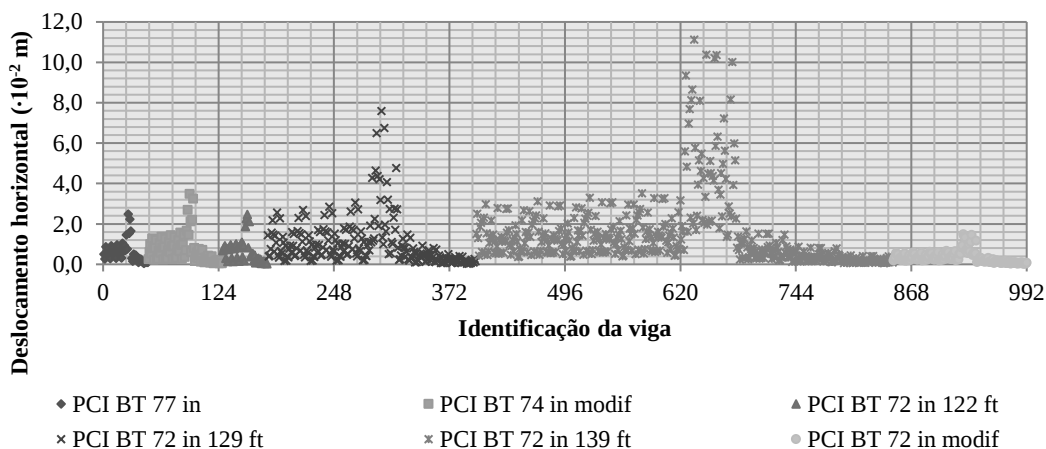
Na Figura 13 e na Figura 14, são apresentados todos os resultados relativos ao deslocamento vertical e ao deslocamento horizontal, respectivamente, no meio do vão da viga. Mais uma vez, é notado o efeito desfavorável do içamento na ausência de balanços. Os maiores deslocamentos verticais e horizontais verificados em cada conjunto de viga referem-se à suspensão sem balanços com cabos retos.

Figura 13 – Deslocamento vertical no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

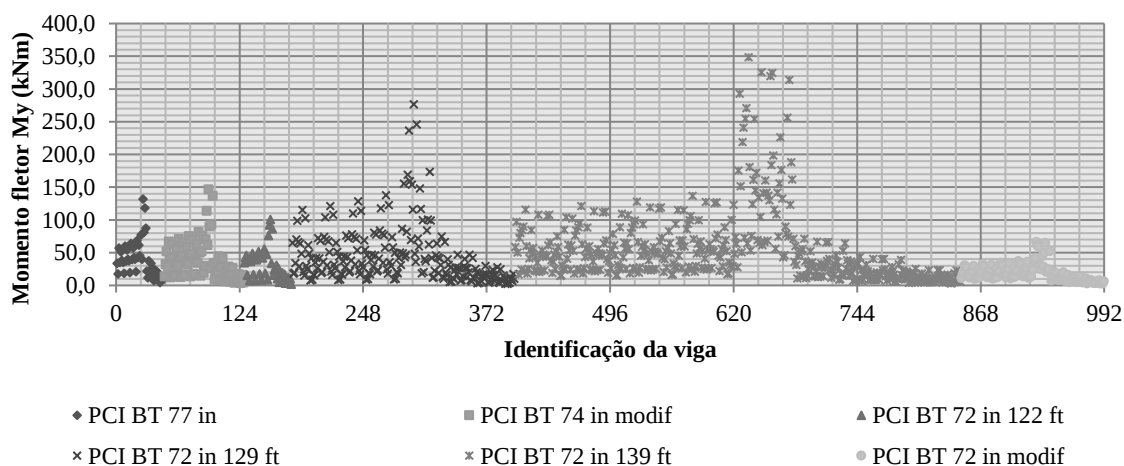
Figura 14 – Deslocamento horizontal no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

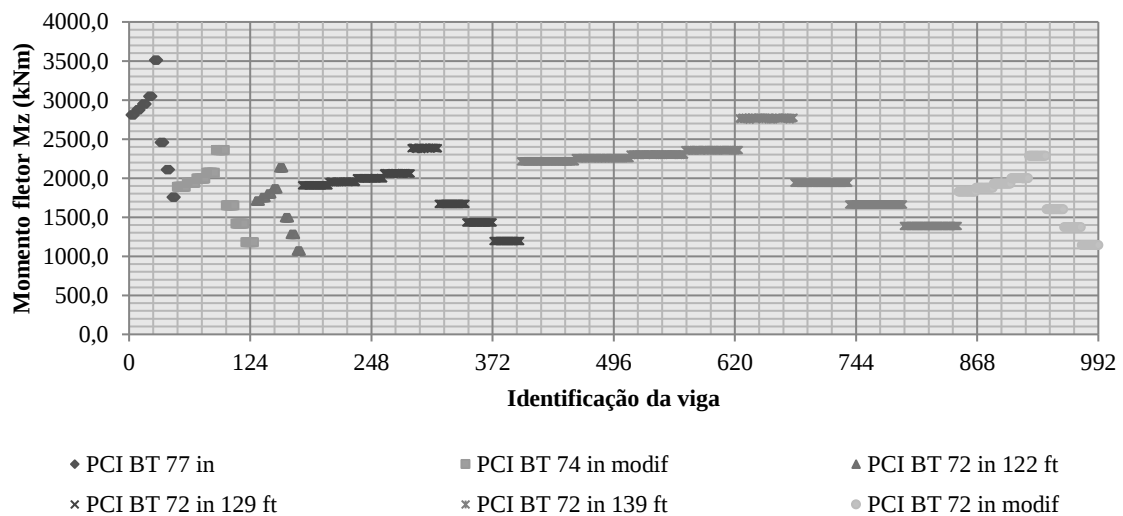
Os momentos fletores na direção da menor inércia (M_y) e na direção da maior inércia (M_z) são apresentados, respectivamente, na Figura 15 e na Figura 16. Os pontos de maiores momentos fletores em cada grupo de vigas correspondem às vigas com maiores imperfeições geométricas iniciais suspensas na ausência de balanços com cabos retos. Para o momento fletor M_z , pode-se perceber que não houve diferença significativa no esforço em virtude de maiores ou menores imperfeições iniciais, como o que ocorreu para o momento fletor M_y . Na maior inércia, as condições e formas de içamento foram as variáveis que mais afetaram a magnitude do momento fletor.

Figura 15 – Momento fletor na direção do eixo de menor inércia no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

Figura 16 – Momento fletor na direção do eixo de maior inércia no meio do vão das vigas



Fonte: Autores (2017).

6. CONCLUSÕES

O estudo da estabilidade lateral revela-se de extrema importância, sobretudo nas fases transitórias. A presença de solicitações não previstas no dimensionamento, a insuficiência dos contraventamentos temporários utilizados e a possibilidade de giro da viga são algumas das causas associadas ao colapso desses elementos, antes mesmo que entrem em serviço.

Neste trabalho, avaliou-se o içamento considerando as seguintes variáveis: presença ou ausência de balanços e suspensão com cabos retos ou inclinados. Foram avaliados os esforços (forças e momentos), deslocamentos (vertical e horizontal) e rotações (giro de corpo rígido e torção) através da planilha eletrônica VT Lifting Analysis (2013). As principais conclusões são:

- (a) Na análise de cada variável, percebeu-se que a inclinação dos cabos de içamento teve maior influência na força normal (como já era esperado, uma vez que a componente horizontal da força de tração no cabo comprime ainda mais a viga e intensifica o valor desse esforço) e no momento fletor na direção do eixo de menor inércia (M_y). Para a suspensão com $a/L = 5\%$, o momento fletor M_y pode ser em torno de 20% maior com cabos inclinados a 45° em relação a cabos retos;

- (b) O comprimento do balanço ou sua ausência no içamento foi a variável que afetou a maior quantidade de esforços, deslocamentos e ângulos. A suspensão sem balanços com cabos retos revelou ser a forma mais crítica para a viga em termos de ângulos de giro e de torção. Esse efeito é sentido ainda mais fortemente quando se trabalha com vigas de maiores imperfeições geométricas iniciais;
- (c) Os parâmetros mais influenciados pela variação de inércia da viga foram os deslocamentos (vertical e horizontal) e o ângulo de giro de corpo rígido. Vigas de seção mais robusta respondem melhor às condições de içamento. As situações mais desfavoráveis ocorreram para a suspensão sem balanços com cabos retos;
- (d) Com relação ao comprimento das vigas, as variáveis mais afetadas foram os deslocamentos, rotações e momentos. Os resultados são mais críticos para as peças de maior comprimento. Novamente, os valores mais desfavoráveis à estabilidade foram encontrados para o içamento sem balanços com cabos retos;
- (e) As análises globais permitiram conhecer em conjunto a resposta de todos os resultados e casos considerados. Verificou-se que as imperfeições geométricas iniciais não influenciam significativamente o momento fletor M_z , que é mais sensível às condições do içamento (como: a presença e ausência de balanços e a inclinação dos cabos). Percebeu-se também que o içamento sem balanços foi, mais uma vez, a situação que forneceu valores máximos para momentos fletores em torno dos eixos de menor e maior inércia, deslocamentos vertical e horizontal e ângulo de giro.

Das análises apresentadas neste artigo, algumas recomendações para o içamento podem ser sugeridas. Na possibilidade e na disponibilidade de equipamentos, aconselha-se utilizar cabos retos, pois diminuem os esforços de compressão na viga, existentes quando são adotados cabos inclinados. Ainda, os resultados apresentados mostraram que o içamento com balanços, mesmo

de pequeno comprimento, é muito favorável para o comportamento estrutural da viga, tendo em vista a necessidade de se verificarem esforços e deslocamentos no meio do vão.

Vale ressaltar que, neste trabalho, não foram analisadas as combinações de balanços com cabos inclinados, exceto para $a/L = 5\%$. Sabe-se que a consideração em conjunto de cabos inclinados sem balanços é ainda mais desfavorável do que as situações analisadas.

Finalmente, destaca-se a preocupação com a segurança estrutural de vigas nas fases transitórias. Os esforços e deslocamentos na direção da menor inércia são críticos nessas vigas. Em casos extremos, a baixa rigidez nessa direção, característica de vigas longas e esbeltas, pode não ser capaz de resistir a esses esforços e deslocamentos, levando a viga ao colapso.

REFERÊNCIAS

- BAIRAN, J. M.; CLADERA, A. Collapse of a precast concrete beam for a light roof. Importance of elastomeric bearing pads in the element's stability. **Engineering Failure Analysis**, v. 39, p. 188-199, apr., 2014.
- COJOCARU, R. **Lifting analysis of precast prestressed concrete beams**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2012.
- CORREIO DE UBERLÂNDIA. Acidente com viga na BR-365. Disponível em: <<http://www.correiodeuberlandia.com.br/fotos/acidente-com-viga-na-br-365/>>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- GIRIJA, K.; MENON, D. Reduction in flexural strength in rectangular RC beams due to slenderness. **Engineering Structures**, v. 33, n. 8, p. 2398-2406, aug., 2011.
- KRAHL, P. A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas em situações transitórias**. 2014. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- LIMA, M. C. V. **Instabilidade lateral das vigas pré-moldadas em regime de serviço e durante a fase transitória**. 1995. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- LIMA, M. C. V. **Contribuição ao estudo da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- MASSEY, C.; WALTER, K. R. The Lateral Stability of a Reinforced Concrete Beam Supporting a Concentrated Load. **Building Science**, v. 3, n. 3, p. 183-187, jan., 1969.
- 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.
- STRATFORD, T. J.; BURGOYNE, C. J. Lateral stability of long precast concrete beams. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Bridges**, v. 124, p. 169-180, may, 1999.

TREMBLAY, R.; MITCHELL, D. Collapse during Construction of a Precast Girder Bridge. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 20, n. 2, p. 113-125, may, 2006.
VT Lifting Analysis. **VT Lifting Analysis** spreadsheet. Download Metric units
<<http://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/23722>>, US units
<<http://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/23723>>, at the Virginia Tech Library's
VTechWorks institutional repository, 2013.

INFLUENCE OF LIFTING VARIABLES ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE BEAMS

ABSTRACT

One of the specific characteristics of precast concrete elements is the existence of transitional phases during their useful life. The stresses of these phases can generate problems related to lateral stability, especially in long, slender beams with initial imperfections. In this sense, this paper intends to evaluate the influence of variables adopted in one of the transitional phases: lifting. Knowing the mechanical and geometric characteristics of standard beams and also the measured field value of their initial imperfections, forces, moments, displacements and angles for different overhang lengths and inclination angle of cables were analyzed using the spreadsheet VT Lifting Analysis (2013). The analyzes showed that the suspension without overhangs interferes considerably in forces, moments, displacements and angles. There was also a trend in the behavior of the different beams when all the results obtained were analyzed together.

KEYWORDS: buckling, beams, lifting.

6. CONCLUSIONS

The study of lateral stability is extremely important, especially in transitory phases. The presence of stresses not foreseen in the design, the insufficiency of the temporary bracing and the possibility of the beam rolling are some of the causes associated with the collapse of these elements, before they even enter into service.

In this paper, it was evaluated the following lifting variables: presence or absence of overhangs and suspension with straight or inclined cables. Efforts (forces and moments), displacements (vertical and horizontal) and rotations (rigid body roll angle and twist angle) were evaluated

through the VT Lifting Analysis (2013) spreadsheet. The main conclusions are:

- (a) In the analysis of each variable, it was verified that the inclination angle of cables had greater influence on the normal force (as was already expected, since the horizontal component of the tensile force in the cable compresses the beam further and intensifies the value of this effort) and on the weak-axis bending moment (M_y). For lifting with $a/L = 5\%$, the bending moment M_y can be 20% higher with cables inclined at 45° in relation to straight cables;
- (b) The overhang length or its absence in the lifting was the variable that affected the greatest amount of efforts, displacements and angles. The suspension without overhangs with straight cables proved to be the most critical for the girder in terms of rigid body rolling angle and twist angle. This effect is felt even more strongly on beams with greater initial geometric imperfections;
- (c) The parameters most influenced by the inertia variation of the beam were the displacements (vertical and horizontal) and the rigid body roll angle. Beams more robust has a better performance when lifted. The most unfavorable situations occurred for suspension without overhangs and with straight cables;
- (d) Regarding the length of the beams, the variables most affected were the displacements, rotations and moments. The results are more critical for longer beams. Again, the values most unfavorable to stability were found for lifting without overhangs and with straight cables;
- (e) The global analyzes allowed to know jointly the response of all the results and cases considered. It was verified that the initial geometric imperfections do not significantly influence the bending moment M_z , which is more sensitive to the lifting conditions (such as: the presence and absence of swings and the inclination of the cables). It was also

verified that the lifting without overhangs was once again the situation that provided maximum values for weak-axis and strong-axis bending moments, vertical and horizontal displacements and rigid body roll angle.

From the analysis presented in this paper, some lifting recommendations can be suggested. In the possibility and the availability of equipment, it is advisable to use straight cables, as they reduce the compressive forces in the beam, existing when inclined cables are adopted. Also, the presented results showed that the lifting with overhangs, even of small length, is very favorable for the structural behavior of the beam, in view of the necessity to verify efforts and displacements in the midspan of the beam.

It is worth mentioning that, in this paper, the combinations of overhangs with inclined cables were not analyzed, except for $a/L = 5\%$. It is known that the consideration of inclined cables without overhangs is even more unfavorable than the situations analyzed.

Finally, it's important the concern with the structural safety of beams in the transitory phases. The graphs presented showed that efforts and displacements towards the lower inertia are critical in these beams. In extreme cases, the low stiffness in this direction, characteristic of long and slender beams, may not be able to resist such efforts and displacements, leading the beam to collapse.