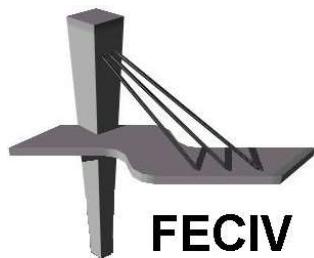


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE
LATERAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE
CONCRETO COM SEÇÃO TRANSVERSAL
ASSIMÉTRICA EM IÇAMENTO**

IBRAHIM ABDALLAH DAURA NETO

UBERLÂNDIA, 19 de março de 2020



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Ibrahim Abdallah Daura Neto

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE LATERAL DE
VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO COM SEÇÃO
TRANSVERSAL ASSIMÉTRICA EM IÇAMENTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima

Co-orientador: Dr. Pablo Augusto Krahl

Uberlândia, 19 de março de 2020.

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

D243	Daura Neto, Ibrahim Abdallah, 1988-
2020	Análise numérica da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto com seção transversal assimétrica em içamento [recurso eletrônico] / Ibrahim Abdallah Daura Neto. - 2020.
<p>Orientadora: Maria Cristina Vidigal de Lima. Coorientador: Pablo Augusto Krahl. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.409 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p>	
<p>1. Engenharia civil. I. Lima, Maria Cristina Vidigal de, 1970-, (Orient.). II. Krahl, Pablo Augusto, 1988-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.</p>	

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 252, PPGEC				
Data:	19 de março de 2020	Hora de início:	14 h min	Hora de encerramento:	16 h 11 min
Matrícula do Discente:	11722ECV001				
Nome do Discente:	Ibrahim Abdallah Daura Neto				
Título do Trabalho:	Análise numérica da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto com seção transversal assimétrica em içamento				
Área de concentração:	Estruturas e Construção Civil				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo analítico e numérico do comportamento de vigas pré-moldadas de concreto durante as fases transitórias considerando o efeito das imperfeições geométricas				

Reuniu-se na Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Fábio Martin Rocha – ICTE/UFTM, Jesiel Cunha – FECIV/UFU e Maria Cristina Vidigal de Lima – FECIV/UFU orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dr.^a Maria Cristina Vidigal de Lima, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Cristina Vidigal de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/03/2020, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jesiel Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/03/2020, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Martin Rocha, Usuário Externo**, em 22/03/2020, às 19:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1938359** e o código CRC **8562F52C**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me abençoar com saúde.

Aos meus queridos pais Alberto e Ana Marta, e minha irmã Patrícia, por serem meu porto seguro, pelo exemplo de conduta, e pelo apoio incondicional em todos os momentos de minha vida.

À minha esposa Priscilla, pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo diário. Por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, e por não me deixar desistir.

À Maria Cristina e ao Pablo, pela orientação acadêmica e aprendizado. À Maria Cristina agradeço também pela paciência e compreensão durante essa caminhada.

Aos meus familiares, pelo incentivo e torcida por mim. Agradeço especialmente a Tia Olga e Angélica, pelas recepções carinhosas em Uberlândia, ao longo do mestrado.

Aos meus valiosos amigos de sempre, pelo apoio, amizade sincera, e por estarem verdadeiramente ao meu lado durante esse período de dedicação e renúncias pessoais.

A todos que contribuíram para minha formação e realização deste trabalho, especialmente meus colegas de mestrado, as instituições de ensino por onde passei, e todos os professores que tive durante minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

Ao Centro Universitário do Cerrado Patrocínio – UNICERP e sua mantenedora, Fundação Comunitária Educacional e Cultural de Patrocínio – FUNCECP, pelo auxílio financeiro e apoio institucional.

Daura Neto, I. A. Análise numérica da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto com seção transversal assimétrica em içamento, 150 p., Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

RESUMO

No cenário atual da construção civil, a busca pela redução de custos tende a otimizar os processos e materiais envolvidos no dimensionamento, confecção e manutenção de elementos estruturais em concreto armado e protendido. Assim, resultam elementos com seções transversais esbeltas e com melhor rendimento mecânico, porém mais propensos ao fenômeno da instabilidade lateral durante as fases transitórias, como o içamento. O principal objetivo deste trabalho é analisar, por meio de análise numérica no programa computacional ANSYS, o comportamento de vigas pré-moldadas com seção transversal assimétrica na fase transitória de içamento por cabos, com relação à estabilidade lateral, considerando-se a influência das variáveis que são referentes aos processos de fabricação e içamento. Foram realizadas análises paramétricas para verificar o efeito da variação de parâmetros na estabilidade lateral de vigas, quais sejam: comprimento da viga, posicionamento e ângulo dos cabos, altura das alças de içamento, resistência característica do concreto à compressão, excentricidade lateral inicial, desvios das alças, características geométricas da seção transversal da viga e força de protensão. Os resultados mostram a relevância e a interferência causada por cada um destes parâmetros, dos quais se destacam o comprimento dos balanços, a retirada do elemento que causa a assimetria, e os desvios de posicionamento das alças. Os resultados mostram ainda a influência da assimetria na seção transversal, cuja presença aumenta consideravelmente o ângulo de rotação de equilíbrio da seção transversal. Para as análises desenvolvidas neste trabalho, a retirada dos componentes que causam a assimetria resultou em reduções do ângulo de rotação de equilíbrio entre 30% e 50%. Para a viga de 45,57 m de vão, resultou ainda em reduções na tensão máxima de tração da ordem de 20%.

Palavras-chave: Vigas pré-moldadas. Içamento. Estabilidade lateral. Assimetria.

Daura Neto, I. A. Numerical analysis of lateral stability of precast concrete girders with asymmetric cross section during lifting, 150 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2020.

ABSTRACT

In the current scenario of civil construction, the search for cost reduction tends to optimize the processes and materials involved in the design, manufacture and maintenance of structural elements in reinforced and prestressed concrete. Therefore, elements with slender cross-sections and better mechanical performance arise, despite being more prone to the phenomenon of lateral instability during transitory phases, such as lifting. The main purpose of this work is to analyze, by means of numerical analysis in the computer program ANSYS, the behavior of precast beams with asymmetric cross section in the transient phase of lifting by cables, with respect to lateral stability, considering the influence of the variables regarding manufacturing and lifting processes. Parametric analyzes were performed to verify the effect of the variation of parameters on the lateral stability of beams, which are: girder length, position and angle of the cables, height of the lifting loops, characteristic resistance of the concrete, lateral sweep, lifting loops deflection, geometric properties of the beam's cross section and prestressing force. The results show the relevance and the interference caused by each one of these parameters, of which the location of the lift points from the ends, the removal of the element that causes the asymmetry, and the lifting loops deflection stand out. The results also show the influence generated by the asymmetry in the cross section, whose existence considerably increases the equilibrium rotation angle of the cross section. For the analysis developed in this work, the removal of the elements that cause the asymmetry resulted in reductions in the equilibrium rotation angle between 30% and 50%. For the 45.57 m span beam, it resulted in about 20% reduction in the maximum tensile stress.

Keywords: Precast beams. Lifting. Lateral stability. Asymmetry.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	8
INTRODUÇÃO	8
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2. OBJETIVOS	11
1.3. JUSTIFICATIVA	12
1.4. METODOLOGIA	15
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
CAPÍTULO 2	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE INSTABILIDADE.....	17
2.2. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS.....	19
2.2.1. Lebelle (1959)	19
2.2.2. Swann e Godden (1966), Anderson (1971) e Swann (1971).....	21
2.2.3. Imper e Laszlo (1987)	25
2.2.4. Mast (1989, 1993 e 1994)	27
2.2.5. Lima (1995 e 2002).....	38
2.2.6. Stratford e Burgoyne (1999 e 2000), e Stratford et al. (1999)	41
2.2.7. Plaut e Moen (2011 e 2013) e Cojocaru (2012)	48
2.2.8. Krahl (2014) e Krahl, Lima e El Debs (2015).....	52
2.2.9. Schuh (2008), Gaykar e Solanki (2014) e Germán (2015).....	54
2.2.10. Zhang (2017) e Lima (2018)	62
2.3. LIMITES DE NORMAS TÉCNICAS.....	65
CAPÍTULO 3	67
MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA ASSIMÉTRICA EM ÍCAMENTO COM PARAPEITO NA MESA SUPERIOR.....	67
3.1. DEFINIÇÕES PRELIMINARES	67

3.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS, MALHA E ELEMENTOS FINITOS NO PROGRAMA COMPUTACIONAL ANSYS	70
3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO, MATERIAIS E MODELAGEM.....	73
3.4. ROTAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA ORIGINAL.....	75
3.5. ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	78
3.5.1. Verificação do efeito da protensão	78
3.5.2. Variação do comprimento do balanço (a)	80
3.5.3. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})	83
3.5.4. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t).....	86
3.5.5. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)	87
3.5.6. Variação do enrijecimento da alça (h_{lift}).....	90
3.5.7. Variação da inclinação dos cabos de içamento (φ).....	92
3.5.8. Variação da altura e posicionamento do parapeito.....	95
3.5.9. Variação do vão da viga	99
3.5.10. Resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica.....	102
3.5.11. Situações limítrofes simuladas	103
3.6. VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO GERMÁN (2015).....	106
3.7. VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO ZHANG (2017) E LIMA (2018).....	107
3.7.1. Variação do comprimento do balanço (a)	107
3.7.2. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})	109
3.7.3. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t).....	110
3.7.4. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)	111
3.7.5. Variação do enrijecimento da alça (h_{lift}).....	112
3.7.6. Variação do vão da viga	113
3.7.7. Verificação do efeito da protensão	115
CAPÍTULO 4	116
MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA ASSIMÉTRICA EM IÇAMENTO COM SEÇÃO “L”	116
4.1. DEFINIÇÕES PRELIMINARES	116
4.2. ROTAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA “L” ORIGINAL.....	120
4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	122
4.3.1. Variação do comprimento do balanço (a)	122
4.3.2. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})	124
4.3.3. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t).....	126
4.3.4. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)	128

4.3.5.	Variação do enrijecimento da alça (h_{lift}).....	129
4.3.6.	Variação da inclinação dos cabos de içamento (φ).....	131
4.3.7.	Variação das dimensões e posicionamento do “berço”	133
4.3.8.	Variação do vão da viga	137
4.3.9.	Resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica.....	139
4.4.	VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO GERMÁN (2015), ZHANG (2017) E LIMA (2018)	141
CAPÍTULO 5		142
CONSIDERAÇÕES FINAIS		142
5.1.	CONCLUSÕES	142
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
REFERÊNCIAS		147

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo El Debs (2017), há a perspectiva de crescimento progressivo da utilização de estruturas de concreto pré-moldado em países como o Brasil, de acordo com o aumento do seu desenvolvimento tecnológico e social. Dentre as vantagens proporcionadas por este modelo, se destacam: possibilidade de se alcançar grandes vãos, aumento da eficiência construtiva, maior controle de qualidade, possível diminuição na quantidade de elementos que compõem a infraestrutura (pelo aumento dos vãos), otimização das dimensões dos elementos, redução dos prazos de construção e custos financeiros. Como exemplos dos sistemas estruturais que utilizam vigas pré-moldadas, vale mencionar as estruturas destinadas a cobrir grandes vãos, e as superestruturas de pontes e viadutos.

No projeto das estruturas pré-moldadas de concreto é preciso levar em conta todas as etapas que compõem a confecção do elemento até a sua disposição final na estrutura, ou seja, deve haver atenção especial tanto na fase de serviço quanto nas fases transitórias, como transporte, içamento e posicionamento sobre aparelhos de apoio, como neoprene. Nestas fases transitórias, devem ser realizadas verificações da segurança estrutural dos elementos, visto que as solicitações atuantes diferem daquelas da situação final, e visto que a resistência do concreto pode ser menor que a resistência especificada em projeto.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente, os estágios transitórios de transporte, içamento e posicionamento sobre aparelhos de apoio de vigas pré-moldadas.

Figura 1 – Viga de 65 m de vão em situação de transporte, no Canadá



Fonte: Hill, Dick e Tadros (2009)

Figura 2 – Viga pré-moldada de concreto em situação de içamento



Fonte: PCI Bridge Design Manual (2016)

Figura 3 – Viga pré-moldada de concreto posicionada sobre aparelhos de apoio



Fonte: PCI Bridge Design Manual (2016)

Aumentos na resistência do concreto, o uso da protensão e melhorias no processo de fabricação das vigas permitiram que os projetistas de estruturas de concreto pré-moldado protendido pudessem idealizar vãos cada vez maiores para tais elementos, o que também ocasionou problemas, como dificuldades no transporte e instabilidade lateral. Para reduzir o peso próprio das vigas, a solução encontrada comumente é a escolha de estruturas mais esbeltas, aproveitando-se ao máximo o rendimento mecânico da seção transversal. Com a utilização destas estruturas, aumenta a possibilidade de falha por instabilidade lateral, pois tais estruturas apresentam baixos valores de rigidez lateral, se comparados aos valores de rigidez relativos ao eixo de maior inércia.

Quanto mais esbeltas as vigas, mais as mesmas se tornam propensas ao fenômeno de instabilidade lateral durante as fases transitórias, especialmente no içamento. Desta forma, a esbeltez é um parâmetro de extrema importância no projeto e construção destas estruturas, pois os efeitos da esbeltez acentuada se manifestam na forma de deslocamentos laterais e torção, o que pode levar ao colapso destas vigas. Assim, os elementos pré-moldados devem apresentar rigidez lateral suficiente para evitar a redução da capacidade resistente, por excesso de deformação ou fissuração. Sob esse aspecto, cabe ressaltar que esse assunto não é tratado adequadamente pelas normas brasileiras, pois não se considera nenhum fator relacionado com a esbeltez da viga para redução de sua capacidade resistente.

Uma outra variável que pode influenciar quanto à estabilidade estrutural de uma viga pré-moldada é a sua imperfeição geométrica, que se manifesta inicialmente durante as fases de moldagem e desforma da viga. Trata-se de uma situação inerente ao processo construtivo, sendo que essas imperfeições podem ser decorrentes de excentricidades laterais, falta de prumo, mal posicionamento das alças de içamento, retração do concreto, erros no início do içamento e na concretagem, aplicação da força de protensão com excentricidade lateral, erros no posicionamento de fontes de calor na cura térmica, exposição à radiação solar em somente uma das faces da viga durante o armazenamento, controle ineficaz do posicionamento das armaduras, e falta de homogeneidade da peça moldada.

Especificamente durante o içamento, os elementos estão sujeitos, majoritariamente ao peso próprio, porém a vinculação externa fornecida pelo cabo somente restringe o deslocamento vertical, tornando o problema de instabilidade mais acentuado nessa fase.

Sendo assim, em função da esbeltez, das imperfeições geométricas e da liberdade de rotação do elemento em torno de seu eixo longitudinal durante o içamento, a seção transversal sofre uma rotação de corpo rígido de maneira que uma componente do peso próprio passa a solicitar a viga no seu eixo de menor inércia, o que leva a um acréscimo dos deslocamentos laterais. Este processo se repete de maneira cíclica até que haja a estabilização da viga, sendo que esta pode não ocorrer e a viga pode atingir a sua condição fissurada, ou até mesmo o colapso.

Nesse contexto, este trabalho visa estudar numericamente o comportamento quanto à estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto em içamento, especialmente as vigas com seção transversal assimétrica, analisando a influência em seu comportamento de variáveis como: comprimento do balanço, resistência do concreto, posicionamento das alças, excentricidade lateral inicial, enrijecimento da alça, inclinação dos cabos e protensão. Além disso, é de especial interesse a influência causada pela assimetria no comportamento de vigas com seção transversal assimétrica, em comparação à seção simétrica correspondente.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de vigas pré-moldadas com seção transversal assimétrica na fase transitória de içamento por cabos, com relação à estabilidade lateral, considerando-se a influência das variáveis que são referentes aos processos de fabricação e içamento. Nesse sentido, dentre os objetivos específicos do trabalho, constam:

- Simular numericamente o fenômeno de instabilidade lateral durante a suspensão, para obtenção da rotação de corpo rígido de equilíbrio de vigas de seção assimétrica;
- Realizar análises paramétricas para verificar o efeito da variação de parâmetros na estabilidade lateral de vigas, quais sejam: comprimento da viga, posicionamento e ângulo dos cabos, altura das alças de içamento, resistência característica do concreto à compressão, excentricidade lateral inicial, desvios das alças, características geométricas da seção transversal da viga e força de protensão;

- Realizar análises comparativas de tensões e ângulos de rotação de equilíbrio entre vigas com seção transversal assimétrica e vigas simétricas correspondentes;
- Verificar a condição de estabilidade lateral das vigas simuladas numericamente em içamento, a partir de formulações analíticas existentes de rotação de equilíbrio;
- Estabelecer recomendações que possam auxiliar no dimensionamento de vigas pré-moldadas com seção transversal assimétrica, no sentido de reduzir os riscos de instabilidade lateral no içamento.

1.3. JUSTIFICATIVA

A utilização de vigas pré-moldadas de concreto tem crescido substancialmente nos últimos anos, por meio de estruturas cada vez mais esbeltas e vãos cada vez maiores, o que aumenta consideravelmente os riscos de instabilidade lateral. Sendo assim, acidentes e colapsos de elementos estruturais têm acontecido nas etapas transitórias. Este trabalho trata especificamente da situação de vigas suspensas por cabos, caso em que o parâmetro mais relevante é a rigidez lateral das mesmas.

O içamento de vigas longas e esbeltas tem sido motivo de preocupação de projetistas e fabricantes, enquanto verifica-se a carência de indicações normativas para verificação da estabilidade lateral dos elementos pré-moldados durante as etapas transitórias. Embora a verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas não seja um item de destaque no seu dimensionamento, as falhas estruturais sinalizam a necessidade de novos estudos.

A ocorrência de falhas por instabilidade lateral resulta em impacto prejudicial em vários aspectos, como: perdas financeiras por atrasos em cronograma, prejuízos materiais e danos aos equipamentos de construção, além de risco à vida dos trabalhadores. Por serem vigas pesadas, as imperfeições geométricas, os desvios de montagem, os travamentos inadequados, dentre outros fatores passam a ter fundamental influência na sua estabilidade. Portanto, é de suma importância estudar as razões das falhas por instabilidade lateral, e as variáveis que influenciam neste problema. A seguir são apresentados casos recentes de colapso de vigas na fase transitória de içamento, a fim de destacar a importância do tema.

As Figuras 4 e 5 apresentam um problema ocorrido em uma fábrica na cidade de Uberlândia-MG, no ano de 2016, em que uma viga de 28,57 m de vão chegou ao colapso. Durante o içamento, a viga rapidamente apresentou deslocamento lateral acentuado, situação que piorou bruscamente ao longo da suspensão, ocasionando a fragmentação da mesma em três partes. Esta viga de concreto protendido tinha uma altura de 1,25 m, além de duas alças de cada lado, posicionadas a 1,20 m e a 2,40 m da extremidade da viga.

Figura 4 – Deslocamento lateral inicial acentuado em viga, em Uberlândia



Fonte: Legran (2016)

Figura 5 – Içamento de viga com deslocamento lateral acentuado, em Uberlândia



Fonte: Legran (2016)

Já a Figura 6 apresenta o caso ocorrido durante a construção de um viaduto em Olost, na Espanha, cuja estrutura consistia em três vãos, de 20,45 m, 44,90 m e 45,57 m. Importante

ressaltar que as vigas posicionadas nas extremidades da ponte contavam com um parapeito em um dos lados da mesa superior, caracterizando uma assimetria da seção transversal.

Algumas destas vigas chegaram ao canteiro de obras apresentando grandes deslocamentos, tendo sido medida em campo uma imperfeição lateral de 90 mm em uma viga com 45,57 m de vão, segundo Zhang (2017). Por se tratar de um valor considerado aceitável pelos códigos normativos, a operação de içamento foi confirmada e, durante a suspensão, os deslocamentos laterais foram se acentuando e o processo foi interrompido para reavaliação da estabilidade da peça. A equipe técnica decidiu pela continuidade do içamento, posicionando a viga em seu local de destino. Contudo, os deslocamentos laterais já tinham alcançado um valor de 300 mm, além da viga apresentar fissuras no topo da mesa superior, sendo necessária a sua substituição por uma nova viga.

Figura 6 – Deslocamento lateral inicial acentuado em vigas, em Olost (Espanha)



Fonte: Germán (2015)

Sendo assim, o problema ocorrido em Olost (Espanha) foi o fator principal que serviu como justificativa e influenciou na definição do tema deste trabalho, que tem como foco principal a análise das condições de estabilidade lateral de vigas com seção transversal assimétrica em içamento. Além disso, é de especial interesse a análise da interferência gerada pela assimetria da seção no comportamento da mesma.

Deve-se ressaltar que não existem trabalhos com essa preocupação, o que concede originalidade e relevância ao trabalho.

1.4. METODOLOGIA

Para a avaliação da rotação de equilíbrio de vigas pré-moldadas na situação de içamento, o presente trabalho se utiliza de análises numéricas desenvolvidas com o auxílio do programa computacional ANSYS, como ferramenta de modelagem estrutural. Este programa é baseado no método dos elementos finitos (MEF) para a resolução de problemas, e apresenta recursos que permitem realizar análises de instabilidade, e análises estáticas lineares e não lineares.

Através da discretização da estrutura é atribuída a cada elemento uma matriz de rigidez que correlaciona esforços e deslocamentos. Sendo assim, para a modelagem numérica das vigas foram utilizados elementos finitos tridimensionais e lineares, de maneira a permitir simulações do fenômeno da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas na fase transitória de suspensão.

Neste trabalho, foi realizada uma análise em que se considerou que existe proporcionalidade entre tensões e deformações, pois o material da estrutura é assumido com comportamento elástico-linear. Desta forma, o programa computacional ANSYS considera diretamente as propriedades físicas do material na matriz de rigidez, inserindo a relação linear entre tensões e deformações como lei constitutiva elástica dos materiais.

Já quanto às condições de aplicação do carregamento, dentre as maneiras possibilitadas pelo programa ANSYS, o mesmo permite a metodologia de passos de carga, sendo que neste trabalho o carregamento foi aplicado em 20 etapas ou passos de carga.

Quanto à modelagem numérica no programa computacional ANSYS, foram realizados estudos de caso de duas vigas com seção transversal assimétrica, uma delas com parapeito no topo da mesa superior, e outra em seção “L”, para a verificação da influência destas condições pouco convencionais quanto às condições de estabilidade lateral. Assim, análises numéricas foram desenvolvidas para estabelecer a rotação de corpo rígido de equilíbrio para estas vigas, além de estudos paramétricos e verificações das formulações analíticas de Zhang (2017) e Lima (2018), para verificar a segurança estrutural das mesmas quanto à estabilidade lateral, por meio de cálculos de fator de segurança.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados de maneira a tratar separadamente os diferentes aspectos referentes ao tema da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto.

O *Capítulo 1* apresenta uma introdução do tema, justificativa, os objetivos e a metodologia empregada na pesquisa.

No *Capítulo 2* é apresentada uma revisão bibliográfica, com uma síntese dos trabalhos mais relevantes para o presente estudo. Sendo assim, os fundamentos teóricos acerca da instabilidade lateral são tratados em ordem cronológica, no intuito de demonstrar a evolução do estado da arte no que se refere ao fenômeno da instabilidade lateral.

O *Capítulo 3* apresenta as definições tomadas e os resultados obtidos por modelagem numérica de viga pré-moldada de concreto em situação de içamento, com seção transversal assimétrica caracterizada por parapeito em um dos lados da mesa superior, através do ANSYS. Além disso, é realizada uma análise comparativa com os resultados obtidos por formulações gráficas e analíticas existentes.

No *Capítulo 4* é realizada uma análise similar à desenvolvida no Capítulo 3, para uma viga assimétrica pré-moldada de concreto de “seção L”.

Por fim, o *Capítulo 5* traz as conclusões obtidas neste trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE INSTABILIDADE

Considera-se como teoria de primeira ordem a formulação de Teoria das Estruturas na qual a determinação dos esforços solicitantes de um elemento é realizada supondo a estrutura na posição indeformada. Em alguns casos, esta suposição pode ser feita sem trazer prejuízos significativos aos resultados encontrados, em comparação a cálculos mais realistas. Entretanto, existem outros casos em que é necessária a adoção da teoria de segunda ordem, em que a deformação da estrutura deve ser levada em conta para determinação dos esforços solicitantes, pois os efeitos gerados por tal deformação são relevantes. Nesse contexto, considera-se que existe uma não linearidade geométrica.

Já a não linearidade física, também presente nos problemas de instabilidade, associa-se ao material do elemento. Nesse caso o material traz consigo a propriedade intrínseca de não apresentar proporcionalidade entre tensão e deformação produzida por uma força aplicada. É importante destacar que a não linearidade física traz consequências tanto para a teoria de primeira ordem quanto para a teoria de segunda ordem.

Em análise de estruturas usuais, pode se considerar que exista não linearidade física, não linearidade geométrica, ambas, ou nenhuma destas (o que caracteriza uma análise elástica linear). As análises de instabilidade lateral se caracterizam por serem efetivamente um problema não linear geométrico.

Ao se tratar analiticamente o problema, considerando como linear a solução não linear, se obtém a chamada carga crítica ou carga de flambagem, que consiste basicamente no instante em que, face ao problema não linear, a estrutura passa a apresentar grandes deslocamentos.

Esta situação também pode ser tratada pelo método dos elementos finitos, que consiste em resolver o problema de autovalor e autovetor com as matrizes de rigidez e geométrica. Nesse sentido, os autovalores são as cargas críticas e os autovetores são os modos de flambagem. Com base na aproximação adotada para modelos analíticos e numéricos, as soluções serão razoavelmente próximas.

A presença de imperfeições geométricas iniciais nas vigas pré-moldadas de concreto contribui para a sua perda de estabilidade lateral, especialmente nas fases transitórias. Assim, uma viga pré-moldada está sujeita à instabilidade por deformação com apoios que restringem o giro e o deslocamento lateral, por deformação com apoios flexíveis ou por tombamento.

Como não existem estruturas perfeitas, as vigas sempre apresentarão algum deslocamento lateral antes de receber o carregamento. Ao receber o carregamento, o deslocamento lateral tende a aumentar, eventualmente se tornando assintótico à situação de equilíbrio estável, mas somente a altos deslocamentos.

De acordo com Stratford et al. (1999), a viga será igualmente suscetível a se deslocar em qualquer direção, podendo apresentar equilíbrio indiferente (o que significa que nenhum aumento adicional na carga será possível após a carga crítica W_{CR}), ou apresentar equilíbrio estável (o que significa que a viga pode ser levada a um leve aumento na carga, mas a um deslocamento lateral extremamente aumentado).

Até mesmo se a viga está a uma carga abaixo da carga crítica, o deslocamento lateral pode dar origem a problemas causados por tensões geradas pela curvatura do eixo de menor inércia. Em casos em que a viga já está sujeita a altos valores de tensão em decorrência da protensão e do peso próprio, problemas podem ser causados, seja por altos valores de compressão ou por fissuração da viga à tração, o que tenderia a reduzir ainda mais a rigidez da viga, levando a uma maior possibilidade de colapso.

A situação de içamento diz respeito à instabilidade por deformação com apoios flexíveis. Nessa situação, segundo Mast (1993), as propriedades elásticas que compõem a rigidez à flexão lateral da viga são os parâmetros que governam a instabilidade. Portanto, apesar da flexibilidade da ligação, nesta fase a ruptura ocorre no elemento por deformação por flexão lateral, pois não ocorrem deformações significativas por torção.

2.2. ESTUDOS ANTERIORES SOBRE INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS

2.2.1. Lebelle (1959)

Lebelle (1959) apud Krahl (2014) foi um dos primeiros autores a estudar as fases transitórias de uma viga de concreto pré-moldado, e também a considerar a flexibilidade das ligações à torção. O autor apresenta um procedimento para obtenção da carga crítica de instabilidade (w_{cr}) de vigas vinculadas a apoios deformáveis à torção, cuja deformabilidade é inserida ao problema através das condições de contorno.

A Equação (1) apresenta a carga crítica de instabilidade lateral, e a Equação (2) apresenta a fórmula da constante k , utilizada na determinação da carga crítica por Lebelle (1959) apud Krahl (2014). Já as Equações (3) e (4) apresentam os coeficientes β e δ , que levam em conta a rigidez lateral das mesas e a posição do ponto de aplicação do carregamento em relação ao centro de giro da seção, respectivamente.

$$w_{cr} = k \frac{16}{L^3} \sqrt{\alpha_{cr}} \sqrt{E_c I_y G_c J_t} \quad (1)$$

$$k = \sqrt{1 + 2,47\beta + 0,52\delta^2} - 0,72\delta \quad (2)$$

$$\beta = \frac{E_c I_{y, \text{mesas}}}{G_c J_t} \frac{2z}{L^2} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2h}{L} \sqrt{\frac{EI_y}{G_c J_t}} \quad (4)$$

Sendo que: L é o comprimento da viga;

α_{cr} é o coeficiente que estima o efeito da deformabilidade nos apoios;

E_c é o módulo de elasticidade longitudinal do concreto;

I_y é o momento de inércia calculado em relação ao eixo de menor inércia;

G_c é o módulo de elasticidade transversal do concreto;

J_t é o momento de inércia à torção;

$I_{y,mesas}$ é a média ponderada das inércias das mesas da viga;

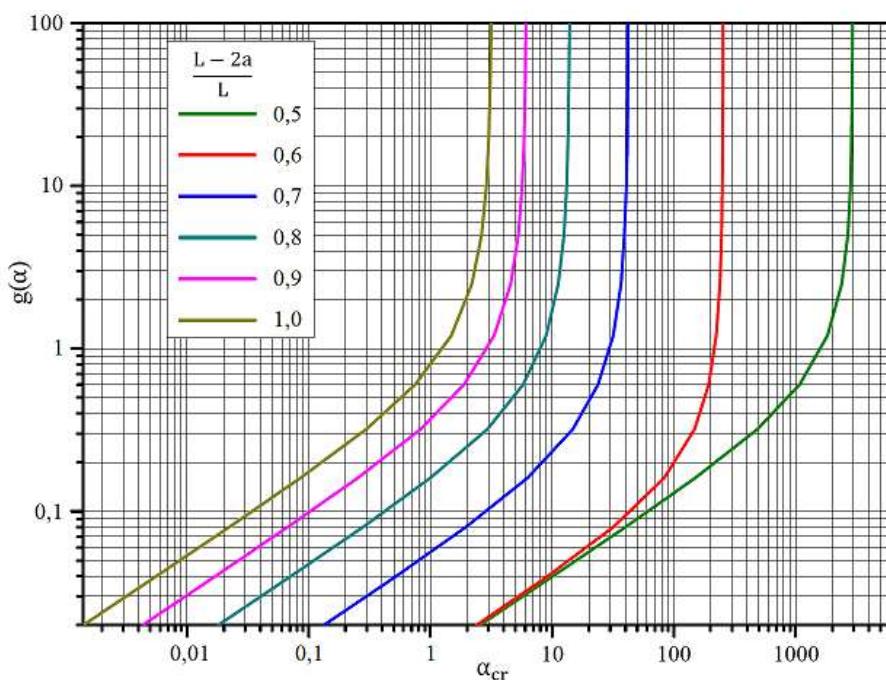
z é a distância entre os centroides das mesas;

h é a distância entre o ponto de aplicação de carga e o eixo de giro para vigas suspensas, ou seja, entre o ponto de fixação dos cabos e o CG.

Para içamento, α_{cr} depende da posição dos cabos, da altura (h) e das rigidezes à flexão lateral e à torção. Pode-se obter o α_{cr} com o gráfico da Figura 7, que relaciona essa variável com a função $g(\alpha)$, expressa pela Equação (5). Assim, calcula-se $g(\alpha)$ e obtém-se α_{cr} para uma dada relação $L - 2a/L$, sendo a o comprimento do balanço.

$$g(\alpha) = \frac{4h}{L} \sqrt{\frac{EI_y}{G_c J_t}} \quad (5)$$

Figura 7 – Diagrama da função $g(\alpha)$ relacionado à α_{cr}



Fonte: Adaptado de Lebelle (1959) apud Krahl (2014)

De acordo com a Figura 7, pode-se perceber que, para um mesmo valor da função $g(\alpha)$, o valor de α_{cr} aumenta à medida que o comprimento dos balanços aumenta, ocasionando também um aumento da carga crítica de instabilidade lateral, conforme Equação (1). Além disso, nota-se também que, em geral, quanto maior o valor da função $g(\alpha)$, maiores valores de α_{cr} (e consequentemente de w_{cr}) serão encontrados.

Na situação de içamento, a formulação de Lebelle (1959) apud Krahl (2014) sugere a verificação da carga crítica de instabilidade lateral de vigas pré-moldadas, considerando os parâmetros das rigidezes em regime elástico. O autor destaca ainda que, quando a carga devido ao peso próprio é inferior a $\frac{1}{4}$ de w_{cr} , a viga não terá problemas de instabilidade.

2.2.2. Swann e Godden (1966), Anderson (1971) e Swann (1971)

Swann e Godden (1966) analisaram a flambagem lateral de vigas esbeltas de concreto suspensas por cabos. Segundo os autores, o fenômeno da instabilidade é mais propenso a acontecer na fase de içamento, em detrimento à situação em que as vigas estão em sua posição final de projeto. Um cenário crítico pode ocorrer na fase de içamento devido à instabilidade por giro total como corpo rígido e flexão lateral, sem torção ao longo da extensão da viga.

De acordo com Swann e Godden (1966), seria importante que se encontrasse uma metodologia capaz de lidar satisfatoriamente com o grande número de parâmetros que influenciam a estabilidade estrutural, quais sejam: seção transversal variável, carregamento variável, cargas excêntricas ao centro de cisalhamento, carga axial, restrição ao empenamento da seção, posicionamento das alças de içamento, curvatura inicial da viga em seu próprio plano e altura das alças de içamento acima do centro de cisalhamento. No entanto, os autores trataram do problema da instabilidade lateral basicamente considerando diferentes carregamentos e condições de apoio de vigas de concreto içadas por cabos.

O trabalho de Swann e Godden (1966) foi dividido em duas etapas. Primeiramente foi apresentado um procedimento numérico para determinação da carga elástica de flambagem de vigas esbeltas sujeitas a carregamento no plano vertical. Posteriormente, foram apresentados os resultados de duas séries de testes em vigas suspensas por cabos.

Nesta parte, a primeira série de testes foi realizada em seis vigas de alumínio com seção transversal I e diferentes condições de suporte, e a segunda série de testes considerou oito vigas de dimensões reduzidas de concreto protendido.

O procedimento numérico simplificado proposto por Swann e Godden (1966) consiste em dividir a viga com uma pequena curvatura em uma pequena quantidade de trechos retos unidos nas extremidades nodais. Em seguida, supõe-se uma configuração inicial de rotação por torção de acordo com o tipo de vinculação, simulando um modo de flambagem. Do momento de torção provocado pelo carregamento e pela rotação assumida na configuração inicial, obtém-se uma nova configuração, a ser comparada à configuração adotada. A partir de então é iniciado um processo de tentativa e erro até que as configurações atinjam a convergência, dentro de uma certa tolerância. Desta maneira, calcula-se analiticamente a carga crítica ou a excentricidade lateral crítica.

Os resultados dos testes experimentais desenvolvidos por Swann e Godden (1966) atestaram a eficiência e precisão do procedimento numérico simplificado, pois houve pequena variação entre a carga obtida nos testes e a carga de flambagem calculada. Foi possível perceber também que as cargas de flambagem obtidas foram muito suscetíveis à distância vertical correspondente à altura da alça de içamento.

Em 1971, Anderson enfatizou a necessidade do entendimento das tensões temporárias e da estabilidade lateral de vigas de concreto pré-moldadas protendidas durante as fases transitórias de transporte e içamento. Para evitar o fenômeno da instabilidade, o autor definiu um fator de segurança contra a flambagem lateral de uma viga em suspensão, dado pela Equação (6):

$$FS = \frac{y_t}{\Delta_y} \quad (6)$$

Sendo que: y_t é a distância do topo da viga ao centro de gravidade da viga;

Δ_y é o deslocamento lateral no meio do vão quando todo o peso próprio da viga é aplicado na direção do eixo de menor inércia.

Para uma viga prismática apoiada em suas extremidades, com peso próprio uniformemente distribuído e momento de inércia constante, o deslocamento Δ_y pode ser calculado utilizando-se a Equação (7):

$$\Delta_y = \frac{5}{384} \times \frac{w \times L^4}{E_c \times I_y} \quad (7)$$

Sendo que: w é o peso próprio uniformemente distribuído da viga;

L é o comprimento da viga;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

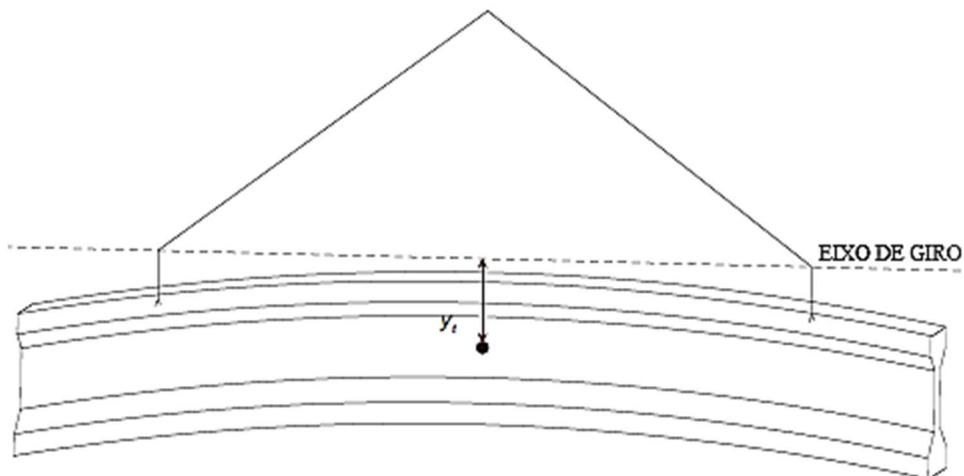
I_y é o momento de inércia calculado em relação ao eixo de menor inércia.

Baseando-se na publicação de Anderson, Swann (1971) propôs uma nova equação para a determinação do fator de segurança contra a flambagem lateral de vigas em içamento, alterando o denominador da equação de Anderson. Swann (1971) percebeu que o denominador seria a mudança do centro de gravidade da viga após se deslocar lateralmente, ao invés do deslocamento da seção de meio de vão aplicando-se todo o peso próprio da viga na direção do eixo de menor inércia. Assim, o deslocamento lateral do centro de gravidade de uma viga apoiada em suas extremidades (\bar{z}_0) é dado pela Equação (8), e o fator de segurança revisado (FS) é dado pela Equação (9):

$$\bar{z}_0 = \frac{1}{120} \times \frac{w \times L^4}{E_c \times I_y} = 0,64 \times \Delta_y \quad (8)$$

$$FS = \frac{y_t}{\bar{z}_0} = \frac{y_t}{0,64 \times \Delta_y} \quad (9)$$

Swann (1971) também alterou o valor de y_t , sendo tomado como a distância vertical entre o eixo de giro que passa através dos dois pontos de içamento e o centro de gravidade de toda a viga, ao invés da distância do topo da viga ao seu centro de gravidade, conforme Figura 8. Além disso, Swann (1971) ressaltou a importância das imperfeições iniciais geométricas no cálculo da estabilidade, como o deslocamento lateral inicial e a excentricidade lateral das alças de içamento em relação ao centro de gravidade da seção transversal, representadas na Figura 9.

Figura 8 - Representação de y_t na vista isométrica da viga em içamento

Fonte: Adaptado de Cojocaru (2012)

Figura 9 – Imperfeições iniciais geométricas



Fonte: Adaptado de Germán (2015)

Com o intuito de ilustrar a importância da consideração das imperfeições geométricas na estabilidade estrutural de uma viga em içamento, Swann (1971) forneceu uma equação para o cálculo do momento fletor em relação ao eixo de menor inércia (M_y), dada em função do ângulo de inclinação devido às imperfeições. Assim, M_y é dado pela Equação (10):

$$M_y = M_x \times \theta_0 \times \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{FS}} \right) \quad (10)$$

Sendo que: θ_0 é o ângulo de inclinação devido a imperfeições;

M_x é o momento fletor em relação ao eixo de maior inércia, devido ao peso próprio.

Ao apresentar esta equação, Swann (1971) reconheceu que nem mesmo um alto valor de fator de segurança (FS) é garantia contra uma ocasião de instabilidade lateral, visto que M_y pode se tornar de alto valor quando o valor de θ_0 for elevado, ainda que o valor de FS seja também elevado.

Além disso, Swann (1971) ressaltou que se uma viga pré-moldada for submetida a tensões que superem o limite da fissuração ao ser içada, sua rigidez em relação ao eixo de menor inércia diminuirá, ampliando o seu deslocamento lateral, e consequentemente reduzindo o seu fator de segurança contra a flambagem lateral. Por sua vez, a redução do FS amplifica o valor de M_y , conforme Equação (10), o que pode agravar a fissuração da viga. Portanto, segundo Swann (1971), a fissuração devido à flexão provavelmente pode causar um colapso catastrófico com pouco ou nenhum sinal de falha estrutural.

2.2.3. Imper e Laszlo (1987)

Imper e Laszlo (1987) analisaram o fenômeno da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto. Segundo os autores, tal fenômeno surge devido às imperfeições durante a produção das vigas, quais sejam: excentricidade lateral inicial, alças de içamento não centralizadas na seção ou variação de temperatura entre as faces de cada viga. Tais imperfeições fazem com que uma viga se curve horizontalmente durante o seu manuseio, ocasionando deslocamento do centro de gravidade da mesma.

De acordo com Imper e Laszlo (1987), quando a viga está em suspensão, a combinação das imperfeições iniciais com a ação da inclinação faz com que a mesma sofra flexão e se desloque progressivamente em relação ao eixo de menor inércia. Assim que o limite da fissuração é superado, o momento de inércia é reduzido e o fenômeno aumenta rapidamente até que a viga sofra falha estrutural.

Imper e Laszlo (1987) propuseram três medidas a serem tomadas com o objetivo de se reduzir o deslocamento lateral do centro de gravidade de vigas pré-moldadas de concreto: reduzir o vão de içamento (movendo as alças de suspensão a partir das extremidades da viga), aumentar o módulo de elasticidade do concreto, e utilizar um sistema de contraventamento durante as fases transitórias.

Sobre a opção do aumento do módulo de elasticidade do concreto, os autores consideram que existe uma limitação financeira, pois trata-se de uma solução cara. Além disso, Imper e Laszlo (1987) também apontaram as limitações de um sistema de contraventamento lateral durante o içamento, que tem como finalidade enrijecer a região de menor inércia da viga e reduzir a fissuração gerada pelas tensões de tração devido à superelevação a qual a viga está submetida.

Imper e Laszlo (1987) examinaram o comportamento de vigas pré-moldadas de concreto de longos vãos nas fases de transporte e suspensão, e comprovaram a influência do posicionamento das alças de içamento sobre a estabilidade estrutural da mesma. Assim, o içamento com balanços pode aumentar substancialmente o valor da carga crítica de instabilidade lateral. Como exemplo, para um balanço equivalente a 6% do vão da viga, a flecha máxima é reduzida para 58,8% da flecha para a mesma viga sem a adoção de balanços, o que ocasiona um aumento considerável do fator de segurança contra a instabilidade lateral.

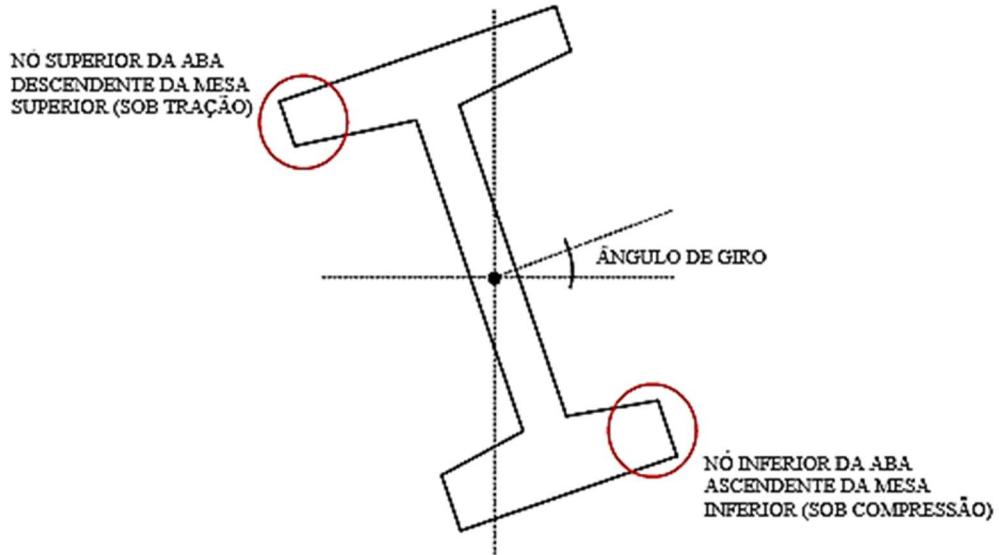
Contudo, em grande parte dos casos, é difícil mover os pontos de içamento a partir das extremidades da viga, sem causar aumento significativo das tensões na seção transversal correspondente ao meio do vão da viga, especialmente em vigas protendidas. Nesse caso, à medida que se aumenta o comprimento dos balanços, o momento fletor na seção central devido ao peso próprio é reduzido. Desta forma, o alívio das tensões devido ao peso próprio em contraposição à protensão é menor, o que gera tensões finais de maior valor.

Os autores sugeriram então um procedimento analítico e empírico para determinação da segurança durante as fases transitórias, baseado em deslocamentos e tensões. Imper e Laszlo (1987) verificaram que existia uma relação entre a flecha no meio do vão e a razão entre o comprimento do balanço (a) e o comprimento da viga (L), na situação de suspensão. Para a obtenção da relação a/L , primeiramente é necessária a adoção de um fator de segurança. Através de suas experiências de campo e fabricação de peças pré-moldadas, Imper e Laszlo (1987) recomendaram os seguintes fatores de segurança: $FS > 1,5$ para manuseio em fábrica, e $FS > 1,75$ para manuseio das peças em campo.

O procedimento analítico de Imper e Laszlo (1987) permite calcular as tensões de uma viga deslocada lateralmente em qualquer ponto ao longo de seu comprimento. É

importante destacar que os pontos críticos estão na seção transversal de meio de vão, e são os seguintes: nó superior da aba descendente da mesa superior (sob tensões de tração), e nó inferior da aba ascendente da mesa inferior (sob tensões de compressão). A Figura 10 ilustra os pontos críticos.

Figura 10 – Pontos críticos sob tração e compressão da viga em içamento



Fonte: Adaptado de Germán (2015)

Por fim, Imper e Laszlo (1987) pesquisaram também os efeitos da deformação lenta e impacto nas fases de transporte e içamento de vigas pré-moldadas, e concluíram que estes efeitos não trazem grandes preocupações, haja visto que as fases transitórias são relativamente de curta duração.

2.2.4. Mast (1989, 1993 e 1994)

Mast (1989) avaliou que as fórmulas clássicas de flambagem lateral não se aplicavam às situações de içamento, pois se baseavam na suposição de que as vigas são rigidamente restrinvidas à rotação em seus suportes. Nesse caso, a flambagem seria causada pela seção de meio do vão se torcer em relação aos apoios, criando um deslocamento lateral. No que diz respeito ao material, Mast (1989) afirma que as vigas pré-moldadas pretendidas de concreto e seção duplo T têm elevada rigidez à torção, em comparação a vigas metálicas, concluindo que a flambagem lateral descrita nos estudos clássicos é raramente crítica em vigas de concreto.

O objetivo de Mast (1989) era entender o caso especial de vigas em içamento, situação em que os apoios apresentam flexibilidade à rotação. Nesse caso, a viga pode girar lateralmente, produzindo assim flexão lateral, o que pode levar ao fenômeno de instabilidade lateral em vigas I de concreto.

No caso de uma viga suspensa a partir de cabos flexíveis, o centro de rotação é o ponto no qual as alças se unem à viga, normalmente na superfície superior da viga de concreto. Uma linha passando através do centro de rotação em cada apoio forma o eixo de giro da viga. Se não houvessem erros de execução, a viga seria içada em posição aprumada, com o seu centro de gravidade diretamente abaixo do eixo de giro. Contudo, erros de execução no prumo da viga e no posicionamento das alças de içamento causam o deslocamento do centro de gravidade da viga em relação ao eixo de giro, gerando uma rotação inicial (θ_i). A Figura 11 apresenta a posição de equilíbrio da viga em içamento, apresentada por Mast (1989).

Figura 11 – Equilíbrio da viga durante o içamento



Fonte: Adaptado de Mast (1989)

Segundo Mast (1989), a breve inclinação inicial da viga causa que uma componente do peso próprio W seja aplicada sobre o eixo de menor inércia. Esta componente é $W \times \text{sen}\theta_i$, que por sua vez causa um deslocamento lateral da viga, o que altera novamente o centro de gravidade da viga. Esta alteração gera acréscimo no ângulo de rotação θ , o que leva a uma maior componente do peso próprio atuando como carga lateral, e maiores deslocamentos laterais, configurando um ciclo de eventos dependentes entre si. Dependendo da rigidez lateral da viga, a mesma pode alcançar equilíbrio a um ângulo de rotação

levemente maior que θ_i , ou então θ pode crescer até um ponto em que a flexão lateral é suficiente para ocasionar o colapso da viga.

Assume-se que a viga esteja uniformemente inclinada por um ângulo θ . A componente $W \times \sin\theta$ causa um deslocamento lateral adicional z do centro de gravidade da viga, sendo portanto necessário que se saiba o valor de z para que se encontre o ângulo θ . Contudo, o deslocamento lateral z é determinado por $W \times \sin\theta$, que por sua vez depende de θ . Para resolver este impasse, Mast (1989) propõe que se calcule primeiramente o deslocamento teórico \bar{z}_0 do centro de gravidade da viga considerando todo o peso próprio aplicado sobre o eixo de menor inércia. Então, o deslocamento z pode ser dado pela Equação (11) a seguir:

$$z = \bar{z}_0 \times \sin\theta \quad (11)$$

Com relação ao valor de \bar{z}_0 , Mast (1989) corrobora a Equação (8), vista em Swann (1971), para o caso da viga içada a partir de suas extremidades. Já para o caso de uma viga içada de comprimento L e balanços de comprimento a , o deslocamento lateral fictício é calculado pela Equação (12):

$$\bar{z}_0 = \frac{w}{12E_c I_y L} \times \left(\frac{1}{10} l_1^5 - a^2 l_1^3 + 3a^4 l_1 + \frac{6}{5} a^5 \right) \quad (12)$$

Sendo que: w é o peso próprio uniformemente distribuído da viga;

l_1 é a diferença entre L e $2a$;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

I_y é o momento de inércia calculado em relação ao eixo de menor inércia.

O ângulo de rotação θ pode ser encontrado, então, por aproximações sucessivas, tratando-se de um ângulo suficientemente pequeno. De acordo com a Figura 11, pode-se escrever a Equação (13):

$$\theta = \frac{e_i}{y_r - \bar{z}_0} \Rightarrow \theta = \theta_i \times \left(\frac{1}{1 - \frac{\bar{z}_0}{y_r}} \right) \quad (13)$$

Sendo que: θ_i é o ângulo de rotação inicial, dado por $\theta_i = e_i/y_r$;

e_i é a excentricidade inicial do centro de gravidade a partir do eixo de giro;

\bar{z}_0 é o deslocamento lateral fictício do centro de gravidade da viga;

y_r é a distância do centro de gravidade da viga ao eixo de giro, medida ao longo do eixo vertical original da viga (já inclinado).

Pela Equação (13) desenvolvida por Mast (1989), percebe-se que, ainda que as imperfeições iniciais sejam praticamente nulas, o ângulo de rotação θ se torna muito grande à medida que \bar{z}_0 se aproxima do valor de y_r . No caso extremo de igualdade entre y_r e \bar{z}_0 , a viga é totalmente instável, configurando a situação crítica de estabilidade lateral no içamento. Considerando este fato, Mast (1989) propôs a adoção de um fator de segurança contra o colapso por instabilidade lateral para uma viga perfeita sem imperfeições iniciais, baseado nas suas propriedades elásticas laterais. A Equação (14) apresenta este fator de segurança:

$$FS = \frac{y_r}{\bar{z}_0} \quad (14)$$

Entretanto, pode-se considerar que uma viga sem imperfeições iniciais seja uma situação distante da realidade. Vigas com imperfeições iniciais podem sofrer colapso antes que a instabilidade total seja alcançada, pois existe um ângulo de rotação limite que as mesmas podem suportar, no que diz respeito à sua resistência à flexão lateral. Esse ângulo é definido como θ_{\max} , e a razão y_r/\bar{z}_0 que garanta que a rotação atinja θ_{\max} é denominada $(y_r/\bar{z}_0)_{\text{crít}}$. Desenvolvendo-se a Equação (13), pode-se obter a Equação (15) a seguir:

$$\left(\frac{y_r}{\bar{z}_0}\right)_{\text{crít}} = \frac{1}{1 - \frac{\theta_i}{\theta_{\max}}} \quad (15)$$

Sendo assim, Mast (1989) reformulou a determinação do fator de segurança, conforme Equação (16).

$$FS = \frac{y_r/\bar{z}_0}{(y_r/\bar{z}_0)_{\text{crít}}} \quad (16)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (16), pode-se obter:

$$FS = \frac{y_r}{\bar{z}_0} \times \left(1 - \frac{\theta_i}{\theta_{\max}}\right) \quad (17)$$

A Equação (17) apresentada por Mast (1989) considera a relação que representa a estabilidade básica y_r/\bar{z}_0 como seu parâmetro principal, podendo o fator de segurança ser reduzido ou não, dependendo da existência e magnitude das imperfeições iniciais. Quando não são consideradas as imperfeições iniciais, a Equação (17) reduz-se à Equação (14).

Contudo, Mast (1989) percebeu que a Equação (17) pode não representar fielmente a estabilidade lateral de uma viga em içamento no caso da mesma ser rígida lateralmente. Nesse caso, \bar{z}_0 tem pequeno valor, resultando em elevados valores de fator de segurança conforme a equação supracitada, o que não corresponde à realidade. Até mesmo vigas muito rígidas têm um ângulo de rotação limite θ_{\max} , além do qual a viga se rompe por flexão lateral. Para este tipo de vigas, o efeito das imperfeições iniciais é dominante, e Mast (1989) define o fator de segurança pela Equação (18):

$$FS = \frac{\theta_{\max}}{\theta} \quad (18)$$

Substituindo a Equação (13) na Equação (18), pode-se obter:

$$FS = \frac{\theta_{\max}}{\theta_i} \times \left(1 - \frac{\bar{z}_0}{y_r}\right) \quad (19)$$

O fator de segurança a ser adotado deve ser o menor entre os valores obtidos nas Equações (17) e (19).

Portanto, Mast (1989) propôs a avaliação da estabilidade lateral de vigas protendidas de seção duplo T em içamento, através da definição de um fator de segurança. Tal fator relaciona a altura acima do centro de gravidade até o eixo de giro da viga, o deslocamento fictício lateral do centro de gravidade da viga quando todo o peso próprio é aplicado

lateralmente, o ângulo de rotação inicial devido às imperfeições construtivas, e a máxima inclinação admissível da viga no içamento.

Mast (1989) ainda apresentou comparação entre sua formulação e a formulação do PCI Design Handbook 3^a edição, e concluiu que o seu fator de segurança dado pela Equação (14) é cerca de 50% maior que o fator dado pelo PCI. Logo, o PCI apresenta um fator de segurança oculto de 1,5, configurando uma opção conservadora que de certa forma compensa a ausência de especificações referentes às imperfeições construtivas.

A princípio, os estudos desenvolvidos por Mast (1989) limitavam-se aos problemas de instabilidade antes da viga começar o processo de fissuração, e o máximo ângulo de rotação era limitado pela máxima tensão de tração das fibras superiores da seção transversal.

Em seu segundo estudo, Mast (1993) estende as análises de estabilidade lateral para casos mais gerais de vigas, cujo apoio apresente restrições elásticas à rotação. Foi estudado o comportamento de vigas longas e esbeltas sobre apoios temporários, nos quais a ligação ainda não fora executada, e também o estágio transitório de transporte. A superelevação da via de tráfego é considerada e procedimentos simples são descritos para sua determinação.

Mast (1993) considerou que, com o aumento dos ângulos de inclinação da viga, a mesma permanece sem fissuras até um determinado valor de ângulo e, em seguida, inicia o processo de fissuração até sua ruptura. O autor apresenta ensaios experimentais que confirmam que as vigas suportam ângulos de rotação superiores ao ângulo limite de fissuração, sendo que a rigidez à flexão deve ser reduzida nesse caso.

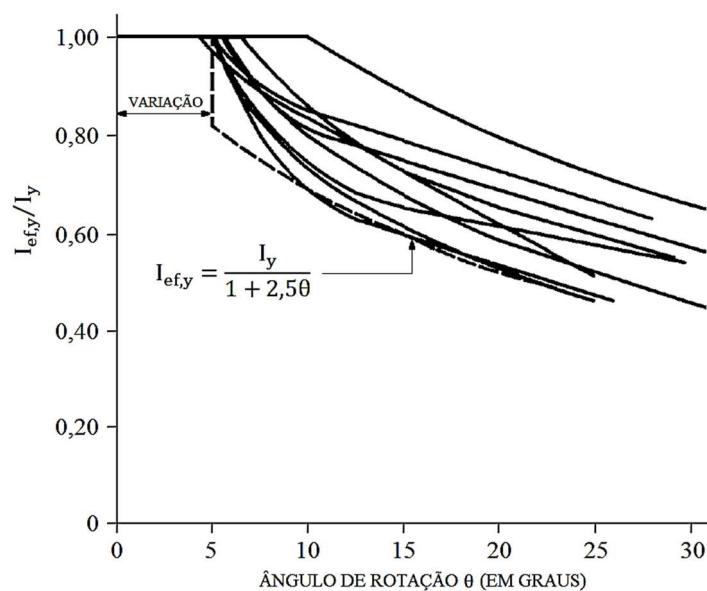
Pela análise de um programa computacional, com comprovação experimental de um ensaio em escala real, para nove vigas longas de seção I, Mast (1993) verifica que a rigidez à flexão lateral é reduzida na viga fissurada. Foi possível perceber que a variação da rigidez em função do ângulo de inclinação foi similar nas nove vigas, configurando um padrão. Além disso, todas as vigas tiveram um ângulo de inclinação previsto para atingir a resistência nominal de pelo menos 23°, o que motivou Mast (1993) a definir o ângulo de inclinação equivalente à ruptura como 0,4 rad. (ou 23°).

A partir dos estudos analíticos e experimentais, Mast (1993) propôs a adoção de uma rigidez efetiva para longas vigas I de concreto protendido, baseada nos valores das tensões de tração máximas na seção transversal. Sendo assim, o autor recomenda utilizar o valor integral da inércia I_y da seção, para ângulos de inclinação que produzam tensões de tração na mesa superior inferiores a $7,5\sqrt{f'_c}$, sendo f'_c a resistência de um corpo de prova cilíndrico de concreto na data do içamento ou transporte. Para ângulos de inclinação que produzam tensões de tração na mesa superior superiores a este parâmetro, Mast (1993) assume como rigidez efetiva a Equação (20):

$$I_{ef,y} = \frac{I_y}{1 + 2,5\theta} \quad (20)$$

A Figura 12 apresenta os resultados da variação da inércia de cada uma das nove vigas em relação ao ângulo de rotação θ , obtidos através do programa computacional de Mast (1993). Já a curva tracejada representa os resultados da Equação (20), proposta para o cálculo do momento de inércia efetivo. Também é importante destacar na Figura 12, que o patamar em que $I_{ef,y}/I_y = 1$, representa a situação anterior à fissuração, e o comprimento deste patamar varia de acordo com a tensão na mesa superior da viga. Além disso, a curva tracejada que representa a Equação (20) pode ser considerada como uma hipótese mais conservadora, pois supõe que haja uma perda brusca de rigidez após o início da fissuração.

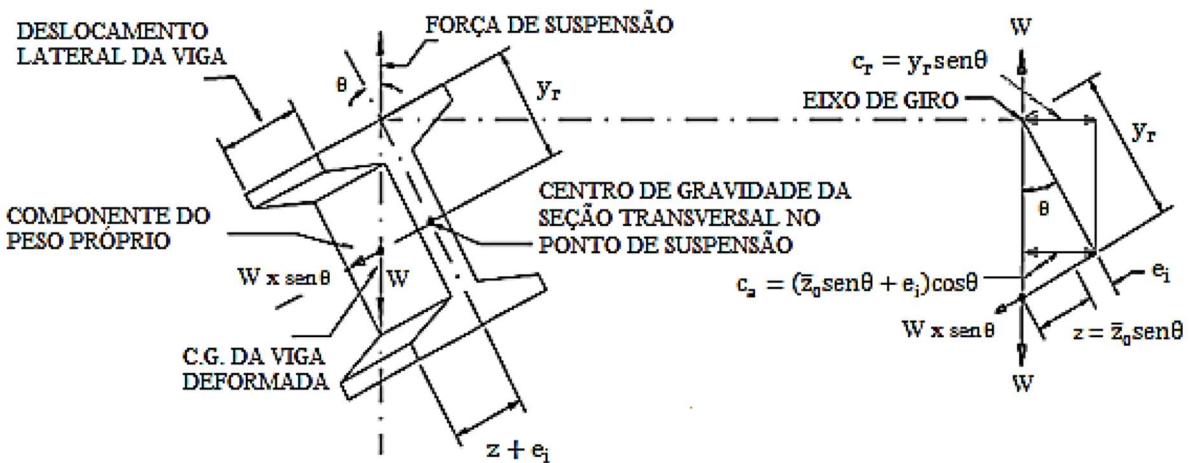
Figura 12 – Relação entre a inércia efetiva e o ângulo de rotação



Fonte: Adaptado de Mast (1993)

Mast (1993) expressou o fator de segurança em função de duas novas variáveis: o braço de alavanca do momento desestabilizador (c_a) e o braço de alavanca do momento estabilizador (c_r). Como se sabe que o peso da viga tende a causar seu tombamento, e que a reação nos cabos tende a sustentá-la, Mast (1993) definiu o fator de segurança contra a fissuração FS_{fiss} como a relação entre c_r e c_a . A Figura 13 mostra como os braços de alavanca são definidos, sendo que os momentos são calculados em relação ao centro de gravidade da seção transversal.

Figura 13 – Braços de alavanca estabilizador (c_r) e desestabilizador (c_a) para uma viga em içamento



Fonte: Adaptado de Mast (1993)

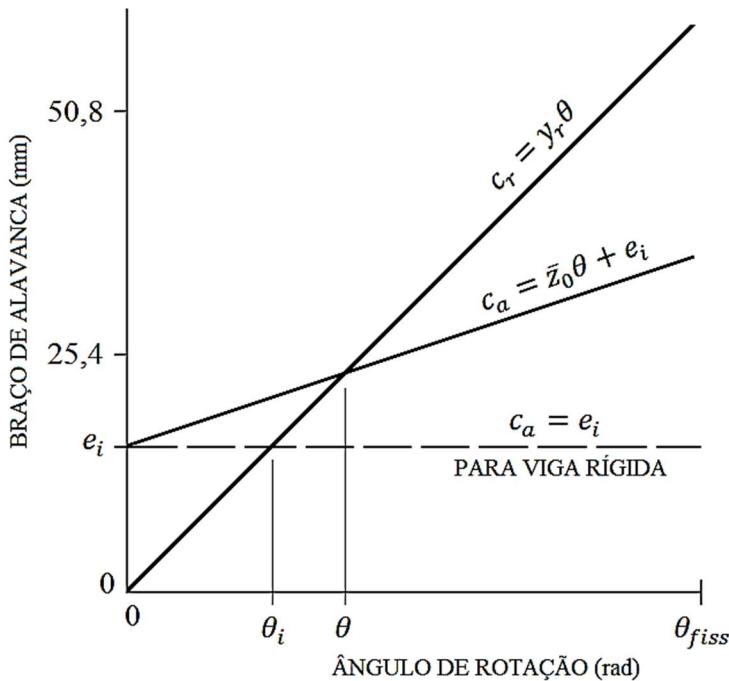
As Equações (21) e (22) representam os valores de c_r e c_a definidos por Mast (1993), para vigas em situação de içamento.

$$c_r = y_r \times \text{sen}\theta \quad (21)$$

$$c_a = (\bar{z}_0 \times \text{sen}\theta + e_i) \times \cos\theta \quad (22)$$

A Figura 14 apresenta uma plotagem de c_r e c_a para vigas não fissuradas, ou seja, vigas sujeitas a um ângulo de rotação relativamente pequeno. Em decorrência disso, aproximações podem ser realizadas, de modo que se tenha $\text{sen}\theta = \theta$, e $\cos\theta = 1$, o que garante que as curvas de c_r e c_a sejam linhas retas. O ângulo de equilíbrio θ é definido pela interseção das duas curvas, dado pela Equação (13), vista em Mast (1989).

Figura 14 – Variação dos braços de alavanca conforme ângulo de rotação (para vigas não fissuradas)



Fonte: Adaptado de Mast (1993)

O fator de segurança contra a fissuração proposto por Mast (1993) pode ser definido como a razão entre c_r e c_a , conforme Equação (23):

$$FS_{fiss} = \frac{c_r}{c_a} = \frac{y_r \theta}{\bar{z}_0 \theta + e_i} \quad (23)$$

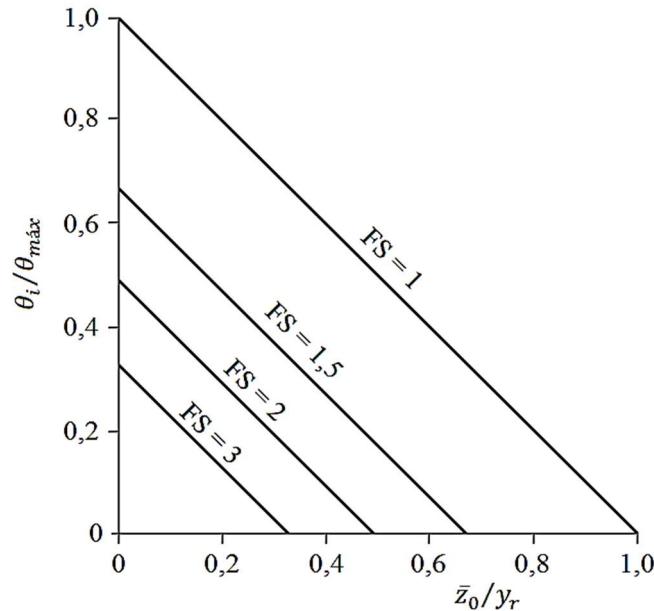
O ângulo de rotação inicial θ_i de uma viga rígida é e_i/y_r . Quando temos $\theta = \theta_{fiss}$, o ângulo de inclinação θ no qual se espera a fissuração, o fator de segurança contra a fissuração é encontrado. A Equação (24) representa este fator.

$$FS_{fiss} = \frac{y_r \theta_{fiss}}{\bar{z}_0 \theta_{fiss} + e_i} \Rightarrow FS_{fiss} = \frac{1}{\bar{z}_0/y_r + \theta_i/\theta_{fiss}} \quad (24)$$

A Figura 15 expressa graficamente a equação anterior. Esta equação substitui as Equações (17) e (19), apresentadas em Mast (1989). A nova equação apresenta menores valores de fator de segurança quando essas duas relações são positivas, pois considera o efeito combinado das duas relações variando simultaneamente, enquanto que as Equações (17) e (19) consideravam essas relações variando uma por vez. Desta forma, quando ou

\bar{z}_0/y_r ou θ_i/θ_{fiss} são nulos, os resultados obtidos pela Equação (24) são idênticos aos resultados de Mast (1989).

Figura 15 – Fatores de segurança contra a fissuração em uma viga em içamento



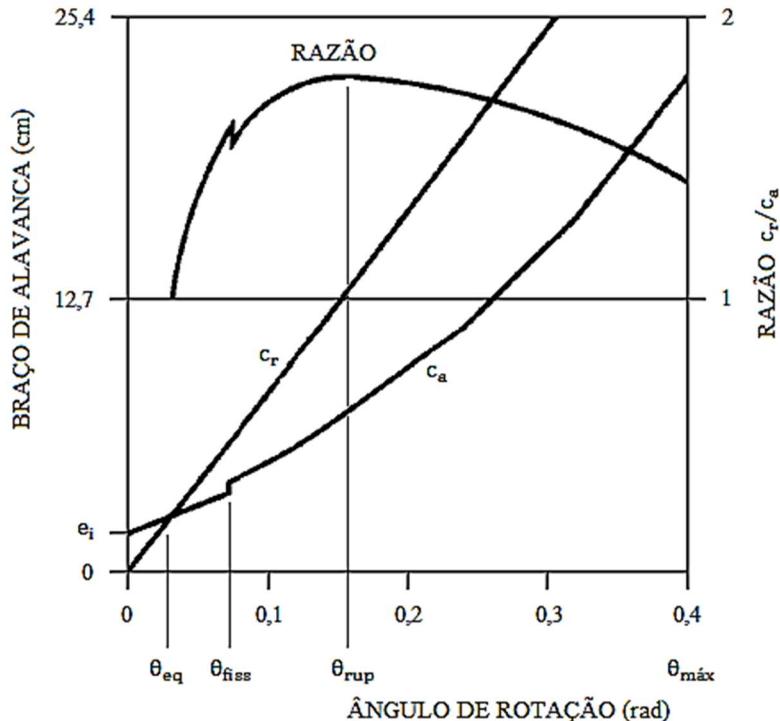
Fonte: Adaptado de Mast (1993)

No caso de vigas já fissuradas, como \bar{z}_0 é função da rigidez em relação ao eixo de menor inércia, e esta rigidez depende do ângulo de inclinação θ , então \bar{z}_0 é também uma função de θ .

O fator de segurança contra a ruptura FS_{rup} pode ser analisado ao se levar as curvas c_r e c_a além do ponto de fissuração. O cálculo para c_r e c_a é feito para incrementos do ângulo de inclinação θ além da fissuração. Para cada θ , calcula-se \bar{z}_0^{rup} , usando-se $I_{ef,y}$ para o mesmo ângulo θ . O cálculo é dado na Equação (25), e os resultados são apresentados na Figura 16.

$$\bar{z}_0^{rup} = \bar{z}_0(1 + 2,5\theta) \quad (25)$$

Figura 16 – Razão entre braços de alavanca conforme ângulo de rotação (para vigas fissuradas)



Fonte: Adaptado de Mast (1993)

A curva de c_r é quase uma linha reta, já que para $\theta = 0,4$ rad, $\sin \theta = 0,97 \theta$. A curva de c_a (momento aplicado) tem inclinação ascendente em maiores ângulos θ , à medida que a rigidez diminui e \bar{z}_0 aumenta. A relação entre c_r e c_a também é plotada. O seu máximo valor ocorre em um ângulo de rotação chamado θ_{rup} , correspondente ao fator de segurança contra a ruptura. A partir desse ponto, a relação c_r/c_a começa a diminuir. Mast (1993) definiu este ângulo como o ângulo de inclinação de ruptura, dado conforme Equação (26).

$$\theta_{rup} = \sqrt{\frac{e_i}{2,5\bar{z}_0}} \quad (26)$$

As quantidades θ_{rup} e \bar{z}_0^{rup} podem ser substituídas na Equação (23) para encontrar o máximo fator de segurança contra a ruptura:

$$FS_{rup} = \frac{y_r \theta_{rup}}{\bar{z}_0^{rup} \theta_{rup} + e_i} \quad (27)$$

Finalmente, Mast (1993) recomenda que se utilize um fator de segurança de 1,0 contra a fissuração e 1,5 contra a ruptura.

Por tratarem o problema com simplicidade e clareza, os artigos de Mast (1989 e 1993) se tornaram referência na verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas protendidas. Assim, é importante ressaltar que as recomendações do autor ainda constam atualmente no código americano PCI Bridge Design Manual.

Mast (1994) apresenta os resultados de um ensaio de uma viga de concreto protendido de 45,4 m de comprimento, e seção transversal I de aproximadamente 1,87 m de altura. A viga foi submetida à flexão lateral até a sua ruptura, tendo sido gradualmente inclinada com balanços de 3,3 m, na direção de sua imperfeição inicial, e sob condições controladas. Os objetivos do teste foram analisar o comportamento das seções fissuradas de vigas I, sujeitas a carregamento aplicado no seu eixo de menor inércia, e avaliar a eficácia dos sistemas de contraventamento utilizados no transporte de vigas de concreto protendido.

As tensões e deformações foram medidas em intervalos de tempo previamente determinados, implementando-se diferentes incrementos no ângulo de inclinação. Os testes demonstraram que a viga apresentou carga referente à fissuração consideravelmente superior à carga teórica prevista, e que para esta carga, ainda não era possível se notar nenhum sinal visível de danificação após a retirada da carga lateral. Além disso, o ângulo de inclinação lateral observado até a ruptura foi também superior ao valor previsto em projeto, observando fissuração na mesa superior em torno de 16° e ruptura para rotação de 32°.

Sendo assim, de acordo com Mast (1994), o comportamento de vigas protendidas com carregamento lateral pode ser previsto satisfatoriamente por uma análise elástica da seção fissurada. O autor verificou ainda, que o uso do sistema de contraventamento *king-post* não representou ganho significativo ao se solicitar a viga horizontalmente.

2.2.5. Lima (1995 e 2002)

Lima (1995) discute uma formulação analítica para o cálculo da carga crítica de instabilidade de vigas pré-moldadas, durante o regime de serviço e durante a fase transitória. A fase de serviço apresenta situações de vigas sobre apoios deformáveis e indeformáveis à torção, enquanto que a fase transitória inclui os casos de içamento com cabos retos e inclinados na presença e na ausência de balanços.

O estudo do equilíbrio no espaço é efetuado por Lima (1995) a partir da resolução das equações diferenciais regentes da instabilidade elástica. A resolução do sistema diferencial composto pelas equações acopladas da flexão lateral e da torção é realizada por vários métodos, incluindo o desenvolvimento e automatização do método numérico de Runge-Kutta, para algumas seções típicas.

Os exemplos numéricos propostos por Lima (1995) apresentaram resultados que confirmaram que as fases de serviço geralmente não são críticas por perda de estabilidade lateral. Já a fase transitória constitui uma situação oposta, em que são verificadas ocorrências de flambagem lateral. Nesse caso, a presença de balanços no içamento tem um efeito positivo, tanto para as vigas protendidas como para as vigas sem protensão, incrementando substancialmente a segurança desta fase, e diminuindo os problemas de instabilidade lateral. Na situação de suspensão de vigas protendidas, os balanços devem ser geralmente pequenos. Já nos demais casos, confirma-se que a melhor disposição dos cabos se situa nas proximidades dos quartos de vão.

O estudo de Lima (1995) possibilita, como uma primeira aproximação, o cálculo da carga crítica de instabilidade lateral resultante do limite de instabilidade elástica, pois as análises foram baseadas nas hipóteses de regime elástico-linear. Assim sendo, a partir deste limite, ocorre mudança de equilíbrio em teoria de segunda ordem. Conhecida a carga crítica, pode-se escrever expressões aproximadas para a rigidez reduzida. Porém, estas não correspondem às reais condições de forma satisfatória e mais realista, uma vez que o problema da instabilidade lateral deve ser tratado levando-se em conta as deformações da viga e o comportamento não linear dos materiais.

Já em sua tese de doutorado, Lima (2002) apresenta um estudo do comportamento não linear físico de vigas pré-moldadas de concreto armado e protendido sob ação simultânea de torção, flexão bilateral e força axial. O trabalho foi desenvolvido por meio de modelagem numérica, sendo implantados no programa computacional de Lima (2002) alguns modelos numéricos para simular o comportamento das vigas, baseados na predominância dos esforços de torção ou de flexão, e também por meio de ensaio experimental de vigas de concreto sob tombamento lateral gradual.

De acordo com Lima (2002), o modelo numérico adequado a situações onde a torção é predominante sobre a flexão baseia-se na analogia ao comportamento de treliça espacial e na extensão da teoria dos campos diagonais comprimidos. O modelo utilizado por Cocchi & Volpi (1996) e implementado no programa computacional de Lima (2002) conduz a respostas satisfatórias do comportamento de elementos estruturais sob ações combinadas de flexão, torção e força axial, se aproximando dos resultados experimentais disponíveis na literatura técnica. Já nas situações em que a flexão é predominante sobre a torção, Lima (2002) utilizou o modelo de Hannachi & Fouré (1996), que permite calcular a rigidez à torção após a fissuração por flexão da viga.

Lima (2002) desenvolveu um programa experimental, em que duas vigas longas e esbeltas de concreto armado foram moldadas e ensaiadas no laboratório, sob tombamento lateral gradual e ação única do peso próprio. O objetivo era a calibração e validação do programa computacional proposto. Através do experimento, pôde-se observar que a torção é de fato muito pequena e que a flexão lateral é predominante em virtude da baixa rigidez lateral das vigas esbeltas. As medidas experimentais das deformações no concreto e nas armaduras foram feitas utilizando-se Estações Totais, e convergiram satisfatoriamente com as respostas numéricas, conforme relatado também por Lima e El Debs (2005). A Figura 17 mostra uma fase de leitura dos deslocamentos laterais de uma viga.

Figura 17 – Acompanhamento do ângulo imposto pelas medidas de deslocamentos nos apoios



Fonte: Lima (2002)

Lima (2002) ressalta ainda a importância de se escolher adequadamente o comprimento dos balanços, bem como a inclinação dos cabos de suspensão, garantindo a estabilidade da viga. Os resultados numéricos mostram que os balanços formados podem gerar estabilidade ou instabilidade no comportamento geral, aumentando ou diminuindo o fator de segurança durante a fase de içamento.

2.2.6. Stratford e Burgoyne (1999 e 2000), e Stratford et al. (1999)

Stratford e Burgoyne (1999) observam a necessidade da verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto, visto que as seções de vigas disponíveis buscam atender a demanda da indústria da construção pré-fabricada para vãos cada vez maiores. Como consequência do aumento do vão das vigas, tem-se reduzido a largura das mesas, mantendo-se o peso das vigas em um patamar aceitável. Contudo, o resultado disso é que as seções de vigas apresentam menor rigidez à torção e menor rigidez à flexão lateral, se comparadas às seções utilizadas anteriormente. Sendo assim, a verificação da estabilidade lateral é justificada nas peças de concreto, embora trate-se de um material com peso próprio elevado e alta rigidez à torção.

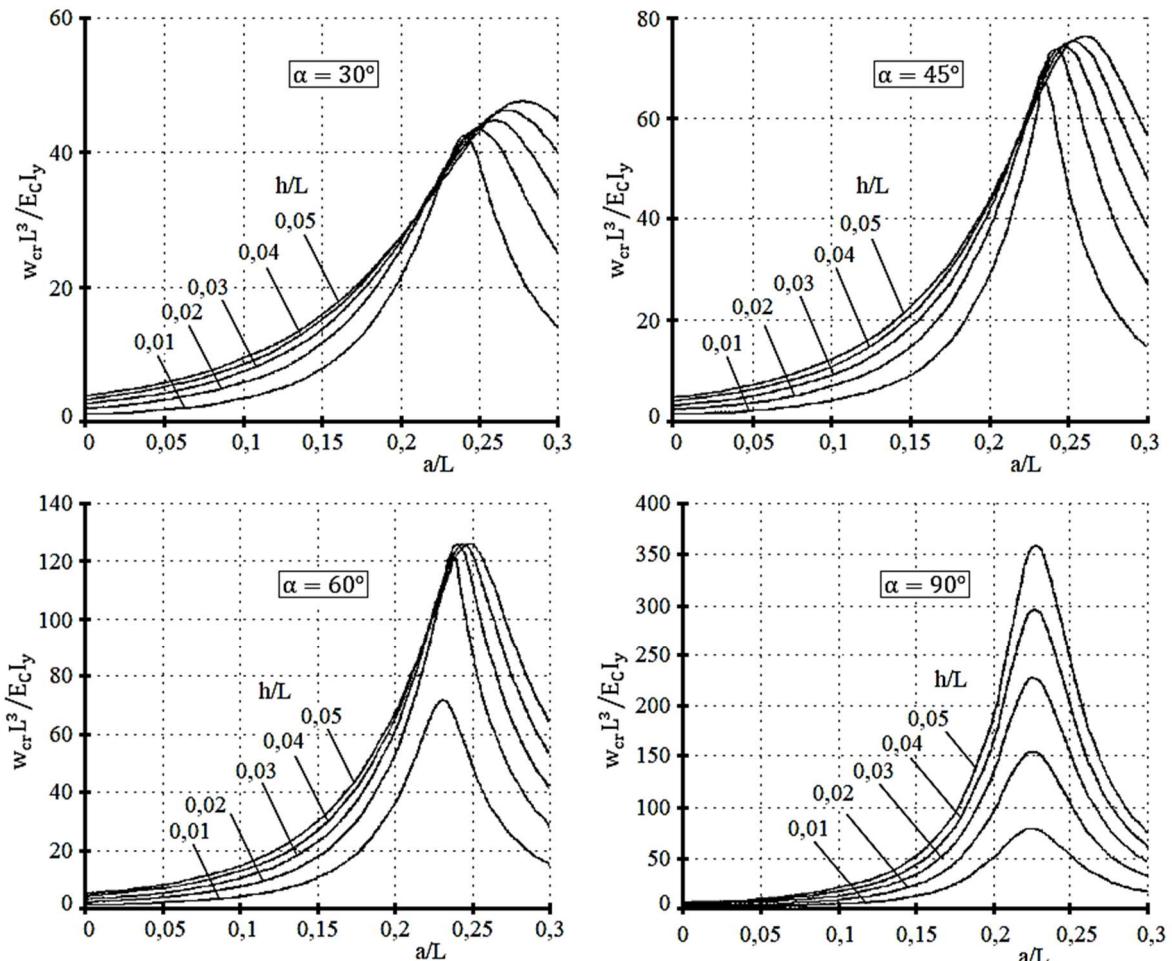
Em vigas pré-moldadas de concreto, de acordo com Stratford e Burgoyne (1999), as condições transitórias exigem especial atenção. Desta forma, as análises de estabilidade foram desenvolvidas para três diferentes estágios, quais sejam: içamento, transporte e posicionamento na estrutura. Para estas condições, admite-se que a ruína irá ocorrer por instabilidade elástica sob solicitação exclusiva do peso próprio. Logo, a carga crítica corresponde ao carregamento uniformemente distribuído que causaria instabilidade lateral em uma viga perfeita, cujo valor deve ser comparado com o peso próprio real da viga. Os parâmetros necessários para as análises de estabilidade através do cálculo da carga crítica são o comprimento da viga, as propriedades físicas dos materiais e mecânicas da seção transversal, a posição dos apoios e a inclinação dos cabos de suspensão.

Devido à complexidade das análises de estabilidade para as três diferentes condições de apoio, nem todas elas são passíveis de solução analítica. Portanto, Stratford e Burgoyne (1999) utilizaram técnicas de elementos finitos e realizaram duas análises, uma de autovalor e outra não linear, buscando-se a produção de gráficos de projeto e a resposta completa da

curva força-deslocamento da viga. Estudos paramétricos foram realizados utilizando-se a análise de elementos finitos de autovalores. Estes investigaram a variação na carga crítica com a variação dos parâmetros citados anteriormente. É importante destacar que em todas as análises numéricas desenvolvidas por Stratford e Burgoyne (1999), o material é considerado com comportamento elástico-linear, sem que a fissuração seja levada em consideração.

A Figura 18 mostra a variação da carga crítica adimensional com a geometria da viga. Cada gráfico foi plotado para diferentes valores do ângulo do cabo α e mostra curvas para valores de h/L , sendo h a altura da barra rígida. Os gráficos fornecem a variação na carga crítica com a relação a/L , sendo a o posicionamento dos apoios a partir das extremidades.

Figura 18 – Carga crítica adimensional de vigas içadas por cabos verticais em função do comprimento do balanço, altura de barra rígida e ângulo de inclinação dos cabos

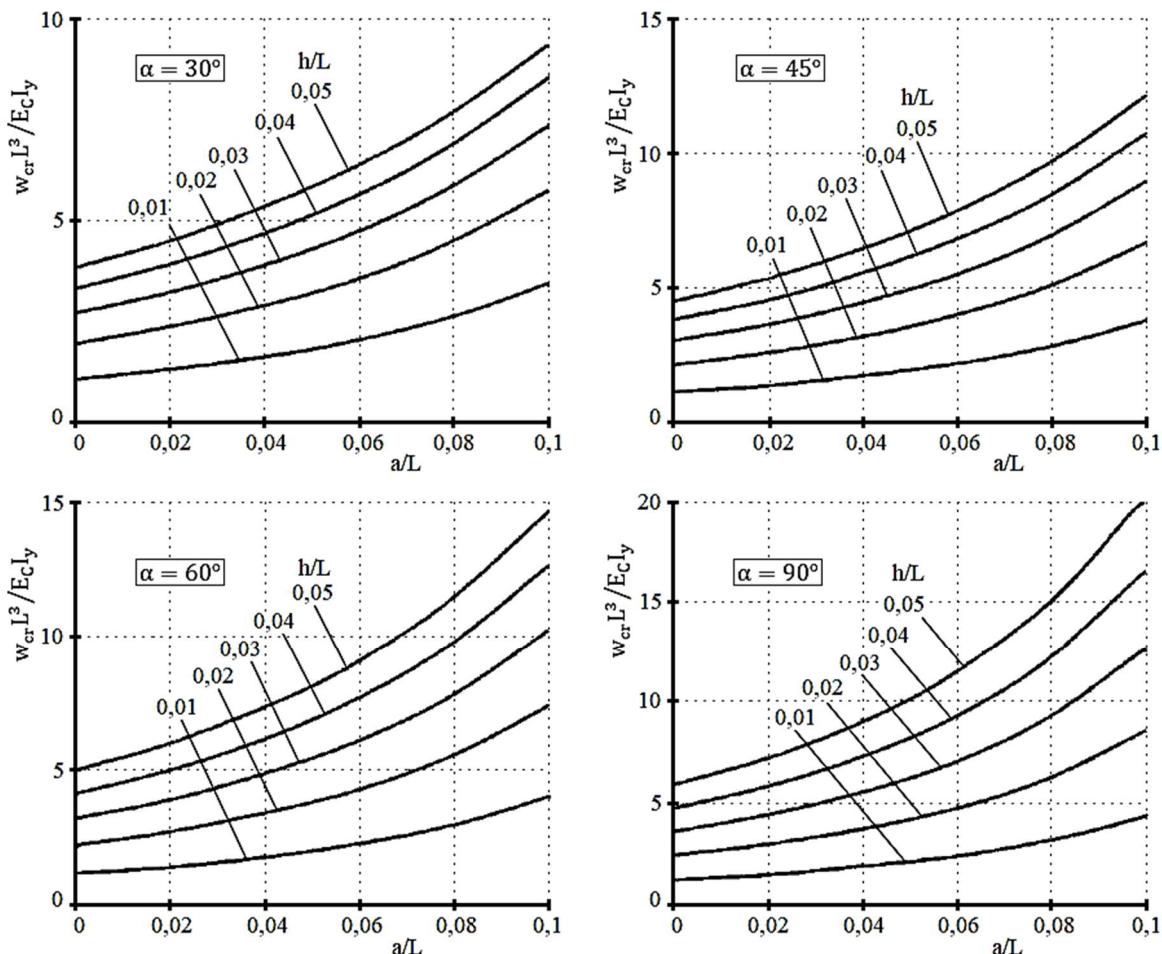


Fonte: Adaptado de Stratford e Burgoyne (1999)

A análise por elementos finitos de Stratford e Burgoyne (1999) mostrou que a carga crítica de uma viga em suspensão é independente da rigidez à torção GJ , e consequentemente pode ser escrita em termos adimensionais usando-se o parâmetro EI_y/L^3 . Embora haja uma rotação de corpo rígido, há apenas uma pequena variação na torção ao longo da viga.

Os gráficos da Figura 18 foram obtidos por simulação numérica, e mostram que a carga crítica aumenta com a altura das alças de içamento, à medida que os cabos se aproximam da vertical, e à medida que as alças se aproximam do quarto de vão ($a/L = 0,25$). Contudo, devido a execução da protensão na viga, normalmente não é possível inserir as alças de içamento muito afastadas de suas extremidades. Portanto, gráficos adicionais são apresentados na Figura 19, mostrando as cargas críticas para vigas içadas por cabos cujo posicionamento garanta a relação a/L inferior a 0,1.

Figura 19 – Carga crítica adimensional de vigas içadas por cabos verticais posicionados próximos às suas extremidades, em função do comprimento do balanço, altura de barra rígida e ângulo de inclinação dos cabos



Fonte: Adaptado de Stratford e Burgoyne (1999)

Ao identificarem que a componente de torção que colabora na instabilidade lateral em vigas de concreto não é significativa, Stratford e Burgoyne (1999) descreveram o problema da instabilidade de vigas suspensas por cabos através da rotação de corpo rígido em torno do ponto de fixação dos cabos e da flexão em torno do eixo de menor inércia. Desta forma, o problema da viga suspensa é analisado pelos autores como instabilidade por flexão lateral.

Stratford e Burgoyne (1999) forneceram também os valores de carga crítica para uma viga longa SY-6 submetida a várias condições de apoio, e compararam estes valores ao peso próprio da viga. A comparação mostrou que a carga crítica que causa instabilidade lateral para uma viga em içamento é muito menor que a carga crítica para uma viga simplesmente apoiada ou em transporte. Sendo assim, os autores concluíram que a suspensão da viga é a etapa mais crítica, uma vez que não há qualquer restrição ao giro de corpo rígido da mesma, permitindo que ela gire até encontrar uma posição de equilíbrio. Além disso, 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.

Quanto às imperfeições iniciais, Stratford e Burgoyne (1999) afirmaram que as mesmas podem crescer à medida que a carga é aplicada, o que pode levar a tensões inaceitáveis antes da instabilidade lateral ocorrer, ainda que o peso da viga seja menor que a carga crítica.

Sendo assim, no intuito de considerar as imperfeições geométricas, Stratford e Burgoyne (1999) sugerem a utilização da hipótese de Southwell (1932) apud Stratford e Burgoyne (1999), que é utilizada para descrever o comportamento carga-deslocamento de uma viga que está se aproximando da carga de flambagem. Segundo os autores, a deformação inicial de uma viga içada pode ser tomada com forma senoidal. A Equação (28) é utilizada para relacionar o deslocamento lateral devido ao peso próprio w ao deslocamento lateral inicial δ_0 , sendo que o deslocamento lateral resultante da equação é usualmente conservador, pois superestima o deslocamento real.

$$\delta = \frac{\delta_0(1 - \operatorname{sen} \pi a/L)}{(1 - w/w_{cr})} \quad (28)$$

Sendo que: w_{cr} é a carga crítica de instabilidade lateral da viga.

Stratford et al. (1999) apresentam um equacionamento simplificado que permite aos projetistas estruturais verificarem a estabilidade de vigas pré-moldadas de concreto na fase de serviço, durante o transporte, durante o içamento e apoiadas sobre almofadas de elastômero. Os autores revelam algumas expressões para o cálculo da carga crítica de instabilidade lateral, para o prognóstico dos efeitos de imperfeições geométricas da viga, e para determinação do efeito das tensões induzidas por efeitos de segunda ordem em vigas imperfeitas.

A situação de içamento de uma viga é considerada por Stratford et al. (1999) como a mais crítica, em decorrência da falta de restrição lateral. Para esta situação, Stratford et al. (1999) confirmaram, através de simulação numérica com o método dos elementos finitos, que a carga crítica de instabilidade pode ser considerada independente da rigidez à torção. Durante o içamento, os cabos não impedem a rotação nos pontos onde são fixos, e a viga sofre rotação como um corpo rígido, o que possibilita que se despreze a rotação relativa entre os cabos e o meio do vão. Sendo assim, grandes deslocamentos à flexão podem ocorrer sem nenhuma variação de torção ao longo da viga.

De acordo com Stratford et al. (1999), para cada caso de carregamento, é de fundamental importância que se determine: a carga crítica de instabilidade lateral de uma viga perfeita, a curva carga-deslocamento da viga com imperfeições, a curvatura associada a um dado deslocamento lateral, e as tensões de flexão que são adicionais àquelas devidas ao momento fletor principal e à protensão.

Portanto, baseados na hipótese de Southwell (1932) apud Stratford et al. (1999), a Equação (29) é utilizada para relacionar o deslocamento lateral no instante da instabilidade δ_t ao deslocamento lateral inicial δ_0 .

$$\delta_t = \frac{\delta_0(1 - \operatorname{sen} \pi a/L)}{(1 - w_{lim}/w_{cr})} \quad (29)$$

Sendo que: w_{cr} é a carga crítica de instabilidade lateral da viga;

w_{lim} é a carga limite de instabilidade que leva em conta as imperfeições geométricas da viga.

Como apresentado também em Stratford e Burgoyne (1999), a análise por elementos finitos mostrou que a carga crítica de uma viga em suspensão é independente da rigidez à torção GJ , podendo ser escrita em termos adimensionais usando-se o parâmetro EI_y/L^3 . Uma solução analítica foi obtida para o problema da viga em içamento, mas as equações resultantes devem ser resolvidas numericamente, e os resultados foram apresentados por Stratford et al. (1999) em forma gráfica adimensional.

Os gráficos apresentados por Stratford et al. (1999) foram obtidos por simulação numérica, e mostram que a carga crítica aumenta com a altura das alças de içamento, à medida que os cabos se aproximam da vertical, e à medida que as alças são movidas a partir das extremidades da viga, sendo que a situação em que as mesmas estão nas extremidades corresponde ao caso mais crítico de instabilidade lateral.

Apenas o caso de cabos de içamento verticais pode ser reduzido a uma simples expressão, apresentada na Equação (30):

$$w_{cr} = \frac{12E_c I_y h}{L^4/10 - aL^3 + 3a^2L^2 - 2a^3L - a^4} \quad (30)$$

Considerando a relação entre os deslocamentos inicial e final e a rotação da seção, no estágio limite uma componente da carga w_{lim} estará atuando lateralmente. Então o deslocamento provocado será $(\delta_t - \delta_0)$. Usando a Equação (30) na expressão apresentada por Stratford et al. (1999) que relaciona deslocamento à rotação limite, obtém-se a Equação (31), considerando a aproximação de pequenos deslocamentos.

$$w_{lim} = w_{cr} - \frac{\delta_0[1 - \operatorname{sen}(\pi a/L)]}{\frac{w \operatorname{sen} \theta_{lim}}{384E_c I_y} (5L^2 - 20aL - 4a^2) \left(\frac{6}{5}a^5 - L\right)^2 + \delta_0[1 - \operatorname{sen}(\pi a/L)]} \quad (31)$$

Sendo que: θ_{lim} é a rotação no momento em que w_{lim} é alcançada.

Stratford et al. (1999) concluíram que as vigas são mais suscetíveis a sofrer instabilidade lateral durante seu içamento, sendo que os riscos são acentuados à medida que seu comprimento cresce, assim como sua esbeltez. Além disso, a presença de imperfeições iniciais pode gerar grandes tensões no concreto, e a fissuração não deve ser permitida, pois gera um alto potencial de ruptura abrupta.

Especificamente sobre a suspensão de vigas, Stratford et al. (1999) fizeram as seguintes recomendações:

- Os cabos de suspensão devem ser tão verticais quanto for possível;
- O tamanho da alça de içamento deve ser aumentado para se aumentar a altura y_r ;
- A posição ótima dos cabos de içamento deve situar-se próxima dos quartos de vão, exceto no caso de vigas protendidas. Nesse caso os cabos devem aproximar-se das extremidades da viga;
- O projeto de protensão deve levar em consideração tensões presentes no içamento devido à carga lateral de peso próprio e cargas laterais adicionais, pois tais cargas podem ser muito significativas;
- Imperfeições laterais devem ser mantidas em um valor mínimo. Uma pequena curvatura lateral irá sempre existir em virtude do processo de manufatura, mas excentricidades acentuadas podem introduzir tensões significativas no concreto.

Stratford e Burgoyne (2000) discutiram a estabilidade da situação crítica de vigas içadas por cabos, considerando que o modo de flambagem de vigas longas e pesadas pode ser concebido por meio de uma rotação de corpo rígido em torno de pontos fixos nos cabos de suporte, aliada à flexão lateral em torno do eixo de menor inércia. Assim sendo, a simplificação decorrente da suposição de que a viga apresenta rigidez infinita à torção, permite tratar o problema de forma analítica, embora os autores tenham utilizado também solução numérica no conjunto final de equações.

Desta forma, Stratford e Burgoyne (2000) propuseram a análise e derivaram equações para o problema do içamento de vigas por cabos inclinados ou verticais, com barras rígidas verticais ou inclinadas, com cargas laterais como o efeito do vento, bem como vigas com imperfeições iniciais. Foram apresentados métodos que mostram como a carga de

flambagem, o modo de flambagem e o comportamento carga-deslocamento de vigas com imperfeições podem ser determinados.

A formulação proposta por Stratford e Burgoyne (2000) foi aplicada a algumas vigas de comprimento L suspensas por cabos retos ou inclinados, com balanços. Os cabos são presos a barras rígidas fixadas na viga acima do eixo do centro de gravidade. O carregamento se resume ao peso próprio ao longo do CG e a uma carga distribuída lateralmente ao longo do comprimento da viga, representando por exemplo o carregamento do vento. Dentre as hipóteses assumidas pelos autores, destaca-se que a viga não apresenta flexão em torno do eixo de maior inércia nem torção, que os deslocamentos relativos ao eixo de menor inércia são assumidos pequenos em comparação com o eixo da viga, e que a viga permanece no regime elástico-linear em toda a análise, sendo invariáveis as propriedades das seções.

Stratford e Burgoyne (2000) definiram que sua análise somente poderia ser desenvolvida considerando-se a rigidez do elemento estrutural constante, ou seja, o equacionamento do problema não é válido para vigas submetidas a tensões que superem o limite da fissuração, uma vez que a fissuração reduz a rigidez da viga, o que certamente levaria a um problema de instabilidade lateral.

As análises simplificadas desenvolvidas por Stratford e Burgoyne (2000) mostraram o comportamento de vigas suspensas em gráficos plotando a relação da carga crítica com o comprimento dos balanços, considerando ou não excentricidade inicial lateral como imperfeição inicial, e verificando a influência da inclinação dos cabos de suspensão. Com relação à suposição inicial de que há rotação na viga sem variação na torção, Stratford e Burgoyne (2000) observaram que a taxa de giro por torção é pequena comparada com o giro de corpo rígido, verificando que a simplificação é razoável, e que este tipo de análise é particularmente adequado para vigas de concreto.

2.2.7. Plaut e Moen (2011 e 2013) e Cojocaru (2012)

Plaut e Moen (2011, 2013) apresentaram teorias e aplicações referentes à situação de içamento de vigas duplamente simétricas por dois cabos. O objetivo dos autores era obter soluções analíticas para forças internas, ângulos de giro, deslocamentos e momentos na viga,

considerando-se a mesma curva, e com dimensões da seção transversal pequenas quando comparadas com o raio de curvatura. O estudo realizado divide-se em duas partes, sendo que a primeira apresenta a formulação analítica proposta, e a segunda apresenta as aplicações do equacionamento analítico em vigas de concreto e em vigas de aço.

De acordo com Plaut e Moen (2011, 2013), durante a suspensão de uma viga curva, a mesma tende a sofrer um giro em torno de um eixo superior à mesma, o que leva ao surgimento de momentos fletores em torno dos eixos de maior e menor inércia, além de torção da seção transversal. Alguns parâmetros influenciam nesse comportamento da viga, quais sejam: a rigidez no eixo de menor inércia, a inclinação dos cabos de suspensão e o comprimento dos balanços.

A formulação analítica proposta por Plaut e Moen (2011, 2013) leva em consideração vigas curvas de pequena curvatura suspensas por dois cabos simétricos em relação ao meio do vão, cujo centro de gravidade coincide com o centro de cisalhamento, além de material homogêneo e estudo em regime elástico-linear. Considera-se ainda que as deformações são pequenas, que os cabos se encontram alinhados, ou seja, sem excentricidade, e que não há esforços de protensão aplicados.

A Figura 20 apresenta a configuração da viga curva de pequena curvatura na situação de içamento por dois cabos, sendo apresentadas duas vistas superiores mostrando a excentricidade e também o centro de curvatura, e duas perspectivas mostrando o ângulo de giro da viga. A Figura 20 apresenta também alguns parâmetros geométricos de interesse referentes à situação de içamento.

Sendo que: γ é o ângulo associado ao ponto de içamento;

θ é o ângulo que indica a posição ao longo de metade do comprimento da viga no içamento;

α é o ângulo associado à extremidade da viga no içamento;

β é o ângulo de giro da viga;

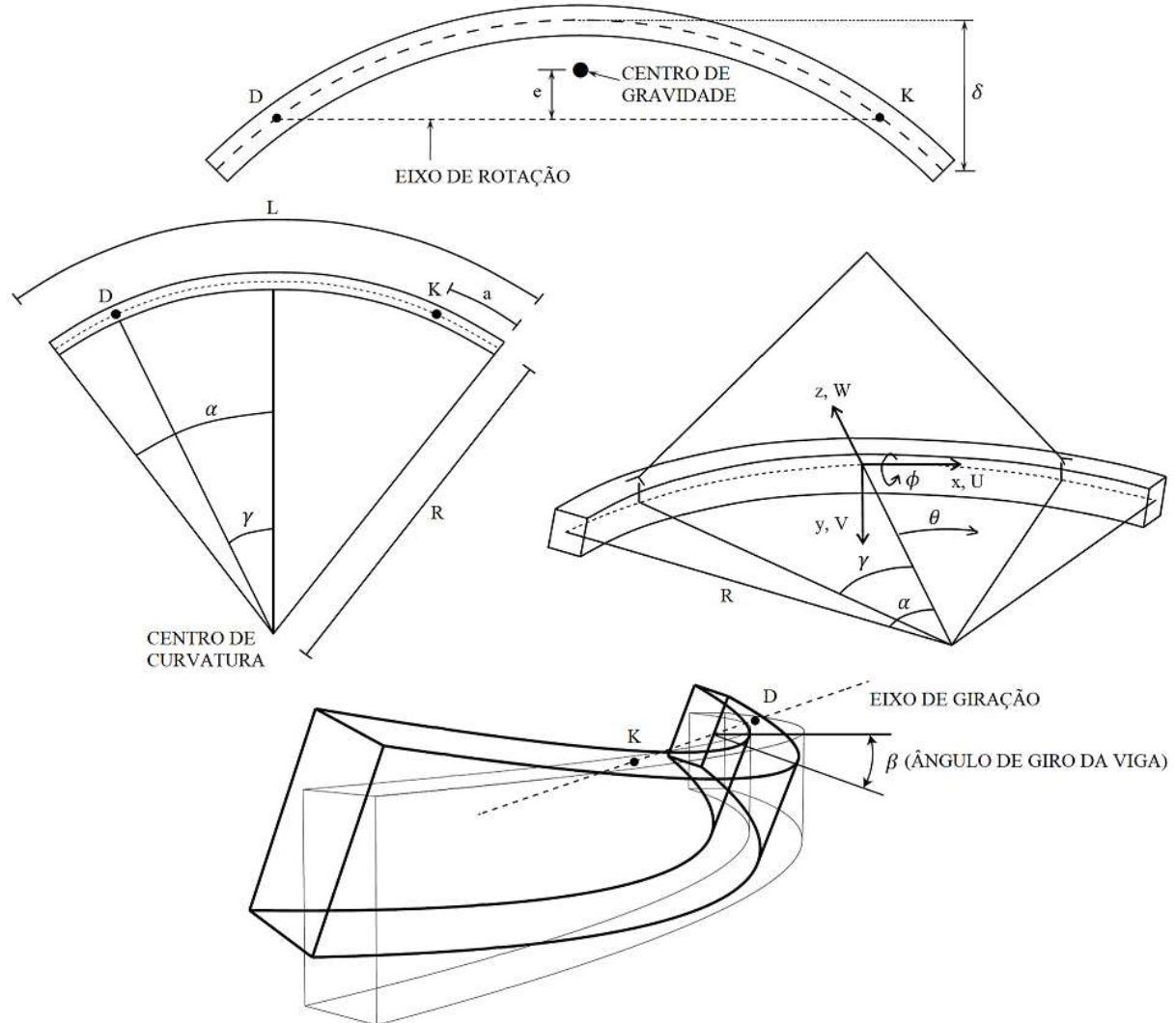
ϕ é o giro de torção da viga;

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;
 W é o deslocamento na direção do eixo de maior inércia da viga.

Figura 20 – Parâmetros geométricos da viga curva



Fonte: Adaptado de Plaut e Moen (2011, 2013)

A segunda parte do trabalho de Plaut e Moen (2011, 2013) consistiu na aplicação das fórmulas obtidas na primeira parte em vigas de concreto e de aço, ambas duplamente simétricas. Nas vigas de concreto, o empenamento foi desprezado, a curvatura foi considerada como a imperfeição existente na própria viga, e a seção transversal era retangular e esbelta. Já nas vigas de aço, o empenamento não foi desprezado, as vigas foram intencionalmente curvadas, e foi adotada seção transversal I.

Quanto às vigas de concreto, Plaut e Moen (2011, 2013) concluíram que, caso a rigidez no eixo de menor inércia ou a distância entre o centro de gravidade e o eixo de giro aumentem, o ângulo de giro diminui. Além disso, foi possível atestar que o momento e o ângulo de torção são pequenos no balanço, e que o momento fletor no eixo de menor inércia aumenta se a inclinação dos cabos de içamento aumenta. Já quanto às vigas de aço, Plaut e Moen (2011, 2013) observaram que o ângulo de torção é muito sensível à razão a/L , sendo que, se essa razão diminui, o ângulo de torção aumenta. Além disso, se a largura e espessura das mesas das vigas de aço são maiores, o ângulo de giro e o ângulo de torção na metade do vão e nas extremidades diminuem, pois há maior resistência à torção e ao empenamento.

Em suma, Plaut e Moen (2011, 2013) forneceram um método geral para estudar o comportamento de uma viga curva sendo içada por dois cabos. Os autores verificam que as maiores tensões e deformações em uma viga curva podem ocorrer durante o içamento e que a locação das alças de içamento é fundamental na determinação do ângulo de rotação e deformações da viga. Plaut e Moen (2011, 2013) observam ainda que rotação total de cada seção transversal depende do ângulo de giro de corpo rígido e da parcela da torção, bem como da posição no comprimento da viga. Para balanços com comprimento equivalente a 20% do comprimento da viga, a rotação total é ínfima. No entanto, para vigas de concreto pretendido, ter um balanço tão grande pode não ser possível devido às tensões de tração longitudinais excessivas no topo da viga, e seu consequente efeito de fissuração.

Cojocaru (2012) apresenta uma compilação de aferições de medidas de deslocamento lateral em 128 vigas padronizadas normalmente utilizadas na construção de pontes e viadutos, e da excentricidade dos pontos de içamento em 10 vigas. Segundo o autor, para a maioria das vigas, o deslocamento lateral medido no meio do vão coincidiu com o máximo valor verificado para toda a viga. Já quanto à excentricidade das alças de içamento, de acordo com Cojocaru (2012), nenhuma das medidas excedeu o valor limite de 2,54 cm, estabelecido pelo PCI (2000).

Cojocaru (2012) estudou a aplicabilidade da formulação analítica de Plaut e Moen (2011, 2013) em seções transversais de vigas de concreto pretendido monossimétricas, como as vigas PCI Bulb Tee 72 in e AASHTO Tipo IV, na fase de içamento. Os resultados

analíticos obtidos foram comparados com os resultados obtidos pelo programa computacional ABAQUS, que desenvolve uma análise numérica.

Segundo Cojocaru (2012), para os casos em que o centro de torção encontrava-se abaixo do centroide, as equações de Plaut e Moen (2011, 2013) forneceram valores conservativos de força, momento e deformação. Já para o caso em que o centro de torção está acima do centroide, os resultados não seriam apropriados em virtude de serem menos conservativos.

Os resultados obtidos por Cojocaru (2012) em seu modelo em elementos finitos foram muito próximos dos valores gerados pela formulação analítica de Plaut e Moen (2011, 2013). Foram observadas pequenas diferenças e variações (não excedendo 5%), as quais podem ser atribuídas ao posicionamento do centro de torção da viga, em relação ao seu centroide.

2.2.8. Krahl (2014) e Krahl, Lima e El Debs (2015)

Krahl (2014) expõe procedimentos de verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto nas situações transitórias de suspensão, transporte e pré-serviço com e sem contraventamento nos apoios. As formulações apresentadas pelo autor são baseadas nos cálculos de carga crítica e momento crítico de instabilidade lateral, e na determinação de fatores de segurança. Desta forma, Krahl (2014) apresenta exemplos numéricos e realiza análises paramétricas com o objetivo de propor limites de segurança, através da variação de fatores como: f_{ck} , imperfeições geométricas, comprimento da viga, largura da mesa comprimida e espessura da alma.

Krahl (2014) percebeu que os limites de segurança para as seções de vigas I e vigas retangulares são distintos entre si. Esta constatação se baseia nas esbeltezes geométricas limites para fases transitórias, relações entre carga crítica e carga devido ao peso próprio e uma relação entre momento crítico elástico e momento último de flexão para a fase transitória anterior à execução do tabuleiro com contraventamento nos apoios.

As análises de Krahl (2014) concluíram que os limites de esbeltez geométrica preconizados, como $\ell h/bf^2$, geram elementos de seção transversal I com esbeltez elevada. Este parâmetro apresentou uma variação significativa na tentativa de determinar limites nas análises paramétricas.

Sendo assim, Krahl (2014) afirma que a verificação da segurança por esbeltezes geométricas nem sempre é recomendável, pois não são levados em conta fatores de extrema importância nas análises paramétricas, como f_{ck} e imperfeições geométricas. Além disso, o autor considera que pode ser conservador adotar como limite a menor esbeltez obtida nas análises. Krahl (2014) verifica que a esbeltez representada pela razão entre momento último e momento crítico de instabilidade elástico é mais abrangente, verificando que a busca por um valor limite deste parâmetro tem pouca variação para as vigas I.

Finalmente, com relação ao limite clássico de segurança que recomenda uma carga crítica maior que quatro vezes a carga de peso próprio, Krahl (2014) considera que esta recomendação é conservadora, indicando que para vigas de seção I uma razão equivalente a 2,5 atende a segurança destes elementos.

Krahl, Lima e El Debs (2015) realizaram análises paramétricas em vigas de concreto, utilizando o programa computacional LTBeam, em que a carga crítica é obtida pelo cálculo do menor autovalor, sendo a viga discretizada em no mínimo 100 elementos finitos. O objetivo dos autores era apresentar limites de segurança para a verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas em fases transitórias. Sendo assim, os resultados das análises paramétricas foram comparados com recomendações de normas nacionais e internacionais, e as formulações utilizadas para o cálculo da carga crítica de instabilidade foram confrontadas.

Krahl, Lima e El Debs (2015) definiram os seguintes parâmetros iniciais: resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, imperfeição geométrica de 1/300 do vão (quando considerada), balanços de 2,5 m, cabos de içamento verticais, e critério de segurança tomado pela relação entre a carga crítica e o peso próprio da viga, adotado como 4. As relações geométricas foram tabeladas, com utilização de espessura de mesas e almas das vigas I fixadas em 15 cm. Tomando estes parâmetros iniciais, os autores promoveram

um estudo com a variação da largura e do vão, no caso da viga retangular, e da largura de mesa e do vão, no caso da viga com seção transversal I.

No que diz respeito à fase de içamento, Krahl, Lima e El Debs (2015) concluíram que a formulação de Stratford et al. (1999) foi a que apresentou resultados de carga crítica mais próximos aos obtidos pelo programa computacional LTBeam. Os resultados mostram ainda que os limites de segurança para vigas de seção I e vigas de seção retangular são diferentes, fato este que não é contemplado por nenhuma norma. Tomando como referência a equação de esbeltez utilizada pelo fib Model Code (2012), o limite determinado para vigas retangulares seria 85 e para vigas de seção I seria 53, o que poderia ser tomado igual a 50, como recomendado pela norma. Dentre os casos analisados de vigas I, apenas a recomendação do fib Model Code (2012) atende o limite de esbeltez para fases transitórias.

2.2.9. Schuh (2008), Gaykar e Solanki (2014) e Germán (2015)

Schuh (2008) apresenta um estudo do comportamento de vigas I metálicas e curvas durante a fase transitória de içamento, indicando conclusões e recomendações para a suspensão segura das mesmas, baseadas em testes experimentais (conforme Figura 21) e modelos analíticos. De acordo com Schuh (2008), duas questões distintas devem ser consideradas ao se verificar a segurança ao içamento: o controle da rotação de corpo rígido associada à maneira como a viga é içada, e a estabilidade estrutural da viga curva.

Figura 21 – Seção transversal de viga I metálica, e viga I em situação de içamento

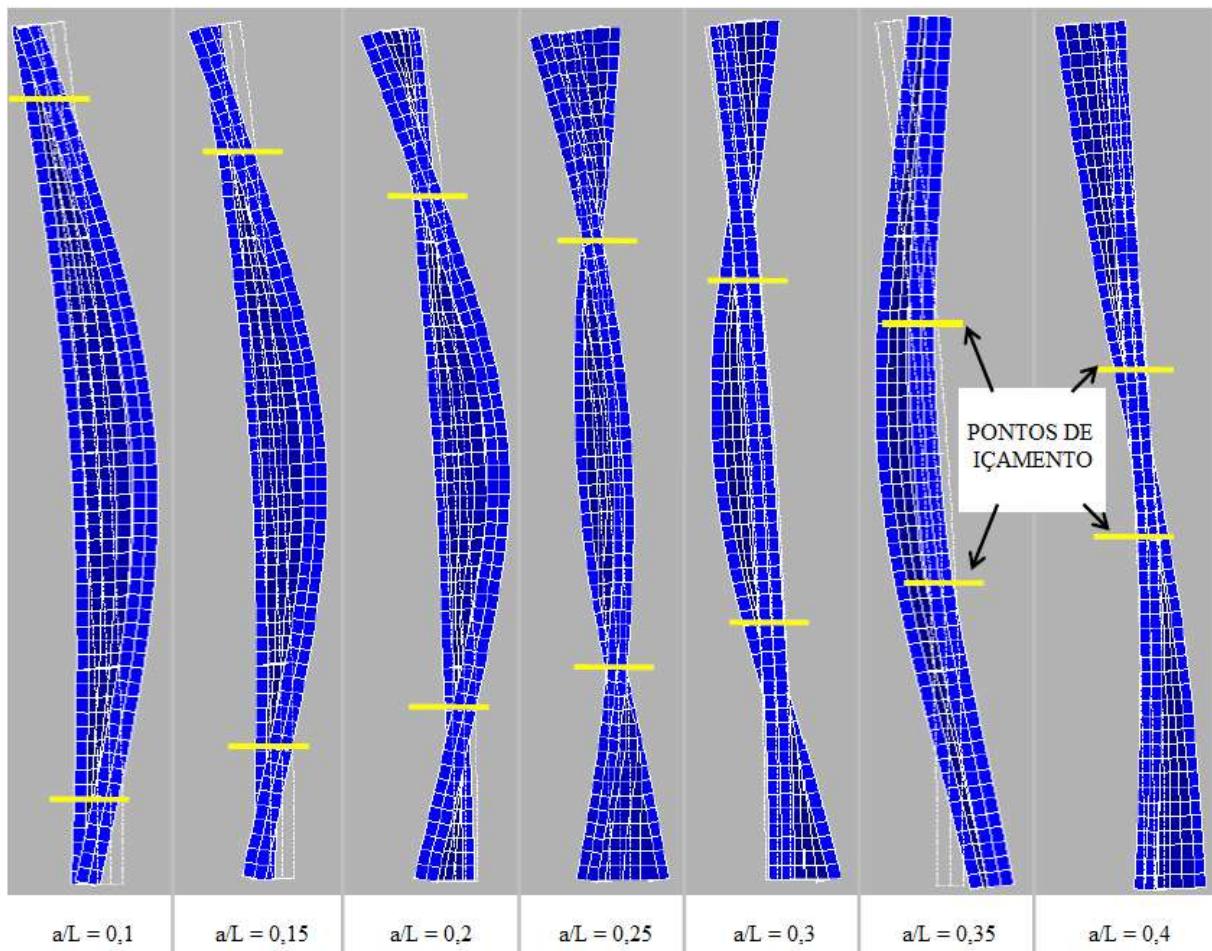


Fonte: Schuh (2008)

Quanto à rotação de uma viga I curva durante o içamento, Schuh (2008) indica que essa rotação surge como resultado da excentricidade entre o eixo de giro que passa pelos pontos de içamento e o centro de gravidade da seção curva da viga. O autor faz as seguintes recomendações para limitar tal rotação durante o içamento: minimizar a excentricidade citada, e utilizar um aparato que maximize a altura do eixo de rotação.

Sobre a importância do comprimento dos balanços, a Figura 22 apresenta a variação da forma deformada de uma viga I durante a sua suspensão, conforme a alteração da locação dos pontos de içamento, de acordo com as análises produzidas por Schuh (2008). É possível perceber a grande influência do comprimento dos balanços, sendo que fica evidente também a suposição de que a flexão lateral controla o comportamento de estabilidade da viga durante o içamento.

Figura 22 – Forma deformada de uma viga I metálica durante içamento



Fonte: Adaptado de Schuh (2008)

De acordo com Schuh (2008), a localização dos pontos de içamento se mostrou um fator determinante de como as vigas I curvas metálicas se comportam durante o processo de suspensão, sendo que este parâmetro afeta profundamente a rotação e a estabilidade da viga nesta fase. A estabilidade de uma viga I curva é maximizada pelo içamento nos pontos dos quartos de vão ($a/L = 0,25$). Essa diretriz é tipicamente adequada para controle da rotação de corpo rígido da viga em içamento, contudo, realizar o içamento a partir dos quintos de vão ($a/L = 0,20$) da viga minimiza as rotações esperadas durante a suspensão.

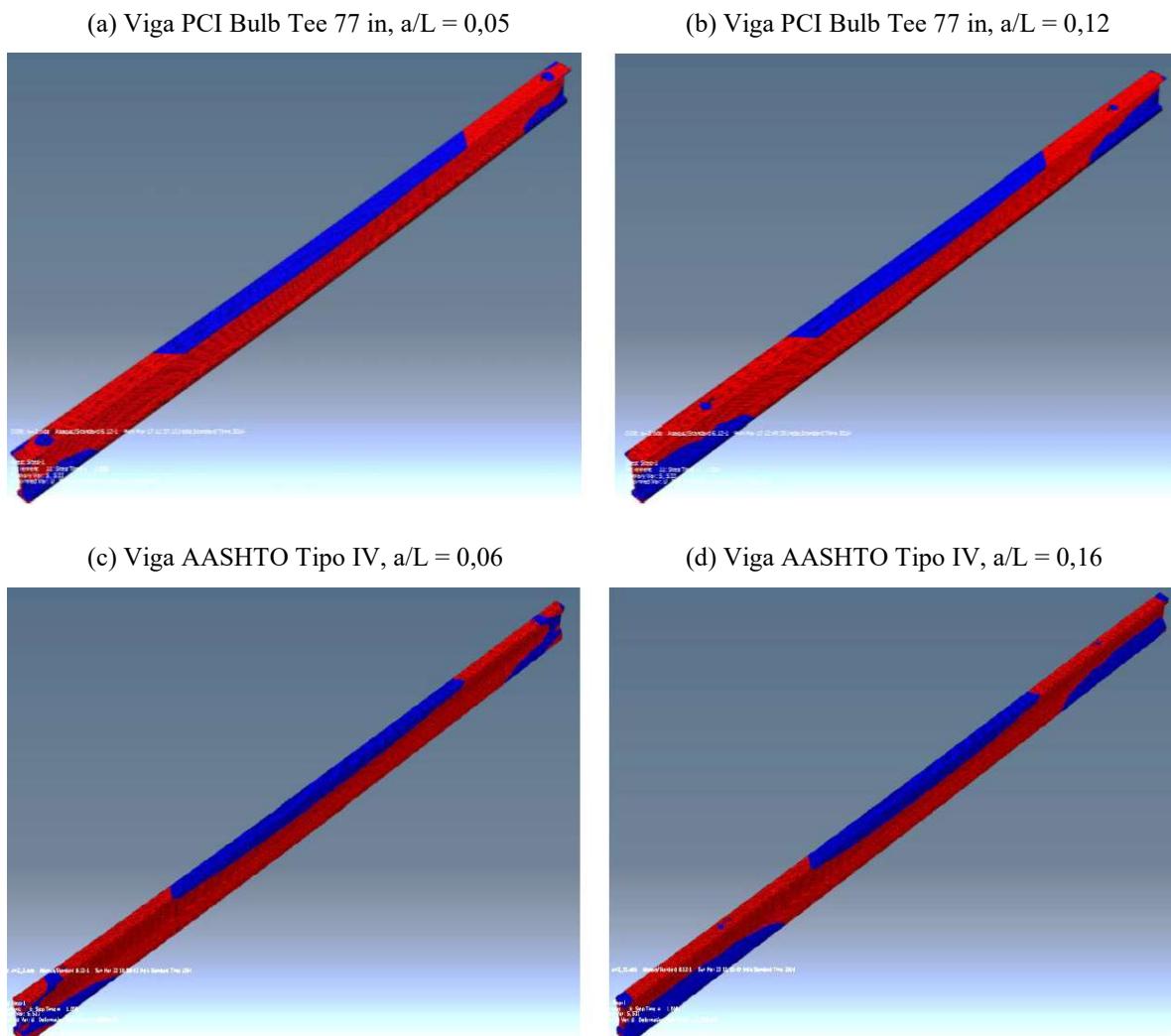
Gaykar e Solanki (2014) realizaram um estudo numérico e analítico a respeito do comportamento de vigas pré-moldadas de concreto, protendidas e sem protensão, durante o estágio de içamento. Os autores realizaram a modelagem numérica, pelo método dos elementos finitos, das vigas PCI Bulb Tee 77 in e AASHTO Tipo IV utilizando o programa computacional ABAQUS, comparando os resultados obtidos com a formulação de Plaut e Moen (2013), para as vigas protendidas e sem protensão. Além disso, Gaykar e Solanki (2014) estudaram a diferença no comportamento de tensões e deslocamentos de vigas devido à atuação da protensão.

A análise numérica de Gaykar e Solanki (2014) foi realizada em duas seções de vigas pré-moldadas protendidas de comprimento de 42,36 m e 31,70 m. Considerou-se a imperfeição inicial na viga na forma de uma curvatura radial, e a resistência à compressão do concreto das vigas foi fixada. Modelos de elementos finitos tridimensionais de ambas as vigas foram feitos com e sem considerar a força de protensão, e consistiram em 3 partes com vínculo perfeito entre si: viga, cabos de protensão e alças de içamento. Além disso, a condição inicial de tensões foi aplicada aos cabos, de modo a se obter o efeito da protensão, e o comportamento dos materiais foi considerado linear.

Os resultados numéricos apresentados por Gaykar e Solanki (2014) para vigas sem protensão mostram que, à medida que o balanço aumenta, as tensões de compressão no topo e as tensões de tração no fundo sofrem redução, pois como o vão interno diminui, as tensões de flexão devido ao peso próprio também diminuem. A Figura 23 apresenta o contorno das tensões, sendo que a zona vermelha se refere às tensões de tração, e a zona azul se refere às tensões de compressão. Sendo assim, são apresentados os contornos das tensões para a viga

PCI Bulb Tee 77 in, com relações a/L de 0,05 e 0,12, e para a viga AASHTO Tipo IV, com relações a/L de 0,06 e 0,16.

Figura 23 – Variação das tensões em função do aumento do comprimento dos balanços (viga sem protensão)

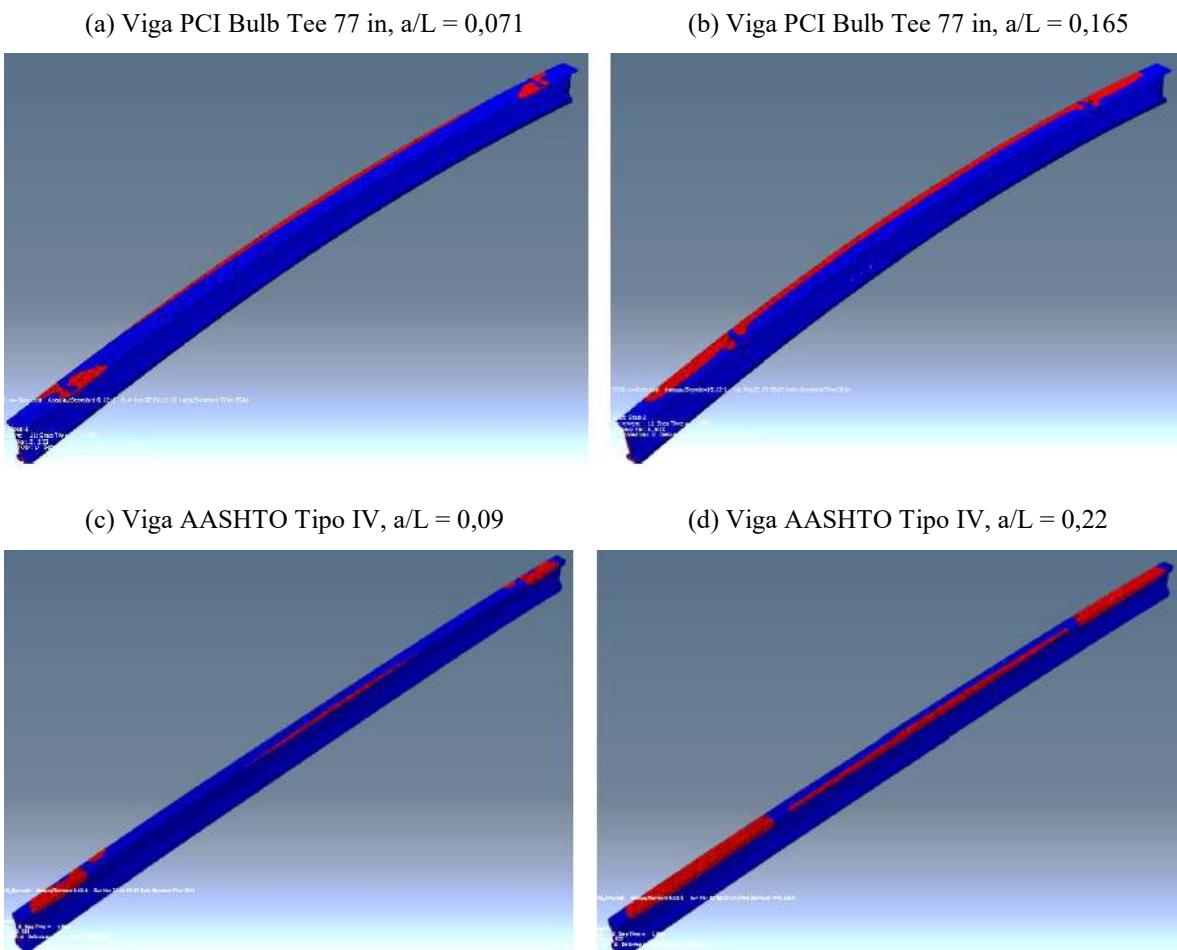


Fonte: Gaykar e Solanki (2014)

Já para a viga protendida, o comportamento visto é o oposto, pois já existe um momento de flexão negativo devido à protensão, portanto há tração no topo e compressão no fundo. Com o aumento do balanço e consequente redução do vão interno, as tensões de tração resultantes na fibra superior aumentam e as tensões de compressão resultantes na fibra inferior também aumentam, visto que as tensões relativas à atuação do peso próprio sofrem redução. A Figura 24 apresenta o contorno das tensões, sendo que a zona vermelha se refere às tensões de tração, e a zona azul se refere às tensões de compressão. Sendo assim, são

apresentados os contornos das tensões para a viga PCI Bulb Tee 77 in, com relações a/L de 0,071 e 0,165, e para a viga AASHTO Tipo IV, com relações a/L de 0,09 e 0,22.

Figura 24 – Variação das tensões em função do aumento do comprimento dos balanços (viga com protensão)



Fonte: Gaykar e Solanki (2014)

Portanto, as Figuras 23 e 24 ilustraram a importância e a influência do comprimento dos balanços nas tensões de compressão e tração em uma viga na situação de içamento.

No estudo analítico, Gaykar e Solanki (2014) calcularam o momento de flexão na viga durante o içamento usando a formulação de Plaut e Moen (2013). Assim, as tensões de flexão foram calculadas e, em seguida, adicionadas à tensão relativa à protensão. As Equações (32) e (33) representam as tensões no topo (σ_{topo}) e no fundo (σ_{fundo}) da seção transversal, respectivamente, considerando a compressão como negativa e a tração como positiva. Usando estas equações, as tensões foram calculadas variando-se o comprimento do balanço.

$$\sigma_{\text{topo}} = -\frac{P}{A} + \frac{P \times e}{Z_{\text{topo}}} - \frac{M}{Z_{\text{topo}}} \quad (32)$$

$$\sigma_{\text{fundo}} = -\frac{P}{A} - \frac{P \times e}{Z_{\text{fundo}}} + \frac{M}{Z_{\text{fundo}}} \quad (33)$$

Sendo que: P é a força de protensão;

A é a área da seção transversal;

e é a excentricidade do cabo de protensão;

M é o momento fletor sobre o eixo de maior inércia;

Z_{topo} e Z_{fundo} são os módulos de resistência no topo e no fundo da seção transversal, respectivamente.

Os resultados analíticos obtidos foram comparados com os resultados da análise de elementos finitos para ambas as seções. Gaykar e Solanki (2014) verificaram que o comportamento de tensão de ambas as vigas, protendidas e não protendidas, entre a análise analítica e a análise de elementos finitos é similar. Os autores observaram ainda que, para uma viga protendida, as alças de içamento devem estar afastadas da seção intermediária, ou seja, a relação a/L deve ser menor que 0,20 a 0,25, para que as tensões estejam abaixo dos limites permitidos. Ao contrário, uma viga sem protensão apresenta menores deslocamentos e tensões quando a relação a/L é próxima de 0,20 a 0,25.

Quanto ao comportamento de deslocamentos laterais e verticais das vigas, Gaykar e Solanki (2014) verificaram que o comportamento mostrado pela análise de elementos finitos e pelas fórmulas é o mesmo ao longo do comprimento da viga, exceto que a análise de elementos finitos mostra o deslocamento lateral na direção oposta pelo efeito da gravidade.

Germán (2015) apresenta um estudo paramétrico numérico, e avalia a influência de diversos parâmetros que condicionam a estabilidade lateral de uma viga de concreto pré-moldada e protendida, quais sejam: deslocamento lateral, comprimento da viga, locação dos pontos de içamento, propriedades da seção transversal da viga, ângulo de inclinação dos cabos de içamento, resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), força de protensão e altura dos pontos de içamento.

Germán (2015) analisou seções transversais de vigas simétricas usadas comercialmente, com comprimento entre 10 e 60 metros. Quanto ao comprimento lateral destas vigas, a variação foi realizada entre $L/2000$ e $L/500$, sendo L o vão da viga. Foi também avaliada a variação do f_{ck} do concreto entre 20 e 60 MPa, e a força de protensão ficou entre 0 e o valor máximo de modo que a tensão de tração na fibra superior seja superior à resistência característica do concreto à tração.

Já quanto às condições de içamento, foi feita a variação na locação dos pontos de içamento, da situação em que as alças de içamento estão na extremidade da peça até a situação em que as mesmas estão a uma distância de 20% do comprimento da viga. Além disso, Germán (2015) levou em consideração a influência da altura das alças de içamento, com a variação ocorrendo entre 20 e 140 cm. Finalmente, avaliou-se a interferência do ângulo de inclinação dos cabos, de 0 a 45º com relação ao eixo vertical. Para a variação de cada parâmetro, o autor definiu como comprimento crítico ou alcance da viga, a situação em que as tensões atuantes se igualam à resistência característica do concreto à tração.

Em seu estudo paramétrico, durante a variação do comprimento da viga por incrementos, Germán (2015) percebeu aumento do ângulo de rotação da viga à medida que a extensão do vão também aumentava, assim como aumento no deslocamento no eixo de menor inércia da viga. No que diz respeito às tensões na mesa superior da seção transversal, o autor percebeu um aumento sutil nas tensões de compressão até um comprimento equivalente a 80% do comprimento máximo, momento este em que há uma variação abrupta do estado de tensões, o que rapidamente leva a tensões de tração. Germán (2015) percebeu ainda que, nas vigas com menor rigidez lateral, a fissuração ocorre para menores vãos, ou seja, as vigas com maior rigidez lateral apresentam um maior alcance em comparação às demais vigas.

Já durante a variação da locação das alças de içamento, Germán (2015) percebeu que mover os pontos de içamento para o interior da viga reduz expressivamente o ângulo de rotação da mesma, além de diminuir o momento fletor devido ao peso próprio. No que diz respeito ao vão máximo que a viga pode obter, a criação e aumento do comprimento dos balanços gera vigas com alcance maior de vão máximo, antes de se atingir a tensão resistente característica de tração do concreto.

Germán (2015) também realizou a variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) e dos deslocamentos laterais da viga. O aumento nos valores de f_{ck} não tem efeito quanto ao ângulo de rotação inicial, mas gera um menor ângulo de rotação total, assim como um alcance de vão maior às vigas. Já com o aumento do deslocamento lateral, o autor percebeu um aumento no ângulo de rotação total e inicial das vigas, assim como consequente redução no comprimento crítico da viga.

Dando sequência, Germán (2015) realizou a variação da altura das alças de içamento nas vigas, fixando os demais parâmetros. Através de suas simulações, o autor conclui que a rotação inicial devido ao deslocamento lateral diminui quando a viga é içada de um ponto mais alto, ou seja, quando a altura das alças de içamento é maior. Como resultado, o ângulo de rotação total também reduz. No que diz respeito ao alcance de vãos das vigas, a redução da rotação da viga permite à mesma alcançar maiores vãos, segundo Germán (2015). Portanto, o aumento da altura das alças de içamento garante às vigas a possibilidade de alcançar maiores vãos.

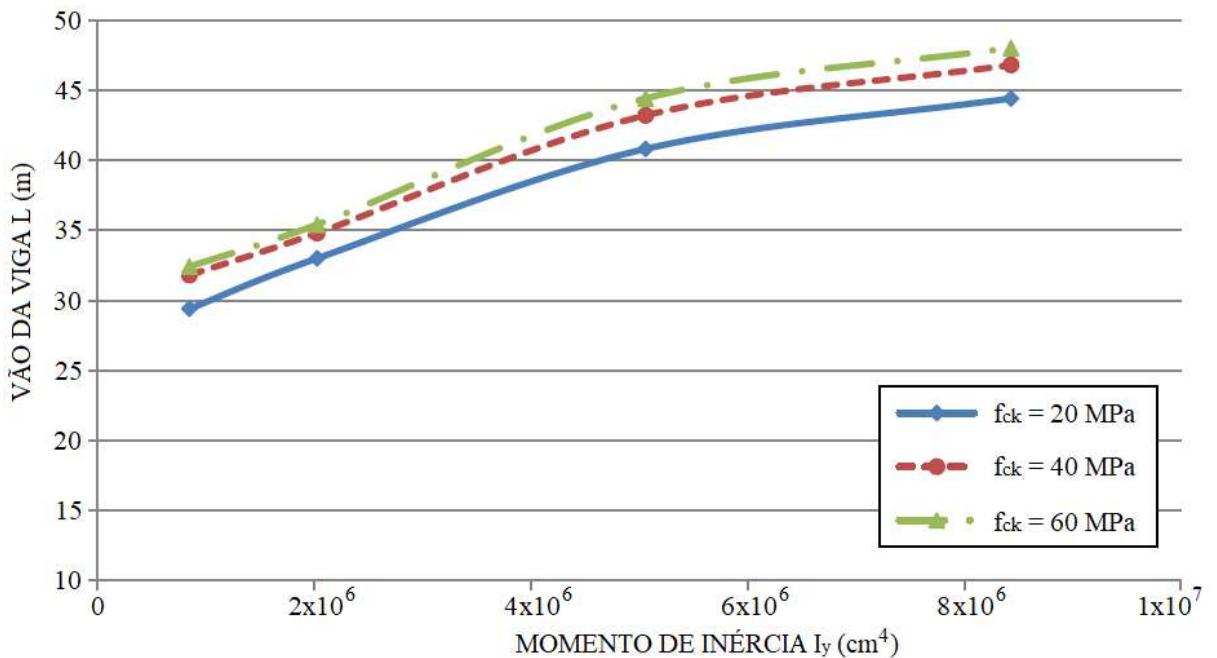
Finalmente, Germán (2015) realizou a variação da força de protensão e do ângulo de inclinação dos cabos. A variação da força de protensão não tem interferência no ângulo de rotação da viga, sendo que o valor desta força não gerou alterações no alcance do vão das vigas. Já o aumento do ângulo de inclinação dos cabos gera acréscimo no ângulo de rotação total, embora pequeno. Contudo, não houve diferenças quanto ao alcance de vão.

Ao longo do trabalho de Germán (2015), foi demonstrada a interferência de diversos parâmetros na rotação de uma viga simétrica em situação de içamento. Contudo, o autor percebeu que a baixa rigidez lateral das vigas é o principal limitante para que as mesmas tenham garantida a sua estabilidade lateral. Desta forma, baseando-se nas simulações de seu estudo paramétrico, o autor propôs um critério gráfico de projeto, baseado exclusivamente na rigidez lateral de uma determinada viga e seu alcance máximo de vão sem problemas de estabilidade lateral no içamento.

A Figura 25 apresenta no eixo das abscissas o momento de inércia relativo ao eixo de menor inércia, e nas ordenadas o vão da viga simétrica. O gráfico apresenta ainda três

curvas, que demonstram um limite de estabilidade para situações de f_{ck} com os valores de 20, 40 e 60 MPa.

Figura 25 – Critério de projeto proposto por Germán (2015)



Fonte: Germán (2015)

Desta forma, Germán (2015) propõe que, para que uma viga vença determinado vão utilizando-se de uma determinada resistência característica do concreto à compressão, ela tenha que apresentar uma rigidez lateral mínima, dada pelo eixo das abscissas no gráfico. Ao garantir esta situação, a peça não passaria por problema de estabilidade lateral relativo à situação de içamento.

2.2.10. Zhang (2017) e Lima (2018)

Zhang (2017) analisa os parâmetros que podem causar o problema da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas protendidas durante a fase de suspensão, e, inspirando-se no modelo analítico apresentado por Mast (1989 e 1993), apresenta um estudo paramétrico com o intuito de estudar as condições de ruptura em função de cada parâmetro, quais sejam: geometria da viga, inclinação dos cabos, resistência do material, barras rígidas fixadas à viga para vinculação dos cabos de içamento, excentricidade lateral inicial, etc.

A análise paramétrica realizada por Zhang (2017) trata de vigas pré-moldadas de seção tipo I, variando-se a força de protensão, a altura das vigas, a excentricidade lateral inicial, o valor do f_{ck} , o vão da viga e o desvio das alças de içamento. Este estudo foi de fundamental importância, pois possibilitou que Zhang (2017) verificasse os parâmetros que mais interferem na instabilidade lateral, o que deu condições para que a autora propusesse uma formulação analítica para análise de estabilidade.

Sendo assim, Zhang (2017) propôs uma formulação simplificada para cálculo do fator de segurança (FS) e do máximo giro de corpo rígido (θ_{cr}) permitido para a seção transversal no meio do vão, de forma que não ocorram tensões de tração nesta seção superiores ao limite f_{ctm} , e consequente fissuração. O objetivo da autora era propor uma expressão analítica para avaliar o potencial de fissuração de vigas durante a suspensão, que resultasse em importante informação de projeto.

Para possibilitar o desenvolvimento da formulação, Zhang (2017) analisa as componentes de tensão de cada variável na fase de içamento, tais como: tensões devido ao peso próprio, tensões devido à inclinação do cabo e tensões devido à protensão. Além disso, a análise da tensão é realizada na extremidade da mesa superior da seção transversal, ponto onde ocorre a maior tensão de tração. A formulação proposta foi agrupada para diferentes tipos de excentricidade lateral inicial no intuito de simplificar as equações finais propostas. O equacionamento proposto por Zhang (2017) foi comparado com o de Mast (1993) para diferentes alturas de seções e f_{ck} , tendo sido encontrados valores satisfatórios.

As equações (34) e (35) apresentam, respectivamente, o máximo giro de corpo rígido contra a fissuração (θ_{cr}) e o fator de segurança contra a instabilidade lateral (FS) apresentados por Zhang (2017), sendo que foram admitidas as simplificações para pequenos ângulos ($\sin \theta = \theta$ e $\cos \theta = 1$).

$$\theta_{cr} = \left[f_{ctm} + \frac{P_0 + R_c \cos \alpha}{A} - \frac{P_0 e (h - y_{cg})}{I_y} + \frac{(M_{pp,y} + M_{c,y})(h - y_{cg})}{I_y} - \frac{M_{c,x} b_s}{2I_x} \right] \times \frac{16I_x}{b_s q l_a^2} \quad (34)$$

$$FS = \frac{M_r}{M_a} = \frac{y_r \theta_{cr}}{z_0 \theta_{cr} + e_i} \geq 1,0 \quad (35)$$

Sendo que: f_{ctm} é a resistência do concreto à tração; A é a área da seção transversal; P_0 é a força de protensão aplicada; R_c é a reação do cabo; α é a inclinação entre o cabo e o eixo horizontal longitudinal da viga; e é a distância do cabo de protensão ao centro de gravidade da seção; h é a altura da seção transversal; y_{cg} é a distância da borda da mesa inferior até o centro de gravidade da seção; I_y é o momento de inércia da seção em relação ao eixo y ; $M_{pp,y}$ é a componente do momento que atua no eixo de maior inércia; $M_{c,y}$ é o momento fletor causado pela reação do cabo em relação ao eixo y ; $M_{c,x}$ é o momento fletor causado pela reação do cabo em relação ao eixo x ; b_s é a largura da mesa superior; I_x é o momento de inércia da seção em relação ao eixo x ; l_a é a distância entre os pontos de içamento; M_r é o momento resistente; M_a é o momento atuante; y_r é a distância da borda superior ao centro de gravidade da seção; z_0 é o deslocamento lateral fictício da viga com o peso próprio inteiramente aplicado na direção do eixo de menor inércia; e_i é a excentricidade lateral inicial devido às imperfeições na fabricação do elemento.

Lima (2018) apresenta, por meio de análise numérica e teórica, o estudo do problema de instabilidade lateral no içamento. Sendo assim, o autor realizou análises paramétricas e um estudo de caso para uma situação de colapso de uma viga em içamento, ocorrida em uma fábrica da cidade de Uberlândia-MG. As variáveis consideradas nas análises paramétricas são: comprimento dos balanços (a/L), desvios de posicionamento das alças (t), excentricidade lateral inicial (e_i), inclinação dos cabos de içamento (α), e comprimento do dispositivo para enrijecimento da ligação entre a viga e os cabos de apoio (h_{lift}).

Em sua análise teórica, Lima (2018) apresentou proposta de alteração do equacionamento de Zhang (2017), que por sua vez se baseou no estudo do equilíbrio desenvolvido por Mast (1993). Para o estudo da rotação limite relativa à fissuração proposta por Zhang (2017), Lima (2018) incluiu a consideração das seguintes variáveis: cabos inclinados (α), desvio da alça (t) em relação ao centro da mesa superior e a existência de elemento capaz de suspender o eixo de rotação, tratado como barra rígida (h_{lift}). Além disso, Lima (2018) não considerou a simplificação realizada em ângulos pequenos nas funções seno e cosseno.

Assim, Lima (2018) propôs a inclusão de uma parcela de giro que levasse em consideração o efeito estabilizante ou não das variáveis negligenciadas pela formulação

original. Esta parcela pode ser dada pela Equação (36) a seguir, sendo y_r a distância da borda superior ao centro de gravidade da seção.

$$\theta_{RB} = \arctan\left(\frac{e_i + t}{y_r + h_{lift}}\right) \quad (36)$$

Desta forma, o cálculo do giro de corpo rígido proposto (θ_p) por Lima (2018) é dado pela Equação (37) e o fator de segurança (FS_p), é dado pela Equação (38), em contraposição à Equação (35) vista em Zhang (2017).

$$\theta_p = \theta_{fiss} + \theta_{RB} \quad (37)$$

$$FS_p = \frac{M_r}{M_a} = \frac{(y_r + h_{lift})\tan\theta_p}{z_0 \operatorname{sen}\theta_p + e_i} \quad (38)$$

Quanto à análise numérica desenvolvida por Lima (2018) com auxílio do programa computacional ANSYS 18.1, as análises realizadas mostram a necessidade da adequada definição em projeto das variáveis de estudo, visto que as recomendações dos códigos normativos são ainda ineficientes para garantir a segurança desta fase transitória.

Finalmente, Lima (2018) mostra a necessidade de se conhecer as imperfeições iniciais das vigas pré-moldadas, como medir a excentricidade lateral inicial e os desvios das alças antes de realizar o içamento. O conhecimento desses desvios de execução torna-se ainda mais necessário para manter a estabilidade do elemento quando a suspensão for realizada sem balanços ou com pequenos balanços.

2.3. LIMITES DE NORMAS TÉCNICAS

São apresentados nesta seção os limites normativos propostos pelas principais normas técnicas nacionais e internacionais acerca da verificação da estabilidade lateral em vigas de concreto armado. É importante destacar que os códigos normativos apresentam limitações de segurança contra instabilidade lateral baseadas unicamente em parâmetros

geométricos, apesar de diversos estudos ratificarem a importância do conhecimento de outras variáveis importantes relacionadas às fases transitórias, como as propriedades dos materiais, os níveis de tensões e deslocamentos existentes.

Sendo assim, são apresentadas as considerações das normas nacionais ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2017, e das normas internacionais FIB Model Code 2010, ACI 318:2014, Eurocode 2 (2004) e BS:8110-1 (2007). De acordo com El Debs (2017), ocorrem discrepâncias significativas nessas recomendações e nem sempre é estabelecida a diferença entre situações definitivas e transitórias. A Tabela 1 apresenta as recomendações normativas para estabilidade lateral de vigas de concreto.

Tabela 1 – Recomendações normativas para estabilidade lateral

NORMA / CÓDIGO	LIMITE DE ESBELTEZ
ABNT NBR 6118	$\frac{h}{b_f} \leq 2,5 \text{ ou } 5$ (função do tipo de viga); $\frac{l_{0f}}{b_f} \leq 50$
ABNT NBR 9062	$\frac{l_{0f}h}{b_f^2} \leq 500$; $\frac{l_{0f}}{b_f} \leq 50$
FIB Model Code 2010	$\frac{l_{0f}}{b_f} \leq \frac{50}{\left(\frac{h}{b_f}\right)^{\frac{1}{3}}}$
ACI 318	$\frac{l_{0f}}{b_f} \leq 50$
Eurocode 2	$\frac{l_{0f}}{b_f} \leq \frac{70}{\left(\frac{h}{b_f}\right)^{\frac{1}{3}}}$; $\frac{h}{b_f} \leq 3,5$
BS 8110-1	$\frac{l_{0f}h}{b_f^2} \leq 250$; $\frac{l_{0f}}{b_f} \leq 60$

Fonte: Autor (2020)

Sendo que: h é a altura da seção;

b_f é a largura da mesa comprimida;

l_{0f} é o vão teórico ou espaçamento entre contraventamento.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA ASSIMÉTRICA EM IÇAMENTO COM PARAPEITO NA MESA SUPERIOR

3.1. DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Este capítulo apresenta as simulações numéricas desenvolvidas no programa computacional ANSYS 18.1, plataforma Workbench, a fim de se realizar uma análise de instabilidade lateral em vigas em situação de içamento. Além disso, são apresentadas as principais definições a serem utilizadas na modelagem, como o estudo de malha e definição de materiais e vinculações. Finalmente, é apresentada uma análise com variação de diversos parâmetros para avaliação de influência na estabilidade lateral de vigas.

A viga estudada é uma viga de concreto de 45,57 m com seção transversal assimétrica, de um caso real de instabilidade lateral ocorrido em Olost (Espanha). A sua condição de assimetria é decorrente da presença de um parapeito de 40 cm de altura, localizado em uma das extremidades de sua mesa superior. Segundo Zhang (2017), anteriormente ao içamento, a viga apresentava deslocamentos laterais da ordem de 90 mm, e ao final do procedimento e posicionamento da viga em seu local de destino, os deslocamentos laterais já tinham alcançado um valor de 300 mm, além de fissuras no topo da mesa superior.

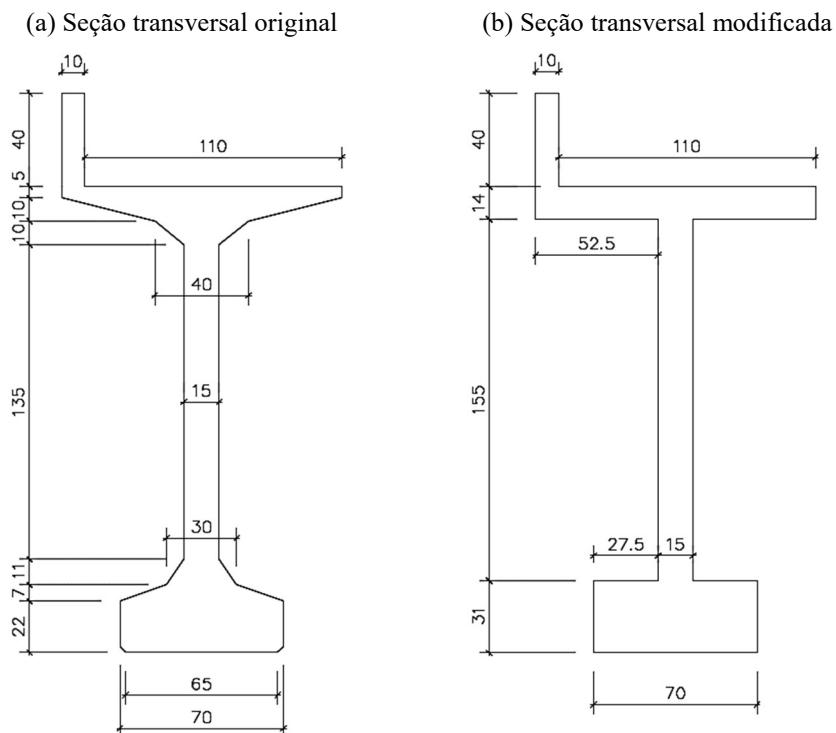
As Figuras 26 e 27 apresentam a situação ocorrida, a seção transversal original da viga e a seção modelada graficamente.

Figura 26 – Deslocamento lateral inicial acentuado em viga, em Olost (Espanha)



Fonte: Germán (2015)

Figura 27 – Seção transversal da viga modelada graficamente (dimensões em cm)

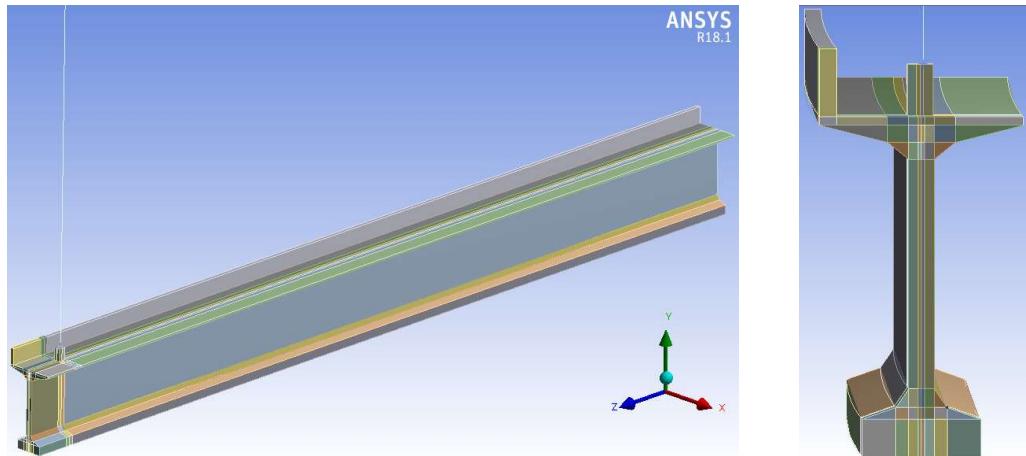


Fonte: Autor (2020)

Conforme visto na Figura 27, para melhor padronização da malha, e para facilitar a modelagem numérica e a inserção dos dados geométricos nas formulações, simplificou-se a seção transversal original retirando-se as suas mísulas.

Entretanto, antes da realização dessa simplificação, foi feito um teste para avaliação dos impactos causados pela mesma quanto aos resultados obtidos. Desta forma, realizou-se a modelagem numérica da estrutura original (contendo as mísulas) por meio do programa computacional ANSYS. A Figura 28 apresenta as vistas longitudinal e transversal da viga com seção transversal original simulada numericamente.

Figura 28 – Vistas longitudinal e transversal da viga com as mísulas



Fonte: Autor (2020)

Ao se realizar a modelagem numérica das duas opções (estrutura contendo as mísulas e estrutura com seção transversal simplificada), foi possível perceber que a estrutura com seção transversal original apresentou um aumento de 15,29% no ângulo de rotação de equilíbrio, e um aumento de 17,85% na tensão máxima de tração na seção de meio de vão. Entretanto, verificou-se que o comportamento estrutural e a configuração deformada de ambas as estruturas seguiram o mesmo padrão, não apresentando discrepâncias. Portanto, é possível afirmar que a simplificação não altera significativamente os resultados de tensões de tração e compressão, deslocamentos laterais na seção de meio de vão e rotação de equilíbrio da viga, justificando assim a sua utilização.

A Tabela 2 apresenta as propriedades geométricas da viga, já se considerando a seção transversal simplificada.

Tabela 2 – Propriedades geométricas da viga com seção transversal assimétrica

PROPRIEDADE	VALOR
Altura da seção - H (cm)	240
Área bruta da seção - A_c (cm ²)	6.575
Vão da viga - L (m)	45,57
Comprimento dos balanços - a (m)	1,00
Posição relativa do balanço - a/L (%)	2,19
Ângulo de inclinação dos cabos de içamento – α (°)	90
Distância vertical entre o CG e a face inferior da seção - y_{CG} (cm)	106,181
Distância horizontal entre o CG e o eixo da alma - x_{CG} (cm)	3,346
Inércia em torno do eixo horizontal - I_x (cm ⁴)	40.610.877,194
Inércia em torno do eixo vertical - I_y (cm ⁴)	4.085.398,249
Distância entre o CG e o eixo de giro - h (cm)	123,819

Fonte: Autor (2020)

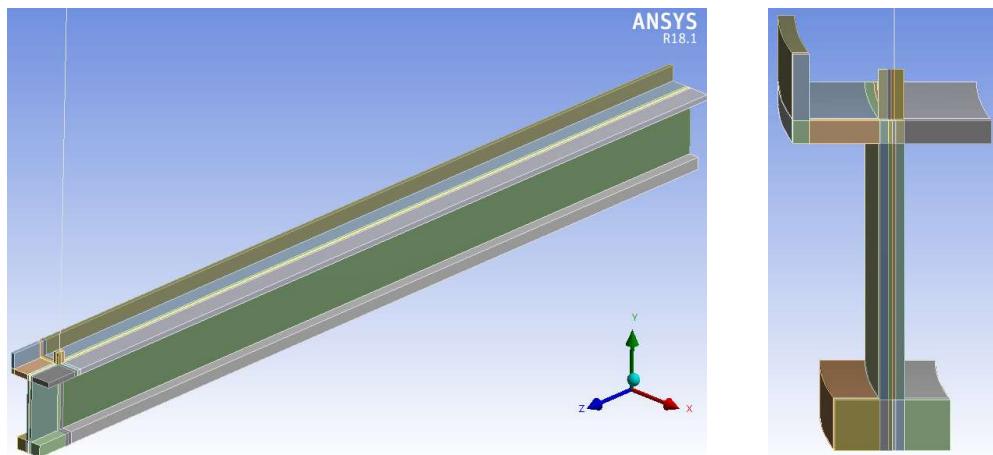
É importante destacar que um dos principais aspectos a serem avaliados nesta análise numérica é a influência da assimetria da seção transversal, e o impacto causado pela mesma quanto à estabilidade lateral da viga. Esta análise será destacada na Seção 3.5.8.

3.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS, MALHA E ELEMENTOS FINITOS NO PROGRAMA COMPUTACIONAL ANSYS

O programa computacional ANSYS se baseia no método dos elementos finitos, e possui uma interface gráfica para modelagem que possibilita, na área de estruturas, que se efetuem análises dinâmicas, estáticas e de estabilidade. Sendo assim, por meio dele pode-se realizar análises não lineares de naturezas tanto físicas quanto geométricas, levando em conta os deslocamentos, deformações, entre outros fenômenos. Para a verificação dos esforços e deslocamentos, adotou-se nas análises carregamento resumido ao peso próprio, e tendo sido aplicado em incrementos de carga (20 passos de carga).

Para que a modelagem represente de forma satisfatória o comportamento da viga curva, a mesma deve ser realizada a partir do desenho de um arco de uma circunferência que passa pelos pontos extremos da viga, de tal forma que no meio do vão o deslocamento lateral é máximo, e correspondente à excentricidade lateral inicial assumida. A Figura 29 apresenta as vistas longitudinal e transversal da viga simulada no programa computacional ANSYS.

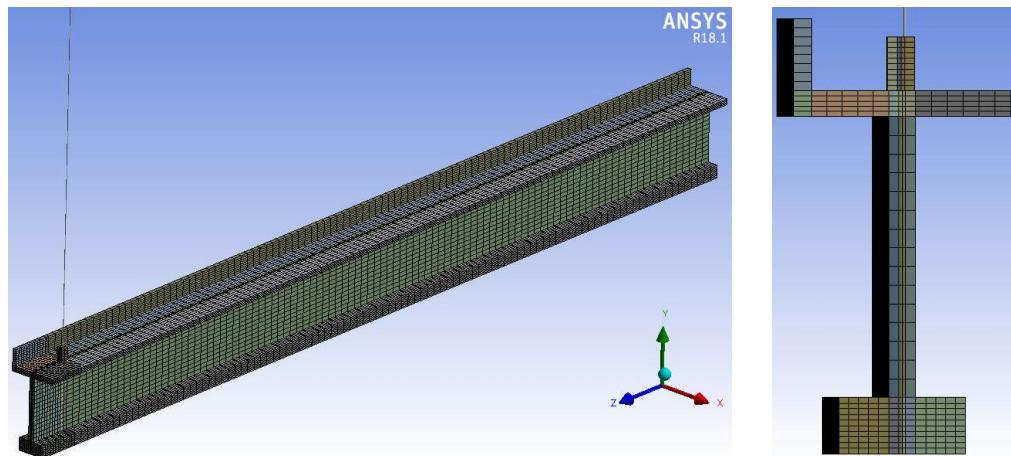
Figura 29 – Vistas longitudinal e transversal da viga modelada graficamente



Fonte: Autor (2020)

Já para a definição da malha transversal e longitudinal em elementos finitos, foi realizado estudo de malha sendo avaliado o efeito do refinamento dos elementos finitos adotados, visto que a eficiência da discretização é dependente disto. A Figura 30 apresenta a malha longitudinal e a malha transversal da viga modelada.

Figura 30 – Malha longitudinal e malha transversal da viga



Fonte: Autor (2020)

O estudo de malha realizou-se atribuindo diferentes níveis de discretização à viga e para cada número de divisões arbitrado foram computados os valores de deslocamento do apoio fictício e suas respectivas reações, analisando-se o erro relativo entre os valores observados para cada nível de discretização. Nestes termos, adotou-se a divisão de malha que forneceu menor erro relativo entre os valores de deslocamentos observados.

A seção transversal da viga foi segmentada em diversos elementos, enquanto longitudinalmente a viga também foi dividida em elementos entre a sua extremidade e a seção de içamento, e entre a seção de içamento e a seção de meio de vão. 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 divisão da 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. A Tabela 3 apresenta as hipóteses das divisões da malha na seção transversal e também longitudinalmente. Já a Tabela 4 apresenta os resultados das análises, com os valores de deslocamentos impostos, reações laterais na base do cabo e na extremidade da mesa inferior, e deslocamento resultante no nó de maior deslocamento.

Tabela 3 – Número de divisões da malha transversal e longitudinal da viga

Local	Comprimento (mm)	1 ^a Hipótese (escolhida)	2 ^a Hipótese	3 ^a Hipótese	4 ^a Hipótese
Largura da mesa superior	525	5	5	5	5
Largura da mesa inferior	425	4	4	4	4
Altura do parapeito	275	5	5	5	7
Altura da mesa superior	400	8	8	8	10
Altura da alma	140	5	5	5	7
Altura da mesa inferior	1550	15	15	15	20
Altura da mesa inferior	310	10	10	10	12
Enrijecimento da alça	300	10	10	10	12
Balanço	900	10	12	5	5
Comprimento longitudinal	21685	100	120	50	50

Fonte: Autor (2020)

Tabela 4 – Análise da malha transversal e longitudinal da viga

Hipótese	Deslocamento lateral imposto (mm)	Reação lateral na base do cabo (N)	Reação lateral na extremidade da mesa inferior (N)	Deslocamento resultante no nó de maior deslocamento (mm)
1 ^a Hipótese (escolhida)	323,68	-7,794	-0,2303	211,32
2 ^a Hipótese	323,68	-7,863	-0,19763	211,32
3 ^a Hipótese	323,83	-7,6852	-0,38352	211,44
4 ^a Hipótese	323,73	-9,9393	-0,6555	211,36

Fonte: Autor (2020)

A malha final escolhida para esta viga foi referente à 1^a hipótese, visto que a malha da 2^a hipótese, que tem uma maior quantidade de divisões, apresentou resultados idênticos de deslocamento resultante no nó de maior deslocamento.

O elemento utilizado para simulação da viga foi o SOLID185, enquanto que os cabos de içamento foram definidos com o elemento LINK180. O elemento SOLID185 é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó (translações nas direções x, y e z). Já o elemento LINK180 foi habilitado somente por esforços axiais, com dois nós (I e J), cada um com três graus de liberdade (translações segundo os eixos x, y e z).

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO, MATERIAIS E MODELAGEM

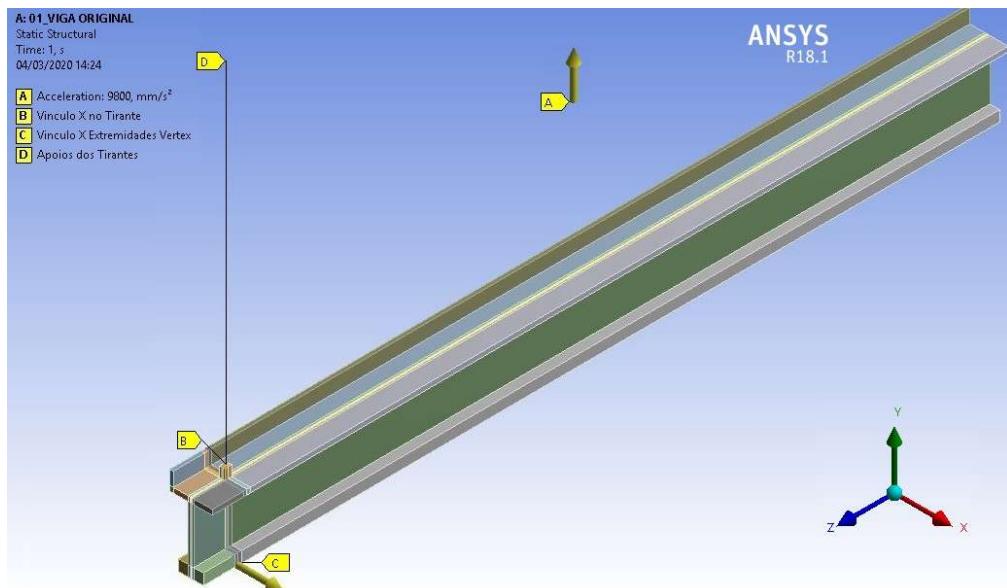
Para a realização da modelagem numérica no programa computacional ANSYS, foi necessária a utilização de uma estratégia para que o programa pudesse reconhecer a situação de içamento como isostática. Isso se dá pelo reduzido número de vínculos e impedimentos ao movimento garantidos pelos cabos, levando-se em conta que se trata de uma viga curva, o que realmente caracterizaria uma situação hipostática, ou seja, uma situação com número insuficiente de vínculos.

A estratégia adotada permite o desenvolvimento e solução numérica do problema, e é uma boa aproximação do comportamento da estrutura, como constatado por Lima (2018). O procedimento consiste na inserção de dois apoios fictícios, os vínculos B e C, representados na Figura 31 a seguir.

O vínculo B é inserido no ponto de encontro da viga com o cabo de içamento, impedindo o deslocamento lateral, e não interfere no problema, pois o cabo de içamento permanece sempre no plano vertical. Já o vínculo C é posicionado na extremidade da mesa inferior, alinhado ao vínculo B, ou seja, na mesma seção transversal de fixação do cabo de içamento, também com o objetivo de impedir o deslocamento lateral.

Importante também destacar que, para realizar a ligação adequada entre o cabo de içamento e o elemento sólido, foi necessário se utilizar um comando de união do nó da malha comum a ambos, dentro do programa computacional ANSYS.

Figura 31 – Elementos para discretização no ANSYS



Fonte: Autor (2020)

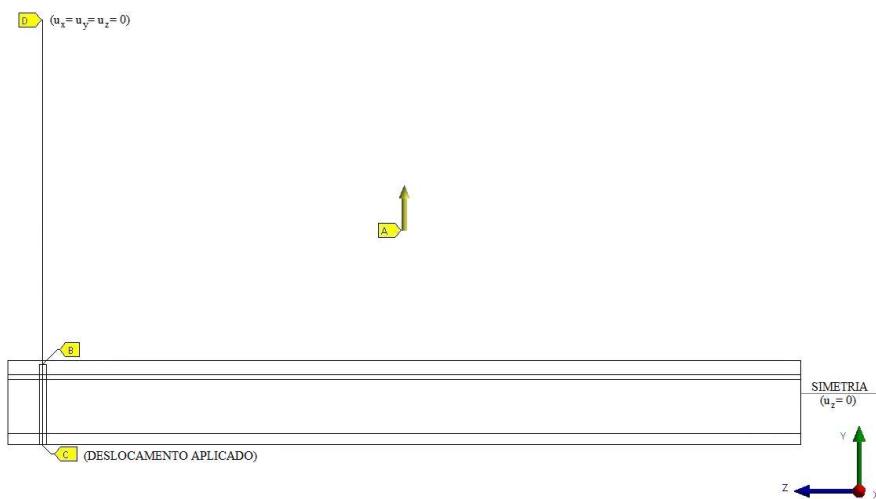
A estratégia de aplicação de restrições na seção de içamento permite encontrar a condição de equilíbrio estático, uma vez que, como não existe restrição ao tombamento, a viga passa por um processo iterativo até que sua posição final seja alcançada. Sendo assim, é imprescindível que as reações de apoio dos vínculos B e C sejam nulas. Somente desta forma se garantem as condições de equilíbrio do problema, e a posição de equilíbrio da viga após o içamento é obtida.

Portanto, é inserido um deslocamento lateral no vínculo C, e após o processamento se verifica o valor da reação de apoio nos vínculos fictícios. Esse processo se repete de maneira iterativa, até que os valores encontrados das reações nos vínculos sejam iguais ou muito próximos de zero, o que caracteriza a posição de equilíbrio.

Por se tratar de um problema simétrico, visto que as duas alças de içamento têm a mesma distância de suas respectivas extremidades, adotou-se a realização da inserção da geometria de apenas metade da viga, a fim de se reduzir custo computacional para o processamento. Desta forma, se inseriu um comando de simetria na seção transversal de meio de vão.

A Figura 32 apresenta, por meio de uma vista lateral da viga, todas as condições de contorno e os graus de liberdade restringidos.

Figura 32 – Condições de contorno e graus de liberdade restringidos



Fonte: Autor (2020)

Quanto aos materiais utilizados, definiu-se a viga em concreto, e os cabos de içamento em aço, não sendo inseridas armaduras passivas na modelagem numérica da viga, a qual considerou resposta linear dos materiais. Para a simulação do comportamento do concreto, é necessário informar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Já para a simulação dos cabos de içamento, deve-se definir diâmetro e comprimento da barra, além do módulo de elasticidade do material.

Para o concreto, considerou-se o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor de resistência característica à compressão (f_{ck}) estipulado em cada simulação, conforme Equações (39) e (40), determinadas pela ABNT NBR 6118:2014. Quanto ao coeficiente de Poisson, o valor estabelecido em todas as análises foi de 0,2. Já para os cabos de içamento, foi considerada uma seção transversal dos cabos com 2 cm de diâmetro, 10 m de comprimento e módulo de elasticidade de 200 GPa.

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, \quad \text{se } 20 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (39)$$

$$E_{cs} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \quad \text{se } 55 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (40)$$

3.4. ROTAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA ORIGINAL

As condições de içamento da viga de concreto pretendido foram estabelecidas de acordo com Germán (2015). As alças de içamento foram posicionadas a 1,00 m das

extremidades, caracterizando uma relação balanço/vôo (a/L) de 2,19%. Quanto ao f_{ck} , no momento do içamento o concreto atingiu 35 MPa, sendo que o f_{ck} estabelecido para as situações em serviço é de 60 MPa. Foi considerado também um desvio das alças de 2 cm, no sentido desfavorável, ou seja, contrário à curvatura da viga.

Anteriormente ao içamento, a viga apresentava deslocamentos laterais da ordem de 90 mm. Sendo assim, considerou-se como excentricidade inicial a relação $L/500$, equivalente a 9,114 cm. O enrijecimento da alça foi de 30 cm, segundo Germán (2015), e o parapeito executado foi de 40 cm. A viga foi suspensa por cabos verticais. Inicialmente, não foi considerada nas análises a força de protensão, sendo que tal parâmetro foi levado em conta na Seção 3.5.1. Desta forma, as condições de içamento da viga são resumidas na Tabela 5.

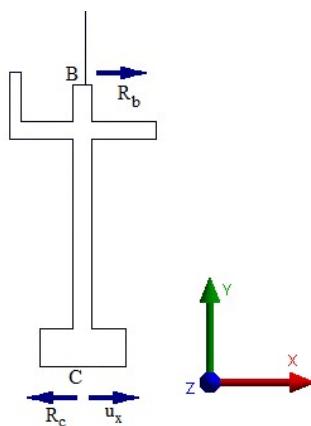
Tabela 5 – Parâmetros estabelecidos para a viga original

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cabo}	L (m)	P (kN)
2,19	35	-2	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	90°	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

Para a modelagem numérica da viga, foram inseridos apoios fictícios, conforme explicado na Seção 3.3. Sendo assim, para a obtenção de reações de apoio próximas de zero nestes vínculos, foi necessária a imposição de um deslocamento lateral de 323,68 mm no vínculo posicionado na extremidade da mesa inferior, valor encontrado de maneira iterativa. A Tabela 6 apresenta as reações laterais nos vínculos B e C encontradas nas 5 iterações realizadas, enquanto que a Figura 33 apresenta a seção transversal correspondente aos pontos de içamento, com a representação destas reações e do deslocamento lateral imposto em C.

Figura 33 – Seção transversal de içamento



Fonte: Autor (2020)

Tabela 6 – Reações laterais nos vínculos para cada iteração

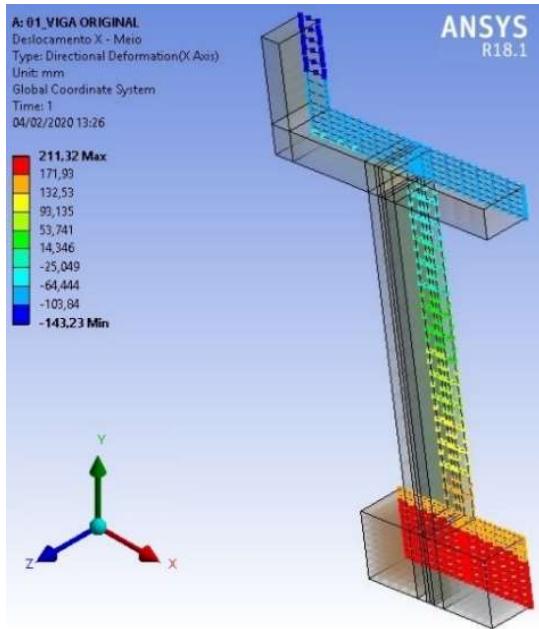
Iteração	Deslocamento lateral imposto em C (mm)	Reações laterais em B e C	
		R_b (N)	R_c (N)
1	100	-15.160,0	+15.155,0
2	200	-8.824,6	+8.819,3
3	300	-1.791,8	+1.784,4
4	320	-285,27	+277,32
5	323,68	-7,794	-0,2303

Fonte: Autor (2020)

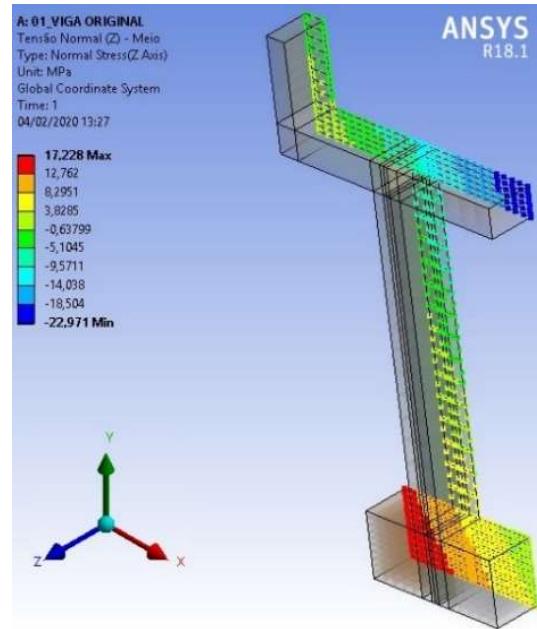
Desta forma, foram obtidos os valores de tensão normal e deslocamentos laterais na seção crítica de meio de vão. A Figura 34 apresenta estes valores por escala de cores, sendo possível perceber a inclinação da linha neutra e a rotação de corpo rígido da seção.

Figura 34 – Resultados obtidos na seção transversal de meio de vão

(a) Deslocamentos laterais



(b) Tensões normais



Fonte: Autor (2020)

Conforme apresentado na Figura 34, as tensões normais máximas de tração e compressão obtidas foram, respectivamente, 17,228 MPa e 22,971 MPa. O valor máximo de tensão de tração foi encontrado no nó da extremidade da mesa inferior no sentido coincidente com a excentricidade inicial, enquanto o valor máximo de tensão de compressão foi encontrado no nó da extremidade da mesa superior no sentido oposto ao da excentricidade inicial. Importante destacar também que a tensão normal máxima de tração obtida é bastante superior ao valor limite resistido pelo concreto (f_{ctm}), de 3,21 MPa.

Conhecidos os deslocamentos laterais da seção de meio do vão e a altura da viga, pode-se calcular geometricamente a rotação de equilíbrio desta seção (θ_{eq}), tendo sido obtido um ângulo de 8,50°.

$$\theta_{eq} = \arcsen \left(\frac{\Delta_{desl}}{H_{viga}} \right) = \arcsen \left(\frac{-143,23 - 21,32}{2400} \right) = -0,1483 \text{ rad ou } -8,50^\circ$$

3.5. ANÁLISE PARAMÉTRICA

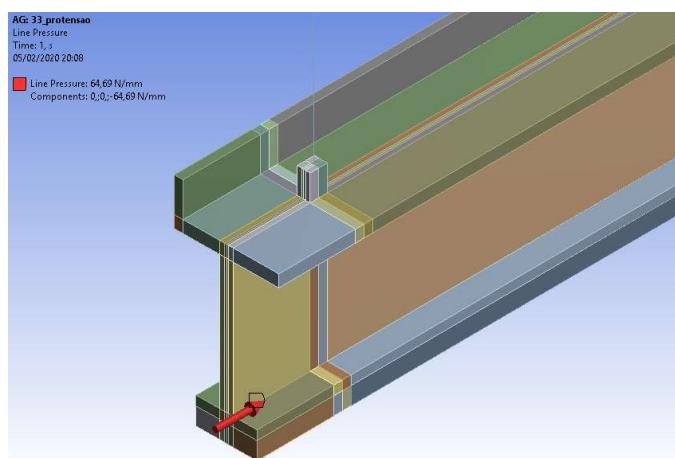
A análise paramétrica desenvolvida nesta seção é realizada respeitando os parâmetros descritos por Germán (2015), e leva em conta o efeito das seguintes variáveis: comprimento do balanço (a), resistência do concreto (f_{ck}), desvio de posicionamento das alças (t), excentricidade lateral inicial (e_i), enrijecimento da alça (h_{lift}), inclinação dos cabos de içamento (φ), altura e posicionamento do parapeito, vão da viga (L) e inserção da protensão.

Ao longo da análise, para todas as variações de parâmetros, foi possível observar que a diferença entre a rotação nas extremidades e no meio do vão é pequena, o que confirma que se trata de um giro de corpo rígido.

3.5.1. Verificação do efeito da protensão

Para verificar o efeito causado pela protensão quanto à estabilidade lateral, foi realizada a modelagem numérica com a inserção de força que simula a ação da mesma. Para a modelagem, a força de protensão foi aplicada como um carregamento uniformemente distribuído longitudinalmente na viga, no valor de 64,69 kN/m, totalizando o valor de protensão final de 2948 kN, já considerando as perdas imediatas e parte das progressivas. A Figura 35 ilustra a aplicação da protensão, com a força de 64,69 kN/m, e com o centro de gravidade (CG) dos cabos distando 73 cm do CG da seção transversal, caracterizando uma protensão com aderência inicial, e, portanto, a existência de cabos retos.

Figura 35 – Aplicação da protensão no modelo



Fonte: Autor (2020)

Os parâmetros que constam na Tabela 7 tiveram seus valores estabelecidos como constantes na análise. Já a Tabela 8 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para verificação do efeito da protensão.

Tabela 7 – Parâmetros estabelecidos para a consideração do efeito da protensão

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cabo} ($^{\circ}$)	L (m)
2,19	35	-2	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	90	45,57

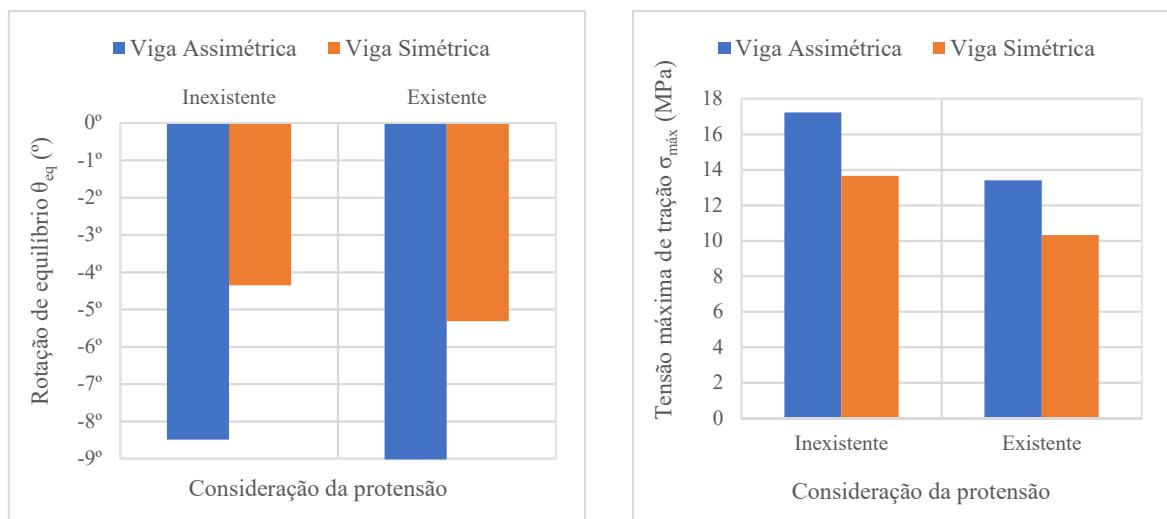
Fonte: Autor (2020)

Tabela 8 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação da protensão

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa ($^{\circ}$)
Protensão	Existente	13,396	-24,821	-8,72	-9,02	0,30
	Inexistente	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

A Figura 36 apresenta os resultados gráficos do ângulo de giro de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para vigas com e sem protensão. Também são apresentados os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga com seção transversal sem a presença do parapeito.

Figura 36 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da protensão

Fonte: Autor (2020)

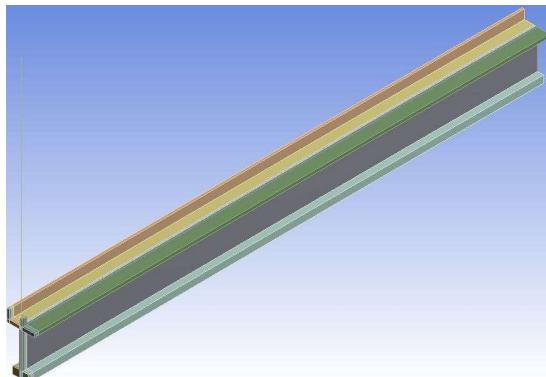
Pode-se perceber que a inserção da força de protensão provoca um aumento no ângulo de rotação de equilíbrio de 6,21%, caracterizando indicativo de que a protensão gera pequena influência na rotação de equilíbrio. Além disso, provoca uma redução na tensão máxima de tração de 22,24%, e um aumento na tensão máxima de compressão de 8,05%. Já ao se comparar as vigas protendidas com seção simétrica com as de seção assimétrica, são percebidas reduções de 41,10% e 22,95% no ângulo de rotação de equilíbrio e na tensão máxima de tração, respectivamente. Como a influência da protensão na rotação de equilíbrio se mostrou pequena, a mesma não será considerada nas análises seguintes da simulação.

3.5.2. Variação do comprimento do balanço (a)

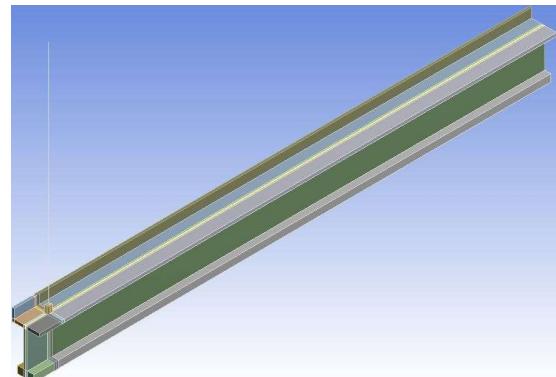
Com o intuito de se verificar a interferência causada pela alteração no comprimento do balanço, foi realizada a modelagem numérica de vigas com a relação balanço/vôo (a/L) equivalente a 0, 5, 10, 15 e 20%, além da situação original de 2,19% ($a = 1,00\text{ m}$). A Figura 37 ilustra as situações estudadas, e a Tabela 9 apresenta os parâmetros fixados nesta análise.

Figura 37 – Situações modeladas para variação do comprimento do balanço

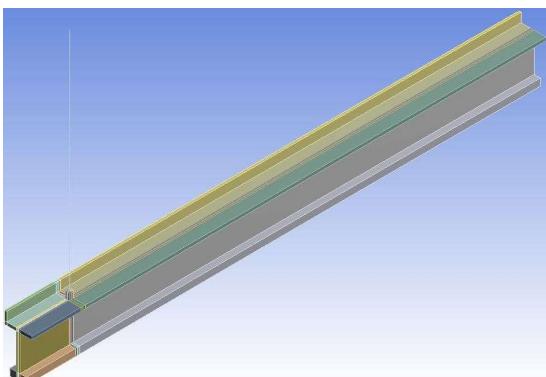
(a) Relação $a/L = 0\%$



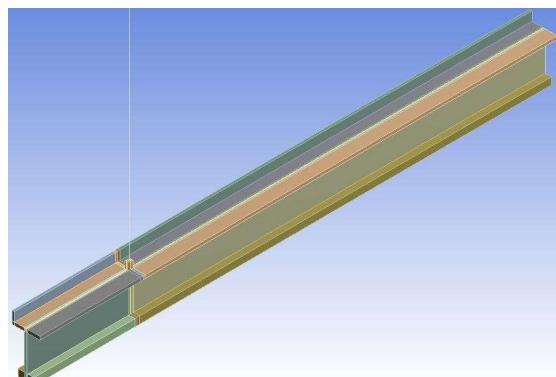
(b) Relação $a/L = 2,19\%$ ($a = 1,00\text{ m}$)

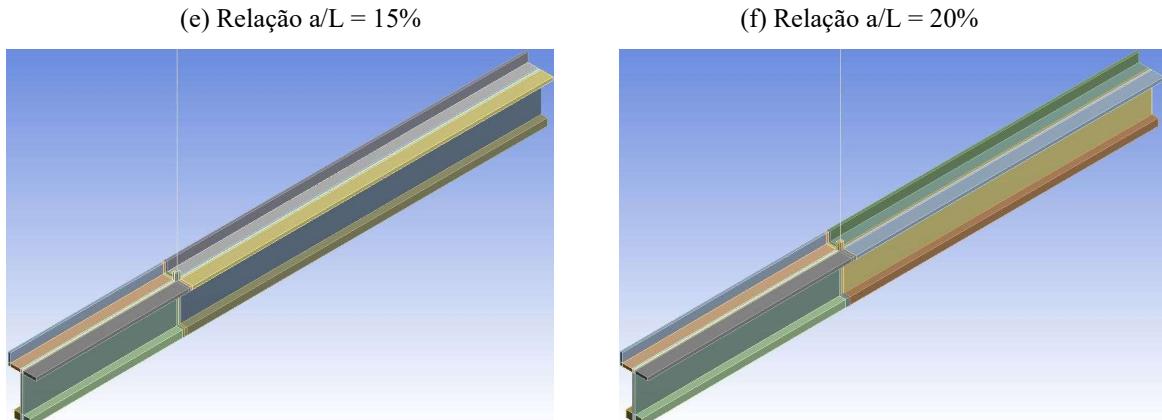


(c) Relação $a/L = 5\%$



(d) Relação $a/L = 10\%$





Fonte: Autor (2020)

Tabela 9 – Parâmetros estabelecidos para a variação do comprimento dos balanços

f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cabo} ($^{\circ}$)	L (m)	P (kN)
35	-2	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	90	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 10 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação do comprimento do balanço da viga com seção assimétrica.

Tabela 10 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do comprimento dos balanços

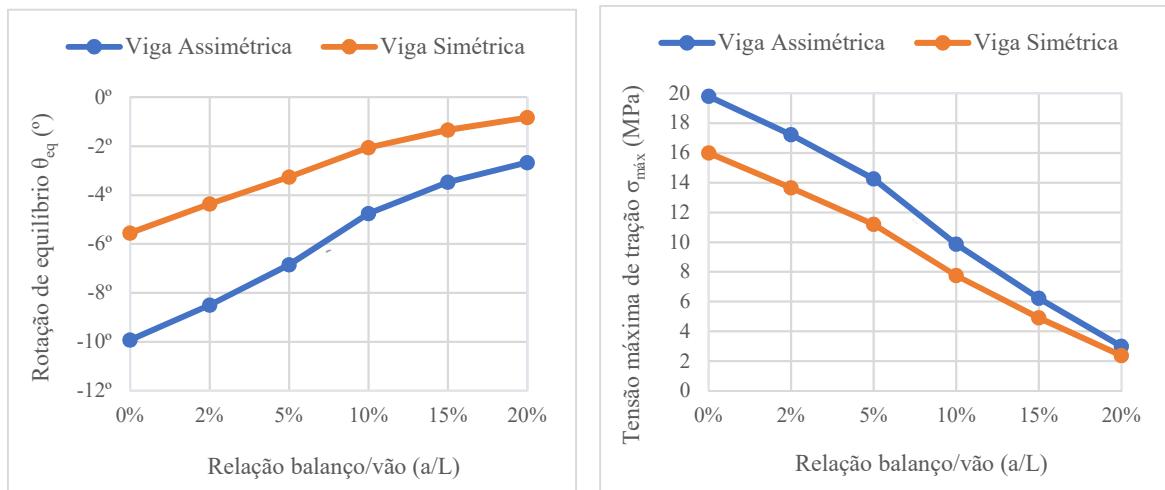
Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa ($^{\circ}$)
Relação balanço/vão (a/L)	0%	19,792	-26,937	-9,47	-9,92	0,45
	2,19%	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37
	5%	14,254	-18,486	-6,58	-6,84	0,26
	10%	9,867	-12,280	-4,61	-4,75	0,14
	15%	6,230	-7,536	-3,39	-3,46	0,07
	20%	2,995	-3,580	-2,64	-2,66	0,02

Fonte: Autor (2020)

Já a Figura 38 mostra os valores do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, alterando-se o comprimento do balanço, para a viga com seção assimétrica e para a viga sem o parapeito (simétrica). Os resultados do estudo paramétrico evidenciam a importância do comprimento do balanço na situação de içamento de vigas de concreto, deixando claro que, respeitados certos limites, quanto maior

a relação balanço/vão, maior o efeito estabilizante gerado na viga, e menor a necessidade de rotação da mesma para que a posição de equilíbrio seja alcançada.

Figura 38 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da relação balanço/vão



Fonte: Autor (2020)

A influência do comprimento do balanço na viga de seção assimétrica é percebida pela redução de 73,16% na rotação de equilíbrio para o caso em que a/L é 20%, em comparação à situação sem balanços. Em outras palavras, a rotação θ_{eq} reduz 3,73 vezes, passando de 9,92° para 2,66°. Em relação à viga original ($a = 1$ m), a redução é de 68,65%.

Quanto aos valores de tensão máxima de tração da viga de seção assimétrica, notase que o comprimento do balanço também gera grande interferência. Foi notada uma redução de 84,87% em relação à situação $a/L = 0\%$, e de 82,62% em relação ao caso original ($a = 1$ m), para a situação em que a relação balanço/vão passa a ser de 20%. Importante destacar também que, em todo o estudo paramétrico, com a variação de diversos parâmetros, a única situação que garantiu uma tensão máxima de tração inferior ao valor limite resistido pelo concreto (f_{ctm}), foi a situação em que a/L é 20%. Nesse caso, o valor de $\sigma_{máx}$, que era de 19,792 MPa sem balanços, passou a ser 2,995 MPa, inferior ao limite f_{ctm} de 3,21 MPa.

Quanto às tensões de compressão na seção de meio de vão da viga com assimetria, houve uma redução de 86,71% considerando-se os casos extremos (sem balanços e com 20% de balanços), valor que pode ser considerado expressivo. Assim, com a diminuição das tensões tanto de tração quanto de compressão, pode-se observar que a linha neutra tem uma

inclinação menor à medida que aumenta o comprimento do balanço. Em contraposição, o içamento pelas extremidades da viga requer um maior ângulo de rotação da seção para alcançar a posição de equilíbrio, resultando em maior inclinação para a linha neutra.

A Figura 38 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga com seção transversal sem a presença do parapeito. Pode-se perceber que a tendência dos resultados de rotação de equilíbrio e de tensão máxima de tração é similar ao verificado para a viga com seção transversal assimétrica. Sendo assim, o aumento da relação a/L ocasiona decréscimos tanto para θ_{eq} quanto para σ_{max} .

Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 44,11% para a situação em que $a/L = 0\%$, a 68,97% para a situação em que a relação balanço/vão é de 20%. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são da ordem de 20% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.3. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})

Para a análise da influência da variação dos valores de resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), foram modeladas numericamente vigas com 35, 40, 45, 50 e 55 MPa, o que implica também alteração dos valores de módulos de elasticidade do concreto. A utilização de determinados aditivos no concreto, mudanças no processo de cura térmica ou a realização do içamento em um estágio posterior poderiam garantir este aumento do f_{ck} . A Tabela 11 apresenta os parâmetros estabelecidos como constantes ao longo desta análise.

Tabela 11 – Parâmetros estabelecidos para a variação da resistência à compressão do concreto (f_{ck})

a/L (%)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
2,19	-2	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	90	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

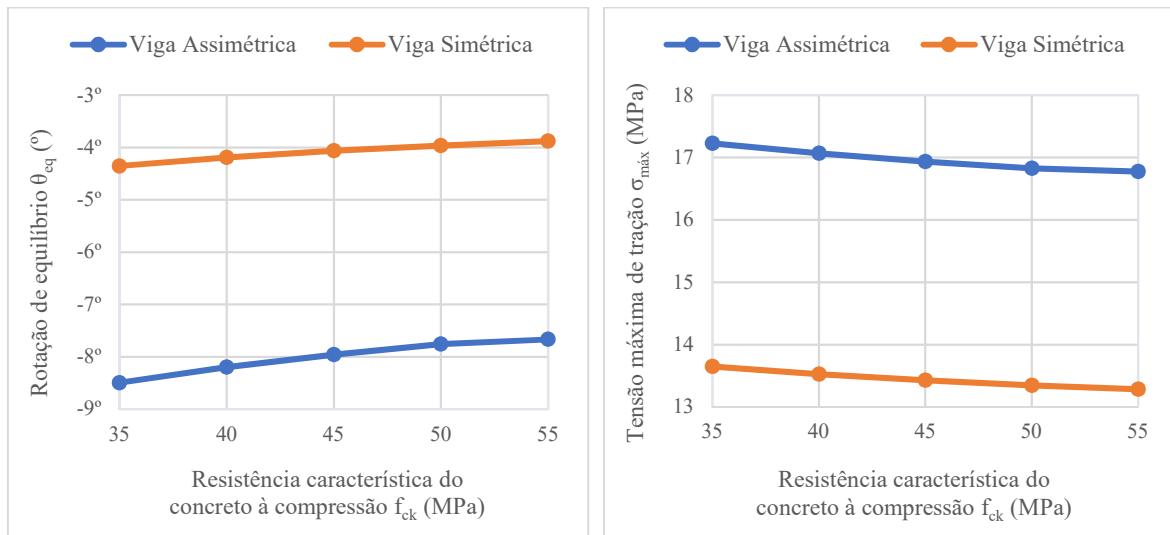
A Tabela 12 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação da resistência à compressão do concreto da viga com seção assimétrica.

Tabela 12 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do f_{ck}

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Resistência do concreto à compressão (f_{ck})	35 MPa	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37
	40 MPa	17,066	-22,627	-7,87	-8,20	0,33
	45 MPa	16,934	-22,349	-7,66	-7,96	0,30
	50 MPa	16,825	-22,118	-7,49	-7,76	0,27
	55 MPa	16,774	-22,012	-7,40	-7,67	0,26

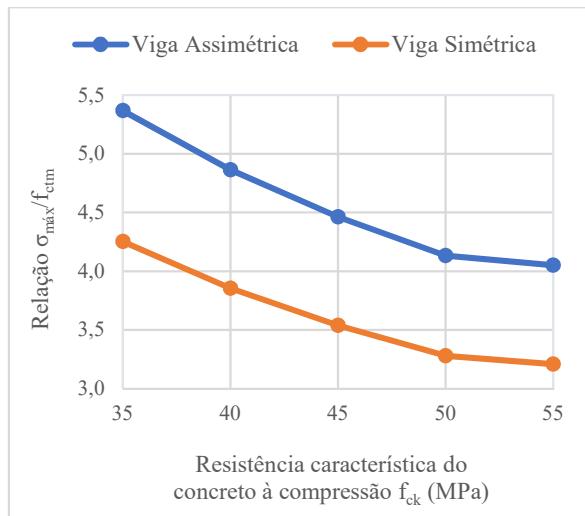
Fonte: Autor (2020)

A Figura 39 apresenta os resultados da rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para a viga com seção assimétrica e para a viga sem o parapeito (simétrica), em função da variação do f_{ck} . Ao comparar as vigas com assimetria de 35 e 55 MPa, pode-se observar que, com o aumento do f_{ck} , ocorre uma redução de 9,73% no ângulo θ_{eq} , uma diminuição de apenas 2,64% na tensão $\sigma_{máx}$, além de uma redução de 4,17% na tensão máxima de compressão. Portanto, o acréscimo deste parâmetro gera um efeito positivo, mas o seu impacto não é tão acentuado.

Figura 39 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do f_{ck} 

Fonte: Autor (2020)

A Figura 40 mostra uma maneira alternativa de avaliar a variação da tensão máxima de tração atuante em função do aumento do f_{ck} , por meio da relação entre a mesma e o valor limite de resistência do concreto à tração (f_{ctm}), visto que o aumento da resistência à compressão também gera acréscimo na tensão resistente do concreto à tração.

Figura 40 – Relação $\sigma_{máx} / f_{ctm}$ em função do f_{ck} 

Fonte: Autor (2020)

Ao comparar as vigas com seção transversal assimétrica de 35 e 55 MPa, pode-se observar que, com o aumento do f_{ck} , ocorre uma redução de 24,52% na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$, em contraposição à redução já discutida de apenas 2,64% no valor nominal da tensão $\sigma_{máx}$. A maior interferência na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$ se dá pois o aumento no f_{ck} gera um maior impacto na tensão f_{ctm} , que aumenta 28,99% com o aumento do f_{ck} de 35 para 55 MPa.

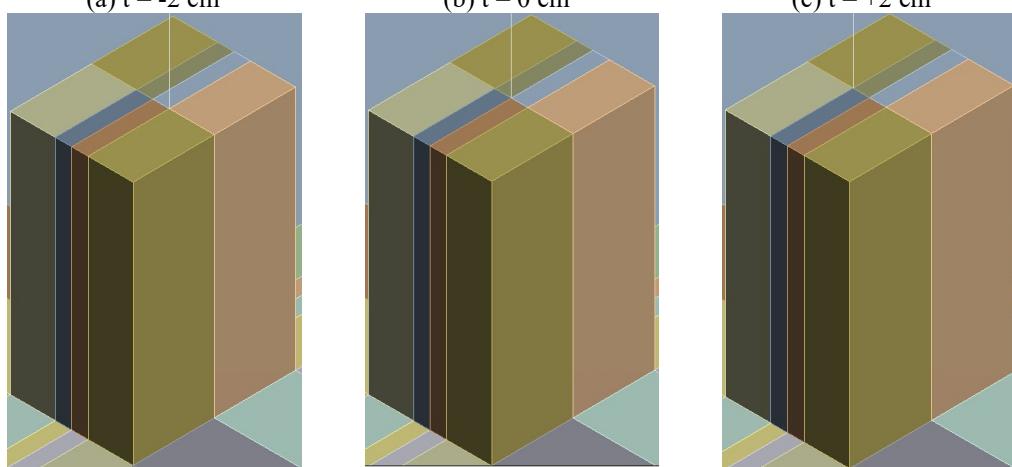
As Figuras 39 e 40 também apresentam curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga com seção transversal sem a presença do parapeito. Nota-se que a tendência dos resultados de rotação de equilíbrio e de tensão máxima de tração é similar ao verificado para a viga com seção transversal assimétrica. Sendo assim, o aumento do f_{ck} ocasiona reduções do ângulo de rotação θ_{eq} , da tensão máxima de tração $\sigma_{máx}$ e da relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$.

Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 48,75% para a situação em que $a/L = 0\%$, a 49,44% para a situação em que a relação balanço/vão é de 20%. Já no que se refere à tensão máxima de tração e à relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$, os resultados para a viga simétrica correspondente são da ordem de 20% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica. Finalmente, os valores obtidos de tensão máxima de compressão para a viga simétrica correspondente são aproximadamente 26% inferiores em comparação à viga com parapeito.

3.5.4. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t)

No propósito de quantificar o impacto causado pela variação dos desvios de posicionamento das alças de içamento, foi realizada a modelagem numérica de três situações: alças sem desvio ($t = 0$), com desvio no sentido da curvatura ($t = +2$ cm) e com desvio no sentido contrário à curvatura ($t = -2$ cm). A Figura 41 ilustra tais situações, e a Tabela 13 apresenta os parâmetros com valores estabelecidos como constantes na análise.

Figura 41 – Situações modeladas para variação do desvio de posicionamento da alça



Fonte: Autor (2020)

Tabela 13 – Parâmetros estabelecidos para a variação do posicionamento das alças

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cab} ($^{\circ}$)	L (m)	P (kN)
2,19	35	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	90	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 14 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação do desvio da alça da viga de seção assimétrica.

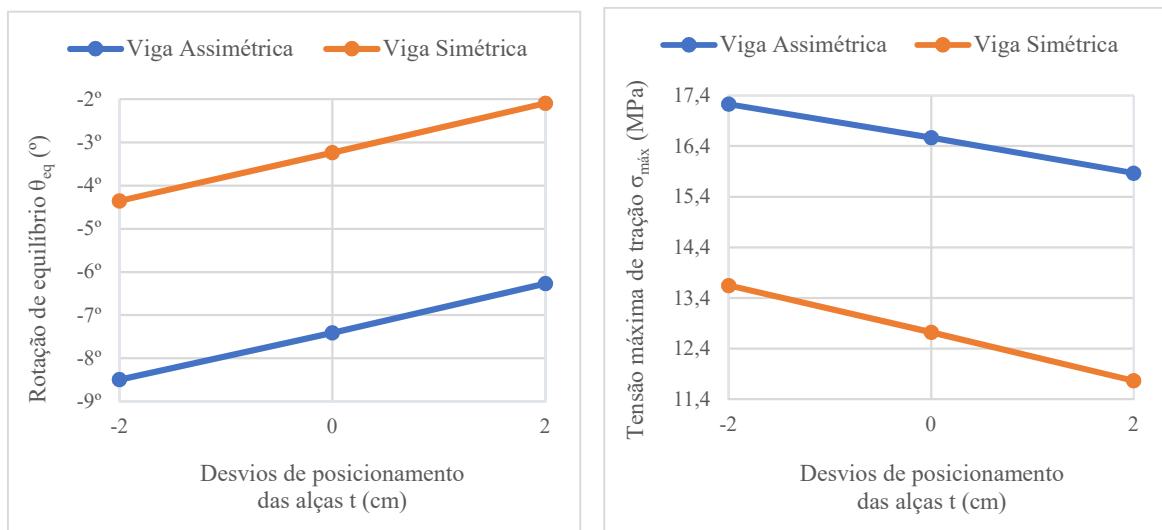
Tabela 14 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do desvio da alça

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa ($^{\circ}$)
Desvio da alça (t)	-2 cm	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37
	0 cm	16,567	-21,741	-7,04	-7,41	0,37
	+2 cm	15,869	-20,442	-5,90	-6,27	0,37

Fonte: Autor (2020)

A Figura 42 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para a viga com seção assimétrica e para a viga sem o parapeito (simétrica), em função da variação do desvio das alças. A alteração do desvio de $t = -2$ cm para $t = +2$ cm gera um efeito estabilizante, provocando na viga com seção assimétrica uma redução de 26,21% no ângulo θ_{eq} . No que diz respeito às tensões, o impacto é mais discreto, com diminuição de apenas 7,89% na tensão de tração $\sigma_{máx}$, além de uma redução de 11,01% na tensão máxima de compressão.

Figura 42 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da posição das alças



Fonte: Autor (2020)

A Figura 42 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga sem a presença do parapeito. Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 48,75% para a situação em que $t = -2$ cm a 66,70% para a situação em que $t = +2$ cm. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são de 20% a 25% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.5. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)

As vigas desta análise paramétrica foram criadas como arcos de circunferência, tendo sido determinados, para cada uma delas, raios de curvatura que garantam a excentricidade lateral inicial (e_i) desejada na seção de meio de vão. A influência da variação da

excentricidade foi considerada, com a modelagem de vigas curvas com e_i equivalente a L/500, L/625, L/750, L/875 e L/1000, sendo L o comprimento da viga (45,57 m).

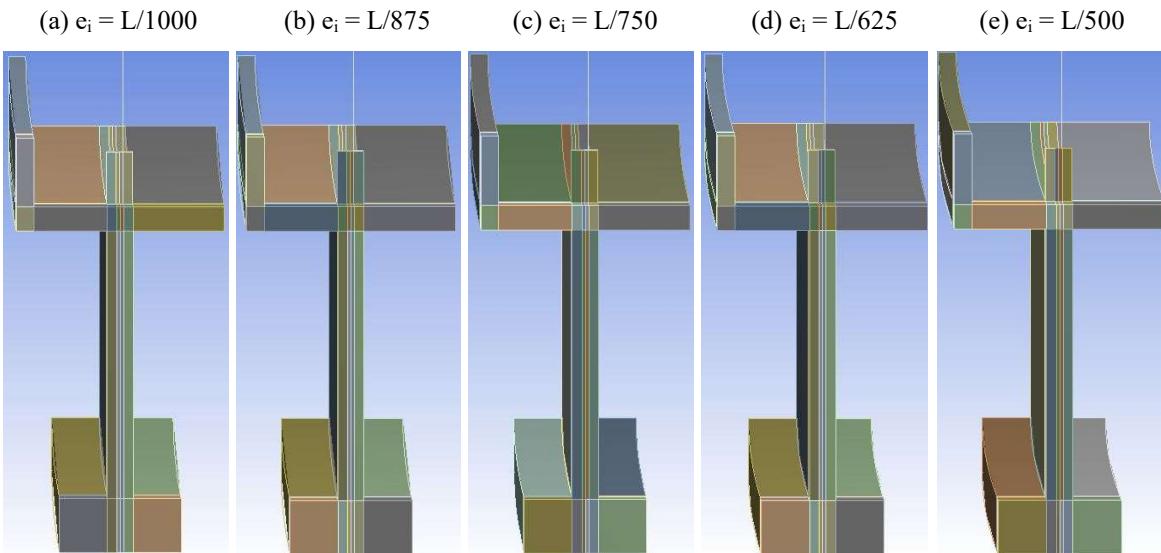
Os parâmetros que constam na Tabela 15 tiveram seus valores estabelecidos como constantes ao longo desta análise, e a Figura 43 ilustra as situações modeladas graficamente, sendo possível perceber o aumento gradual da curvatura da viga em função do aumento da excentricidade lateral inicial da mesma.

Tabela 15 – Parâmetros estabelecidos para a variação da excentricidade lateral inicial

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
2,19	35	-2	30	40 (lado da e_i)	90	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

Figura 43 – Situações modeladas para variação da excentricidade lateral inicial



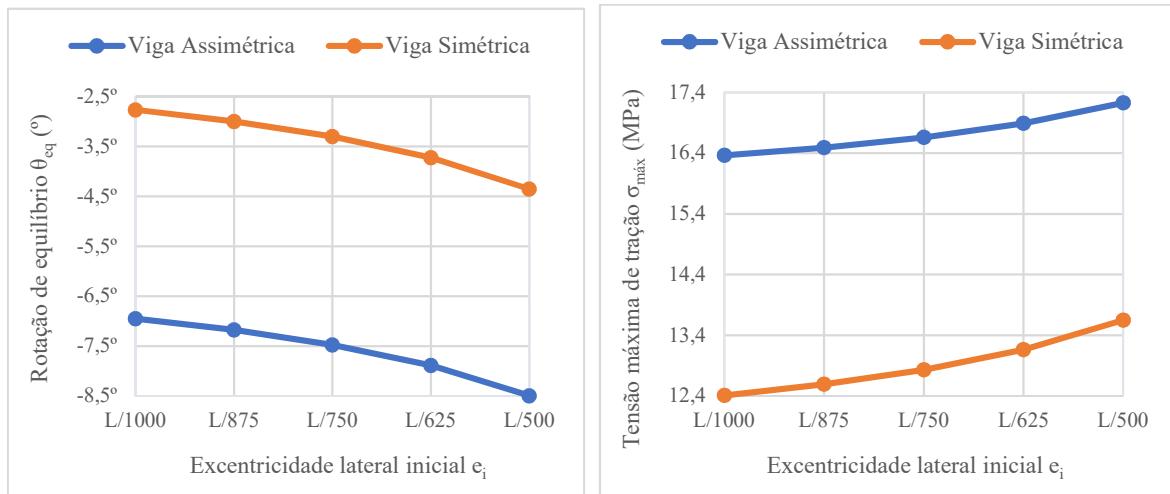
Fonte: Autor (2020)

A Tabela 16 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico da viga com assimetria, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação do desvio da alça. Já a Figura 44 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação da excentricidade lateral inicial (e_i). É possível notar que, à medida que a e_i aumenta, ocorrem também aumentos nos valores de θ_{eq} e $\sigma_{máx}$, com crescimento destes parâmetros segundo curvas parabólicas.

Tabela 16 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação da excentricidade lateral inicial

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Excentricidade lateral inicial (e_i)	L/1000	16,362	-21,170	-6,66	-6,95	0,29
	L/875	16,490	-21,434	-6,88	-7,18	0,30
	L/750	16,658	-21,783	-7,16	-7,47	0,31
	L/625	16,889	-22,264	-7,55	-7,89	0,34
	L/500	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

Figura 44 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da excentricidade inicial

Fonte: Autor (2020)

Foram realizadas simulações reduzindo-se o valor de e_i para a viga com seção assimétrica, a partir da situação original ($e_i = L/500$). Comparando-se as situações limites, percebe-se que, com a redução da e_i de $L/500$ (9,114 cm) para $L/1000$ (4,557 cm), houve reduções na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) de 18,20%, e na tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) de 5,03%. Além disso, houve um decréscimo de 7,84% na tensão máxima de compressão.

A Figura 44 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga sem a presença do parapeito. Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 48,75% para a situação com e_i de $L/500$ a 60,18% para a situação com e_i de $L/1000$. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são de 20% a 25% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.6. Variação do enrijecimento da alça (h_{lift})

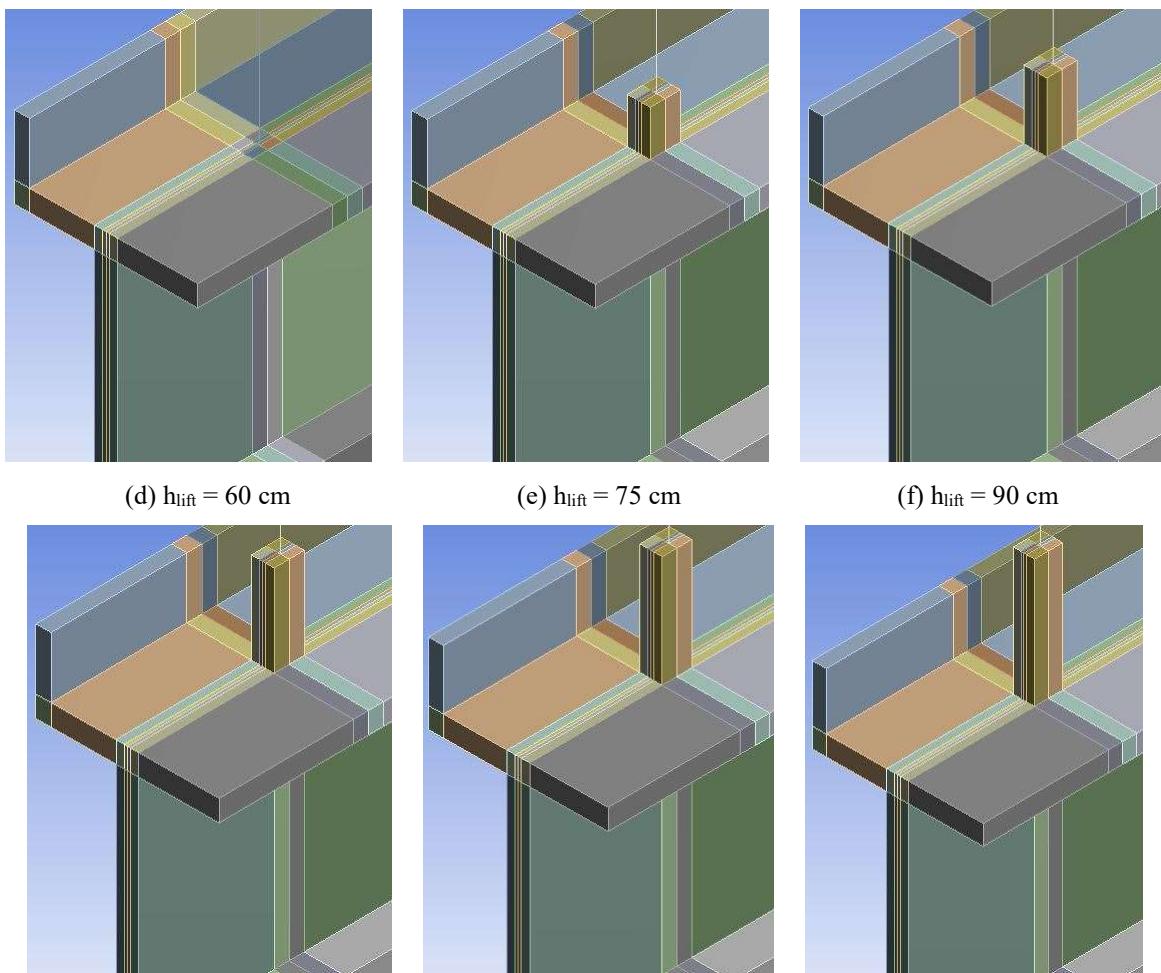
Para avaliar a influência deste parâmetro foi realizada a simulação para valores de enrijecimento da alça (h_{lift}) de 45, 60, 75 e 90 cm, além da situação original ($h_{lift} = 30$ cm), e também da situação sem enrijecimento ($h_{lift} = 0$). Esta modelagem foi realizada através da extensão da alma da viga acima de sua mesa, assim como é observado na prática construtiva, em que o enrijecimento da alma é conectado na viga ao longo de toda a altura da seção. A Figura 45 ilustra as situações estudadas, e a Tabela 17 apresenta os parâmetros estabelecidos.

Figura 45 – Situações modeladas para variação do enrijecimento da alça de içamento

(a) $h_{lift} = 0$ cm

(b) $h_{lift} = 30$ cm

(c) $h_{lift} = 45$ cm



Fonte: Autor (2020)

Tabela 17 – Parâmetros estabelecidos para a variação do enrijecimento da alça

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	parapeito (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
2,19	35	-2	$L/500$	40 (lado da e_i)	90	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 18 apresenta os resultados do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação do enrijecimento da alça da viga com seção assimétrica.

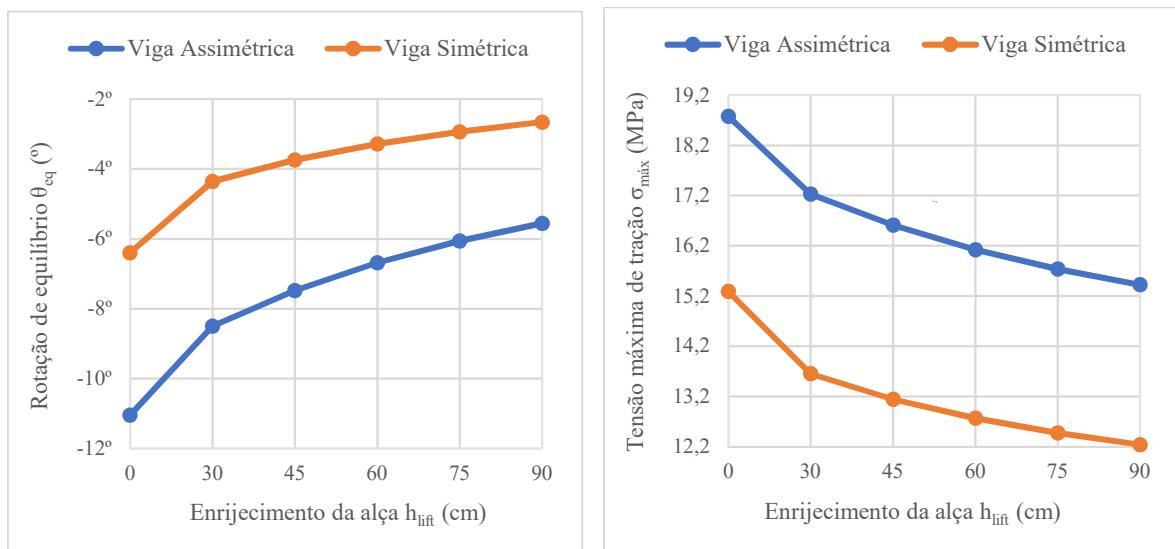
Tabela 18 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do enrijecimento da alça

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Enrijecimento da alça (h_{lift})	0 cm	18,778	-25,810	-10,72	-11,05	0,33
	30 cm	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37
	45 cm	16,610	-21,820	-7,11	-7,48	0,37
	60 cm	16,122	-20,912	-6,32	-6,69	0,37
	75 cm	15,734	-20,190	-5,69	-6,06	0,37
	90 cm	15,422	-19,610	-5,18	-5,55	0,37

Fonte: Autor (2020)

A Figura 46 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação do enrijecimento da alça (h_{lift}). Pode-se verificar que, à medida que h_{lift} aumenta, ocorrem reduções tanto nos valores de θ_{eq} quanto nos valores de $\sigma_{máx}$.

Figura 46 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do enrijecimento da alça



Fonte: Autor (2020)

A interferência do enrijecimento da alça na viga com assimetria pode ser notada pela considerável redução de 49,73% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) para a situação em que h_{lift} é

90 cm, em comparação à situação de içamento sem enrijecimento ($h_{lift} = 0$), passando de 11,05° para 5,55°. Em relação à viga original ($h_{lift} = 30$ cm), a redução é de 34,63%.

A redução na rotação de equilíbrio é bem mais expressiva que a redução nos valores de tensão máxima de tração, visto que a inserção e aumento da altura de enrijecimento da alça alteram diretamente o posicionamento do eixo de giro da viga. Esta suspensão do eixo confere maior estabilidade à viga, e reduz a necessidade de rotação da mesma para que a posição de equilíbrio seja alcançada.

Sendo assim, quanto aos valores de tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), foi verificada uma redução de 17,87% em relação à situação em que $h_{lift} = 0$, e de apenas 10,48% em relação à viga original ($h_{lift} = 30$ cm), para a situação em que a altura de enrijecimento da alça passa a ser 90 cm. Além disso, houve diminuição de 24,02% na tensão máxima de compressão, em relação à situação sem enrijecimento da alça.

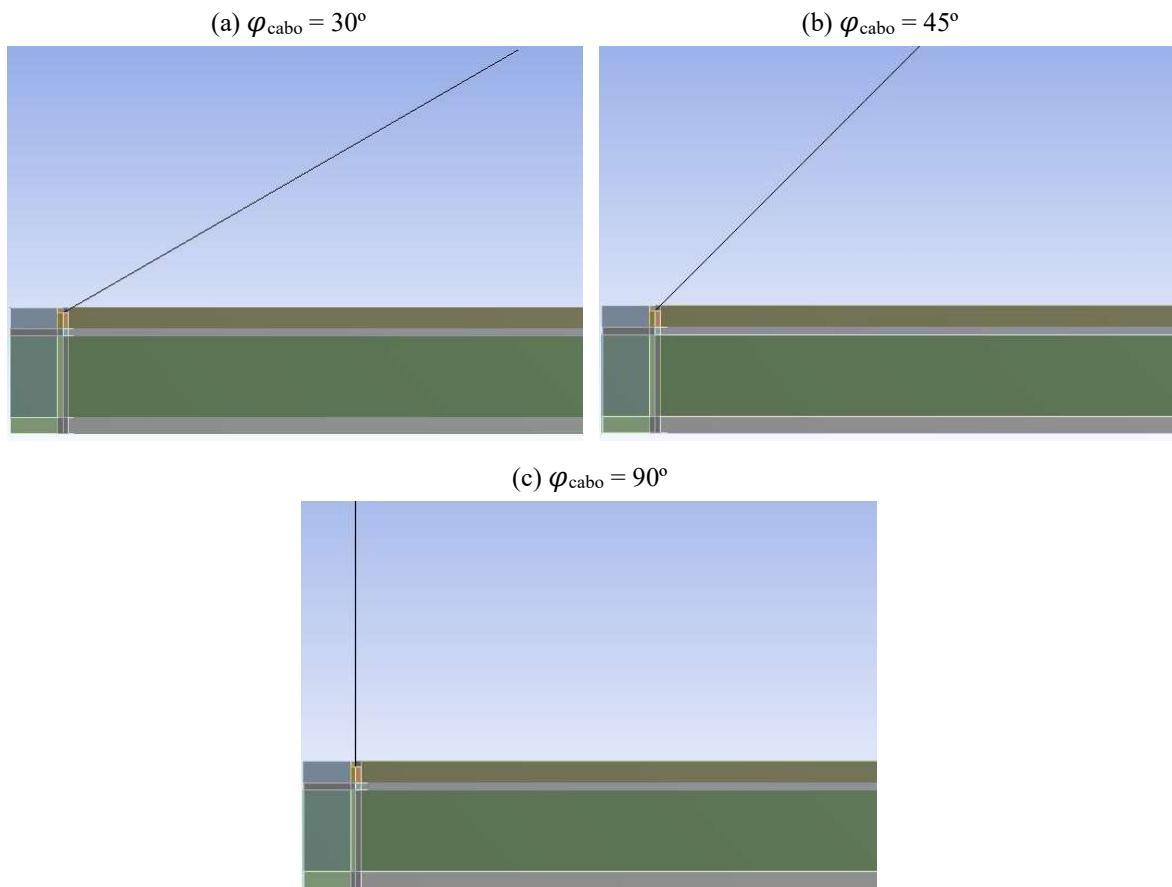
É importante destacar que a viga original modelada graficamente já contava com um enrijecimento da alça de 30 cm, e a simulação feita sem enrijecimento ($h_{lift} = 0$) provocaria um aumento de 30,04% na rotação de equilíbrio, e de 9,00% na tensão máxima de tração, o que atesta novamente a interferência causada por esse parâmetro.

Além das curvas correspondentes à viga com seção assimétrica, a Figura 46 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga sem a presença do parapeito. Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 42,12% para a situação em que $h_{lift} = 0$ a 52,20% para a situação em que $h_{lift} = 90$ cm. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são de 18% a 21% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.7. Variação da inclinação dos cabos de içamento (ϕ)

Com o intuito de se quantificar a influência causada pela variação da inclinação dos cabos de içamento, foi realizada a modelagem numérica de vigas sendo içadas por cabos a ângulos de 30°, 45° e 90° a partir do eixo horizontal, conforme mostra a Figura 47.

Figura 47 – Situações modeladas para variação da inclinação dos cabos de içamento



Fonte: Autor (2020)

A viga original modelada graficamente é suspensa por cabos retos ($\varphi_{cabo} = 90^\circ$). A intenção em se reduzir este ângulo é verificar o impacto da componente da reação do cabo que é introduzida como um esforço normal, e que pode contribuir para a instabilidade lateral da viga. Para o estudo, alguns parâmetros são estabelecidos como constantes na análise, apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros estabelecidos para a variação da inclinação do cabo de içamento

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	parapeito (cm)	L (m)	P (kN)
2,19	35	-2	$L/500$	30	40 (lado da e_i)	45,57	0

Fonte: Autor (2020)

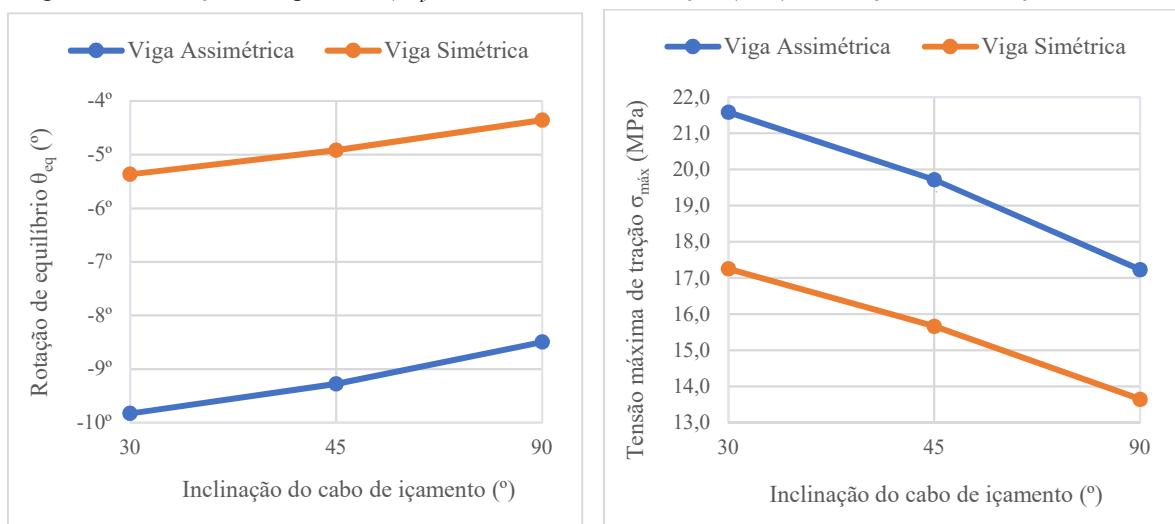
A Tabela 20 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação da inclinação dos cabos da viga com seção transversal assimétrica.

Tabela 20 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação da inclinação dos cabos

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Inclinação dos cabos (φ_{cabo})	30°	21,585	-31,918	-9,30	-9,83	0,53
	45°	19,716	-28,098	-8,82	-9,28	0,46
	90°	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

A Figura 48 mostra os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da mudança na inclinação dos cabos de içamento. Ao comparar a primeira situação em que o ângulo dos cabos é de 90°, e a segunda situação em que tal ângulo passa a ser de 30°, pode-se observar que, com a diminuição do ângulo φ_{cabo} , ocorre um aumento de 15,69% no ângulo θ_{eq} , e um acréscimo mais expressivo de 25,29% na tensão $\sigma_{máx}$, além de um aumento de 38,95% na tensão máxima de compressão, considerando-se a viga com seção transversal assimétrica.

Figura 48 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da inclinação dos cabos

Fonte: Autor (2020)

Os cabos inclinados geram uma força axial na parte superior das alças de içamento, que induzem um momento fletor no plano vertical, sendo que, devido às imperfeições iniciais, uma parcela deste momento atua no eixo de menor inércia. Desta forma, aumentam-se os deslocamentos laterais e, consequentemente, o ângulo de rotação de equilíbrio necessário também aumenta.

A Figura 48 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga com seção transversal sem a presença do parapeito. Pode-se perceber que a tendência dos resultados de rotação de equilíbrio e de tensão máxima de tração é similar ao verificado para a viga com seção transversal assimétrica. Sendo assim, o aumento do ângulo dos cabos ocasiona decréscimos tanto para θ_{eq} quanto para $\sigma_{máx}$.

Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 45,41% para a situação em que $\varphi_{cabo} = 30^\circ$, a 48,75% para a situação em que os cabos são retos. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são da ordem de 20% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.8. Variação da altura e posicionamento do parapeito

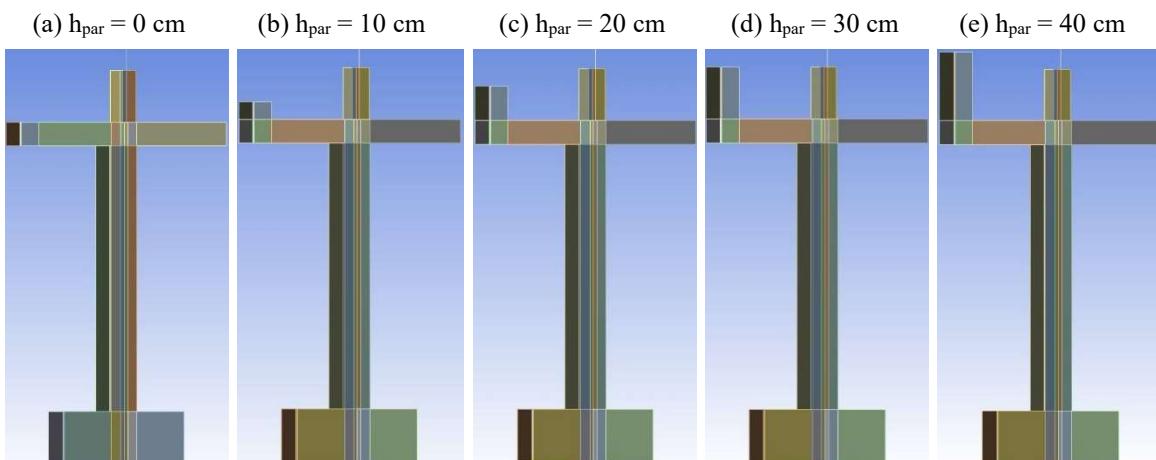
Primeiramente, as vigas desta análise paramétrica foram modeladas numericamente com altura variável do parapeito, de 40, 30, 20 e 10 cm, além da situação de seção transversal simétrica (sem parapeito), conforme Figura 49. Posteriormente, foi modelada uma viga com o posicionamento do parapeito contrário à curvatura da viga, situação ilustrada pela Figura 50. Para ambas as análises foram estabelecidos parâmetros, os quais constam na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros estabelecidos para a variação da altura e posição do parapeito

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	φ_{cabo} ($^\circ$)	L (m)	P (kN)
2,19	35	-2	$L/500$	30	90	45,57	0

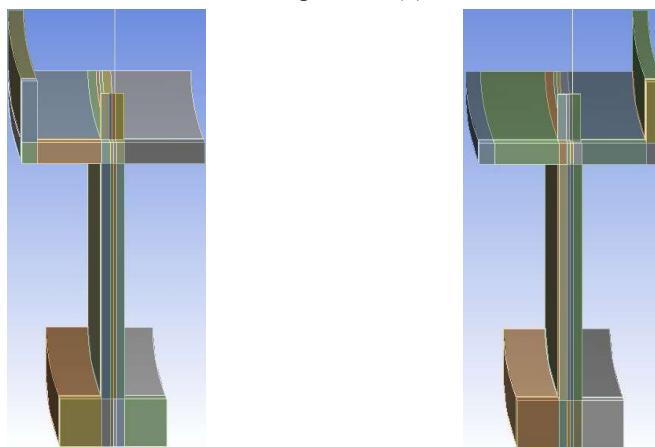
Fonte: Autor (2020)

Figura 49 – Situações modeladas para variação da altura do parapeito



Fonte: Autor (2020)

Figura 50 – Situações modeladas para variação do posicionamento do parapeito
 (a) coincidente com a curvatura da viga (b) contrário à curvatura da viga



Fonte: Autor (2020)

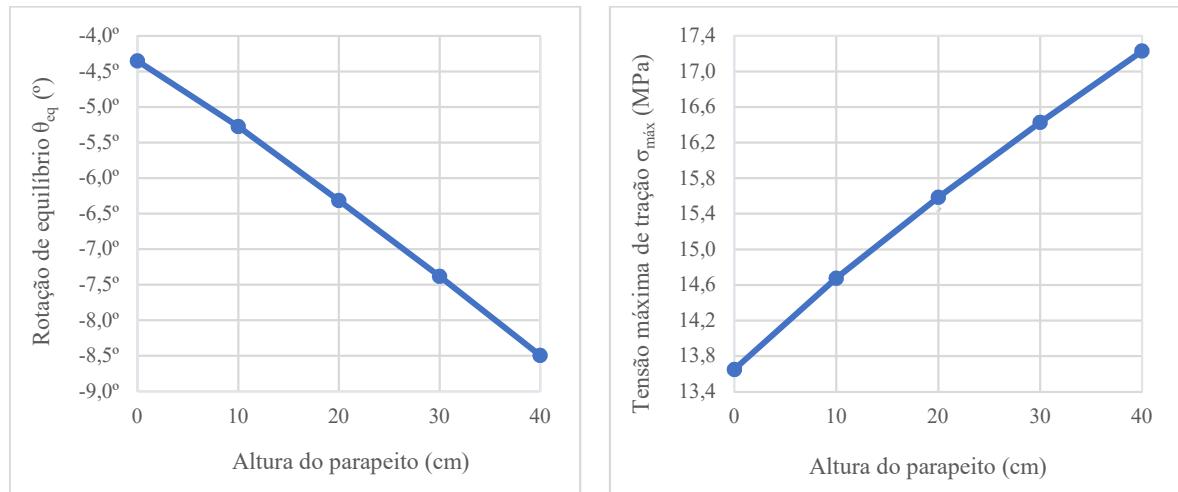
A Tabela 22 e a Figura 51 apresentam os resultados do estudo paramétrico, em termos de tensões e rotação de equilíbrio, para variação da altura do parapeito.

Tabela 22 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação da altura do parapeito

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Altura do parapeito	0 cm	13,650	-16,952	-4,18	-4,35	0,17
	10 cm	14,675	-18,646	-5,06	-5,28	0,22
	20 cm	15,585	-20,171	-6,05	-6,31	0,26
	30 cm	16,426	-21,597	-7,07	-7,38	0,31
	40 cm	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

Figura 51 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da altura do parapeito



Fonte: Autor (2020)

A Figura 51 mostra a influência da altura do parapeito, até a situação de sua retirada, o que configura a situação de simetria da seção transversal. São apresentados os resultados de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, com a variação deste parâmetro. A título de comparação, se destacam as situações limites em que o parapeito tem 40 cm, e em que o mesmo não existe.

A redução da altura do parapeito, e consequente retomada de simetria da seção transversal, provoca uma diminuição acentuada de 48,75% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), passando de 8,50° para 4,35°. No que diz respeito à tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), ocorre uma redução também expressiva, de 20,77%, passando de 17,228 MPa para 13,65 MPa. Além disso, é percebida uma redução de 26,20% na tensão máxima de compressão na seção.

Portanto, pode-se perceber claramente que a condição de assimetria da seção transversal agrava a condição de estabilidade lateral da viga, já complicada em função de seu longo vão e da esbeltez de sua seção transversal. Além disso, quanto maiores as dimensões do elemento ou elementos que causem esta condição, maiores os deslocamentos laterais, ângulos de rotação de equilíbrio e tensões atuantes na seção crítica de meio de vão. Estes resultados eram esperados, pois a presença do parapeito desloca o centro de gravidade da seção transversal para mais próximo do mesmo, acarretando um momento de tombamento gerado pela carga excêntrica ao eixo de giro, que passa pelos pontos de içamento.

Quanto à variação do posicionamento do parapeito, a Tabela 23 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão.

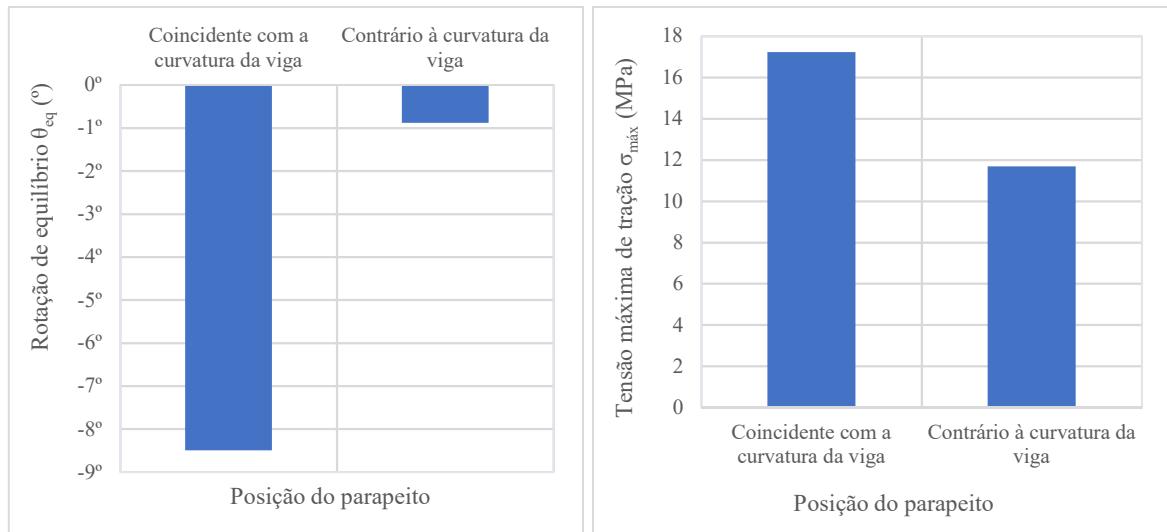
Tabela 23 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do posicionamento do parapeito

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Posição do Parapeito	Contrário à curvatura	11,688	-11,917	-0,91	-0,88	0,03
	Coincidente à curvatura	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

Já a Figura 52 apresenta os resultados de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para duas situações: parapeito coincidente e parapeito contrário à curvatura de excentricidade inicial da viga.

Figura 52 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da posição do parapeito



Fonte: Autor (2020)

A inversão do posicionamento do parapeito provoca uma redução de 89,61% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), passando de 8,50 $^{\circ}$ para 0,88 $^{\circ}$. Quanto à tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), ocorre uma grande diminuição, de 32,16%, passando de 17,228 MPa para 11,688 MPa. Finalmente, nota-se também uma redução de 48,12% na tensão máxima de compressão na seção. É importante destacar que estes valores de redução são superiores aos valores encontrados com a retirada do parapeito, e retomada da simetria da seção transversal, conforme destacado anteriormente.

Entretanto, seria improvável que a excentricidade lateral inicial da seção transversal do meio do vão, em relação aos apoios, ocorresse no sentido contrário à posição do parapeito, visto que a inserção do parapeito altera a posição do centro de gravidade da seção transversal para mais próximo do mesmo, e não para a extremidade oposta. Por outro lado, tal situação seria mais factível caso fosse estabelecida em projeto a necessidade da inserção de uma curvatura lateral, como um componente obrigatório da geometria da mesma. Além disso, algumas das variáveis que podem gerar excentricidade são independentes da posição do parapeito, como a retração do concreto, a excentricidade dos cabos de protensão e imperfeições na fôrma.

3.5.9. Variação do vão da viga

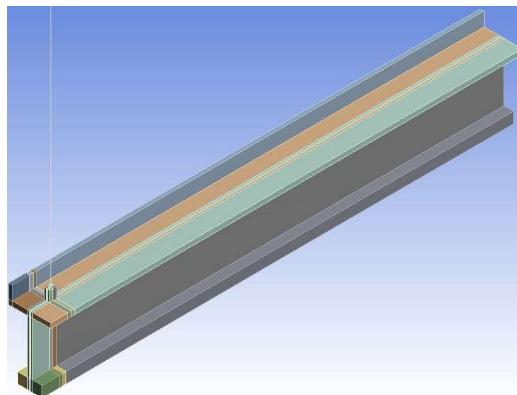
Com a intenção de se verificar a interferência causada pela alteração no vão da viga, foi realizada a modelagem numérica de vigas com comprimentos equivalentes às seguintes porcentagens do vão original da viga ($L = 45,57$ m): 60, 70, 80 e 90%, além da situação inicial de 100%. A Figura 53 ilustra as situações estudadas.

Neste trabalho foi adotada a redução do vão da viga sem redução correspondente da altura da seção transversal, não sendo mantida como constante a relação entre vão e altura da viga. Em um viaduto com vãos diferentes, por exemplo, a manutenção da altura da viga para menores vãos pode estar relacionada a uma opção construtiva de se manter a mesma fôrma para concretagem, afetando, no entanto, o detalhamento das armaduras.

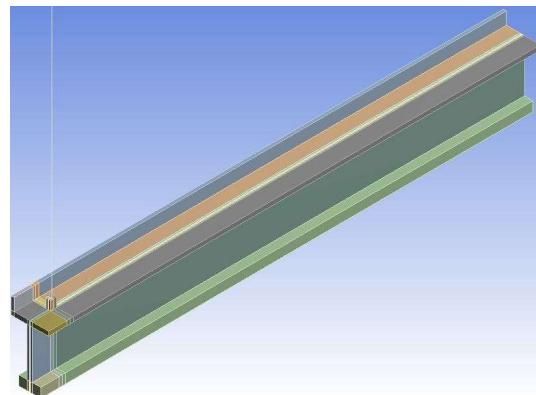
Os parâmetros que constam na Tabela 24 tiveram seus valores estabelecidos como constantes ao longo desta análise, com destaque para a relação a/L , mantida em 2,19%.

Figura 53 – Situações modeladas para variação do vão da viga

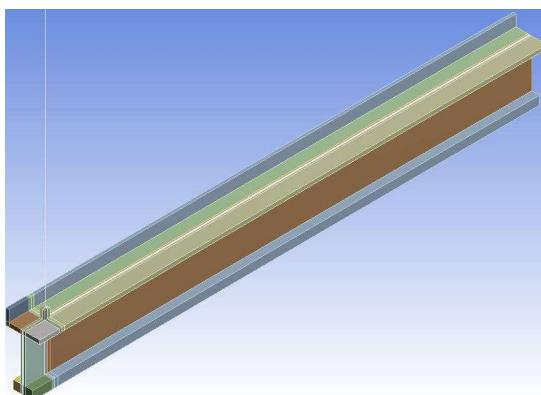
(a) Vão = $0,6L = 27,34$ m



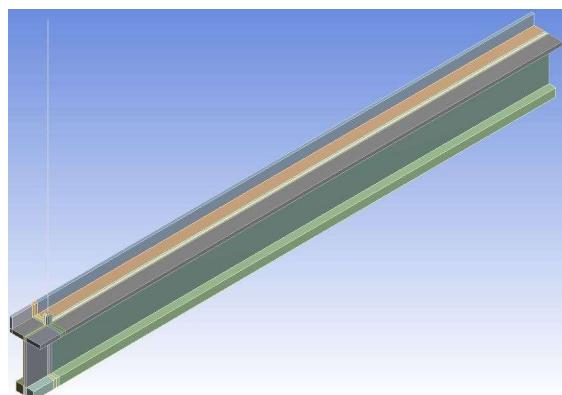
(b) Vão = $0,7L = 31,90$ m



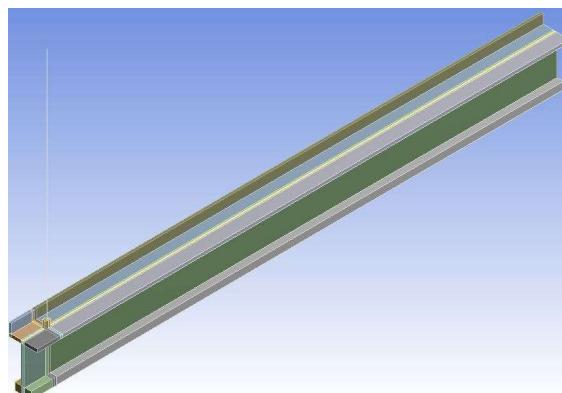
(c) Vão = $0,8L = 36,46$ m



(d) Vão = $0,9L = 41,01$ m



(e) Vão = L = 45,57 m



Fonte: Autor (2020)

Tabela 24 – Parâmetros estabelecidos para a variação do vão da viga

a/L (%)	f _{ck} (MPa)	t (cm)	e _i	h _{lift} (cm)	parapeito (cm)	φ _{cabo} (°)	P (kN)
2,19	35	-2	L/500	30	40 (lado da e _i)	90	0

Fonte: Autor (2020)

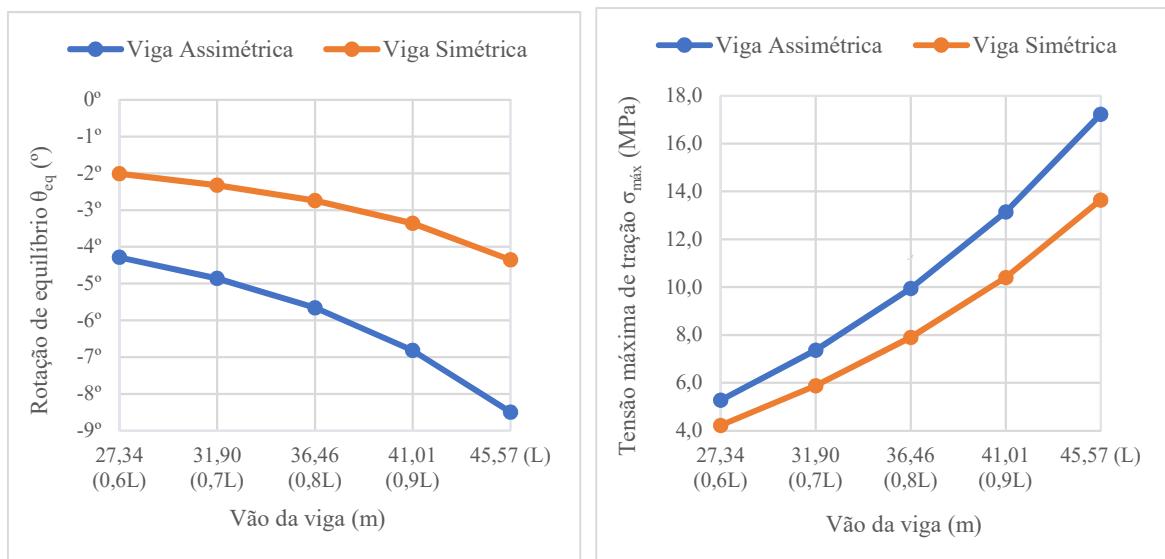
A Tabela 25 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para variação do vão da viga com seção assimétrica.

Já a Figura 54 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação do vão da viga. Para a viga com seção transversal assimétrica, ao se reduzir o vão de 45,57 m para 27,34 m (60% de 45,57 m), nota-se uma redução de 49,54% no ângulo θ_{eq} , passando de 8,50° para 4,29°. Além disso, houve diminuição ainda mais significativa nas tensões máximas de tração (69,38%) e também de compressão (71,48%).

Tabela 25 – Resultados numéricos do estudo paramétrico

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Vão da viga	60% x L	5,276	-6,552	-4,23	-4,29	0,06
	70% x L	7,372	-9,228	-4,77	-4,86	0,09
	80% x L	9,952	-12,634	-5,52	-5,66	0,14
	90% x L	13,153	-17,051	-6,59	-6,81	0,22
	L	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37

Fonte: Autor (2020)

Figura 54 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do vão da viga

Fonte: Autor (2020)

A grande influência do vão da viga na estabilidade lateral da mesma já era esperada, visto que se trata de um dos principais parâmetros na verificação dos estados-limite último e de serviço de qualquer viga, com grande impacto nos esforços solicitantes (principalmente o momento fletor) e nos deslocamentos.

A Figura 54 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga com seção transversal sem a presença do parapeito. Pode-se perceber que a tendência dos resultados de rotação de equilíbrio e de tensão máxima de tração é similar ao verificado para a viga com seção transversal assimétrica. Sendo assim, a redução do vão ocasiona decréscimos tanto para θ_{eq} quanto para $\sigma_{máx}$.

Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 48,75% para vão de 45,57 m, a 53,09% para vão de 27,34 m (60% de 45,57 m). Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são da ordem de 20% inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.5.10. Resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica

A Tabela 26 apresenta uma classificação dos parâmetros cuja variação é mais impactante na rotação de equilíbrio θ_{eq} . As variações negativas correspondem a decréscimos, enquanto que as positivas (em vermelho) dizem respeito a acréscimos.

Tabela 26 – Alterações de parâmetros mais influentes na rotação de equilíbrio θ_{eq}

Nº	Alteração	Variação na rotação θ_{eq} (%)	Nº	Alteração	Variação na rotação θ_{eq} (%)
1	$a/L = 20\%$	-68,65	17	$e_i = L/875$	-15,53
2	$a/L = 15\%$	-59,23	18	Parapeito de 30 cm	-13,10
3	$Vão = 60\% \times L$	-49,54	19	Desvio alça 0 cm	-12,79
4	Retirada parapeito	-48,75	20	$e_i = L/750$	-12,01
5	$a/L = 10\%$	-44,05	21	$h_{lift} = 45 \text{ cm}$	-11,95
6	$Vão = 70\% \times L$	-42,79	22	$f_{ck} = 55 \text{ MPa}$	-9,73
7	Parapeito de 10 cm	-37,89	23	$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$	-8,66
8	$h_{lift} = 90 \text{ cm}$	-34,63	24	$e_i = L/625$	-7,16
9	$Vão = 80\% \times L$	-33,36	25	$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$	-6,32
10	$h_{lift} = 75 \text{ cm}$	-28,71	26	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$	-3,49
11	Desvio alça +2 cm	-26,21	27	Inserção protensão	+6,21
12	Parapeito de 20 cm	-25,67	28	$\varphi_{cabô} = 45^\circ$	+9,22
13	$h_{lift} = 60 \text{ cm}$	-21,31	29	$\varphi_{cabô} = 30^\circ$	+15,69
14	$Vão = 90\% \times L$	-19,79	30	$a/L = 0\%$	+16,79
15	$a/L = 5\%$	-19,48	31	$h_{lift} = 0 \text{ cm}$	+30,04
16	$e_i = L/1000$	-18,20			

Fonte: Autor (2020)

A alteração com mais impacto seria o aumento na relação balanço/vão (a/L). Em seguida, surgem a redução do vão, seguidos pela retirada da assimetria, redução do parapeito, enrijecimento da alça, desvios da alça (efeito favorável), diminuição da excentricidade lateral inicial, e por último, acréscimos na resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}). Já a inserção da protensão, utilização de cabos inclinados, e içamento sem balanços e sem enrijecimento da alça geram aumentos no ângulo θ_{eq} .

Já a Tabela 27 contém uma classificação dos parâmetros cuja variação é mais impactante na tensão máxima de tração $\sigma_{máx}$. As variações negativas correspondem a decréscimos, enquanto que as positivas (em vermelho) dizem respeito a acréscimos.

Tabela 27 – Alterações de parâmetros mais influentes na tensão máxima de tração $\sigma_{máx}$

Nº	Alteração	Variação na tensão $\sigma_{máx}$ (%)	Nº	Alteração	Variação na tensão $\sigma_{máx}$ (%)
1	$a/L = 20\%$	-82,62	17	$e_i = L/1000$	-5,03
2	$Vão = 60\% \times L$	-69,38	18	Parapeito de 30 cm	-4,66
3	$a/L = 15\%$	-63,84	19	$e_i = L/875$	-4,28
4	$Vão = 70\% \times L$	-57,21	20	Desvio alça 0 cm	-3,84
5	$a/L = 10\%$	-42,73	21	$h_{lift} = 45 \text{ cm}$	-3,59
6	$Vão = 80\% \times L$	-42,24	22	$e_i = L/750$	-3,31
7	$Vão = 90\% \times L$	-23,65	23	$f_{ck} = 55 \text{ MPa}$	-2,64
8	Inserção protensão	-22,24	24	$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$	-2,34
9	Retirada parapeito	-20,77	25	$e_i = L/625$	-1,97
10	$a/L = 5\%$	-17,26	26	$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$	-1,71
11	Parapeito de 10 cm	-14,82	27	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$	-0,94
12	$h_{lift} = 90 \text{ cm}$	-10,48	28	$h_{lift} = 0 \text{ cm}$	+9,00
13	Parapeito de 20 cm	-9,54	29	$\varphi_{cabo} = 45^\circ$	+14,44
14	$h_{lift} = 75 \text{ cm}$	-8,67	30	$a/L = 0\%$	+14,88
15	Desvio alça +2 cm	-7,89	31	$\varphi_{cabo} = 30^\circ$	+25,29
16	$h_{lift} = 60 \text{ cm}$	-6,42			

Fonte: Autor (2020)

A hierarquia das alterações de parâmetros é similar à apresentada na Tabela 26. Entretanto, desta vez as alterações com mais impacto seriam os aumentos na relação balanço/vão (a/L). Outra diferença é o impacto positivo da inserção da protensão na redução das tensões de tração.

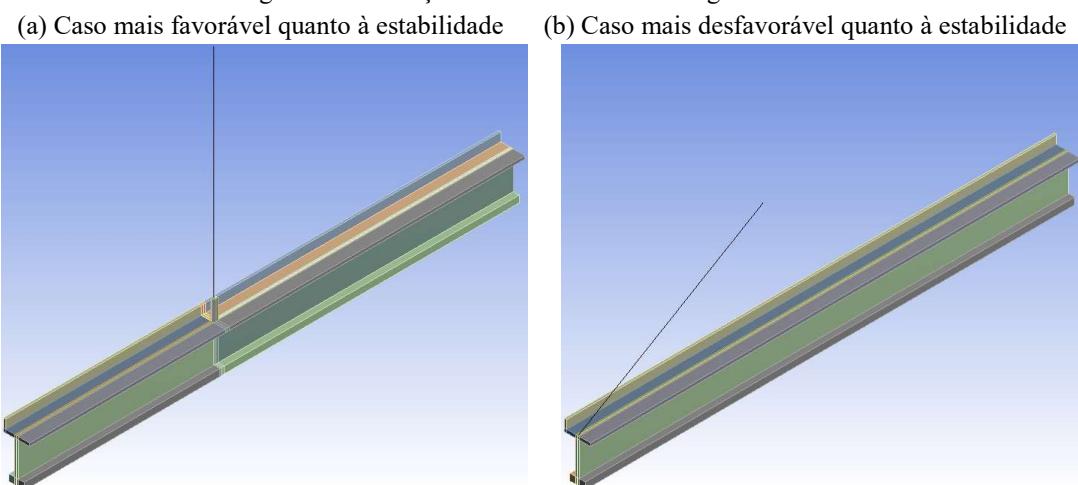
3.5.11. Situações limítrofes simuladas

Com o propósito de se verificar o alcance limite nos resultados de tensões e deslocamentos, tanto favoravelmente quanto desfavoravelmente, foi realizada a modelagem

numérica de três situações: viga com condições originais (com resultados já descritos na Seção 3.4), viga com variação de parâmetros que acentuem a condição de instabilidade lateral (chamada de caso mais desfavorável quanto à estabilidade), e viga com variação de parâmetros que atenuem a condição de instabilidade lateral (chamada de caso mais favorável quanto à estabilidade). Dessa forma, os impactos gerados pela variação dos diversos parâmetros são verificados atuando em conjunto.

A Figura 55 ilustra as situações mencionadas e a Tabela 28 apresenta os parâmetros com valores fixados na análise separada de cada um dos três casos. Importante destacar que nesta análise alguns parâmetros foram estabelecidos como constantes para as três análises citadas, quais sejam: comprimento da viga igual a 45,57 m, posição do parapeito coincidente com a excentricidade lateral inicial, altura do parapeito de 40 cm, e inexistência da protensão.

Figura 55 – Situações limítrofes modeladas graficamente



Fonte: Autor (2020)

Tabela 28 – Parâmetros estabelecidos para as três situações limítrofes simuladas

Situação modelada	$a/L (\%)$	$f_{ck} (\text{MPa})$	$t (\text{cm})$	e_i	$h_{lift} (\text{cm})$	$\varphi_{cabo} (\text{°})$
Caso mais desfavorável quanto à estabilidade	0,00	35	-2	$L/500$	0	30
Viga original	2,19	35	-2	$L/500$	30	90
Caso mais favorável quanto à estabilidade	20,00	55	+2	$L/1000$	90	90

Fonte: Autor (2020)

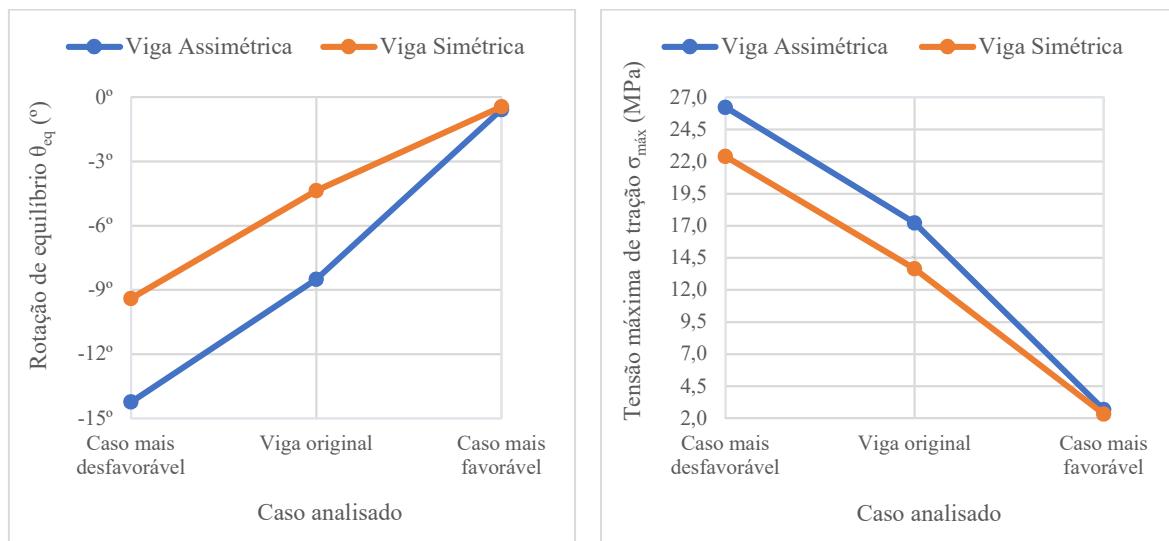
A Tabela 29 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico da viga com assimetria, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão, para as três situações limítrofes simuladas.

Tabela 29 – Resultados numéricos das situações limítrofes simuladas numericamente

Situação modelada	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Caso mais desfavorável quanto à estabilidade	26,224	-40,132	-13,67	-14,23	0,56
Viga original	17,228	-22,971	-8,13	-8,50	0,37
Caso mais favorável quanto à estabilidade	2,691	-3,050	-0,55	-0,57	0,02

Fonte: Autor (2020)

A Figura 56 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para as três situações simuladas.

Figura 56 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) para situações limítrofes

Fonte: Autor (2020)

A variação dos parâmetros no sentido favorável à estabilidade gera uma redução de 93,29% no ângulo de rotação de equilíbrio, passando de 8,50° para 0,57°. Além disso, provoca também uma redução de 84,38% na tensão máxima de tração, passando de 17,228 MPa para 2,691 MPa, inferior ao limite de resistência à tração do concreto. Por fim, nesta situação ocorre uma redução de 86,72% na tensão máxima de compressão.

Já a variação dos parâmetros no sentido desfavorável à estabilidade provoca acréscimos de 67,56% no ângulo de rotação de equilíbrio (passando de 8,50° para 14,23°), de 52,22% na tensão máxima de tração (passando de 17,228 MPa para 26,224 MPa), e de 74,71% na tensão máxima de compressão na seção de meio de vão.

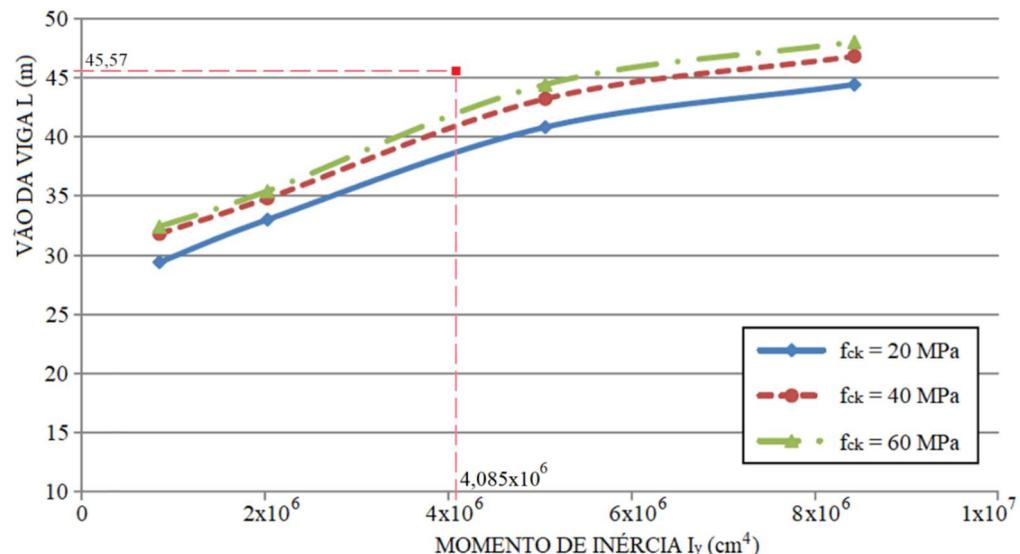
A Figura 56 também apresenta curvas com os resultados para a viga simétrica correspondente, ou seja, para a viga sem a presença do parapeito. Em termos de ângulo de rotação de equilíbrio, a redução percentual em relação à viga com seção assimétrica varia de 22,49% no caso mais favorável a 33,98% no caso mais desfavorável. Já no que se refere à tensão máxima de tração, os resultados para a viga simétrica correspondente são de 13,04% (caso mais favorável) a 14,57% (caso mais desfavorável) inferiores aos resultados verificados para a viga com seção assimétrica.

3.6. VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO GERMÁN (2015)

O critério gráfico de projeto proposto por Germán (2015) se baseia no vão da viga (L), no f_{ck} e no momento de inércia em relação ao eixo y (I_y), considerado o parâmetro que mais influencia a instabilidade lateral de uma viga em içamento. A estabilidade se garante caso o ponto de interseção entre L e I_y relativo à situação da viga seja inferior à curva.

No caso específico desta viga, sabe-se que $L = 45,57\text{ m}$, $I_y = 4.085.398,249\text{ cm}^4$, e o f_{ck} do concreto no içamento é 35 MPa . Desta forma, a Figura 57 apresenta a situação da viga segundo o critério proposto por Germán (2015), com a representação do ponto de interseção entre L e I_y . É possível concluir que a viga se encontra claramente em uma condição de instabilidade lateral, pois a interseção entre o vão da viga e sua rigidez lateral se encontra superior às curvas consideradas como limites de estabilidade, para qualquer valor do f_{ck} .

Figura 57 – Situação da viga assimétrica segundo o critério de projeto proposto por Germán (2015)



Fonte: Autor (2020)

3.7. VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO ZHANG (2017) E LIMA (2018)

Conforme visto anteriormente na Seção 2.2.10 do capítulo 2 deste trabalho, Zhang (2017) propôs uma formulação simplificada para avaliação do potencial de fissuração de vigas em içamento, através do cálculo do fator de segurança (FS) e do máximo giro de corpo rígido (θ_{fiss}) permitido para a seção transversal no meio do vão, de forma que não ocorram tensões de tração superiores ao limite f_{ctm} nesta seção.

Por sua vez, Lima (2018) apresentou proposta de alteração do equacionamento de Zhang (2017), incluindo a consideração das seguintes variáveis: cabos inclinados (α), desvio da alça (t) em relação ao centro da mesa superior e a existência de elemento capaz de suspender o eixo de rotação, tratado como barra rígida (h_{lift}). Além disso, Lima (2018) não considerou a simplificação realizada em ângulos pequenos nas funções seno e cosseno. Desta forma, Lima (2018) propôs a inclusão de uma parcela de giro que levasse em consideração o efeito estabilizante ou não das variáveis negligenciadas pela formulação original.

A seguir, serão apresentados os resultados de um estudo paramétrico analítico baseado na obtenção, através das equações (34) a (38) vistas na Seção 2.2.10, da rotação limite para fissuração (θ_{fiss}) e do fator de segurança, segundo Zhang (2017) e Lima (2018). Para a apresentação gráfica dos valores de rotação θ_{fiss} , serão também inseridos os resultados da relação entre tensão de equilíbrio e tensão de fissuração para estas formulações, juntamente com uma linha que caracteriza o limite de fissuração ($\theta_{eq} / \theta_{fiss} = 1,0$).

3.7.1. Variação do comprimento do balanço (a)

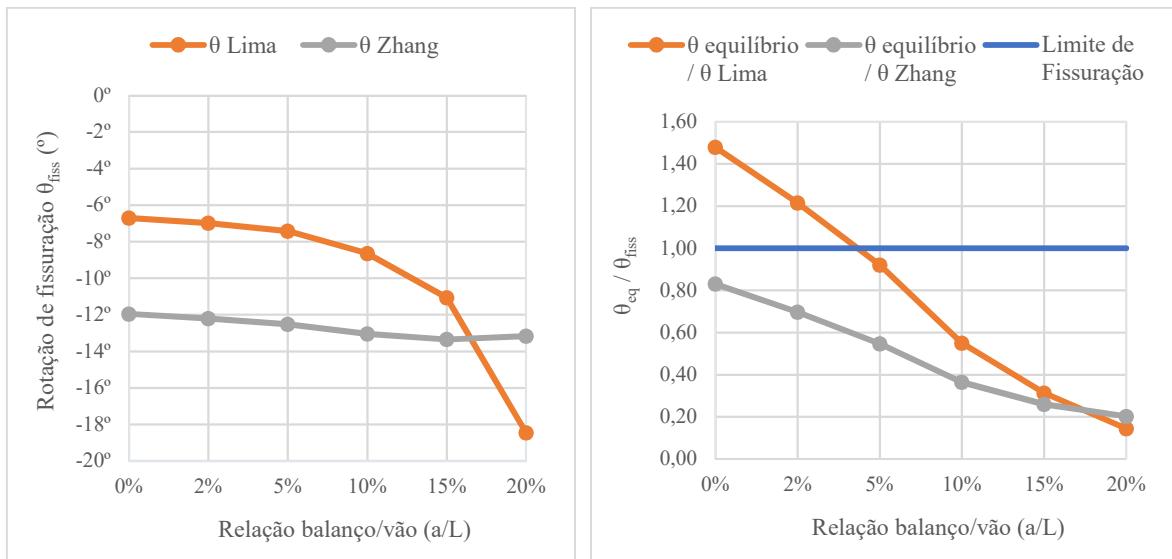
A Figura 58 apresenta a rotação limite de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{eq} / \theta_{fiss}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 59 apresenta o fator de segurança para a variação do comprimento do balanço (a/L).

É possível notar que, à medida que a relação balanço/vão aumenta, os valores de rotação máxima permitida para evitar a fissuração também são acrescidos, como era de se

esperar. Além disso, é possível perceber que, para os valores de a/L equivalentes a 0 e 2,19%, os ângulos de rotação de equilíbrio obtidos através do estudo numérico são superiores aos valores limites estabelecidos por Lima (2018), caracterizando a fissuração da peça.

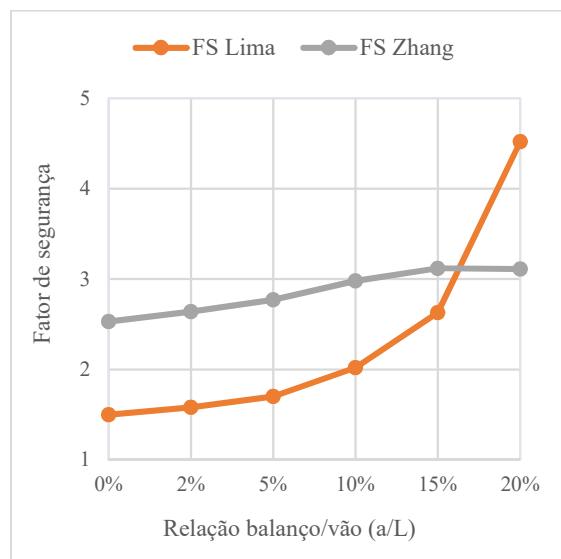
Quanto aos valores de fator de segurança, ocorre acréscimo com o aumento da relação a/L , atingindo os valores de 1,58, segundo Lima (2018), e 2,64, segundo Zhang (2017), para a situação original de içamento presenciada no campo.

Figura 58 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$ em função do comprimento do balanço



Fonte: Autor (2020)

Figura 59 – Fator de segurança (FS) em função do comprimento do balanço

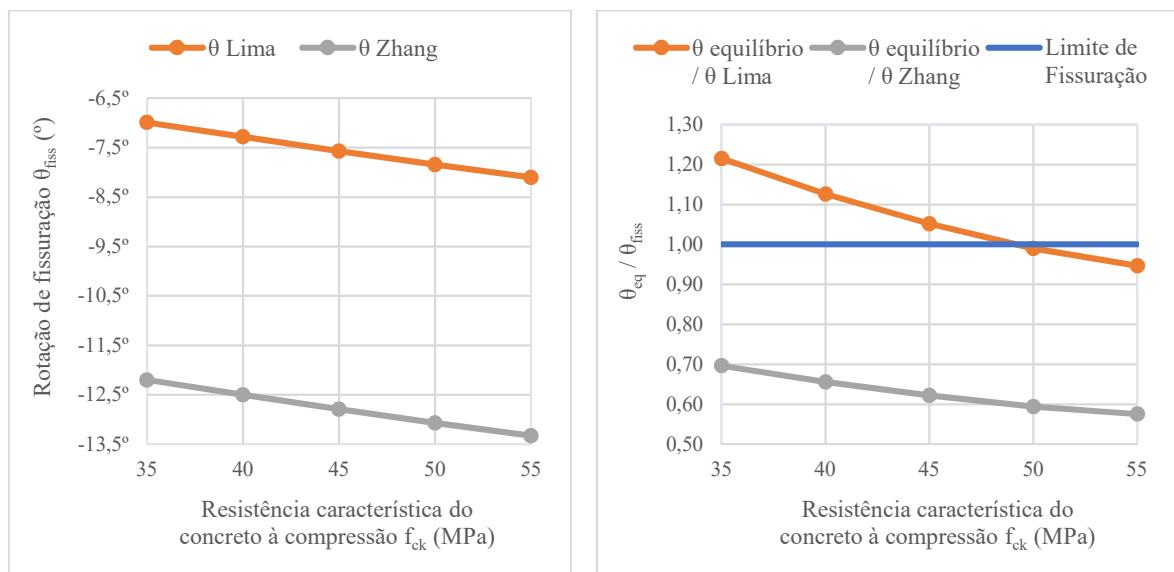


Fonte: Autor (2020)

3.7.2. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})

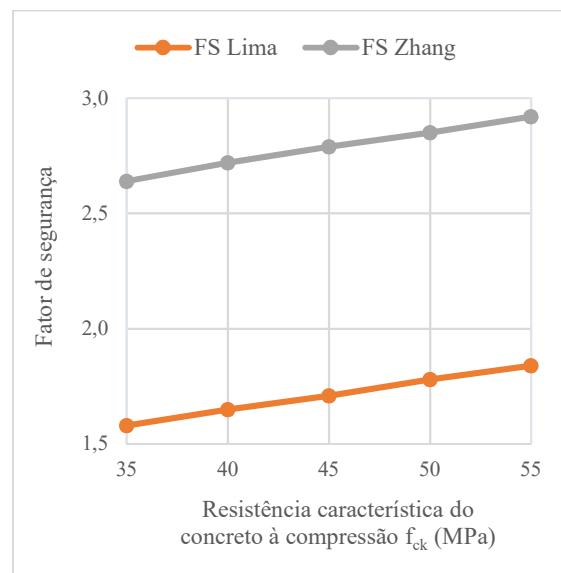
A Figura 60 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{eq} / \theta_{fiss}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 61 apresenta o fator de segurança para a variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}).

Figura 60 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{eq} / \theta_{fiss}$ em função do f_{ck}



Fonte: Autor (2020)

Figura 61 – Fator de segurança (FS) em função do f_{ck}



Fonte: Autor (2020)

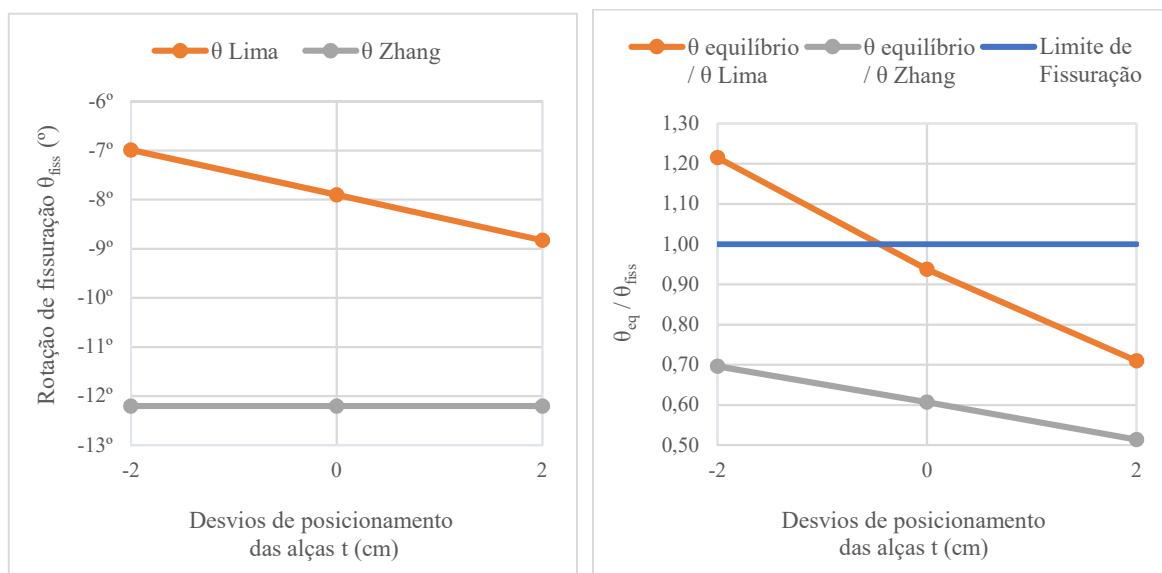
Pode-se perceber que, com o ganho de resistência do concreto, os valores de rotação máxima permitida para evitar a fissuração também são acrescidos. Além disso, é possível notar a fissuração na viga para valores de f_{ck} inferiores a 50 MPa, pois os ângulos de rotação de equilíbrio obtidos na modelagem numérica são superiores aos valores limites estabelecidos por Lima (2018). Quanto aos valores de FS, ocorre acréscimo com o aumento do f_{ck} , sendo o fator estabelecido por Zhang (2017) superior ao fator de Lima (2018).

3.7.3. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t)

A Figura 62 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{eq} / \theta_{fiss}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 63 apresenta o fator de segurança em função da alteração da posição das alças. Conforme esperado, tanto a rotação quanto o fator de segurança definidos por Zhang (2017) apresentaram valores constantes, já que esse parâmetro não foi abordado em sua análise.

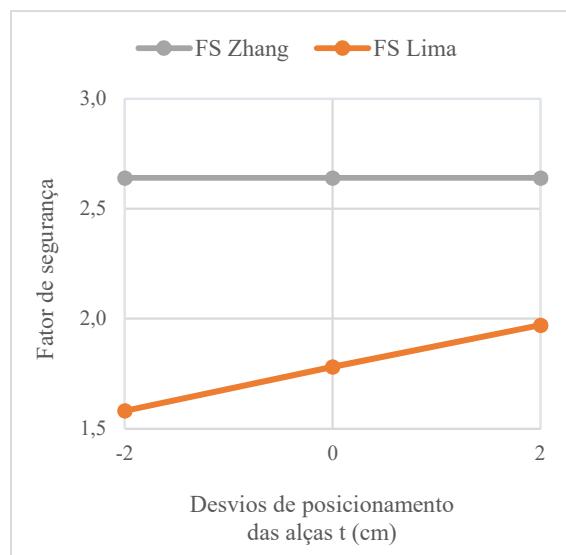
É possível perceber ainda que, ao passar à situação com desvio estabilizante, o ângulo de rotação máxima para evitar a fissuração e o fator de segurança definidos por Lima (2018) sofrem acréscimos. Finalmente, nota-se a fissuração na viga para a situação com desvio desfavorável de 2 cm, pois a rotação de equilíbrio obtida numericamente é superior ao limite definido por Lima (2018).

Figura 62 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{eq} / \theta_{fiss}$ em função da posição das alças



Fonte: Autor (2020)

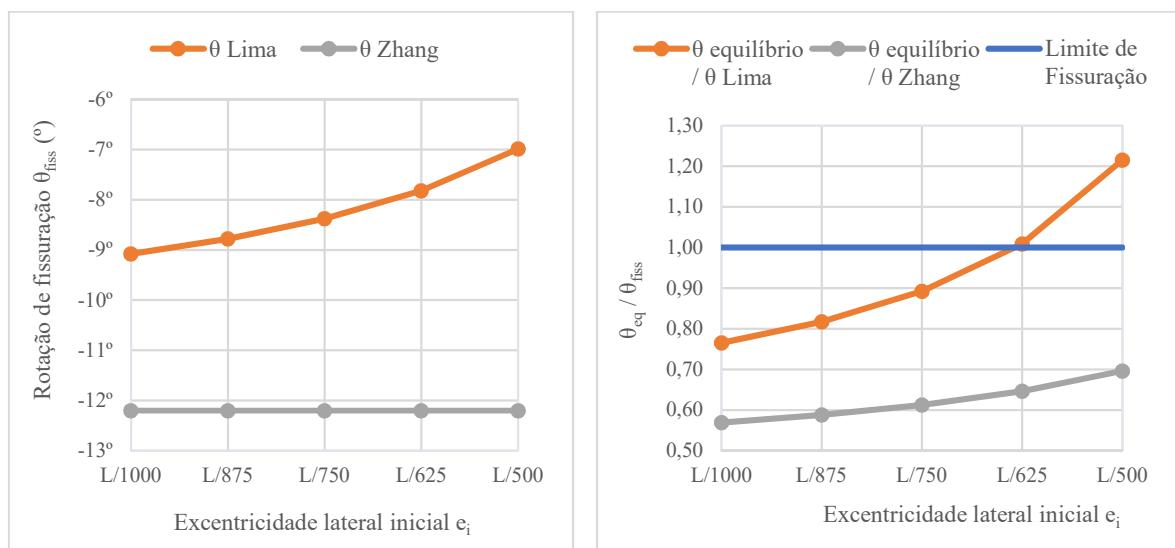
Figura 63 – Fator de segurança (FS) em função da posição das alças



Fonte: Autor (2020)

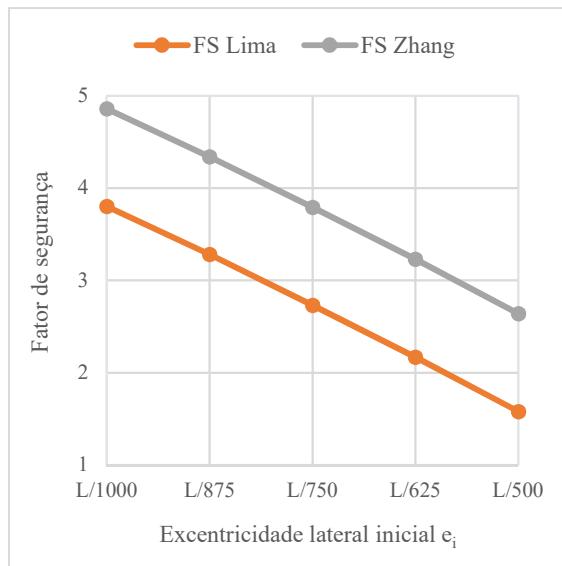
3.7.4. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)

A Figura 64 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 65 apresenta o fator de segurança para a variação da excentricidade lateral inicial (e_i). Conforme esperado, o aumento da e_i gera redução no ângulo limite de giro para evitar a fissuração, assim como diminuição no fator de segurança. Por fim, segundo Lima (2018) haverá fissuração para os casos de e_i iguais a $L/625$ e $L/500$.

Figura 64 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$ em função da excentricidade lateral inicial

Fonte: Autor (2020)

Figura 65 – Fator de segurança (FS) em função da excentricidade lateral inicial



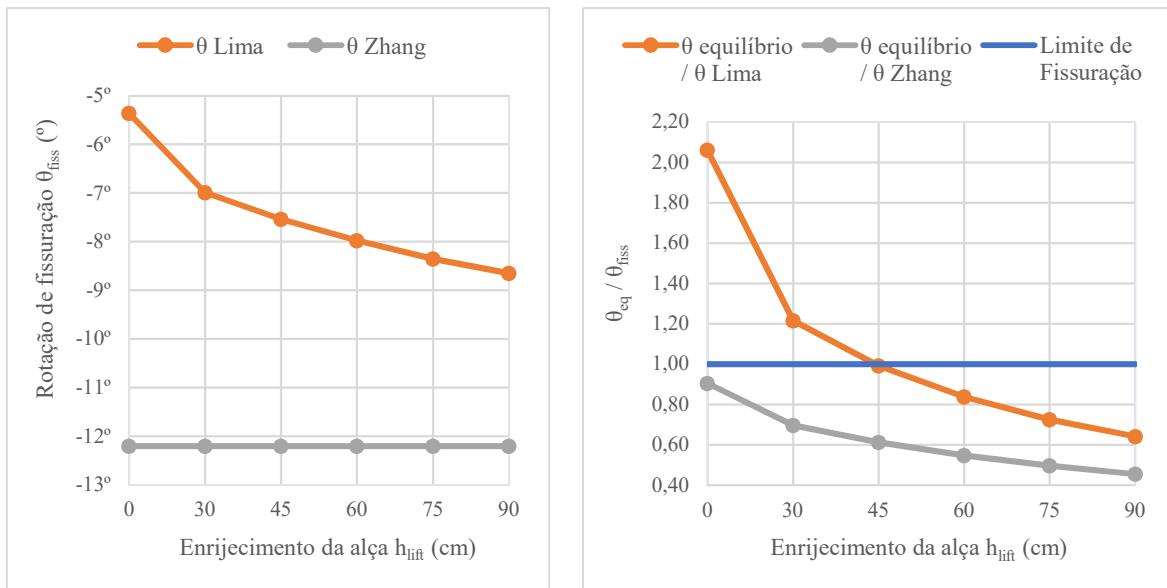
Fonte: Autor (2020)

3.7.5. Variação do enrijecimento da alça (h_{lift})

A Figura 66 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{eq} / \theta_{fiss}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 67 apresenta o fator de segurança para a variação da altura de enrijecimento da alça (h_{lift}). Pode-se perceber que, para Lima (2018), à medida que o enrijecimento aumenta, os valores de rotação máxima permitida para evitar a fissuração também são acrescidos. Já para Zhang (2017), os ângulos de rotação de fissuração se mantém constantes, não tendo sido levados em conta na análise.

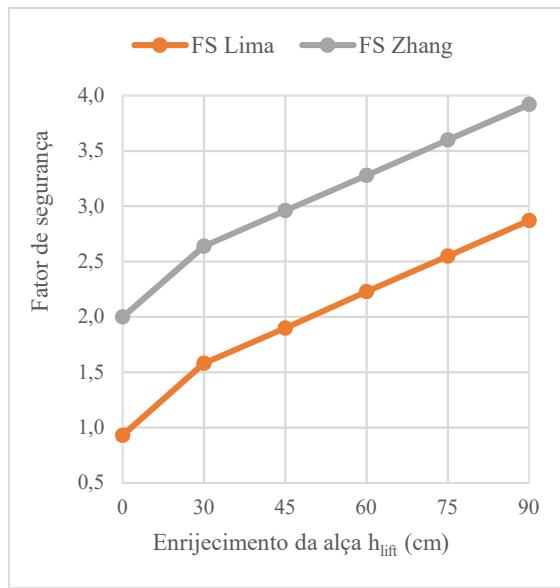
Para Lima (2018), a fissuração acontece na viga para os casos sem enrijecimento e com h_{lift} igual a 30 cm, pois os ângulos de rotação de equilíbrio obtidos na modelagem numérica são superiores aos valores limites estabelecidos pelo autor. Quanto aos valores de FS, ocorre acréscimo com o aumento do f_{ck} , sendo o fator estabelecido por Zhang (2017) superior ao fator de Lima (2018).

Finalmente, é importante destacar que os valores de fator de segurança se mostram muito reduzidos, chegando a valores de 0,93 (Lima, 2018) e 2,00 (Zhang, 2017), na situação de içamento sem enrijecimento de alça.

Figura 66 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$ em função do enrijecimento da alça

Fonte: Autor (2020)

Figura 67 – Fator de segurança (FS) em função do enrijecimento da alça



Fonte: Autor (2020)

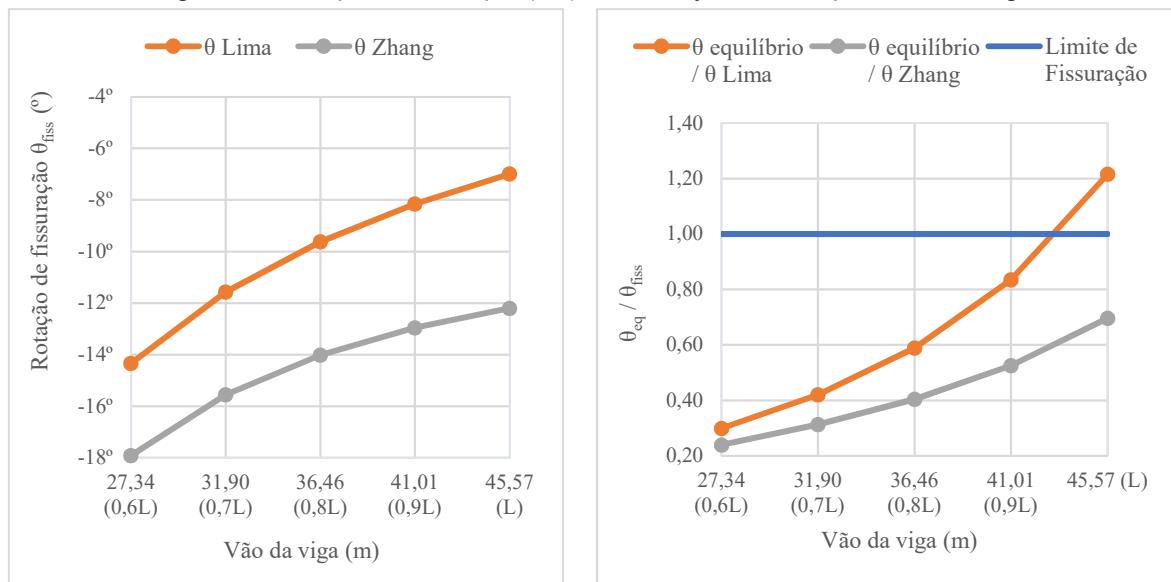
3.7.6. Variação do vão da viga

A Figura 68 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 69 apresenta o fator de segurança para a variação do vão da viga. Nota-se que, tanto para Lima (2018) quanto para Zhang (2017), à medida que o vão aumenta, os valores de

rotação máxima permitida para evitar a fissuração se reduzem consideravelmente. Para Lima (2018), a fissuração acontece na viga para o caso de vão original da viga (45,57 m), pois o ângulo de rotação de equilíbrio obtido na simulação numérica é maior que o limite definido pelo autor.

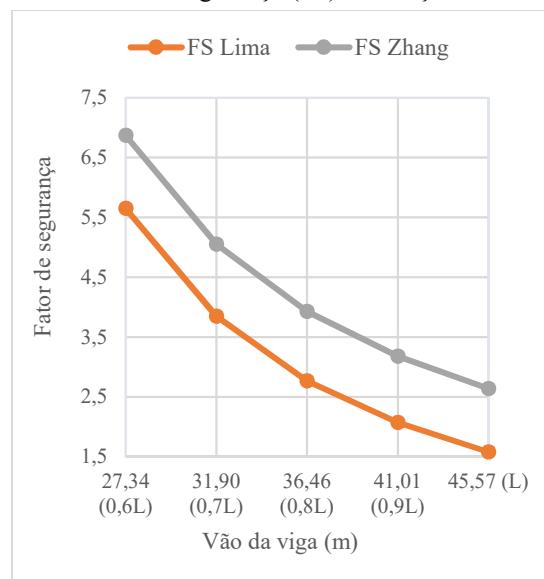
Quanto aos valores de FS, ocorre redução com o aumento do vão da viga, sendo o fator estabelecido por Zhang (2017) sempre superior ao fator de Lima (2018).

Figura 68 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{eq} / \theta_{fiss}$ em função do vão da viga



Fonte: Autor (2020)

Figura 69 – Fator de segurança (FS) em função do vão da viga

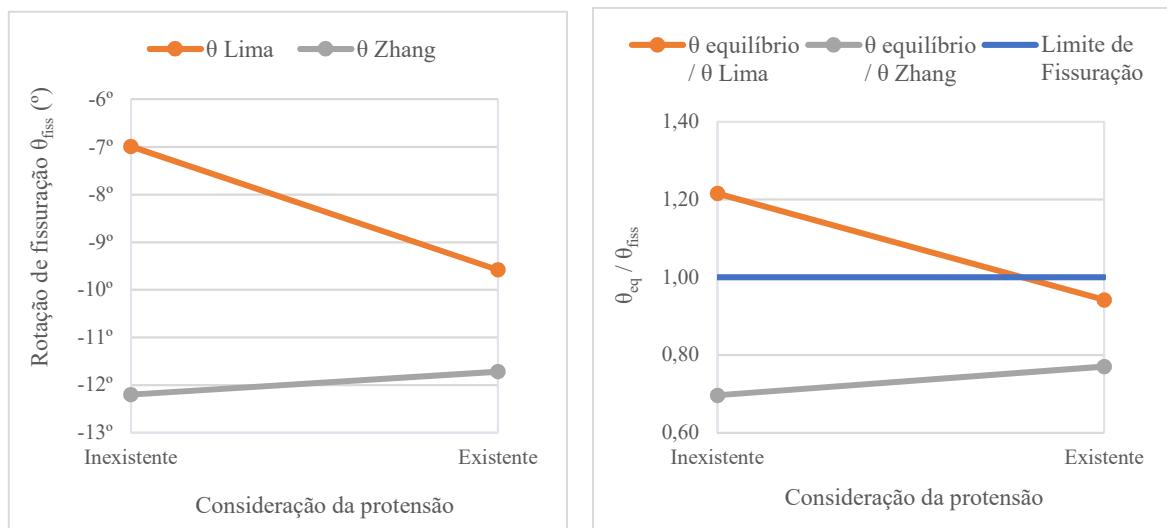


Fonte: Autor (2020)

3.7.7. Verificação do efeito da protensão

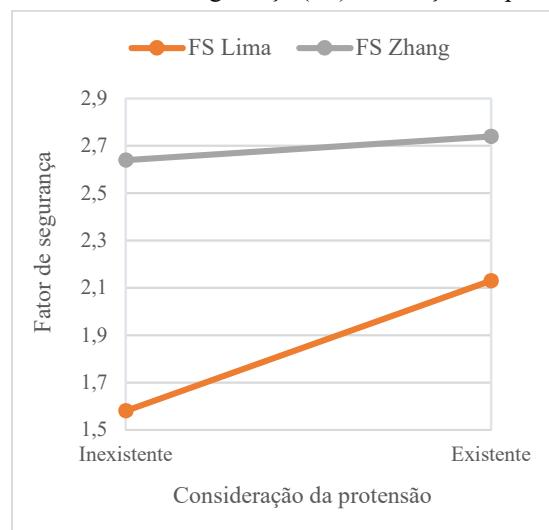
Finalmente, a Figura 70 apresenta a rotação de fissuração (θ_{fiss}), e a relação entre rotação de equilíbrio e rotação de fissuração ($\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$), segundo Zhang (2017) e Lima (2018), enquanto a Figura 71 apresenta o fator de segurança para a consideração ou não do efeito da protensão. Segundo Lima (2018), a fissuração acontece na viga quando a protensão não é levada em consideração, pois o ângulo de rotação de equilíbrio obtido na modelagem numérica é superior ao valor limite estabelecido pelo autor. Quanto aos valores de FS, ocorre acréscimo com a consideração da protensão, sendo o fator estabelecido por Zhang (2017) superior ao fator de Lima (2018).

Figura 70 – Rotação de fissuração (θ_{fiss}) e razão $\theta_{\text{eq}} / \theta_{\text{fiss}}$ em função da protensão



Fonte: Autor (2020)

Figura 71 – Fator de segurança (FS) em função da protensão



Fonte: Autor (2020)

CAPÍTULO 4

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA ASSIMÉTRICA EM IÇAMENTO COM SEÇÃO “L”

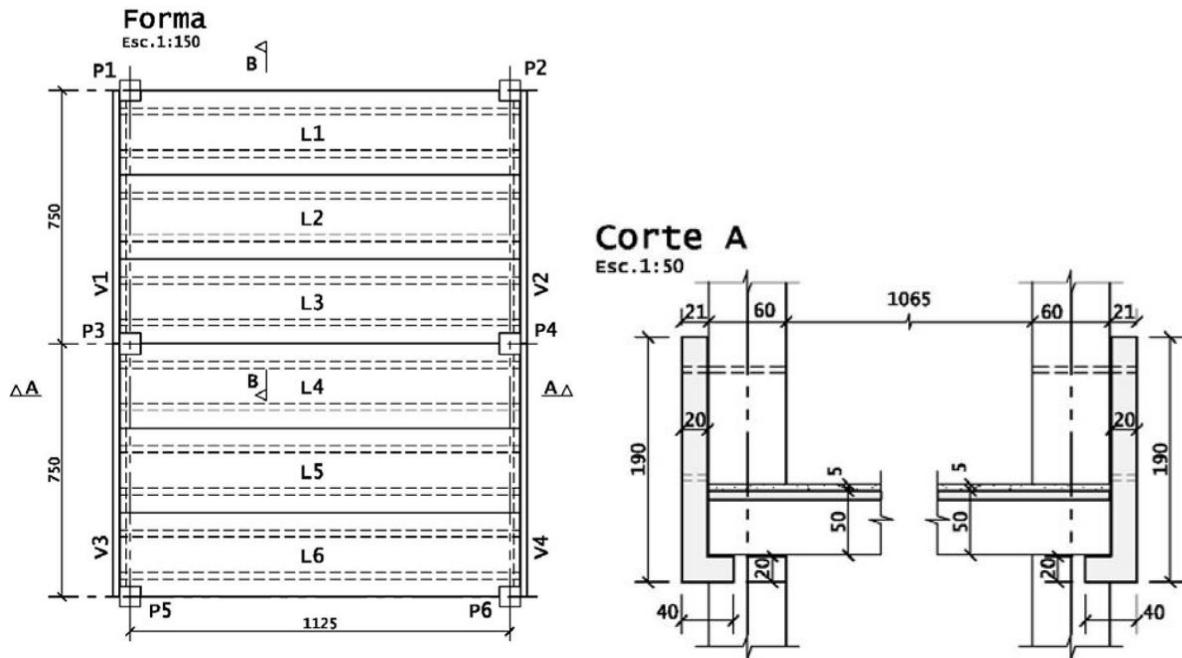
4.1. DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Este capítulo apresenta a modelagem numérica desenvolvida no programa computacional ANSYS 18.1, plataforma Workbench, a fim de se realizar uma análise de instabilidade lateral em vigas assimétricas de seção “L” em situação de içamento. Além disso, são apresentadas as principais definições a serem utilizadas nas simulações, como o estudo de malha e definição de materiais e vinculações. Finalmente, é apresentada uma análise paramétrica com variações de diversos parâmetros para avaliação de influência na estabilidade lateral de vigas em içamento.

A viga estudada é de concreto em seção “L” de 7,48 m de vão, e consta no trabalho de Pastore (2015). Esta viga faz parte de um conjunto de vigas de um edifício idealizado pelo autor, com função de estacionamento para veículos com massa real menor que 2500 kg. Segundo Pastore (2015), os painéis de piso têm dimensões nominais de 7,50 m por 11,25 m, formados por lajes “TT”. Já as vigas que recebem estas lajes têm altura total de 190 cm e largura de peitoril de 30 cm. Estas vigas estão posicionadas na face externa dos pilares e se apoiam em consolos salientes dos mesmos, para evitar sua redução de seção.

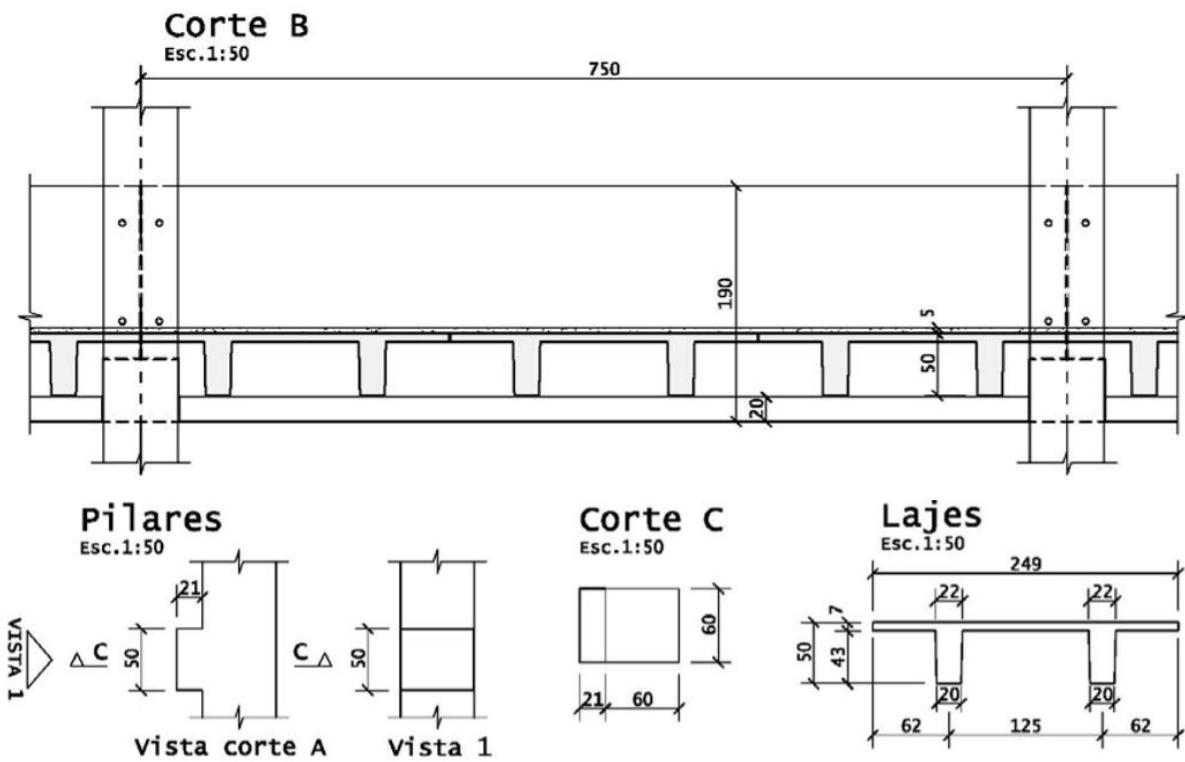
As Figuras 72, 73 e 74 apresentam, respectivamente, a planta de formas e corte A do edifício considerado, os cortes B e C e os detalhes dos pilares e lajes “TT”, e finalmente, a vista longitudinal e o corte D da seção transversal das vigas do edifício garagem.

Figura 72 – Forma e corte A do edifício considerado (dimensões em cm)



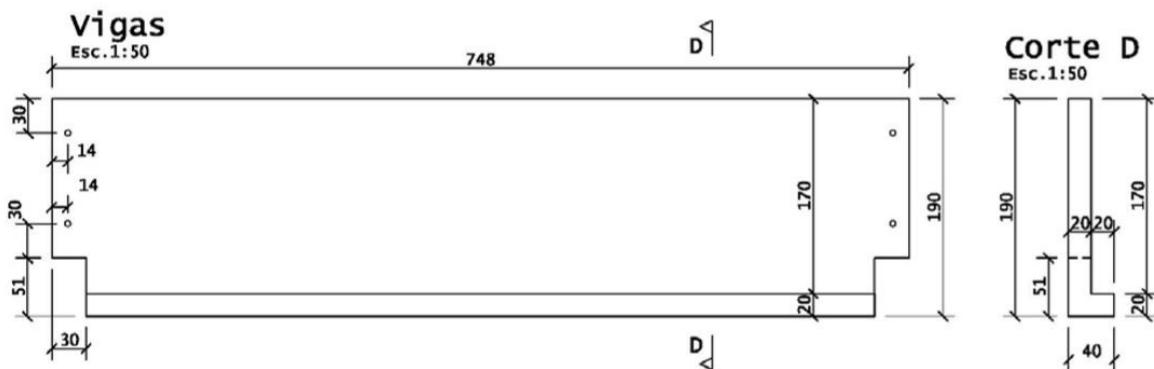
Fonte: Pastore (2015)

Figura 73 – Cortes B e C, e detalhes dos pilares e lajes do edifício considerado (dimensões em cm)



Fonte: Pastore (2015)

Figura 74 – Vista longitudinal e corte das vigas do edifício considerado (dimensões em cm)

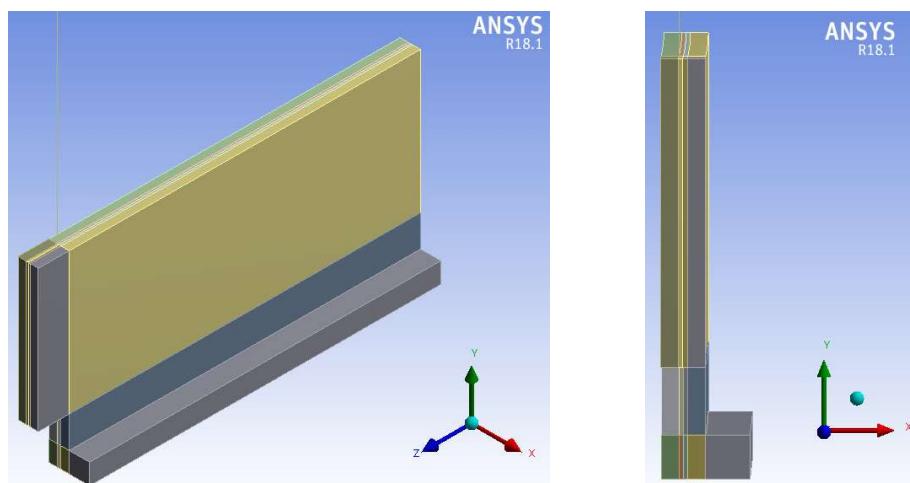


Fonte: Pastore (2015)

É importante destacar que, mais uma vez, um dos principais aspectos a serem avaliados nesta análise numérica é a influência da assimetria da seção transversal, e o impacto causado pela mesma quanto à estabilidade lateral da viga. Entretanto, ao invés da existência de um parapeito na mesa superior, é apresentada uma situação de viga em seção “L”, caracterizada pela presença de um apêndice na sua mesa inferior, para servir de apoio para as lajes do edifício. Neste trabalho, este apêndice será denominado “berço”.

Assim como definido no Capítulo 3, adotou-se consideração de comportamento linear dos materiais. Sendo assim, o carregamento considerado se resume ao peso próprio, tendo sido aplicado em incrementos de carga (20 passos de carga). A Figura 75 apresenta as vistas longitudinal e transversal da viga simulada numericamente por meio do programa computacional ANSYS.

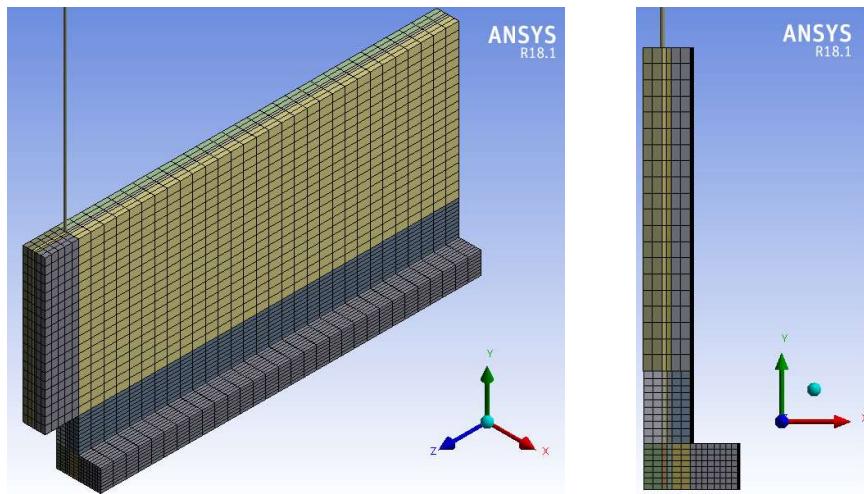
Figura 75 – Vistas longitudinal e transversal da viga de seção “L” modelada graficamente



Fonte: Autor (2020)

Assim como na viga do Capítulo 3, a viga em seção “L” foi modelada a partir do desenho de um arco de circunferência que passa pelos seus pontos extremos. Além disso, definiu-se a malha transversal e longitudinal em elementos finitos, com o objetivo de se obter uma malha que melhor representasse o comportamento da viga. Finalmente, o elemento utilizado para simulação da viga foi o SOLID185, enquanto que para os cabos de içamento utilizou-se o elemento LINK180. A Figura 76 apresenta a malha longitudinal e transversal da viga modelada.

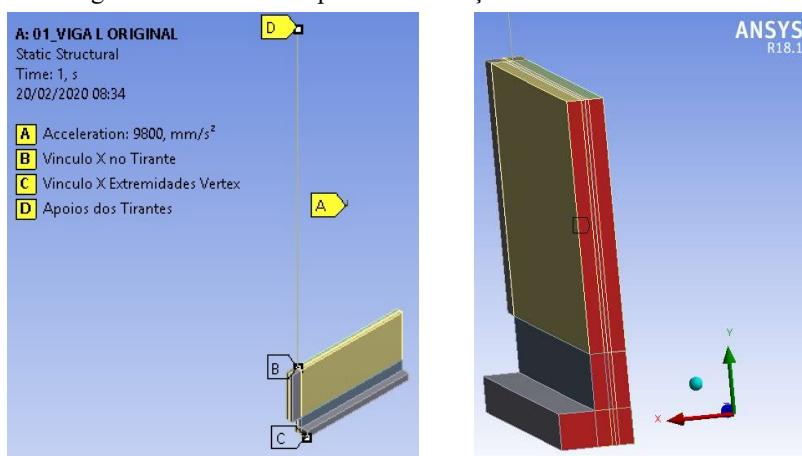
Figura 76 – Malha longitudinal e malha transversal da viga modelada graficamente



Fonte: Autor (2020)

Para a modelagem numérica no ANSYS, foi adotada uma estratégia de inserção de dois apoios fictícios para que o programa pudesse reconhecer como isostática a situação de içamento. Além disso, novamente foi feita a inserção da geometria de apenas metade da viga, juntamente a um comando de simetria. A Figura 77 ilustra essas duas situações.

Figura 77 – Elementos para discretização e simetria no ANSYS



Fonte: Autor (2020)

Quanto aos materiais utilizados, definiu-se a viga em concreto, e os cabos de içamento em aço, tendo sido realizada uma análise física linear neste trabalho. Assim como realizado na viga do Capítulo 3, para o concreto, considerou-se o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor de resistência característica à compressão (f_{ck}) estipulado em cada simulação, conforme a ABNT NBR 6118:2014 determina. Quanto ao coeficiente de Poisson, o valor estabelecido em todas as análises foi de 0,2. Já para os cabos de içamento, foi considerada uma seção transversal dos cabos com 2 cm de diâmetro, 10 m de comprimento e módulo de elasticidade de 200 GPa. Não se considerou armaduras passivas na modelagem numérica.

4.2. ROTAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA “L” ORIGINAL

Algumas condições de içamento da viga foram estabelecidas de acordo com Pastore (2015), e outras por adoção de parâmetros. As alças de içamento foram posicionadas a 30 cm das extremidades, para coincidir com a largura do peitoril, caracterizando uma relação balanço/vôo (a/L) de 4,01%. Quanto ao f_{ck} , no momento do içamento adotou-se resistência de 24 MPa, correspondente a 60% do valor de f_{ck} estabelecido em projeto (40 MPa). Foi considerado também um desvio das alças de 2 cm (número inteiro mais próximo do limite do PCI, de 2,54 cm), no sentido desfavorável, ou seja, contrário à curvatura da viga.

Considerou-se como excentricidade inicial a relação $L/500$, equivalente a 1,496 cm. Não foi considerado enrijecimento da alça, e o parapeito executado foi de 20x20 cm. A viga foi suspensa por cabos verticais. Não foi considerado nas análises o impacto causado pela força de protensão. Desta forma, as condições de içamento da viga podem ser resumidas na Tabela 30, apresentada a seguir.

Tabela 30 – Parâmetros estabelecidos para a viga “L” original

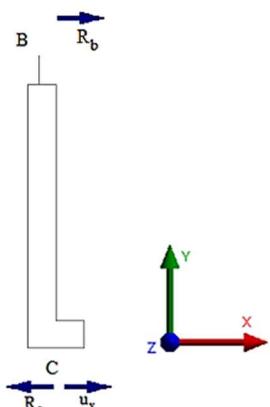
a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ_{cabo}	L (m)	P (kN)
4,01	24	-2	$L/500$	0	20x20	90°	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

Para a simulação numérica da viga, foram inseridos apoios fictícios, conforme explicado na Seção 4.1. Sendo assim, para a obtenção de reações de apoio próximas de zero nestes vínculos, foi necessária a imposição de um deslocamento lateral de -86,46 mm no vínculo posicionado na extremidade da mesa inferior, valor encontrado de maneira iterativa.

A Tabela 31 apresenta as reações laterais nos vínculos B e C encontradas nas 5 iterações realizadas, enquanto que a Figura 78 apresenta a seção transversal correspondente aos pontos de içamento, com a representação destas reações e do deslocamento lateral imposto em C.

Figura 78 – Seção transversal de içamento



Fonte: Autor (2020)

Tabela 31 – Reações laterais nos vínculos para cada iteração

Iteração	Deslocamento lateral imposto em C (mm)	Reações laterais em B e C	
		R _b (N)	R _c (N)
1	0	-902,57	+902,53
2	-20	-692,22	+692,19
3	-70	-170,49	+170,51
4	-80	-66,80	+66,83
5	-86,46	+0,078	-0,0396

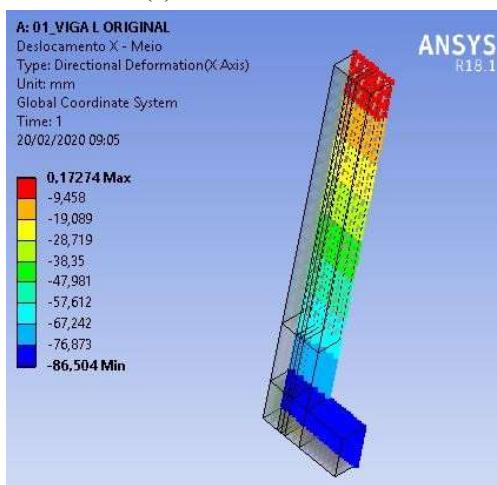
Fonte: Autor (2020)

Desta forma, foram obtidos os valores de tensão normal e deslocamentos laterais na seção crítica de meio de vão. A Figura 79 mostra estes valores por escala de cores, sendo possível perceber a inclinação da linha neutra e a rotação de corpo rígido da seção. Conhecidos os deslocamentos laterais da seção de meio do vão e a altura da viga, pode-se calcular a rotação de equilíbrio desta seção (θ_{eq}), se obtendo um ângulo de 2,61°.

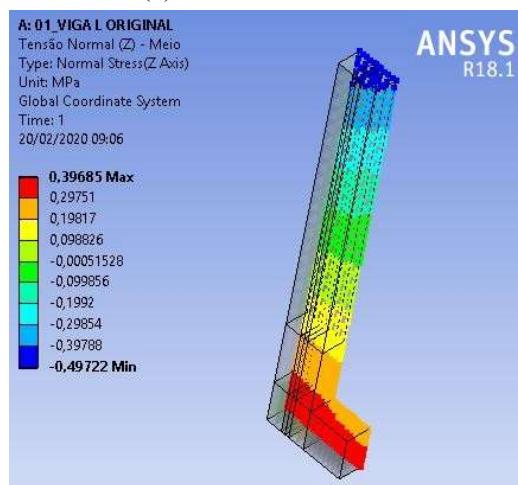
$$\theta_{eq} = \text{arc sen} \left(\frac{\Delta_{desl}}{H_{viga}} \right) = \text{arc sen} \left(\frac{-86,504 - 0,17274}{1900} \right) = -0,0456 \text{ rad ou } -2,61^\circ$$

Figura 79 – Resultados obtidos na seção transversal de meio de vão da viga “L”

(a) Deslocamentos laterais



(b) Tensões normais



Fonte: Autor (2020)

4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

De maneira similar ao que foi feito no Capítulo 3 para a viga com parapeito em sua mesa superior, a análise paramétrica desenvolvida nesta seção leva em conta o efeito das seguintes variáveis: comprimento do balanço (a), resistência do concreto (f_{ck}), desvio de posicionamento das alças (t), excentricidade lateral inicial (e_i), enrijecimento da alça (h_{lift}), inclinação dos cabos de içamento (φ), altura e posicionamento do “berço” de apoio, vão da viga (L).

Ao longo da análise, para todas as variações de parâmetros, foi possível observar que a diferença entre a rotação nas extremidades e no meio do vão é pequena, o que confirma que se trata de um giro de corpo rígido. Além disso, nota-se que os ângulos de rotação de equilíbrio são bem inferiores aos obtidos na viga do Capítulo 3, que tinha um comprimento bem superior, de 45,57 m.

4.3.1. Variação do comprimento do balanço (a)

Com o intuito de se verificar a interferência causada pela alteração no comprimento do balanço, foi realizada a modelagem numérica de vigas com a relação balanço/vão (a/L) equivalente a 0, 5, 10, 15 e 20%, além da situação original de 4,01% ($a = 30$ cm).

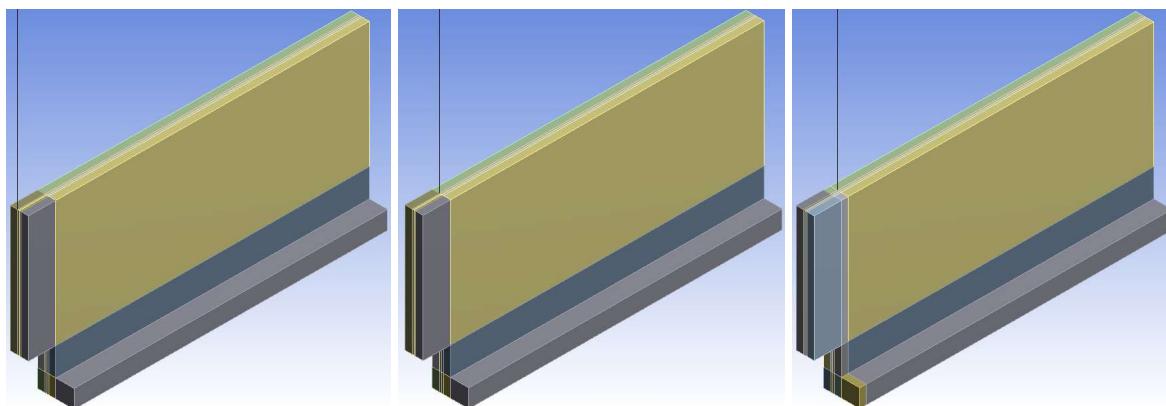
A Figura 80 ilustra as situações estudadas, e a Tabela 32 apresenta os parâmetros estabelecidos como constantes nesta análise.

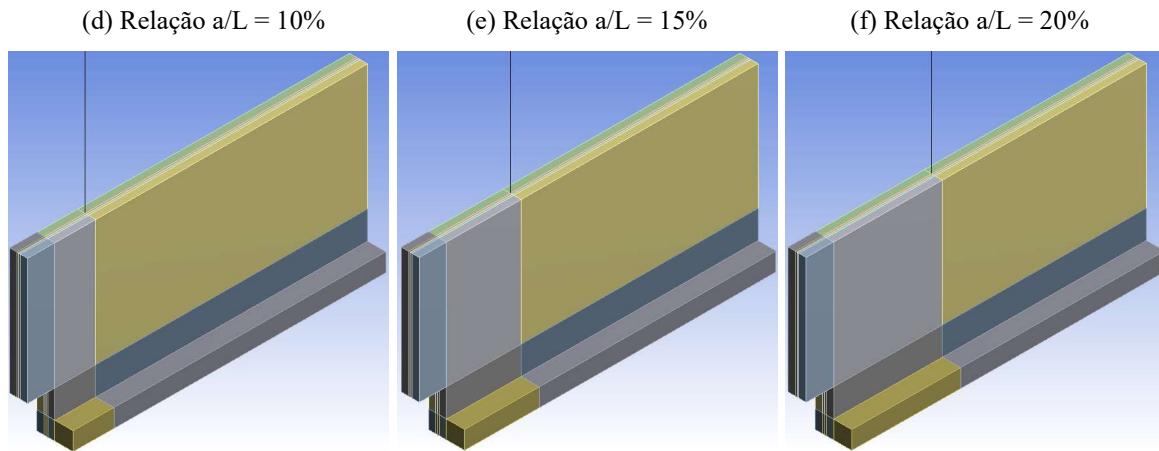
Figura 80 – Situações modeladas para variação do comprimento do balanço

(a) Relação $a/L = 0\%$

(b) Relação $a/L = 4,01\%$

(c) Relação $a/L = 5\%$





Fonte: Autor (2020)

Tabela 32 – Parâmetros estabelecidos para a variação do comprimento dos balanços

f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ_{cabo} ($^{\circ}$)	L (m)	P (kN)
24	-2	$L/500$	0	20x20	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

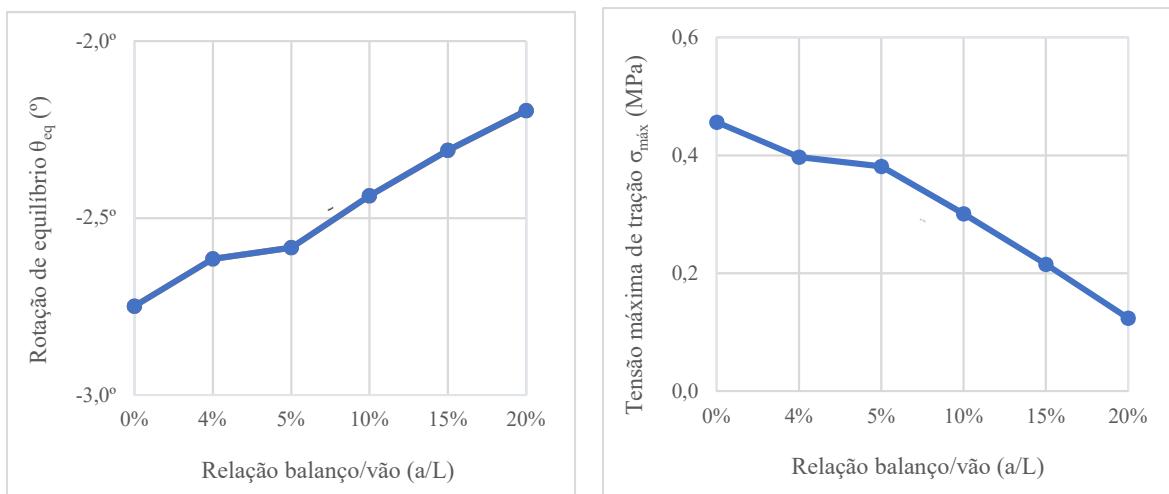
Já a Tabela 33 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação da relação balanço/vão.

Tabela 33 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do balanço

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão ($^{\circ}$)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa ($^{\circ}$)
Relação balanço/vão (a/L)	0%	0,456	-0,588	-2,74	-2,75	0,01
	4,01%	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	5%	0,382	-0,475	-2,58	-2,58	0,00
	10%	0,301	-0,366	-2,43	-2,44	0,01
	15%	0,215	-0,258	-2,30	-2,31	0,01
	20%	0,124	-0,154	-2,19	-2,20	0,01

Fonte: Autor (2020)

A Figura 81 mostra os valores do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, alterando-se o comprimento do balanço. É possível perceber que tanto os ângulos de rotação de equilíbrio quanto os valores de tensão máxima de tração apresentam valores considerados baixos, muito em função do pequeno comprimento da viga (7,48 m).

Figura 81 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da relação balanço/vão

Fonte: Autor (2020)

A influência do comprimento do balanço é percebida pela redução de 20,11% na rotação de equilíbrio para a situação em que a/L é 20%, em comparação à situação de içamento sem balanços. Em relação à viga original ($a = 30$ cm), a redução é de 16,01%.

No que diz respeito aos valores de tensão máxima de tração, foi notada uma redução de 72,87% em relação à situação $a/L = 0\%$, e de 68,80% em relação à viga original ($a = 30$ cm), para a situação em que a relação balanço/vão passa a ser de 20%. Quanto às tensões de compressão na seção de meio de vão, houve uma redução de 73,86% considerando-se os casos extremos (sem balanços e com 20% de balanços).

4.3.2. Variação da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck})

Para a análise da influência da variação dos valores de resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), foram modeladas numericamente vigas com 24, 28, 32, 36 e 40 MPa, o que implica também alteração dos valores de módulos de elasticidade do concreto. A Tabela 34 apresenta os parâmetros que tiveram seus valores estabelecidos como constantes ao longo desta análise, correspondentes à viga original.

Tabela 34 – Parâmetros estabelecidos para a variação da resistência à compressão do concreto (f_{ck})

a/L (%)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
4,01	-2	$L/500$	0	20x20	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

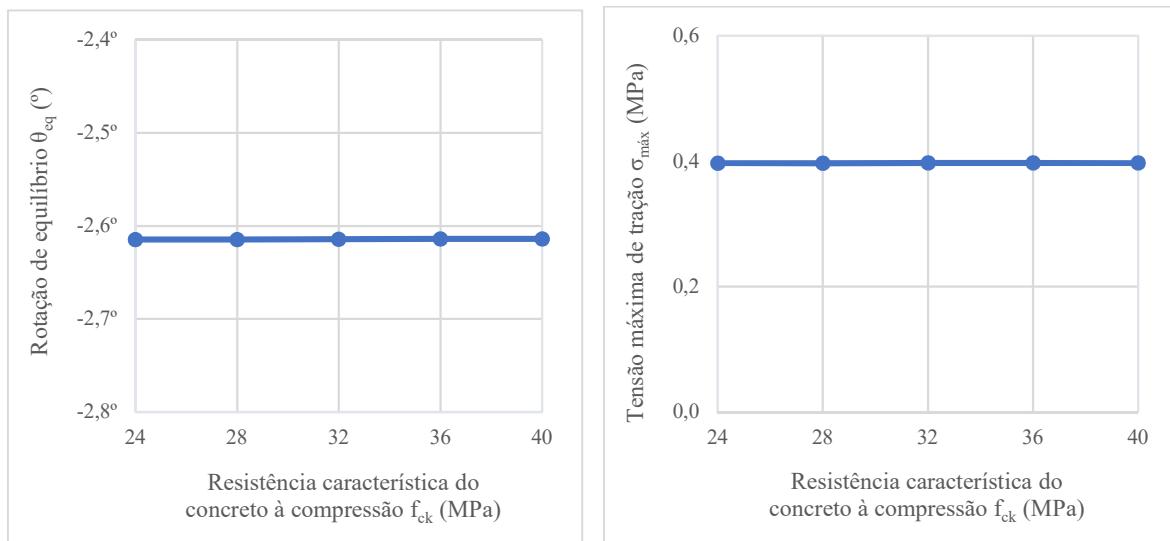
A Tabela 35 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação do f_{ck} .

Tabela 35 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do f_{ck}

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Resistência do concreto à compressão (f_{ck})	24 MPa	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	28 MPa	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	32 MPa	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	36 MPa	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	40 MPa	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00

Fonte: Autor (2020)

A Figura 82 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação do f_{ck} . Ao se comparar as vigas de diferentes valores de f_{ck} , nota-se que praticamente não há alteração no ângulo θ_{eq} , nem nas tensões máximas de tração e compressão.

Figura 82 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do f_{ck} 

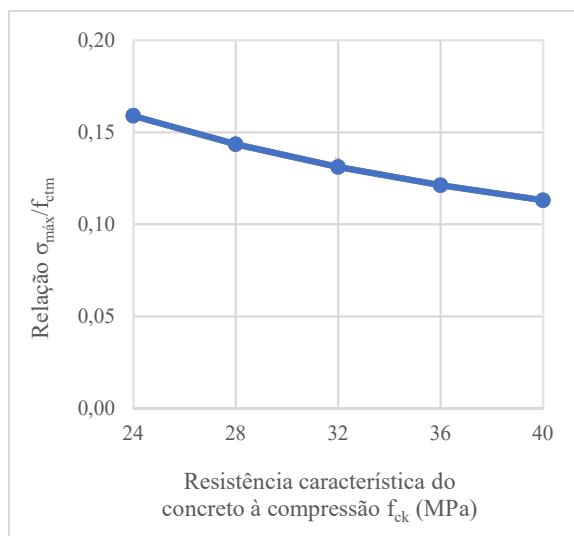
Fonte: Autor (2020)

A Figura 83 mostra a variação da tensão máxima de tração atuante em função do aumento do f_{ck} , por meio da relação entre a mesma e o valor limite de resistência do concreto

à tração (f_{ctm}), visto que o aumento da resistência à compressão também gera acréscimo na tensão resistente do concreto à tração.

Ao comparar as vigas de 24 e 40 MPa, pode-se observar que, com o aumento do f_{ck} , ocorre uma redução de 28,85% na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$, em contraposição à redução imperceptível no valor nominal da tensão $\sigma_{máx}$. A maior interferência na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$ se dá pois o aumento no f_{ck} gera um maior impacto na tensão f_{ctm} , que aumenta 40,57% com o aumento do f_{ck} de 24 para 40 MPa.

Figura 83 – Relação $\sigma_{máx} / f_{ctm}$ em função do f_{ck}



Fonte: Autor (2020)

4.3.3. Variação dos desvios de posicionamento das alças (t)

No propósito de quantificar o impacto causado pela variação dos desvios de posicionamento das alças de içamento, foi realizada a modelagem numérica de três situações: alças sem desvio ($t = 0$), com desvio no sentido da curvatura ($t = +2$ cm) e com desvio no sentido contrário à curvatura ($t = -2$ cm). A Tabela 36 apresenta os parâmetros que tiveram seus valores estabelecidos como constantes na análise.

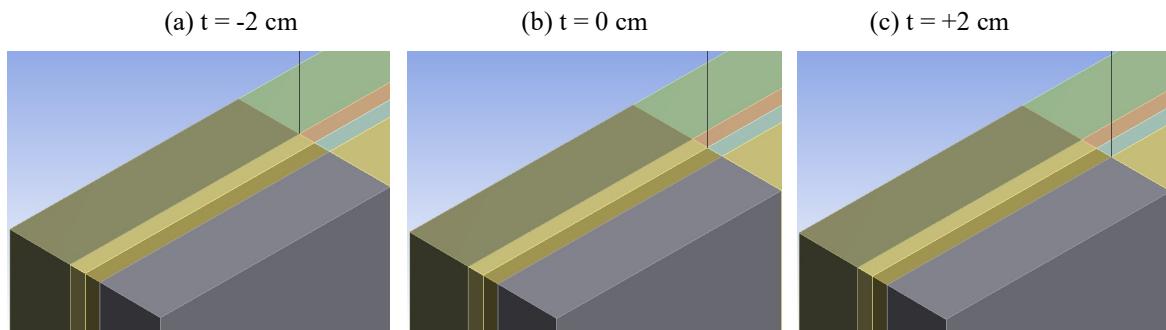
Tabela 36 – Parâmetros estabelecidos para a variação do posicionamento das alças

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	e_i	h_{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
4,01	24	L/500	0	20x20	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

A Figura 84 ilustra as situações modeladas numericamente para variação do desvio de posicionamento de alças.

Figura 84 – Situações modeladas para variação do desvio de posicionamento da alça



Fonte: Autor (2020)

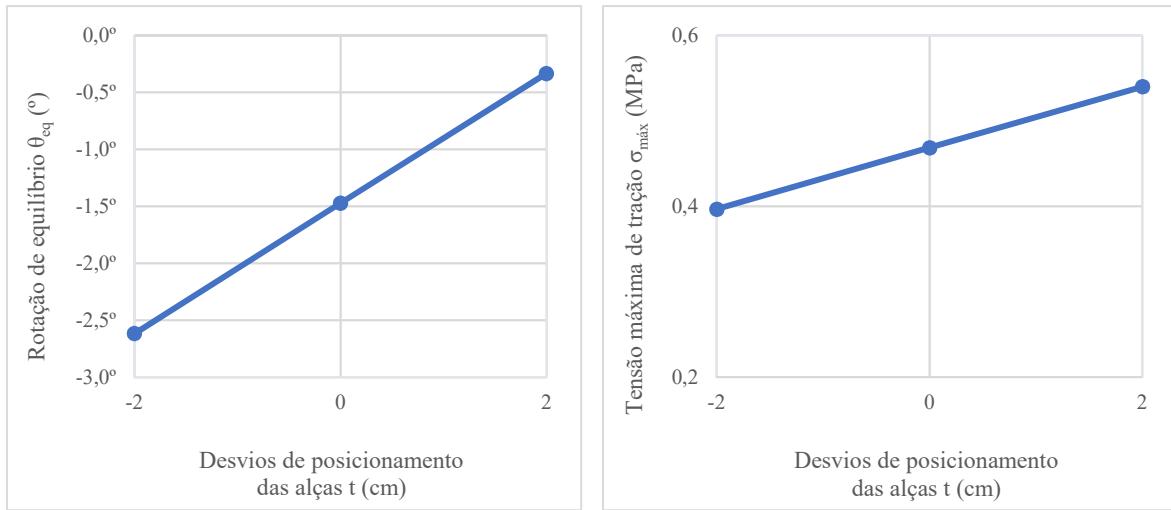
A Tabela 37 contém os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para a variação no posicionamento das alças de içamento.

Tabela 37 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do posicionamento das alças

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Extremos (º)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Meio de vão (º)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Relativa (º)
Desvio da alça (t)	-2 cm	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	0 cm	0,469	-0,480	-1,47	-1,47	0,00
	+2 cm	0,540	-0,543	-0,33	-0,33	0,00

Fonte: Autor (2020)

A Figura 85 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação do desvio das alças. A alteração do desvio de $t = -2$ cm para $t = +2$ cm provoca uma redução de 87,27% no ângulo θ_{eq} . Quanto às tensões, ocorre um aumento de 36,10% na tensão de tração $\sigma_{máx}$, além de um acréscimo de 9,11% na tensão máxima de compressão. Destaca-se que, apesar do aumento na tensão máxima de tração, a tensão limite resistida pelo concreto (f_{ctm}) não foi ultrapassada.

Figura 85 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da posição das alças

Fonte: Autor (2020)

4.3.4. Variação da excentricidade lateral inicial (e_i)

A influência da variação da excentricidade foi levada em conta no estudo, com a modelagem de vigas curvas com excentricidade e_i equivalente a L/500, L/425, L/350, L/275 e L/200, sendo L o comprimento da viga (7,48 m). Os parâmetros que constam na Tabela 38 tiveram seus valores estabelecidos como constantes ao longo desta análise. Já a Tabela 39 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação da excentricidade lateral inicial.

Tabela 38 – Parâmetros estabelecidos para a variação da excentricidade lateral inicial

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	h_{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
4,01	24	-2	0	20x20	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

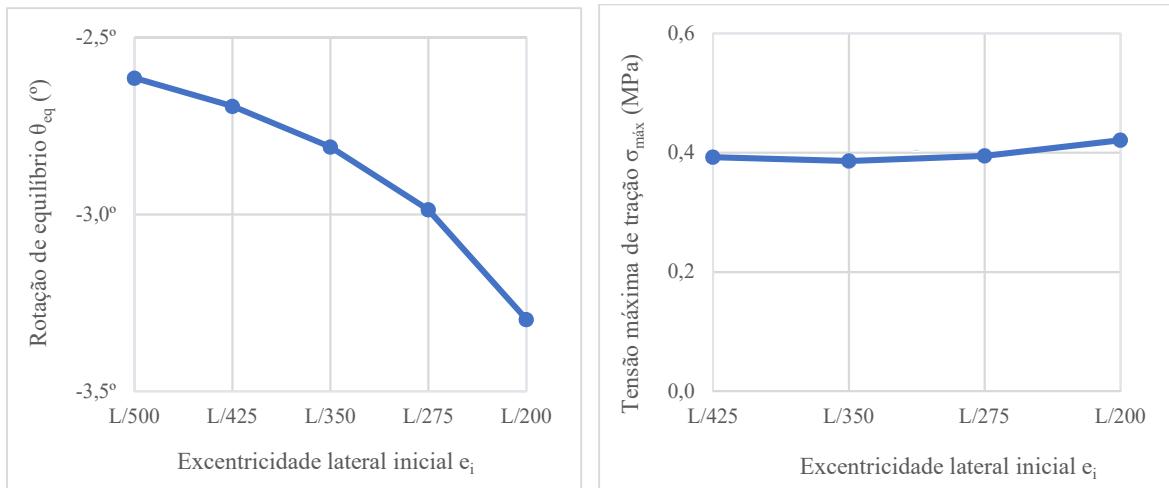
Tabela 39 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação da excentricidade lateral inicial

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Excentricidade lateral inicial (e_i)	L/500	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	L/425	0,392	-0,501	-2,69	-2,69	0,00
	L/350	0,386	-0,507	-2,80	-2,81	0,01
	L/275	0,395	-0,516	-2,98	-2,99	0,01
	L/200	0,421	-0,532	-3,28	-3,30	0,02

Fonte: Autor (2020)

A Figura 86 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação da excentricidade lateral inicial (e_i). É possível notar que, à medida que a e_i aumenta, ocorrem também aumentos nos valores de θ_{eq} e $\sigma_{máx}$.

Figura 86 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da excentricidade inicial



Fonte: Autor (2020)

Foram realizadas simulações acrescendo-se o valor da excentricidade e_i , a partir da situação original ($e_i = L/500$). Comparando-se as situações limites, percebe-se que, com o aumento da e_i de L/500 (1,496 cm) para L/200 (3,740 cm), houve aumento na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) de 26,08%, e também um aumento de 6,12% na tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$). Além disso, houve um acréscimo de 6,99% na tensão máxima de compressão.

4.3.5. Variação do enrijecimento da alça (h_{lift})

Para avaliar a influência deste parâmetro foi realizada a simulação para valores de enrijecimento da alça (h_{lift}) de 30, 45, 60 e 75 cm, além da situação original sem enrijecimento ($h_{lift} = 0$). A Tabela 40 apresenta os parâmetros estabelecidos como constantes nesta análise.

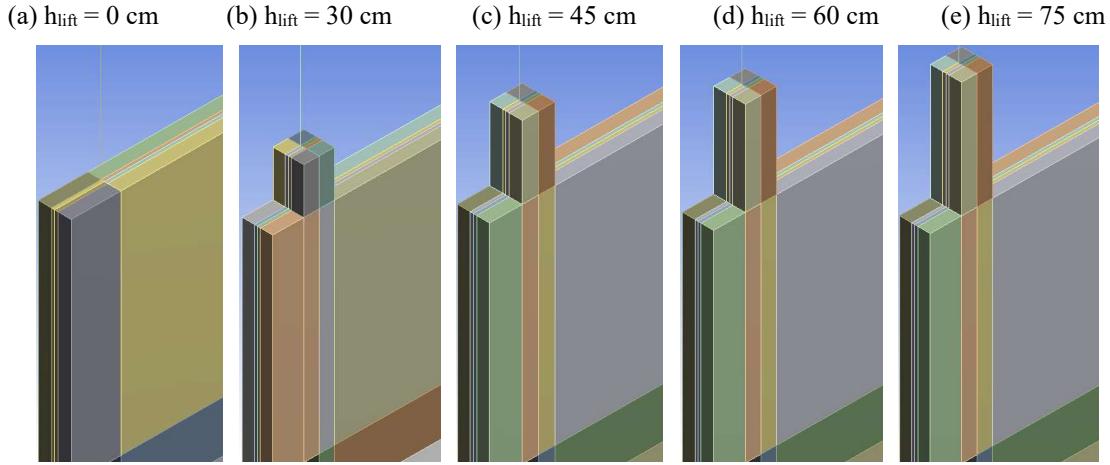
Tabela 40 – Parâmetros estabelecidos para a variação do enrijecimento da alça

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	“berço” (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
4,01	24	-2	L/500	20x20	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

A Figura 87 ilustra as situações modeladas numericamente para variação do enrijecimento da alça, sendo que esta modelagem foi realizada através da extensão da alma da viga acima de sua mesa.

Figura 87 – Situações modeladas para variação do enrijecimento da alça de içamento



Fonte: Autor (2020)

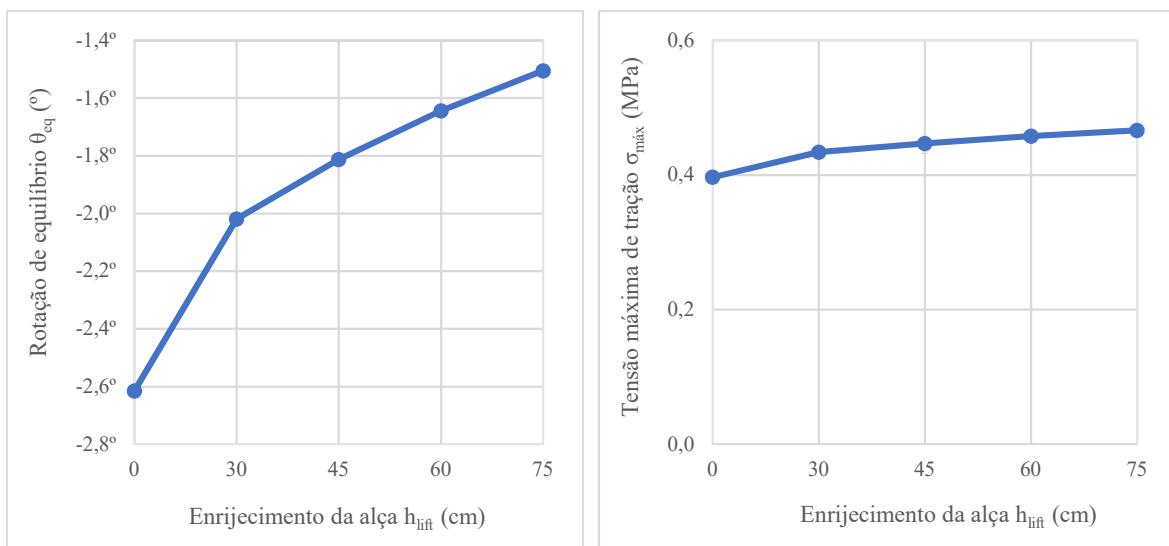
A Tabela 41 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para verificação da variação do enrijecimento das alas de içamento.

Tabela 41 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do enrijecimento da alça

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Enrijecimento da alça (h_{lift})	0 cm	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	30 cm	0,434	-0,477	-2,01	-2,02	0,01
	45 cm	0,447	-0,470	-1,81	-1,81	0,00
	60 cm	0,458	-0,471	-1,64	-1,64	0,00
	75 cm	0,466	-0,478	-1,50	-1,50	0,00

Fonte: Autor (2020)

A Figura 88 apresenta os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da variação do enrijecimento da alça (h_{lift}). Pode-se perceber que o aumento da altura de enrijecimento gera decréscimo na rotação de equilíbrio e acréscimo na tensão máxima de tração.

Figura 88 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do enrijecimento da alça

Fonte: Autor (2020)

A interferência do enrijecimento da alça pode ser notada pela redução de 42,44% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) para a situação em que h_{lift} é 75 cm, em comparação à situação de içamento sem enrijecimento ($h_{lift} = 0$).

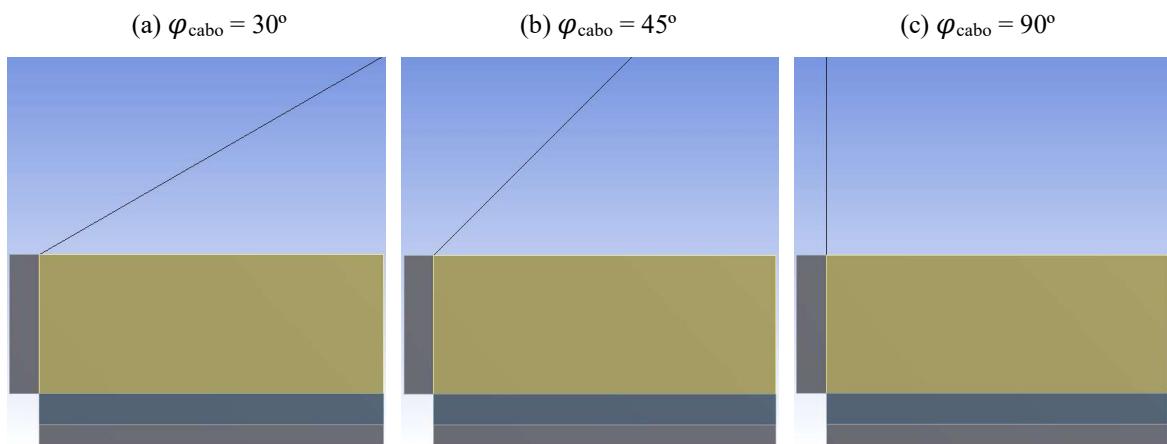
O aumento da altura de enrijecimento da alça altera diretamente o posicionamento do eixo de giro da viga. A suspensão do eixo confere maior estabilidade à viga, e reduz a necessidade de rotação da mesma para que a posição de equilíbrio seja alcançada, o que explica a redução na rotação de equilíbrio.

Entretanto, quanto aos valores de tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), foi verificado um acréscimo de 17,54% em relação à situação em que $h_{lift} = 0$, para a situação em que a altura de enrijecimento da alça passa a ser 75 cm.

4.3.6. Variação da inclinação dos cabos de içamento (ϕ)

Com o intuito de se quantificar a influência causada pela variação da inclinação dos cabos de içamento, foi realizada a modelagem numérica de vigas sendo içadas por cabos a ângulos de 30 $^{\circ}$, 45 $^{\circ}$ e 90 $^{\circ}$ a partir do eixo horizontal. A Figura 89 ilustra as situações modeladas numericamente de variação da inclinação dos cabos de içamento. Além disso, alguns parâmetros são fixados na análise, apresentados na Tabela 42.

Figura 89 – Situações modeladas para variação da inclinação dos cabos de içamento



Fonte: Autor (2020)

Tabela 42 – Parâmetros estabelecidos para a variação da inclinação dos cabos de içamento

a/L (%)	f _{ck} (MPa)	t (cm)	e _i	h _{lift} (cm)	“berço” (cm)	L (m)	P (kN)
4,01	24	-2	L/500	0	20x20	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

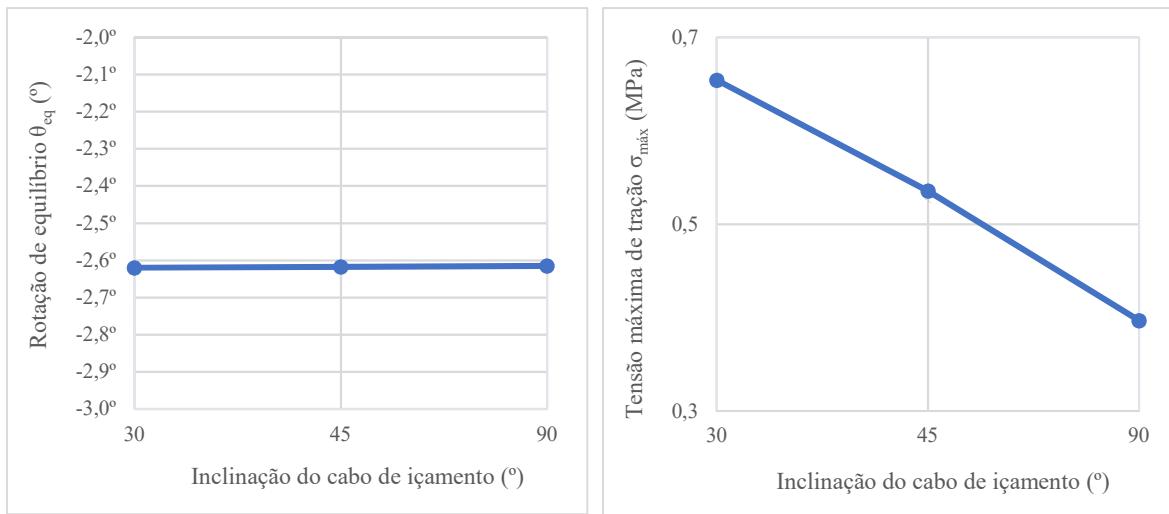
A Tabela 43 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação da inclinação dos cabos de içamento.

Tabela 43 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação a inclinação dos cabos de içamento

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Inclinação dos cabos (φ_{cabo})	30°	0,654	-1,169	-2,61	-2,62	0,01
	45°	0,535	-0,886	-2,61	-2,62	0,01
	90°	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00

Fonte: Autor (2020)

A Figura 90 apresenta, em forma gráfica, os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, em função da mudança na inclinação dos cabos de içamento.

Figura 90 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da inclinação dos cabos

Fonte: Autor (2020)

Ao comparar a primeira situação em que o ângulo dos cabos é de 90°, e a segunda situação em que tal ângulo passa a ser de 30°, pode-se observar que, com a diminuição do ângulo φ_{cabo} , ocorre um aumento de apenas 0,19% no ângulo θ_{eq} , e um acréscimo mais expressivo de 64,86% na tensão $\sigma_{máx}$, além de um aumento de 135,01% na tensão máxima de compressão. Importante destacar que, mesmo com elevado acréscimo na tensão máxima de tração, a resistência limite à tração do concreto não foi superada.

4.3.7. Variação das dimensões e posicionamento do “berço”

As vigas desta análise paramétrica foram modeladas numericamente com dimensões variáveis do “berço”, de 20x20, 15x15, 10x10, 5x5 cm, além da situação de seção transversal simétrica (sem “berço”). Posteriormente, foi modelada uma viga com o posicionamento do “berço” contrário à curvatura da viga. Para ambas as análises foram estabelecidos parâmetros, os quais constam na Tabela 44.

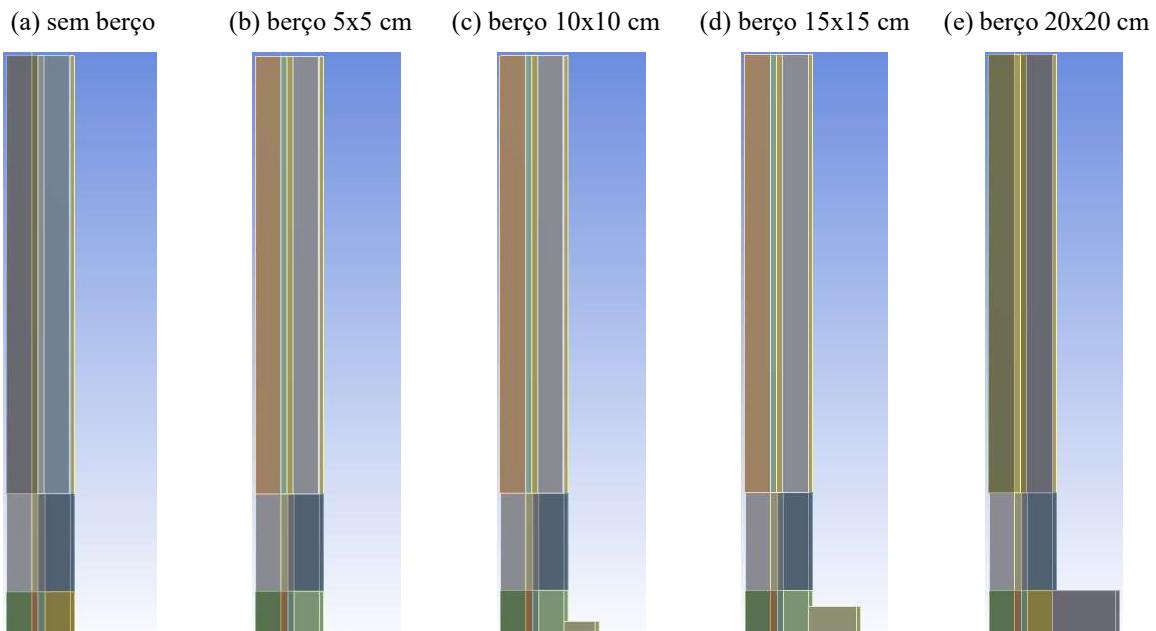
Tabela 44 – Parâmetros estabelecidos para a variação das dimensões e posição do “berço”

a/L (%)	f_{ck} (MPa)	t (cm)	e_i	h_{lift} (cm)	φ_{cabo} (°)	L (m)	P (kN)
4,01	24	-2	L/500	0	90	7,48	0

Fonte: Autor (2020)

As Figuras 91 e 92 apresentam as situações modeladas numericamente para a variação das dimensões e posição do “berço”, que configura assimetria na seção transversal.

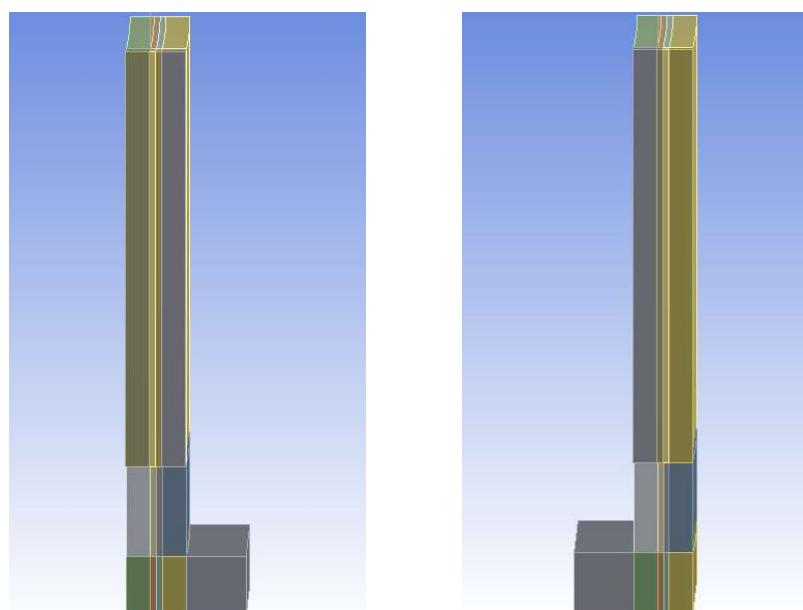
Figura 91 – Situações modeladas para variação das dimensões do “berço”



Fonte: Autor (2020)

Figura 92 – Situações modeladas para variação do posicionamento do “berço”

(a) coincidente com a curvatura da viga (b) contrário à curvatura da viga



Fonte: Autor (2020)

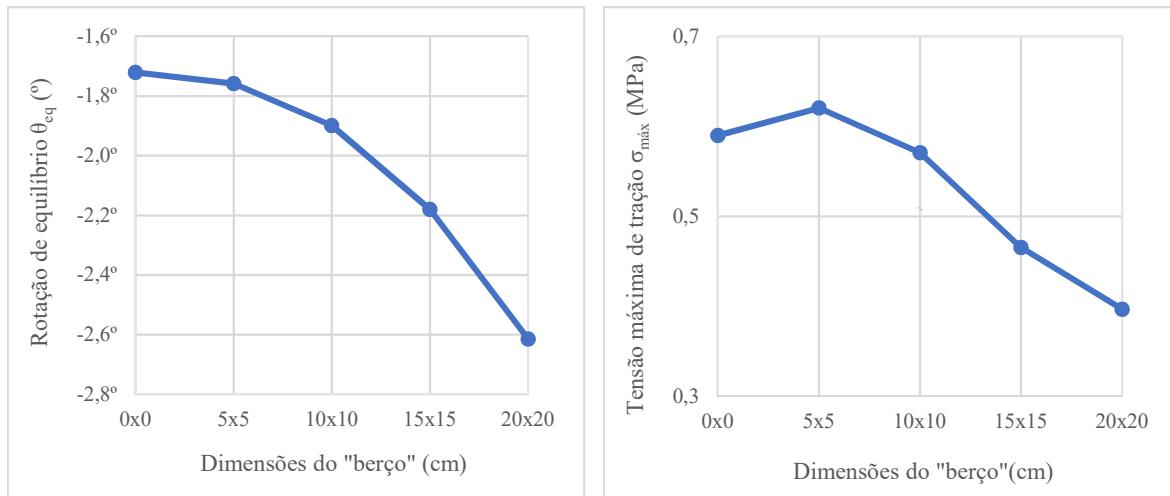
A Tabela 45 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação das dimensões do “berço”.

Tabela 45 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação das dimensões do “berço”

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Dimensões do “berço”	0x0	0,590	-0,599	-1,72	-1,72	0,00
	5x5	0,620	-0,586	-1,76	-1,76	0,00
	10x10	0,571	-0,549	-1,90	-1,90	0,00
	15x15	0,465	-0,513	-2,18	-2,18	0,00
	20x20	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00

Fonte: Autor (2020)

A Figura 93 ilustra a importância das dimensões do “berço”, até a sua retirada, o que configura a situação de simetria da seção transversal.

Figura 93 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do “berço”

Fonte: Autor (2020)

São apresentados os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, com a variação deste parâmetro. A título de comparação, se destacam as situações limites em que o “berço” tem 20x20 cm, e em que o mesmo não existe.

A redução das dimensões do “berço”, e consequente retomada de simetria da seção transversal, provoca uma diminuição de 34,18% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), passando de 2,61 para 1,72. Portanto, pode-se perceber claramente que a condição de assimetria da seção transversal agrava a condição de estabilidade lateral da viga, já complicada em função de

seu longo vão e da esbeltez de sua seção transversal. Entretanto, no que diz respeito à tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), ocorre um aumento de 48,61%. Além disso, é percebido um acréscimo de 20,50% na tensão máxima de compressão na seção.

A Tabela 46 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação do posicionamento do “berço”.

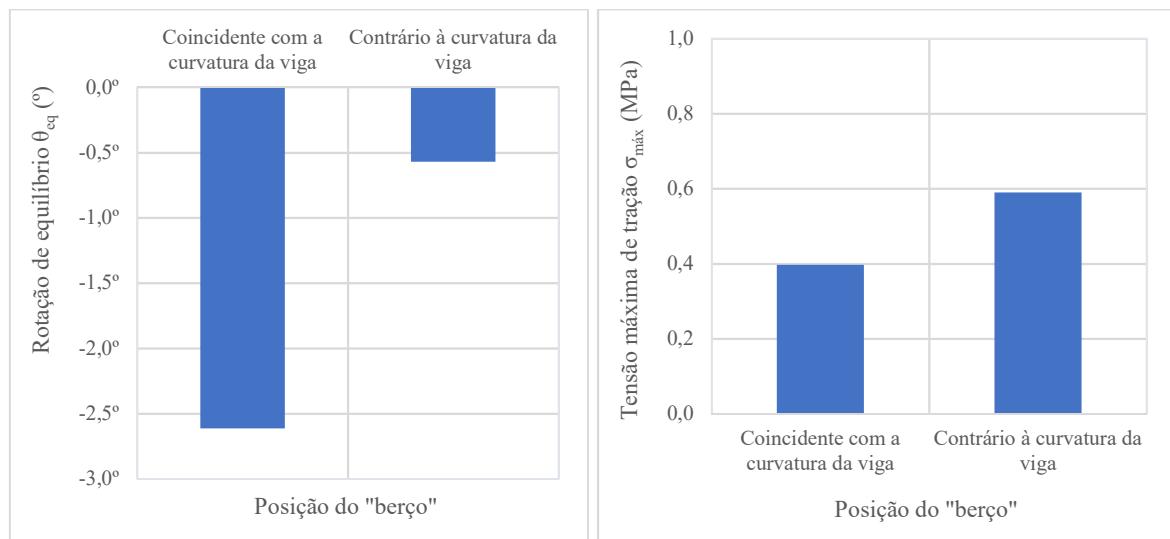
Tabela 46 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do posicionamento do “berço”

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) – Relativa (°)
Posição do “berço”	Contrário à curvatura	0,590	-0,605	-0,57	-0,57	0,00
	Coincidente à curvatura	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00

Fonte: Autor (2020)

Já a Figura 94 mostra os resultados de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), na seção de meio de vão, para duas situações: “berço” coincidente e “berço” contrário à curvatura de excentricidade inicial da viga.

Figura 94 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função da posição do “berço”



Fonte: Autor (2020)

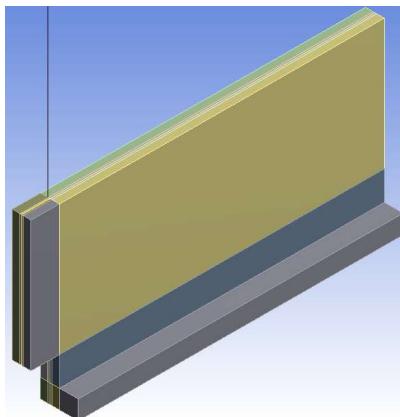
A inversão do posicionamento do “berço” provoca uma redução de 78,26% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), passando de 2,61° para 0,57°. Quanto às tensões máximas de tração e compressão, ocorrem aumentos respectivos de 48,66% e 21,70%.

4.3.8. Variação do vão da viga

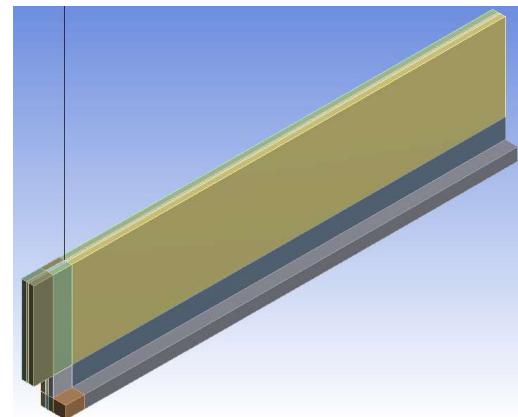
Com a intenção de se verificar a interferência causada pela alteração no vão da viga, foi realizada a modelagem numérica de vigas com comprimentos equivalentes às seguintes porcentagens do vão original da viga ($L = 7,48$ m): 200, 300 e 400%, além da situação inicial de 100%. A Figura 95 ilustra as situações estudadas.

Figura 95 – Situações modeladas para variação do vão da viga

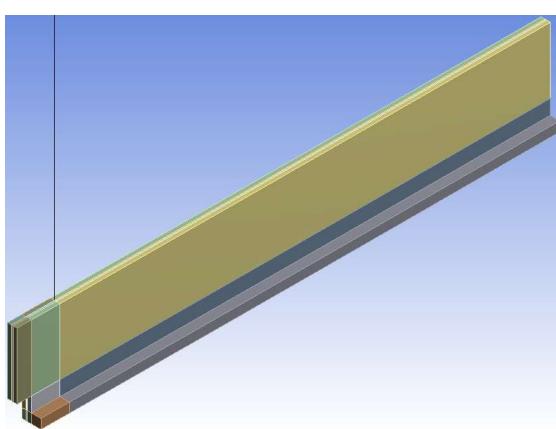
(a) Vão = $L = 7,48$ m



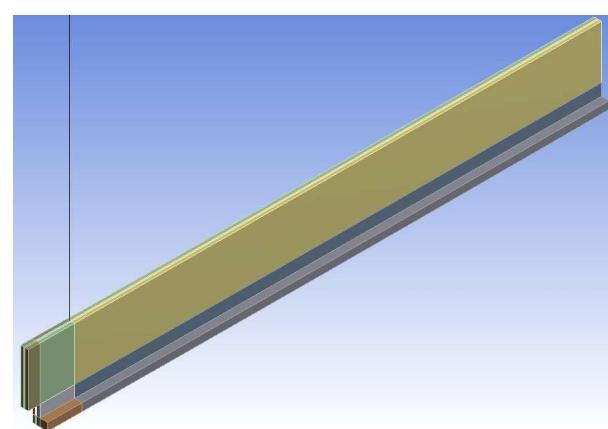
(b) Vão = $2L = 14,96$ m



(c) Vão = $3L = 22,44$ m



(d) Vão = $4L = 29,92$ m



Fonte: Autor (2020)

Os parâmetros que constam na Tabela 47 tiveram seus valores estabelecidos como constantes ao longo desta análise.

Tabela 47 – Parâmetros estabelecidos para a variação do vão da viga

a/L (%)	f _{ck} (MPa)	t (cm)	e _i	h _{lift} (cm)	“berço” (cm)	φ _{cabo} (°)	P (kN)
4,01	24	-2	L/500	0	20x20	90	0

Fonte: Autor (2020)

Neste item, arbitrou-se por realizar aumentos no vão da viga, pois pelas análises já desenvolvidas, pôde-se perceber que o pequeno vão da mesma (7,48 m) provoca pequenos ângulos de rotação de equilíbrio, não gerando problemas significativos de estabilidade lateral. Sendo assim, os vão foram extrapolados para avaliação do impacto deste parâmetro. Importante destacar também que, assim como realizado na Seção 3.5.9, foi adotada a realização de variação do vão da viga sem variação correspondente da altura da seção transversal, não sendo mantida como constante a relação entre vão e altura da viga.

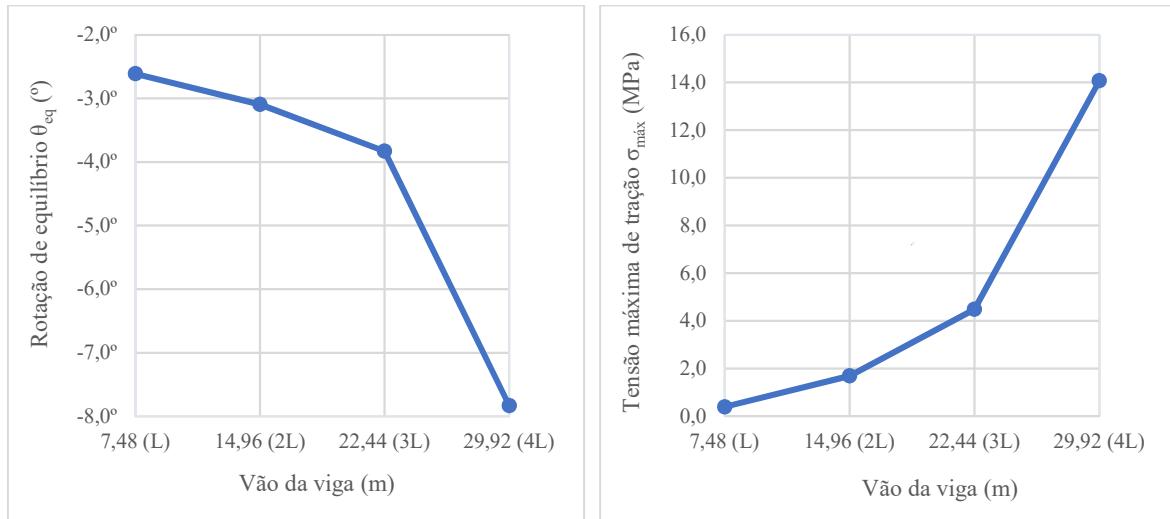
A Tabela 48 apresenta os resultados numéricos do estudo paramétrico, em termos de tensões de tração e compressão na seção de meio de vão, e rotação de equilíbrio nas extremidades e no meio de vão da viga, para variação do vão da viga.

Tabela 48 – Resultados numéricos do estudo paramétrico de variação do vão da viga

Parâmetro	Alteração	Tensão de tração (MPa)	Tensão de compressão (MPa)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Extremos (°)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Meio de vão (°)	Rotação de equilíbrio (θ _{eq}) – Relativa (°)
Vão da viga	L	0,397	-0,497	-2,61	-2,61	0,00
	2 x L	1,695	-1,904	-3,07	-3,10	0,03
	3 x L	4,481	-4,416	-3,76	-3,83	0,07
	4 x L	14,068	-9,715	-7,56	-7,83	0,27

Fonte: Autor (2020)

A Figura 96 apresenta graficamente os resultados do ângulo de rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e da tensão máxima de tração (σ_{máx}), na seção de meio de vão, em função da variação do vão da viga. Ao se aumentar o vão de 7,48 m para 29,92 m (400% de 7,48 m), nota-se um aumento de 199,55% no ângulo θ_{eq}, passando de 2,61° para 7,83°. Além disso, com o aumento no comprimento da viga, a tensão máxima de tração obtida foi mais de 35 vezes superior à obtida na viga original, enquanto que a tensão máxima de compressão foi mais de 19 vezes superior ao valor inicial.

Figura 96 – Rotação de equilíbrio (θ_{eq}) e tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$) em função do vão da viga

Fonte: Autor (2020)

4.3.9. Resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica

A Tabela 49 apresenta uma classificação dos parâmetros cuja variação é mais impactante na rotação de equilíbrio θ_{eq} . As variações negativas correspondem a decréscimos, enquanto que as positivas (em vermelho) dizem respeito a acréscimos.

Tabela 49 – Alterações de parâmetros mais influentes na rotação de equilíbrio θ_{eq}

Nº	Alteração	Variação na rotação θ_{eq} (%)	Nº	Alteração	Variação na rotação θ_{eq} (%)
1	Desvio alça +2 cm	-87,27	15	$f_{ck} = 40$ MPa	-0,030
2	Desvio alça 0 cm	-43,71	16	$f_{ck} = 36$ MPa	-0,028
3	$h_{lift} = 75$ cm	-42,44	17	$f_{ck} = 32$ MPa	-0,017
4	$h_{lift} = 60$ cm	-37,11	18	$f_{ck} = 28$ MPa	-0,009
5	Berço 0x0 cm	-34,18	19	$\varphi_{cabo} = 45^{\circ}$	+0,11
6	Berço 5x5 cm	-32,78	20	$\varphi_{cabo} = 30^{\circ}$	+0,19
7	$h_{lift} = 45$ cm	-30,68	21	$e_i = L/425$	+3,06
8	Berço 10x10 cm	-27,37	22	$a/L = 0\%$	+5,14
9	$h_{lift} = 30$ cm	-22,78	23	$e_i = L/350$	+7,44
10	Berço 15x15 cm	-16,64	24	$e_i = L/275$	+14,22
11	$a/L = 20\%$	-16,01	25	$Vão = 2 \times L$	+18,42
12	$a/L = 15\%$	-11,74	26	$e_i = L/200$	+26,08
13	$a/L = 10\%$	-6,82	27	$Vão = 3 \times L$	+46,52
14	$a/L = 5\%$	-1,20	28	$Vão = 4 \times L$	+199,55

Fonte: Autor (2020)

A alteração com maior impacto positivo seria a imposição de desvios estabilizantes da alça. Em seguida, surge o enrijecimento da alça, retirada ou diminuição das dimensões do “berço” e aumentos na relação balanço/vão (a/L). Em seguida, percebe-se que os aumentos no f_{ck} do concreto praticamente não interferem na rotação de equilíbrio. Dentre as alterações que geram impacto negativo quanto à rotação de equilíbrio, se destaca o aumento do comprimento da viga. Em seguida, surge o aumento da excentricidade lateral inicial, a retirada dos balanços para içamento, e, finalmente, a utilização de cabos inclinados.

Já a Tabela 50 apresenta uma classificação dos parâmetros cuja variação é mais impactante na tensão máxima de tração $\sigma_{máx}$. As variações negativas correspondem a decréscimos, enquanto que as positivas (em vermelho) dizem respeito a acréscimos.

Tabela 50 – Alterações de parâmetros mais influentes na tensão máxima de tração $\sigma_{máx}$

Nº	Alteração	Variação na tensão $\sigma_{máx}$ (%)	Nº	Alteração	Variação na tensão $\sigma_{máx}$ (%)
1	$a/L = 20\%$	-68,80	15	$a/L = 0\%$	+15,00
2	$a/L = 15\%$	-45,75	16	$h_{lift} = 60\text{ cm}$	+15,33
3	$a/L = 10\%$	-24,12	17	Berço 15x15 cm	+17,27
4	$a/L = 5\%$	-3,85	18	$h_{lift} = 75\text{ cm}$	+17,54
5	$e_i = L/350$	-2,69	19	Desvio alça 0 cm	+18,06
6	$e_i = L/425$	-1,11	20	$\varphi_{cabo} = 45^\circ$	+34,91
7	$e_i = L/275$	-0,55	21	Desvio alça +2 cm	+36,10
8	$f_{ck} = 28\text{ MPa}$	0,00	22	Berço 10x10 cm	+43,78
9	$f_{ck} = 32\text{ MPa}$	0,00	23	Berço 0x0 cm	+48,61
10	$f_{ck} = 36\text{ MPa}$	0,00	24	Berço 5x5 cm	+56,33
11	$f_{ck} = 40\text{ MPa}$	0,00	25	$\varphi_{cabo} = 30^\circ$	+64,86
12	$e_i = L/200$	+6,12	26	$Vão = 2 \times L$	+327,21
13	$h_{lift} = 30\text{ cm}$	+9,41	27	$Vão = 3 \times L$	+1029,09
14	$h_{lift} = 45\text{ cm}$	+12,67	28	$Vão = 4 \times L$	+3444,92

Fonte: Autor (2020)

É importante destacar que muitos parâmetros cujas alterações provocaram reduções no ângulo de rotação de equilíbrio, provocaram também aumentos nos valores de tensão de tração. Entretanto, a análise puramente percentual deve ser relativizada, pois se trata de uma viga com um vão pequeno, e os valores de rotação e tensões também são baixos.

Quanto às tensões de tração, a alteração que gerou a maior redução foi o aumento dos balanços, enquanto que a alteração que gerou o maior acréscimo foi o aumento do comprimento da viga, sendo que as únicas alterações que geraram tensões de tração superiores ao limite de resistência à tração do concreto (f_{ctm}) foram as em que o vão da viga foi triplicado ou quadruplicado.

4.4. VERIFICAÇÃO DA VIGA SEGUNDO GERMÁN (2015), ZHANG (2017) E LIMA (2018)

Por se tratar de uma viga com um vão pequeno (7,48 m) se comparado a vãos de vigas de ponte, nenhum dos critérios de Germán (2015), Zhang (2017) ou Lima (2018) considera que a viga se encontra em situação de instabilidade lateral em içamento.

No caso do critério gráfico de projeto proposto por Germán (2015), as curvas consideradas como limites de estabilidade são válidas somente para vãos da ordem de no mínimo 30 m. Em outras palavras, para o autor, vigas com vão abaixo desse limite não apresentam problemas de instabilidade lateral.

Quanto aos critérios analíticos de cálculo do fator de segurança (FS) e do máximo giro de corpo rígido (θ_{cr}) permitido para a seção transversal no meio do vão, de forma que não ocorram tensões de tração nesta seção superiores ao limite f_{ctm} , de Zhang (2017) e Lima (2018), também não são detectados problemas de estabilidade lateral. Nota-se também que o “berço”, que causa a assimetria da seção transversal, não é um fator de grande relevância para aumento do giro de corpo rígido da seção. Por outro lado, o aumento do vão leva a condições de redução da rotação máxima para que não ocorra fissuração, e também de redução do fator de segurança.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o estudo do problema de instabilidade lateral de vigas com seção transversal assimétrica no içamento. As análises numéricas são desenvolvidas no programa computacional ANSYS, a fim de quantificar a rotação de equilíbrio no içamento, em função das características físicas e geométricas do elemento estrutural.

Foram simuladas numericamente duas vigas com seção transversal assimétrica, com características diferentes entre si, sendo uma delas uma viga de ponte e outra uma viga utilizada em edificações. A primeira é uma viga com vão de 45,57 m, referente a um caso real de instabilidade lateral que ocorreu em Olost (Espanha), cuja assimetria da seção transversal é caracterizada pela presença de um parapeito em uma das extremidades da mesa superior. A segunda é uma viga pré-moldada de seção “L”, estudada por Pastore (2015), com vão de 7,48 m, cuja assimetria é causada pela existência de um apêndice ou “berço” na sua mesa inferior, para servir de apoio para as lajes do edifício, representando um caso usual em edifícios pré-moldados.

As variáveis consideradas nas análises paramétricas são: efeito da protensão, relação balanço/vão (a/L), resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), desvios de posicionamento das alças (t), excentricidade lateral inicial (e_i), enrijecimento da alça (h_{lift}), inclinação dos cabos de içamento, vão da viga e condições referentes à redução, retirada ou inversão do posicionamento do elemento que causa a assimetria na seção transversal.

Assim, as principais conclusões para cada parâmetro estudado na viga de 45,57 m, com assimetria causada por parapeito na mesa superior, são as seguintes:

a) Protensão: A inserção da força de protensão provocou um aumento no ângulo de rotação de equilíbrio de 6,21%, indicando que a protensão gera pequena influência na rotação de equilíbrio θ_{eq} . Além disso, provocou também uma redução na tensão máxima de tração, de 22,24%, e um aumento na tensão máxima de compressão de 8,05%.

b) Comprimento dos balanços (a/L): A grande influência do comprimento do balanço é percebida pelas reduções de 73,16% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), 84,87% na tensão máxima de tração e 86,71% na tensão máxima de compressão, para a situação em que a/L é 20%, em comparação à situação de içamento sem balanços. Em todo o estudo paramétrico, a única situação que garantiu uma tensão máxima de tração inferior ao valor limite resistido pelo concreto (f_{ctm}), foi a situação em que a/L é 20%.

c) Resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}): O aumento do f_{ck} gerou um efeito estabilizante, pois ocorreram reduções de 24,52% na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$, e de 9,73% no ângulo θ_{eq} para as vigas de 55 MPa, comparadas às vigas de 35 MPa.

d) Desvio de posicionamento das alças (t): A alteração do desvio de $t = -2$ cm para $t = +2$ cm gerou um efeito favorável, provocando uma redução de 26,21% no ângulo θ_{eq} . No que diz respeito às tensões, o impacto foi mais discreto, com diminuição de apenas 7,89% na tensão de tração $\sigma_{máx}$, além de uma redução de 11,01% na tensão máxima de compressão.

e) Excentricidade lateral inicial (e_i): Com a redução da e_i de $L/500$ (9,114 cm) para $L/1000$ (4,557 cm), houve redução na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) de 18,20%, e também uma diminuição de 5,03% na tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$). Além disso, houve um decréscimo de 7,84% na tensão máxima de compressão.

f) Enrijecimento das alças (h_{lift}): A grande interferência do enrijecimento da alça pode ser notada pela considerável redução de 49,73% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) para a situação em que h_{lift} é 90 cm, em comparação à quando $h_{lift} = 0$. Verificou-se também redução de 17,87% na tensão máxima de tração e 24,02% na tensão máxima de compressão.

g) Inclinação dos cabos: Ao comparar a primeira situação em que o ângulo dos cabos é de 90°, e a segunda situação em que tal ângulo passa a ser de 30°, pode-se observar que, com a diminuição do ângulo φ_{cab} , ocorre um aumento de 15,69% no ângulo θ_{eq} , e acréscimos mais expressivos de 25,29% na tensão $\sigma_{máx}$, e de 38,95% na tensão máxima de compressão.

h) Vão da viga: Ao se reduzir o vão de 45,57 m para 27,34 m (60% de 45,57 m), nota-se uma redução de 49,54% no ângulo θ_{eq} . Além disso, houve diminuição ainda mais significativa nas tensões máximas de tração (69,38%) e também de compressão (71,48%).

i) Retirada ou redução da assimetria da seção transversal: A redução da altura do parapeito, e consequente retomada de simetria da seção transversal, provocou uma diminuição acentuada de 48,75% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}). No que diz respeito à tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), ocorreu uma redução também expressiva, de 20,77%, passando de 17,228 MPa para 13,65 MPa. Além disso, é percebida uma redução de 26,20% na tensão máxima de compressão na seção. Já a inversão do posicionamento do parapeito foi ainda mais significativa, provocando reduções de 89,61% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), 32,16% na tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), e 48,12% na tensão máxima de compressão na seção.

Já para a viga com vão de 7,48 m com assimetria causada pelo apêndice ou “berço” na sua mesa inferior, para servir de apoio para as lajes do edifício, as principais conclusões são as seguintes:

a) Comprimento dos balanços (a/L): A influência do comprimento do balanço é percebida pela redução de 20,11% na rotação de equilíbrio para a situação em que a/L é 20%, em comparação à situação de içamento sem balanços. Quanto aos valores de tensão máxima de tração, foi notada uma redução de 72,87% em relação à situação a/L = 0% para a situação em que a relação balanço/vão passa a ser de 20%. Já quanto às tensões de compressão na seção de meio de vão, houve uma redução de 73,86% considerando-se os casos extremos.

b) Resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}): Ao se comparar as vigas de diferentes valores de f_{ck} , nota-se que praticamente não há alteração no ângulo de rotação de equilíbrio θ_{eq} . Por outro lado, o aumento do f_{ck} gerou uma redução de 28,85% na relação $\sigma_{máx}/f_{ctm}$.

c) Desvio de posicionamento das alças (t): A alteração do desvio de $t = -2$ cm para $t = +2$ cm provoca uma redução de 87,27% no ângulo θ_{eq} . Quanto às tensões, ocorre um aumento de 36,10% na tensão de tração $\sigma_{máx}$, além de um acréscimo de 9,11% na tensão máxima de compressão.

d) Excentricidade lateral inicial (e_i): Com o aumento da e_i de $L/500$ (1,496 cm) para $L/200$ (3,740 cm), houve aumento na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) de 26,08%, e também um aumento de 6,12% na tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$). Além disso, houve um acréscimo de 6,99% na tensão máxima de compressão.

e) Enrijecimento das alças (h_{lift}): A interferência do enrijecimento da alça pode ser notada pela redução de 42,44% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}) para a situação em que h_{lift} é 75 cm, em comparação à quando $h_{lift} = 0$. Verificou-se também acréscimo de 17,54% na tensão máxima de tração e 24,02% neste mesmo caso.

f) Inclinação dos cabos: Ao comparar a primeira situação em que o ângulo dos cabos é de 90° , e a segunda situação em que tal ângulo passa a ser de 30° , pode-se observar que, com a diminuição do ângulo φ_{cabo} , ocorre um aumento de apenas 0,19% no ângulo θ_{eq} , e um acréscimo mais expressivo de 64,86% na tensão $\sigma_{máx}$, além de um aumento de 135,01% na tensão máxima de compressão.

g) Vão da viga: Ao se aumentar o vão de 7,48 m para 29,92 m (400% de 7,48 m), nota-se um aumento de 199,55% no ângulo θ_{eq} , passando de $2,61^\circ$ para $7,83^\circ$. Além disso, com o aumento no comprimento da viga, a tensão máxima de tração obtida foi mais de 35 vezes superior à obtida na viga original, enquanto que a tensão máxima de compressão foi mais de 19 vezes superior ao valor inicial.

h) Retirada ou redução da assimetria da seção transversal: A redução das dimensões do “berço”, e consequente retomada de simetria da seção transversal, provoca uma diminuição de 34,18% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), passando de 2,61 para 1,72. Entretanto, no que diz respeito à tensão máxima de tração ($\sigma_{máx}$), ocorre um aumento de 48,61%. Além disso, é percebido um acréscimo de 20,50% na tensão máxima de compressão na seção. Já a inversão do posicionamento do “berço” provoca uma redução de 78,26% na rotação de

equilíbrio (θ_{eq}), passando de $2,61^\circ$ para $0,57^\circ$. Quanto às tensões máximas de tração e compressão, ocorrem aumentos respectivos de 48,66% e 21,70%.

Para a viga com vão de 45,57 m, verificou-se que a alteração com mais impacto seria o aumento na relação balanço/vão (a/L), seguido pela redução do vão, retirada da assimetria, redução do parapeito, enrijecimento da alça, desvios da alça (efeito favorável), diminuição da excentricidade lateral inicial, e por último, acréscimos na resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}).

Já para a viga com 7,48 m de vão, a alteração com maior impacto positivo seria a imposição de desvios estabilizantes da alça. Em seguida, surge o enrijecimento da alça, retirada ou diminuição das dimensões do “berço” e aumentos na relação balanço/vão (a/L).

É importante destacar a influência causada pelos elementos que caracterizam a assimetria da seção transversal nos dois casos. Para a viga com vão de 45,57 m, a retirada do parapeito implica em redução de 48,75% na rotação de equilíbrio (θ_{eq}), enquanto que para a viga com vão de 7,48 m, a retirada do berço resulta em diminuição de 34,18% em θ_{eq} .

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Todos os casos foram modelados segundo regime elástico e observa-se que as tensões de tração máxima superaram em muitas ocasiões o limite máximo de resistência do concreto à tração (f_{ctm}), que implicaria na perda de rigidez devido à fissuração do concreto. Nestes termos, sugere-se um estudo de inclusão da não linearidade física de forma que seja possível analisar o comportamento da viga entre o estágio de fissuração e colapso.

A análise de protensão foi feita de forma simplificada, avaliando somente seu efeito isolado. Sugere-se que seja feita uma análise paramétrica para vigas protendidas no intuito de avaliar a influência dos diversos parâmetros (excentricidade lateral inicial, desvio de alça, enrijecimento da ligação viga-cabo, inclinação do cabo, balanços e etc.) na instabilidade do elemento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-2014**, Building Code Requirements for Structural Concrete. Michigan, USA, 2014.

ANDERSON, A. R. Lateral stability of long prestressed concrete beams. **PCI Journal**, 16(3), 7-9. Discussion by R. A. Swann, PCI Journal, 16(6), 85-86. Closure, PCI Journal, 16(6), 86-87, 1971.

ANSYS. v. 18.1. ANSYS, Inc.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, **BS 8110**. Code of practice for structural use of concrete. London, 1997.

CATANIA, M.; COCCHI, G. M. **La stabilità nelle travi prefabbricate in regime transitorio e di esercizio**. Milano, ITEC. 185p, 1985.

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.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2^a.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

EUROCODE 2 - Comite European de Normalisation, **CEN EN 1992-1-1 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios**, 2004.

GAYKAR, V. M.; SOLANKI, J. G. Stress analysis of precast prestressed concrete beams during lifting. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, v. 4, n. 9, p. 61-68, Sep., 2014.

GERMÁN, V. H. **Lateral stability analysis of long precast prestressed concrete beams.** 2015. 195 f. Dissertaçao (Màster Enginyeria d'Estructures i Construcció) – Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Barcelona, Espanha, 2015.

HILL, C. D.; DICK, J. S.; TADROS, M. K. PCI Advisory on I-Girder Stability during Handling and Construction. Safety and Serviceability, **Aspire Magazine**, Winter 2009 Issue, p. 38-40, 2009.

IMPER, R. R.; LAZLO, G. Handling and shipping of long span bridge beams. **PCI Journal**, v. 32, n. 6, p. 86-101, nov.-dec., 1987.

KRAHL, P. A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas em situações transitórias.** 2014. 208 f. Dissertaçao (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KRAHL, P. A.; LIMA, M. C. V.; EL DEBS, M. K. Recomendações para verificação da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas em fases transitórias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n.6, p. 763-786, dec., 2015.
<https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000600003>

LEBELLE, P. (1959). Stabilité élastique des poutres en béton précontraint a l'égard de déversement lateral. **Ann. Batiment et des Travaux Publics**, 141, 780-830.

LIMA, M. C. V. **Instabilidade lateral das vigas pré-moldadas em regime de serviço e durante a fase transitória.** 1995. 181 f. Dissertaçao (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.

LIMA, M. C. V.; EL DEBS, M. K. Numerical and experimental analysis of lateral stability in precast concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 57, n. 10, p. 635-647, dec, 2005.

<https://doi.org/10.1680/macr.2005.57.10.635>

LIMA, D. F. P. **Avaliação da segurança durante o içamento de vigas pré-moldadas.** 2018. 88 f. Dissertaçao (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MAST, R. F. Lateral stability of long prestressed concrete beams – Part 1. **PCI Journal**, v. 34, n. 1, jan.-feb., 1989.

MAST, R. F. Lateral stability of long prestressed concrete beams – Part 2. **PCI Journal**, v. 38, n. 1, jan.-feb., 1993.

MAST, R. F. Lateral bending test to destruction of a 149 ft prestressed concrete I-beam. **PCI Journal**, v. 39, p.54-62, jul.-aug., 1994.

PASTORE, M. V. F. **Contribuição ao projeto de vigas delgadas de seção “L” de concreto pré-moldado.** 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

PCI Bridge Design Manual, 2nd ed., Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2003.

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

PCI Design Handbook, 6th ed., Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2004.

PLAUT, R. H.; MOEN, C. D. **Theory and applications of the lifting of elastic, doubly symmetric, horizontally curved beams.** Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. Report No. CE/VPI-ST-11/04, dec., 2011.

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.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000612)

RACHID, M.; MORI, D. D. **Instabilidade: conceitos - aplicações na flambagem por flexão.** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Estruturas. São Carlos, 1989.

SANTOS, L. M. **Estado limite último de instabilidade.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 1987.

SCHUH, A. C. (2008) **Behavior of Horizontally Curved Steel I-girders During Lifting.** 2008. Master’s Thesis, University of Texas at Austin, Austin, TX, 2008.

SOUTHWELL, R. V. (1932). On the analysis of experimental observations in problems of elastic stability. **Proceedings of the Royal Society, Series A.**

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.

<https://doi.org/10.1680/istbu.1999.31383>

STRATFORD, T. J.; BURGOYNE, C. J.; TAYLOR, H. P. J. Stability design of long precast concrete beams. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Bridges**, v. 134, p. 159-168, may, 1999.

<https://doi.org/10.1680/istbu.1999.31382>

STRATFORD, T. J.; BURGOYNE, C. J. The toppling of hanging beams. **International Journal of Solids and Structures**, v. 37, n. 26, p. 3569-3589, jun., 2000.

[https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00059-1)

SWANN, R. A.; GODDEN, W. G. The lateral buckling of concrete beams lifted by cables. **The Structural Engineer**, v. 44, p.21-33, 1966.

ZHANG, F. **Lateral stability of long precast prestressed concrete girders during transient load situations**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Barcelonatech, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017.