



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ANDRÉ FONTEBASSI AMORIM SILVA

**INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO USO DE
EQUIPAMENTOS AUXILIARES NO içAMENTO DE VIGAS
PRÉ-MOLDADAS**

Uberlândia, 2021

ANDRÉ FONTEBASSI AMORIM SILVA

**INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO USO DE
EQUIPAMENTOS AUXILIARES NO içAMENTO DE VIGAS
PRÉ-MOLDADAS**

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.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientadora: Dra. Maria Cristina V. de Lima

Co-orientador: Dr. Pablo Augusto Krahl

Uberlândia, 2021

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

S586	Silva, André Fontebassi Amorim, 1995-
2021	INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO USO DE EQUIPAMENTOS AUXILIARES NO içAMENTO DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS [recurso eletrônico] / André Fontebassi Amorim Silva. - 2021.
<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.2021.543 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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 270, PPGEC				
Data:	21 de Setembro de 2021	Hora de início:	09:00 h	Hora de encerramento:	11:20h
Matrícula do Discente:	11912ECV002				
Nome do Discente:	André Fontebassi Amorim Silva				
Título do Trabalho:	Análise numérica de vigas pré-moldadas: Influência do posicionamento e do uso de equipamentos auxiliares de 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, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Jesiel Cunha - FECIV/UFU, Fábio Martin Rocha - ICTE/UFTM e Maria Cristina Vidigal de Lima orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, 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 22/09/2021, às 15:43, 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 23/09/2021, às 07:36, 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 24/09/2021, às 09:56, 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 **3032025** e o código CRC **3506AF98**.

*Dedico este trabalho
aos meus pais João e Maria Rita
e ao meu amigo Luiz Flávio.*

RESUMO

A instabilidade lateral de vigas pré-moldadas durante as fases transitórias é um fenômeno preocupante, considerando a ocorrência de acidentes relatados na literatura técnica. Durante a fase transitória de içamento, a configuração adotada quanto ao acoplamento entre os cabos do guindaste e o elemento estrutural influencia na segurança desse procedimento, devendo ser criteriosa a definição dos equipamentos auxiliares para o manuseio. O objetivo desta pesquisa é analisar numericamente, por meio de simulações realizadas no *software ANSYS*, o comportamento de vigas pré-moldadas com relação à estabilidade lateral, considerando a influência do tipo e posicionamento dos equipamentos auxiliares de içamento. Foram estudadas quatro situações para a disposição do içamento: uma alça em cada extremidade da viga (sem barra rígida), consideração da barra rígida (*yoke*) para içamento acima da face superior da viga, duas alças posicionadas transversalmente na mesa superior (sem barra rígida) e uso de haste metálica disposta abaixo da mesa superior da viga (içamento por hastas). Essas possibilidades de vinculações do equipamento para o içamento são consideradas para três vigas, sendo uma delas simétrica transversal e longitudinalmente, outra com assimetria na seção transversal (parapeito) e a demais com seção transversal variável longitudinalmente. Os resultados mostram que o pior caso se trata do içamento por uma alça sem uso de barra rígida, pois apresentou os maiores valores de ângulo de equilíbrio e quando comparado com o uso de barra rígida, assim como já defendido pela literatura, observou-se menores valores para ângulo de equilíbrio, confirmando que o içamento mais afastado do centro de gravidade da viga é mais seguro. Em contrapartida, concluiu-se que mesmo com o içamento próximo do centro de gravidade, o uso de duas alças posicionadas transversalmente na mesa da viga apresenta os melhores resultados dentre todas as modelagens realizadas. Observou-se também que o içamento por hastas apresentou resultados a favor e contra a segurança e que o comprimento da haste é inversamente proporcional ao resultado de ângulo, sendo a posição mais favorável as mais distantes do centro de gravidade. Por fim, viu-se que em ambos os casos, a configuração do equipamento de içamento é determinante para segurança do içamento, visto que foram identificadas situações de estabilidade e instabilidade por meio da comparação com o ângulo de fissuração numérico ou analítico das estruturas.

Palavras-chave: Instabilidade lateral – Vigas pré-moldadas – Içamento – Fases transitórias – Análise numérica.

ABSTRACT

The lateral instability of precast beams during transitory phases is a worrying phenomenon, considering the occurrence of accidents reported in the technical literature. During the transitory phase of lifting, the configuration adopted for the coupling between the crane cables and the structural element influences the safety of this procedure, and the definition of auxiliary equipment for handling must be judicious. The objective of this research is to numerically analyze, through simulations carried out in ANSYS software, the behavior of precast beams in relation to lateral stability, considering the influence of the type and positioning of auxiliary lifting equipment. Four situations were studied for the lifting arrangement: a handle at each end of the beam (without rigid bar), consideration of the rigid bar (yoke) for lifting above the upper face of the beam, two handles positioned transversely on the upper table (without rigid bar) and use of a metal rod placed below the upper table of the beam (rod lifting). These possibilities of linking the lifting equipment are considered for three beams, one of which is symmetrical transversely and longitudinally, another with asymmetry in the cross section (parapet) and the other with a longitudinally variable cross section. The results show that the worst case is the lifting by a handle without the use of a rigid bar, as it presented the highest values of equilibrium angle and when compared to the use of a rigid bar, as already defended in the literature, smaller values were observed. values for balance angle, confirming that lifting farther from the beam's center of gravity is safer. On the other hand, it was concluded that even with the lifting close to the center of gravity, the use of two handles positioned transversely on the beam table presents the best results among all the modeling carried out. It was also seen that the lifting by rods presented results for and against safety and that the rod length is inversely proportional to the angle result, with the most favorable position being the ones farthest from the center of gravity. Finally, it was seen that in both cases, the configuration of the lifting equipment is crucial for the safety of the lifting, since situations of stability and instability were identified through comparison with the numerical or analytical crack angle of the structures.

Keywords: Lateral instability, precast beams, lifting, transient phases, numerical analysis.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução		
1.1	Considerações iniciais	7
1.2	Objetivos	8
1.2.1	Objetivo geral.....	8
1.2.2	Objetivos específicos.....	9
1.3	Justificativa.....	9
1.4	Metodologia.....	11
1.5	Sumário estruturado	12
Capítulo 2 - Revisão teórica e estado da arte		
2.1	Contextualização	13
2.2	Considerações sobre a instabilidade lateral.....	14
2.3	Principais estudos.....	15
2.4	Limites de normas técnicas	33
Capítulo 3 - Comportamento estrutural do içamento com hastes metálicas		
3.1	Apresentação do capítulo	35
3.2	Equipamentos auxiliares de içamento	35
3.3	Içamento por hastes:definição dos parâmetros.....	38
Capítulo 4 - Modelagem numérica de viga com assimetria na seção transversal		
4.1	Definições preliminares.....	44
4.2	Propriedades geométricas.....	45
4.3	Malha e elementos finitos	46
4.4	Materiais e condições de contorno	48
4.5	Cálculo do ângulo de equilíbrio	49
4.6	Determinação dos parâmetros das análises	51
4.6.1	Içamento por alças.....	51
4.6.2	Içamento por hastes metálicas.....	52
4.7	Análise dos resultados	54
4.7.1	Içamento por alças.....	54
4.7.2	Içamento por hastes metálicas.....	55
4.7.3	Análise geral do caso.....	61
Capítulo 5 - Modelagem numérica de viga com seção transversal variável longitudinalmente		
5.1	Definições preliminares.....	63
5.2	Propriedades geométricas.....	64
5.3	Malha, elementos finitos, materiais e condições de contorno	65
5.4	Determinação dos parâmetros das análises	66
5.4.1	Içamento por alças.....	66
5.4.2	Içamento por hastes metálicas.....	68
5.5	Análise dos resultados	70
5.5.1	Içamento por alças.....	70
5.5.2	Içamento por hastes.....	71
5.5.3	Análise geral do caso.....	75

Capítulo 6 - Modelagem numérica de viga de seção “I” simétrica e análise da segurança

6.1	Definições preliminares.....	77
6.2	Propriedades geométricas.....	78
6.3	Cálculo numérico do ângulo de fissuração no içamento.....	79
6.3.1	Parâmetros de não-linearidade física para a modelagem numérica	79
6.3.2	Definições da modelagem	89
6.3.3	Definição dos materiais	90
6.3.4	Condições de contorno	90
6.4	Cálculo numérico do ângulo de equilíbrio no içamento	91
6.4.1	Malha, elementos finitos, materiais e condições de contorno.....	91
6.4.2	Determinação dos parâmetros das análises	93
6.5	Análise dos resultados.....	95
6.5.1	Ângulo de fissuração.....	95
6.5.2	Ângulo de equilíbrio.....	96
6.5.3	Análise da segurança.....	96

Capítulo 7 - Considerações finais

7.1	Conclusões	99
7.2	Recomendações para trabalhos futuros	100

Referências	102
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A instabilidade lateral de elementos pré-moldados é um fenômeno preocupante que pode ocorrer durante as fases transitórias. Na fase transitória de içamento, deve-se salientar que a configuração adotada para o acoplamento entre os guindastes e os elementos pré-moldados tem total influência na segurança desse procedimento.

A fixação dos cabos de içamento à viga é realizada por meio dos equipamentos auxiliares e observa-se que o uso dos dispositivos da tipologia “alças” e “orifício e haste metálica” são comumente utilizadas. Na Figura 1 (a) observa-se uma viga onde foi utilizado o dispositivo auxiliar de içamento do tipo “alças” e na Figura 1 (b) observa-se uma viga onde foi utilizado o dispositivo auxiliar de içamento do tipo “orifício e haste metálica”.

Figura 1 – Dispositivos auxiliares de içamento: exemplos



Fonte: (a) Secretaria de Obras de Uberlândia (2021); (b) SBN notícias (2018).

O problema da instabilidade lateral foi abordado por vários autores, tais como Mast (1989), Stratford e Burgoyne (1999), Lima (2002), Plaut e Moen (2011), Cojocaru (2012), Germán (2015), Cardoso, Lima e Queiroz (2017), Zhang (2017), Lima (2018), Daura Neto (2020), dentre outros. Todavia, o estudo do comportamento do equipamento “orifício e haste metálica”, mesmo que necessário, não foi abordado, visto que foi notada a aplicação desse equipamento em vários casos reais de içamento de vigas.

Os trabalhos anteriormente citados contribuíram para o desenvolvimento do problema da instabilidade lateral no içamento abordando os parâmetros como: o comprimento dos balanços, o desvio de posicionamento dos dispositivos de içamento, as imperfeições das vigas (curvatura), a inclinação dos cabos de içamento, o comprimento das vigas, a utilização de barra rígida (*yoke*) e o seu comprimento, a esbeltez e a presença de assimetrias no elemento pré-moldado.

Portanto, com base nas pesquisas citadas, têm-se entendimentos sobre o problema da instabilidade lateral que são essenciais para o desenvolvimento de uma pesquisa nessa área. Primordialmente tem-se definido que o comportamento de vigas no içamento se trata de um giro de corpo rígido com flexão bilateral e torsão insignificante. Além disso, sabe-se que o comprimento dos balanços é um dos fatores de maior influência na segurança do içamento, sendo que no caso de viga de concreto armado (sem protensão) o melhor comprimento de balanço é referente a um quarto do vão.

Vale citar também que é entendido que a utilização de uma barra rígida (*yoke*) nos pontos de içamento, responsável por aumentar a distância entre o centro de gravidade da viga e o ponto em torno do qual a viga gira para se manter em equilíbrio, também exerce grande influência na segurança do içamento.

Considerando o exposto, busca-se neste trabalho analisar a instabilidade lateral de vigas pré-moldadas durante o içamento, levando em consideração a influência do tipo de dispositivo auxiliar de içamento “orifício e haste metálica” e as configurações adotadas em projeto para esse dispositivo, sendo essas: a variação do posicionamento ao longo da seção transversal da viga, a variação das dimensões desses dispositivos e a configuração dos cabos metálicos que ligam esses equipamentos aos guindastes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar numericamente o comportamento de vigas pré-moldadas na fase transitória de içamento por cabos, com relação à estabilidade lateral, considerando-se a influência da escolha do tipo e posicionamento dos equipamentos auxiliares de içamento sendo eles: alças ou orifícios com hastes metálicas.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Dentre os objetivos específicos constam:

- Simular numericamente o fenômeno da instabilidade lateral durante o içamento, para obtenção da rotação de equilíbrio de corpo-rígido de vigas pré-moldadas de concreto armado;
- Realizar análises comparativas para verificar o efeito da variação do tipo e posicionamento dos equipamentos auxiliares de içamento;
- Verificar a condição de estabilidade lateral no içamento, utilizando simulação numérica não-linear física e geométrica e fator de segurança.

1.3 JUSTIFICATIVA

A relevância do presente tema está relacionada principalmente com a ocorrência de acidentes durante o içamento de vigas pré-moldadas. Esses acidentes ocorreram devido à instabilidade do elemento estrutural e podem gerar perdas humanas, materiais e atrasos de cronograma. São citados, a seguir, alguns acidentes ocorridos durante o içamento de vigas.

Uma situação que merece ser citada ocorreu no dia nove de fevereiro de 2014, sendo essa marcada pelo acidente durante o içamento de vigas de concreto pré-moldado na obra do Viaduto Xapetuba, na BR-365/MG. No momento em que estava sendo instalada a quarta viga o operador perdeu o controle desta, o que ocasionou a sua colisão com as vigas já instaladas e refletiu no óbito de um funcionário (CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO, 2014). Não foram citados os motivos da perda de controle da estrutura, todavia, este caso retrata a fatalidade que acidentes ocorridos no içamento de vigas podem causar. Na Figura 2 é exposta a situação citada e ressalta-se a utilização de orifício e haste metálica como equipamento auxiliar de içamento.

Figura 2 – Acidente ocorrido na obra do Viaduto Xapetuba



Fonte: Controladoria Geral da União (2014).

Outra situação ocorreu na cidade de Uberlândia-MG, em 2016, na oportunidade em que uma viga de concreto protendido com 28,57 metros de vão e 1,25 metros de altura preparava-se para ser içada. Ainda na fábrica e durante o içamento, rapidamente apresentou deslocamento lateral até que se notasse fissuração em três áreas. Ainda durante o içamento a viga chegou ao colapso e causou danos materiais e de cronograma. A Figura 3 ilustra o acontecimento citado e ressalta-se o uso de alças como equipamento auxiliar de içamento.

Figura 3 – Acidente ocorrido no içamento de viga em Uberlândia-MG



Fonte: *Legran* (2016).

Ademais, ocorreu próximo à Oslot, na Espanha, na construção de uma ponte, um acidente durante o içamento de uma viga. A viga citada era constituída por concreto protendido e possuía dois metros de altura, vão de 45,60 metros, alças posicionadas a dois metros das extremidades e desvios de posicionamento dessas alças na ordem de 12 mm. Antes de ser içada, a viga já apresentava grandes deformações laterais, na ordem dos 90 mm, mas que eram aceitáveis pelos códigos normativos. Ao ser içada as deformações se acentuaram e optou-se pela paralização do içamento e reavaliação da estabilidade da peça. O caso pode ser observado através da Figura 4 e ressalta-se o uso de alças como equipamento auxiliar de içamento.

Figura 4 - Deslocamento lateral acentuado em viga sob içamento - Oslot



Fonte: *Zhang* (2017).

Considerando o exposto, o problema da instabilidade lateral é causado por uma soma de fatores, que podem causar a falha estrutural. Um dos fatores que agravam o problema é a escolha do posicionamento dos pontos de içamento e nos casos observados, nota-se que a escolha do dispositivo auxiliar de içamento foi diferenciado.

Dessa forma, considerando-se que não existe na literatura nenhum tipo de análise para uso de orifício e haste metálica, vê-se a necessidade de analisar a influência da escolha do tipo e posicionamento dos equipamentos auxiliares de içamento e o acoplamento entre estes e o guindaste (com cabos metálicos), considerando que essa escolha é relevante quanto à segurança no içamento. Portanto, propor formas de avaliar a segurança de elementos estruturais durante a fase de içamento é de grande importância, pois, o risco de acidentes nessa situação pode ser diminuído e controlado.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma abordagem teórica do problema, descrevendo o comportamento do uso de orifício e haste como equipamento auxiliar de içamento e expondo informações que irão auxiliar nas simplificações propostas para os modelos numéricos.

Tendo em vista primordialmente a análise da influência dos equipamentos auxiliares de içamento, dois casos de estudo foram definidos e foi realizada, para cada caso, uma análise numérica por meio do *software ANSYS 19.2*, plataforma *workbench*. A análise foi realizada com o objetivo de encontrar o ângulo de equilíbrio (giro do corpo rígido) e os parâmetros utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa são baseados no trabalho de Lima (2018). Foi calculado o ângulo de fissuração analítico, para cada caso, conforme o estudo de Zhang (2017) para discorrer sobre a segurança estrutural de cada situação (simulação) realizada.

Por fim, foi realizado uma análise de segurança de um caso real de içamento, partindo-se de simulações numéricas utilizando o mesmo *software*. Para isso, foi calculado numericamente o ângulo de fissuração da estrutura no içamento e o ângulo de equilíbrio da mesma para que, por meio da comparação entre os dois parâmetros, possa-se discutir sobre a influência dos equipamentos auxiliares de içamento na segurança. Além disso, também foi utilizado, a critério de comparação, o ângulo analítico de fissuração da viga, proposto por Zhang (2017).

1.5 SUMÁRIO ESTRUTURADO

Propõe-se a organização deste trabalho em cinco capítulos, organizados de maneira a tratar separadamente dos diferentes aspectos referentes ao tema proposto.

No *Capítulo 1* apresenta-se uma introdução ao tema, justificativa, os objetivos e a metodologia empregada na pesquisa.

No *Capítulo 2* apresenta-se inicialmente uma contextualização e definições iniciais sobre o tema e, em seguida, o estado da arte, onde são descritos, sucintamente, os principais trabalhos desenvolvidos sobre o tema em estudo, no intuito de compreender a evolução das pesquisas no que se diz respeito a instabilidade lateral. Sendo assim, os fundamentos serão tratados de forma cronológica, no intuito de demonstrar a evolução do estado da arte.

No *Capítulo 3* apresenta-se uma defesa teórica sobre o uso da haste metálica como equipamento auxiliar de içamento, de forma a descrever o comportamento estrutural ocorrido com o uso desse dispositivo e embasar a análise numérica a ser realizada.

Nos *Capítulos 4 e 5* apresentam-se modelagens numéricas referente a duas vigas sob situação de içamento, de forma a analisar a influência que o equipamento auxiliar de içamento apresenta na instabilidade lateral desses elementos.

No *Capítulo 6* apresenta-se uma modelagem numérica de um caso real, buscando-se analisar a influência que o uso de orifício e haste causa na segurança desse caso. Para isso apresenta-se a implementação de um modelo não-linear físico, com base em um experimento realizado por Lima (2002) e modelos numéricos pré-existentes (Biblioteca ANSYS).

No *Capítulo 7* apresenta-se as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde a Revolução Industrial, criou-se o conceito de industrialização, este associado à organização e à produção em série. Nesse contexto, criou-se também o conceito de industrialização da construção, este relacionado com os diversos processos produtivos que antes demandavam um grande esforço manual e passaram a agregar técnicas de mecanização. Uma das técnicas consagradas de industrialização da construção é a pré-moldagem de estruturas de concreto armado.

A pré-moldagem não é uma técnica nova e seu uso é notado desde os primórdios da utilização do concreto armado, visto que, as primeiras peças de concreto armado - o barco de Lambot, (1848) e os vasos de Monier (1849) - foram elementos pré-moldados (EL DEBS, 2017). Todavia, foi no período de reconstrução pós Segunda Guerra mundial que a pré-fabricação foi utilizada intensivamente como artifício de industrialização da construção, considerando a necessidade de se construir em grande escala (BRUNA, 1976).

Com o uso em larga escala da pré-moldagem percebeu-se que quanto menores as peças fabricadas maior seria a dificuldade na execução, visto a grande quantidade de juntas e aumentar tamanho das peças seria uma opção para garantir maior qualidade e rapidez na execução. Dessa forma, esses elementos passaram a se impor com grande rapidez pela Europa (BRUNA, 1976).

Ao longo do tempo, foram propostos vãos cada vez maiores e as dimensões das peças de concreto cresceram até o ponto de serem limitadas pela capacidade dos equipamentos de transporte e içamento. Visto essa limitação, notou-se a necessidade de dimensionamento de peças mais leves e a técnica utilizada foi a utilização de materiais de construção resistentes com seções transversais esbeltas.

O acontecimento de acidentes nas fases transitórias de elementos pré-moldados, principalmente causada pela esbeltez dos elementos, causou preocupação na comunidade científica e a instabilidade de vigas pré-moldadas ganhou atenção de pesquisadores. Uma das primeiras

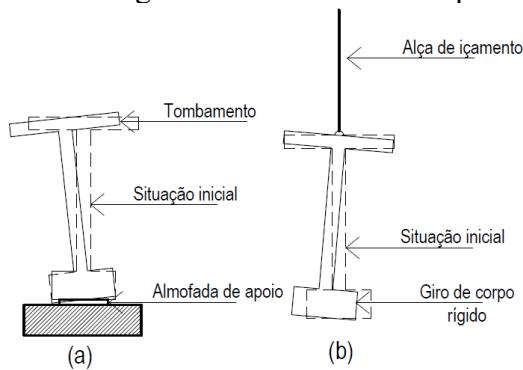
proposições analíticas notáveis relativa à estabilidade de vigas de concreto pré-moldado foi realizada por Lebelle em 1959.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INSTABILIDADE LATERAL

Entende-se que durante as fases transitórias, destacando-se a fase de içamento, uma estrutura pré-moldada está propícia a sofrer o fenômeno da instabilidade lateral. De acordo com Trahair (1993), a instabilidade é definida como um modo de falha em que ocorre uma deformação repentina do elemento na direção, ou em um plano normal à direção, da atuação de forças e momentos.

Sendo assim, a instabilidade lateral pode ocorrer em elementos pré-moldados no momento do içamento e no momento do posicionamento sobre almofadas de apoio. O comportamento descrito pode ser observado na Figura 5, onde em (a) vê-se o caso de tombamento de viga sobre almofada de apoio e em (b) vê-se o caso de rotação de equilíbrio de viga no momento do içamento. Considerando que esta pesquisa se concentra nos casos de içamento, maior destaque é dado à essa situação.

Figura 5 – Instabilidade de vigas sobre almofadas de apoio e durante o içamento



Fonte: O autor.

Portanto, o problema da instabilidade lateral ocorrido no içamento de vigas tem como efeitos predominantes o giro de corpo rígido e a flexão bilateral. A torção também ocorre, mas seu efeito é insignificante (LIMA, 2002). Entende-se que quanto menor o giro de corpo rígido ocorrido na viga, menor é o risco de instabilidade lateral, visto que, geralmente não é previsto nos cálculos de segurança que haja flexão bilateral.

As pesquisas se concentram em determinar os fatores causadores de instabilidade, a magnitude com que cada fator interfere na situação e os meios de controlar essas variáveis. Considerando que o posicionamento dos cabos de içamento influencia diretamente na segurança do elemento

estrutural, entende-se que a escolha do equipamento auxiliar de içamento também interfere no comportamento da viga.

De acordo com o esquema definido por Mast (1989), durante o içamento de vigas, o problema de instabilidade é causado pelos efeitos gerados no eixo de menor inércia da seção, e devido a isso, menores valores de ângulo de equilíbrio do corpo rígido são aliados na segurança nessa fase transitória.

2.3 PRINCIPAIS ESTUDOS

Com base no exposto, é organizado a seguir, em ordem cronológica, as produções mais significativas quanto ao estudo da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas, com destaque à fase transitória de içamento.

De acordo com Swann e Godden (1966) um cenário crítico do fenômeno da instabilidade lateral é a instabilidade por giro total como corpo rígido e flexão bilateral, sem torção. Portanto, é importante que se encontre uma metodologia capaz de lidar satisfatoriamente com o grande número de parâmetros que influenciam a estabilidade estrutural.

No trabalho de Swann e Godden (1966) primeiramente foi apresentado um procedimento numérico simplificado para determinação da carga crítica de flambagem e posteriormente foram apresentados resultados de duas séries de testes em vigas suspensas por cabos, a primeira série em vigas de alumínio e a segunda em vigas de concreto protendido. A análise numérica do modo de ruptura foi feita dividindo-se a viga em uma pequena quantidade de trechos, assim, o problema da viga curva foi simplificado. Com essa pesquisa concluiu-se que o procedimento numérico proposto foi eficiente, considerando a comparação com dados experimentais, e que içar as vigas à um ponto mais afastado do centro de gravidade causa influência positiva significativa nos valores de carga de flambagem.

Imper e Laszlo (1987) analisaram o fenômeno da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto e concluíram que o fator mais agravante do caso são as imperfeições de fabricação das vigas, tais como a excentricidade lateral inicial, desvio de posicionamento das alças de içamento e variação da temperatura entre as faces da viga. Tais imperfeições, quando a viga está em suspensão, fazem com que a mesma sofra flexão bilateral e desloque progressivamente em relação ao eixo de menor inércia.

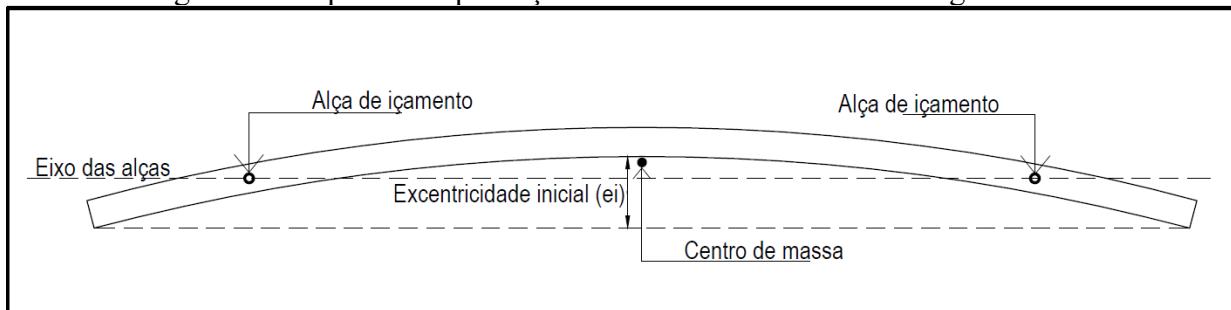
Os autores concluíram que a distância de posicionamento das alças de içamento são o fator que mais contribui para a segurança no içamento e apontaram também que aumentar o módulo de elasticidade é uma opção, todavia é onerosa e de pouco influência. Além disso, descreveram que o içamento com o uso de contraventamento é bastante limitado (IMPER E LASZLO, 1987).

Mast (1989, 1993 e 1994) propôs estudos analíticos e experimentais para descrever o comportamento instável de vigas pré-moldadas na situação de içamento e de apoio. Esses estudos foram de grande importância e são usados como referência para a maioria dos estudos dessa linha de pesquisa. Este autor introduziu o conceito de ângulo de equilíbrio da viga e propôs a utilização de um fator de segurança para quantificar o grau de instabilidade dessas estruturas.

De acordo com Mast (1989) os estudos clássicos se concentravam em analisar o comportamento de vigas com rotação restringida em seus suportes, onde o comportamento crítico se tratava da flambagem que ocorre no meio do vão, onde a viga se torce em relação aos apoios. Todavia, o autor cita que para vigas de concreto pré-moldado do tipo “I”, principalmente, a rigidez à torção é elevada se comparada com vigas metálicas e em situação de serviço, quando os apoios restringem a rotação, a flambagem descrita raramente é crítica.

Mast (1989) descreve que no procedimento de içamento de vigas não há a presença de apoios horizontais, o que acarreta uma liberdade de giro. Dessa forma, se a viga fosse perfeitamente reta, ela seria içada aprumada e não haveria rotação, pois seu centro de massa coincidiria com o alinhamento das alças. Todavia, as vigas podem apresentar imperfeições, tanto na sua geometria (excentricidade inicial) quanto no posicionamento das alças e quando o centro de massa da viga não coincide com o eixo das alças, a viga está fora de equilíbrio e sofre giro da seção transversal até atingir o equilíbrio ou até a ruptura. A Figura 6 ilustra o fenômeno de não coincidência entre eixo das alças e centro de massa do corpo.

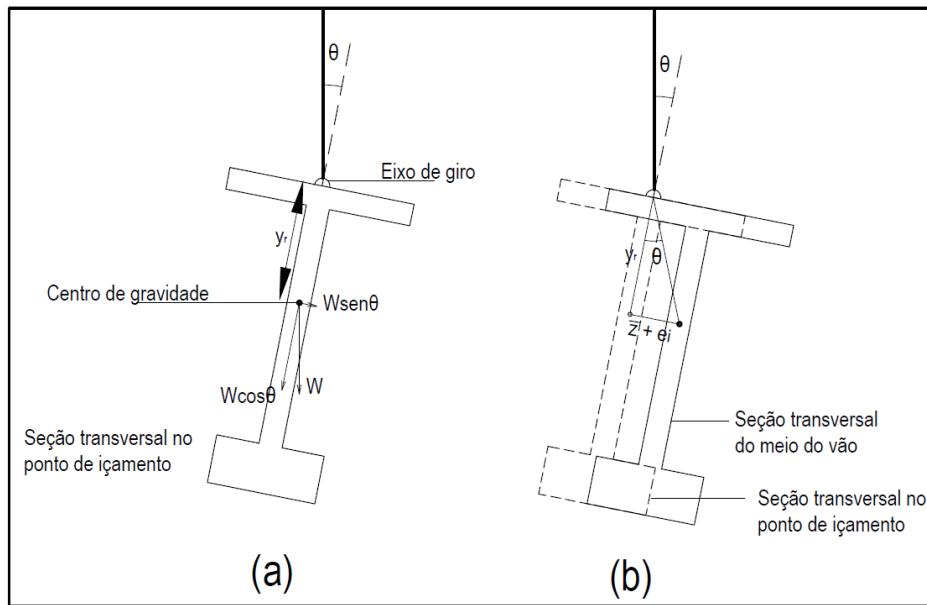
Figura 6 – Esquema: imperfeição lateral e desvio do centro de gravidade



Fonte: O autor.

Mast (1989) também descreve que o giro causa efeitos no eixo de menor inércia da seção e, consequentemente, um deslocamento lateral (\bar{z}). Considerando o exposto, o peso próprio que antes possuía apenas influência no eixo de maior inércia, sofre uma decomposição em dois eixos, conforme ilustrado na Figura 7 (a).

Figura 7 – Esquema: ângulo de equilíbrio no içamento de vigas



Fonte: O autor.

Com base na Figura 7 (b), conclui-se que as variáveis que influenciam no ângulo de equilíbrio da viga “ θ ”, são as seguintes:

e_i = Excentricidade inicial

\bar{z} = Deslocamento lateral

y_r = Distância vertical do centro de gravidade até o eixo de giro

W = Peso próprio

Ainda considerando a Figura 7 (b), observa-se o fator “ $\bar{z} + e_i$ ”. Este é correspondente à distância entre o centro de gravidade da seção transversal do meio do vão e o centro de gravidade da seção transversal do ponto de içamento. O autor considerou que a viga sofre um comportamento iterativo, onde inicialmente a excentricidade inicial causa giro na seção, em seguida decomposição de forças, deflexão lateral e acréscimo no giro, e o processo se repete até o equilíbrio ou até a falha. Dessa forma, o autor propôs a formulação dada pela Equação 1, considerando a aproximação para pequenos ângulos ($\theta = \text{sen}\theta = \tan\theta$).

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

Observa-se na Equação 1 a interdependência entre duas variáveis que se deseja obter, sendo elas, o ângulo de equilíbrio e o deslocamento lateral. Dessa forma, o autor propôs o cálculo de um deslocamento teórico, conforme a Equação 2. Considera-se que β_y é obtido através da equação da linha elástica da viga em questão, aplicando-se todo o peso próprio no eixo de menor inércia.

$$\bar{z}_0 = 0,64 \beta_y \quad (2)$$

Com base na Equação 1, e sabendo-se que θ_i se trata do ângulo de rotação inicial (causado apenas pela excentricidade inicial), percebe-se que quando \bar{z}_0 aproxima-se de y_r , o denominador aproxima de zero e o multiplicador se torna muito alto. Quando \bar{z}_0 é igual a y_r , a viga é totalmente instável, mesmo que não haja imperfeições iniciais. Esse fenômeno representa o limite crítico para estabilidade à flambagem lateral.

Considerando esse fato, Mast (1989) propôs a adoção de um fator de segurança contra a falha por instabilidade lateral, inicialmente para uma viga sem imperfeições iniciais, conforme Equação 3, e posteriormente, adotando-se essas imperfeições, propôs as formulações dadas pelas Equações 4 e 5, considerando que, deve ser adotado o menor resultado encontrado entre elas.

$$FS = \frac{y_r}{z_0} \quad (3)$$

$$FS = \frac{y_r}{\bar{z}_0} \left(1 - \frac{\theta_i}{\theta_{max}}\right) \quad (4)$$

$$FS = \frac{\theta_{max}}{\theta_i} \left(1 - \frac{\bar{z}_0}{y_r}\right) \quad (5)$$

Considerando-se que:

FS = Fator de segurança

θ_i = Ângulo de rotação inicial

θ_{max} = Ângulo de rotação crítico

Mast (1989) define ângulo crítico como o ângulo de rotação máximo que a viga atinge até a ruptura. Uma abordagem conservadora para calculá-lo é através do cálculo da máxima flexão biaxial, que produz uma tensão no canto superior igual ao módulo de ruptura. O valor mais preciso de θ_{max} foi destacado como necessidade de estudos futuros.

Mast (1989) ainda apresentou recomendações de como promover a estabilidade, sendo essas: distanciar os pontos de içamentos das extremidades da viga, anexar uma estrutura (*yoke*) de forma a aumentar a distância entre o eixo de giro e o centro de gravidade da viga, aumentar o módulo de elasticidade do concreto, usar reforços temporários que restrinjam a flambagem lateral e modificar a seção transversal da viga.

Considerando que o primeiro estudo de Mast (1989) se resumiu à análise de instabilidade antes do momento de fissuração, onde o máximo ângulo de rotação era limitado pela máxima tensão de tração das fibras superiores, em seu segundo estudo, Mast (1993) acrescentou o estudo do processo de fissuração até a ruptura.

Para isso, 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) conforme dado pela Equação 6.

$$FS_{fiss} = \frac{c_r}{c_a} = \frac{y_r \theta_{fiss}}{\bar{z}_0 \theta_{fiss} + e_i} \quad (6)$$

Considerando que:

FS_{fiss} = Fator de segurança contra fissuração

θ_{fiss} = Ângulo de inclinação no qual se espera a fissuração

Com base nessa formulação, Mast (1993) propôs a Equação 7 para encontrar o máximo fator de segurança contra ruptura, considerando que as variáveis θ_{rup} e \bar{z}_0^{rup} são apresentadas nas Equações 8 e 9.

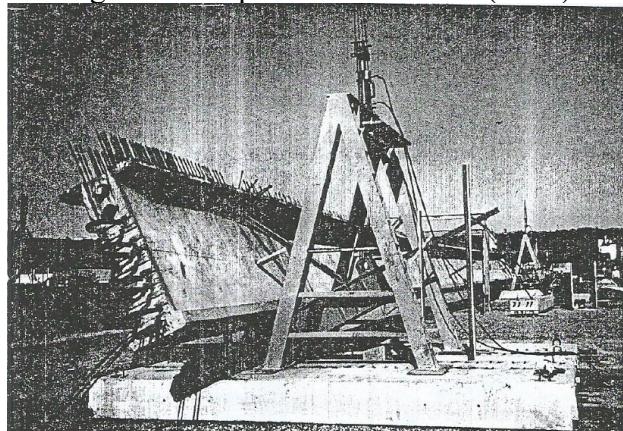
$$FS_{rup} = \frac{y_r \theta_{rup}}{\bar{z}_0^{rup} \theta_{rup} + e_i} \quad (7)$$

$$\theta_{rup} = \sqrt{\frac{e_i}{2,5 \bar{z}_0}} \quad (8)$$

$$\bar{z}_0^{rup} = \bar{z}_0 (1 + 2,5 \theta) \quad (9)$$

Em seu terceiro estudo, Mast (1994) apresenta um ensaio de uma viga de concreto protendido de 45,4 metros de comprimento e seção “I” de 1,87 metros de altura. A viga foi submetida à flexão lateral até a sua ruptura, visto que foi inclinada gradualmente na direção de sua imperfeição inicial. O procedimento pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Experimento de Mast (1994)



Fonte: Mast (1994).

Os testes demonstraram que a viga apresentou carga referente à fissuração superior à carga teórica, não tendo sido notado nenhum sinal visível de fissuração após a retirada da carga lateral. Visto isso, o ângulo de inclinação observado até a ruptura foi bastante superior ao valor calculado analiticamente. Observou-se fissuração na mesa superior da viga quando ângulo de rotação se encontrava a 32° e com base no exposto, conclui-se que o estudo analítico de Mast (1994) encontra-se a favor da segurança e que haveria a necessidade de análises mais refinadas que adicionem outros parâmetros de influência ao caso.

Lima (1995) confirmou, através de uma análise analítica em regime elástico-linear, que geralmente o comportamento das vigas durante o regime de serviço não se apresenta em situações críticas de perda de estabilidade lateral e que na fase transitória de suspensão sem balanços, verifica-se situações de flambagem lateral. Chegou-se a essa conclusão por meio do cálculo da relação RPC, ou seja, foi realizado o cálculo da carga crítica e o resultado foi comparado com a carga do peso próprio e, dessa forma, em algumas situações de içamento a relação RPC foi contra a segurança, entretanto, em todas as simulações em fase de serviço apresentaram uma relação bastante a favor da segurança, maiores que 21 vezes.

Ainda, Lima (1995) analisou, na fase transitória, a variação das distâncias no posicionamento dos pontos de içamento, em relação às extremidades das vigas. Nesse caso, a presença de balanços no içamento tem um efeito positivo, tanto para vigas protendidas, quanto para vigas sem protensão, porém, o comprimento dos balanços das vigas protendidas são geralmente pequenos.

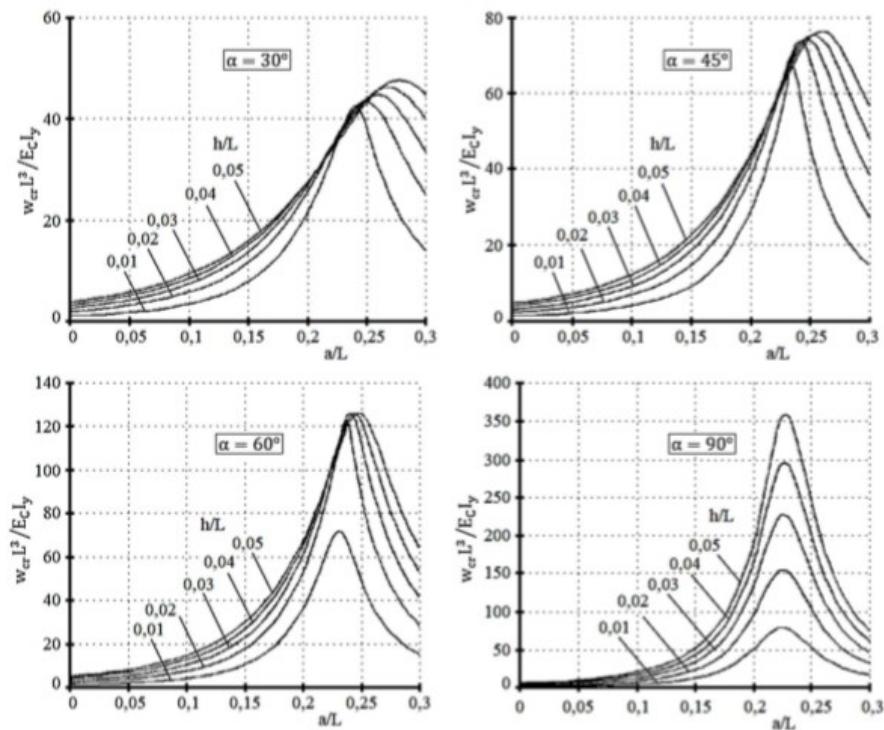
Lima (1995) conclui que o estudo em regime elástico-linear possibilita como uma primeira aproximação, o cálculo da carga crítica de instabilidade, todavia, as condições reais da viga não

são representadas, uma vez que o problema da instabilidade lateral deve ser tratado levando-se em consideração as deformações da viga, o surgimento de fissuras e o comportamento não linear dos materiais.

Stratford e Burgoyne (1999) realizaram o estudo do içamento de vigas de concreto, considerando que o comportamento de vigas longas e pesadas pode ser representado por uma rotação de corpo-rígido em regime linear-elástico com rigidez constante combinado com o efeito dos deslocamentos em relação ao eixo de menor inércia. O problema foi tratado analiticamente e numericamente utilizando como simplificação a não consideração efeitos de torção no elemento.

As análises simplificadas mostraram os resultados de comportamento dos elementos estruturais através da formulação de gráficos. Analisando-se os gráficos propostos, conforme Figura 9, tem-se as seguintes conclusões: tanto maior o fator “ h/L ” menor a carga crítica da estrutura, comprimentos de balanço (a/L) na ordem dos 0,2 a 0,25 foram os com maiores valores de carga crítica e por fim, a configuração de içamento com cabos retos é a que apresenta maior carga crítica e se comparado com a inclinação de cabos de 30° há uma queda nos valores de carga crítica de aproximadamente 87 %.

Figura 9 – Relação entre carga crítica, esbeltez, comprimento dos balanços e inclinação dos cabos de içamento



Fonte: Stratford e Burgoyne (1999)

Lima (2002) apresenta um estudo numérico e experimental do comportamento não-linear físico de vigas de concreto armado e protendido sob ação conjunta de torção, flexão bilateral e força axial. No estudo numérico foi feita a implementação de um programa computacional que realizou a análise da aplicação de alguns modelos numéricos, considerando o grau de solicitação da estrutura seja por torção ou flexão lateral.

O estudo experimental foi realizado com a moldagem em laboratório de duas vigas longas e esbeltas de concreto armado, em escala reduzida, na proporção 1:2, com comprimento de 652 centímetros e base e altura da seção transversal de 2 e 50 centímetros respectivamente. O programa experimental desenvolvido teve o objetivo de simular o comportamento de vigas longas e esbeltas sob flexão bilateral e torção e a carga do experimento se resumiu ao peso próprio.

Lima (2002) concluiu pelo programa experimental que, de fato, a torção é muito pequena no comportamento geral e que a flexão lateral é predominante, em virtude da baixa rigidez lateral das vigas esbeltas. Foi reforçado, ainda, que a definição do comprimento dos balanços é muito importante, uma vez que o mesmo pode criar um efeito estabilizante ou instabilizante no comportamento geral.

Plaut e Moen (2011) desenvolveram um estudo cujo objetivo principal foi obter soluções analíticas para forças internas, deslocamentos e momentos que agem em vigas metálicas e pré-moldadas de concreto, com curvatura lateral, quando expostas a uma situação de içamento por dois cabos. A intenção do desenvolvimento do estudo é a criação de métodos de cálculo para auxiliar os projetistas.

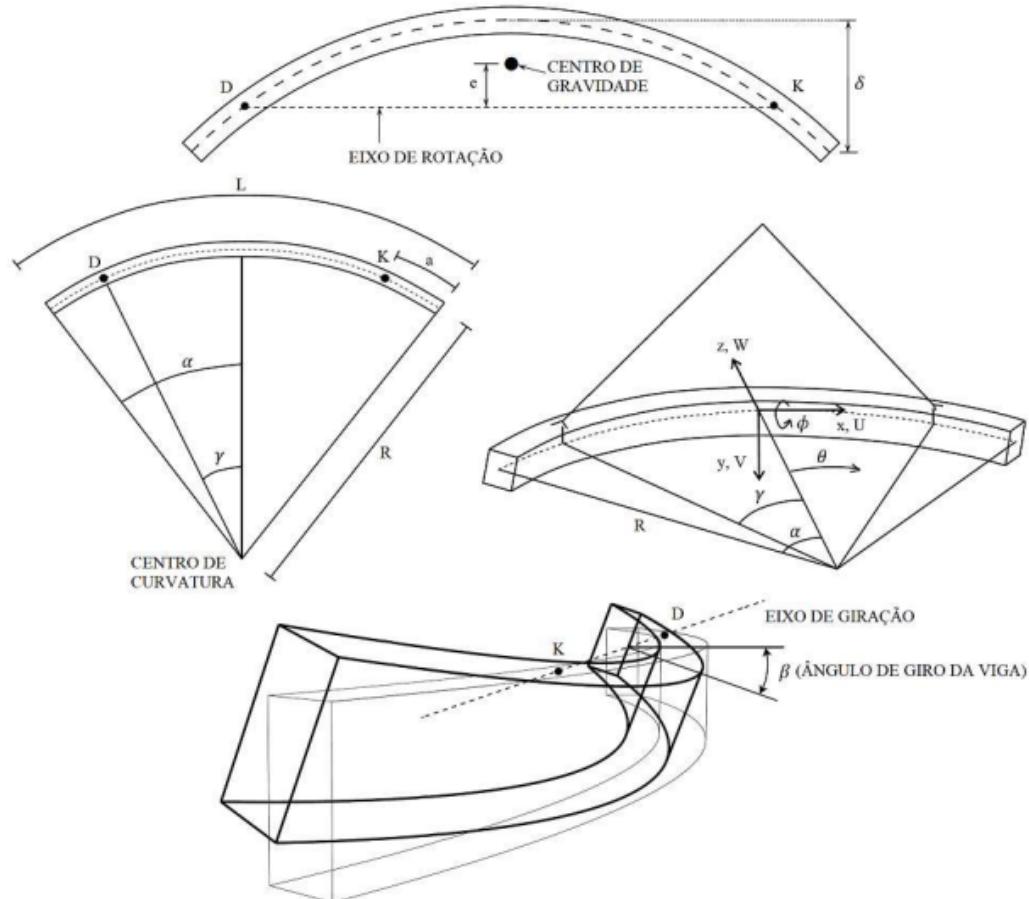
Como parâmetros de estudo, foram feitas as seguintes considerações: a viga é assumida sendo curvada lateralmente em forma de círculo, as dimensões da seção transversal são pequenas se comparadas com o raio de curvatura, a seção transversal é uniforme e duplamente simétrica, o centro de gravidade coincide com o centro de cisalhamento, o material é homogêneo e elástico-linear e as deformações são pequenas. Além disso foram desconsiderados a distorção da seção transversal em um mesmo plano, a deformação por cisalhamento ocorrida na seção de meio de vão e tensões devido a curvatura, protensão ou tensão residual (PLAUT E MOEN, 2011).

Quanto ao içamento, foi considerado realizado por dois cabos, locados simetricamente em relação ao centro do vão. Os cabos foram considerados verticais ou simetricamente inclinados,

e conectados na face superior da viga, ou a uma distância fixa acima desta, ao longo do eixo vertical (PLAUT E MOEN, 2011).

O problema é estaticamente determinado e considera-se o eixo de simetria passando pelo centroide da seção transversal. A Figura 10 apresenta a configuração da viga e em sequência estão organizados os parâmetros geométricos mostrados.

Figura 10 – Parâmetros geométricos da viga curva



Fonte: Adaptado de Plaut e Moen (2011).

Os parâmetros adotados são descritos a seguir:

γ = ângulo associado ao ponto de içamento;

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

α = ângulo associado à extremidade da viga no içamento;

β = ângulo de giro da viga;

ϕ = ângulo de torção da viga;

δ = excentricidade da viga medida entre o meio do vão e as extremidades;

ψ = inclinação dos cabos de içamento (em relação ao eixo vertical);

e = distância horizontal entre o centro de gravidade e o eixo de giro;

R = Raio de curvatura do arco formado;

U = deslocamento ao longo do comprimento;

V = deslocamento na direção do eixo de menor inércia;

W = deslocamento na direção do eixo de maior inércia.

Com base nos parâmetros citados, foram propostas uma série de equações. As conclusões encontradas foram: a localização dos pontos de içamento são cruciais na determinação do ângulo de giro e deformações da viga e a rotação total da seção transversal depende do ângulo de giro do corpo rígido, do ângulo de torção e da localização da análise (PLAUT E MOEN, 2011).

Para a viga básica analisada, se os balanços estiverem localizados à quinta parte do comprimento da viga, o ângulo de giro e de torção serão bem pequenos. Para vigas pretendidas, não é possível usar um valor muito alto de balanço, devido à tensão excessiva no topo da viga. Cargas laterais de vento foram desconsideradas, visto que o içamento é executado geralmente quando as cargas de vento não são significativas (PLAUT E MOEN, 2011).

Cojocaru (2012) analisou a influência da excentricidade lateral inicial de vigas pré-moldadas, para isso, ele realizou a análise quantitativa dos desvios ocorridos no meio do vão realizando, portanto, a aferição desse parâmetro em 128 vigas, produzidas por quatro fábricas diferentes, padronizadas e usualmente utilizadas na construção de pontes e viadutos. Além disso, também foram realizadas aferições relacionadas à excentricidade de posicionamento das alças de içamento em 10 vigas.

O intuito do estudo foi comparar os valores aferidos com as normas técnicas existentes e indicar se usualmente esses valores são cumpridos. Os limites utilizados foram de acordo com o PCI e, segundo o autor, apenas 18 % das vigas não apresentaram valores aceitáveis. Ele ainda citou que nos ambientes analisados, a influência da temperatura era bastante pequena e que em casos de maior incidência desse fator poderia ocorrer efeitos piores (COJOCARU, 2012).

Quanto à excentricidade das alças, concluiu-se que o efeito é maior quando a excentricidade dos cabos é do mesmo lado, e, visto isso, é importante que essa excentricidade seja considerada para os dois lados. Ainda, o autor realizou uma análise analítica baseando-se no método de Paut e Moen (2011), considerando dessa vez a situação de vigas com simetria em apenas uma direção, visto que, como citado, a maioria das vigas utilizadas seguem esse padrão. Concluiu-

se que o acréscimo de dimensão na mesa inferior influencia positivamente no equilíbrio da viga (COJOCARU, 2012).

Krahl (2014) verificou a estabilidade de vigas pré-moldadas de concreto nas situações transitórias de içamento, transporte e pré-serviço. O método utilizado foi baseado nos cálculos de carga crítica, momento crítico de instabilidade lateral e na determinação de fatores de segurança. Dessa forma, foram apresentados exemplos numéricos e realizou-se análises paramétricas com o objetivo de propor limites de segurança.

Krahl (2014) concluiu, segundo os resultados das suas análises paramétricas, que os limites das normas atuais são conservadores na verificação de vigas retangulares e geralmente contra a segurança em vigas “I”. Portanto, os códigos necessitam de novos limites de esbeltez para se atualizarem quanto a realidade dos materiais utilizados na fabricação de vigas e destacou-se a necessidade de diferença entre limites para variados tipos de seção.

Gaykar e Solanki (2014) realizaram um estudo numérico e analítico a respeito do içamento de vigas de concreto, utilizando o programa computacional ABAQUS. Os autores trabalharam com vigas PCI Bulb Tee 77 in e AASHTO tipo IV, protendidas e sem protensão, e compararam os resultados encontrados com as formulações de Plaut e Moen (2013).

Para vigas sem protensão, observou-se que à medida que se posiciona as alças de içamento distante da extremidade, as tensões de compressão no topo e as tensões de tração na base sofrem redução. Já para vigas protendidas, o comportamento é oposto, pois a protensão gera um momento de flexão negativo e, portanto, há tração no topo e compressão na base (GAYKAR E SOLANKI, 2014).

Dessa forma, os autores citados também se prenderam à análise dos comprimentos dos balanços no içamento. Em suas análises, concluíram que, para uma viga protendida as alças de içamento devem estar afastadas da extremidade a uma razão a/L (balanço/comprimento) de no máximo 0,25, para que as tensões estejam abaixo dos limites permitidos (GAYKAR E SOLANKI, 2014).

Krahl, Lima e El Debs (2015) encontraram, por modelos numéricos, limites de esbeltez de vigas pré-moldadas em fases transitórias e compararam com algumas legislações vigentes, sendo essas: Eurocode 2, ABNT NBR 9062, ACI 318-02, *Fib Model Code*, BS:8110-1 e ABNT NBR 6118. Além disso, deve-se citar que foram realizadas as análises em seções

transversais retangulares e seção I. Baseado nos resultados das análises paramétricas é relevante considerar que foram alcançados diferentes valores de esbeltez para vigas de seções transversais diferentes. Também se observou que, para os casos analisados, para seções I, apenas o *Fib Model Code* atende aos limites de esbeltez encontrados.

Germán (2015) realizou uma análise paramétrica numérica, onde avaliou seções transversais de vigas simétricas usadas comercialmente. Foram envolvidos na análise: 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.

O autor 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 à 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.

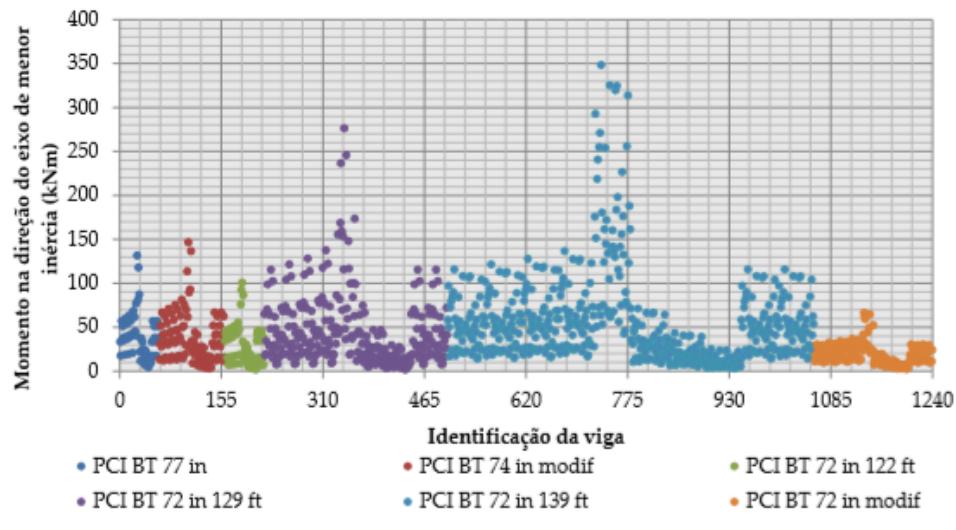
Ele também concluiu que mover os pontos de içamento para o interior da viga reduz expressivamente o ângulo de rotação da mesma, além de diminuir o momento fletor devido ao peso próprio. O aumento nos valores de f_{ck} não tem efeito quanto ao ângulo de rotação inicial, mas gera um menor ângulo de rotação total e 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 redução no comprimento crítico da viga (GERMÁN, 2015).

Por fim, Germán (2015) conclui que a rotação inicial devido ao deslocamento lateral diminui quando a altura das alças de içamento é maior e, além disso, garante às vigas a possibilidade de alcançar maiores vãos. 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. O autor destacou o importante papel da rigidez, comentando que a baixa rigidez lateral das vigas é o principal limitante para que as mesmas tenham garantida a sua estabilidade lateral.

Cardoso (2017) realizou a análise do posicionamento de alças de içamento em 6 tipos de seção transversal de viga de concreto. Foram feitas neste trabalho várias simulações e determinação

de esforços e deslocamentos utilizando a planilha *VT Lifting Analysis* (2013). Foram analisados comprimento dos balanços, inclinação dos cabos e desvio no posicionamento dos pontos de içamento. No total, foram obtidos resultados, os quais foram aglomerados a fim de se conhecer o comportamento geral dos casos analisados conforme Figura 11.

Figura 11 – Resultados de momento fletor no eixo de menor inércia



Existe uma tendência no comportamento de cada conjunto de vigas no içamento, onde cada conjunto de vigas apresentou um valor máximo de momento fletor no eixo de menor inércia que corresponde à situação verificada como a mais crítica, sendo esta a suspensão sem balanços em vigas com maiores imperfeições iniciais (CARDOSO, 2017).

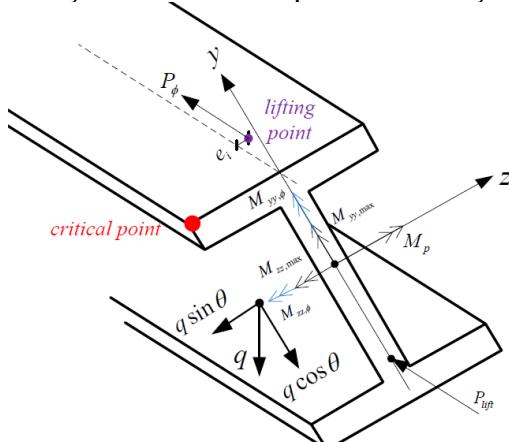
Por fim, as análises realizadas no içamento indicaram que os esforços e deslocamentos na direção da menor inércia são significativos e preocupantes para a integridade física e estabilidade da viga nas fases transitórias. Ainda levando-se em conta a baixa rigidez das vigas no eixo de menor inércia, os efeitos podem ser sentidos ainda mais fortemente quando não são adotados balanços ou utilizando-se cabos inclinados no içamento (CARDOSO, 2017).

Cardoso, Lima e Queiroz (2017) avaliaram a influência de variáveis adotadas no içamento de vigas de concreto pré-moldado. Conhecendo as características mecânicas e geométricas de vigas padronizadas e também o valor, medido em campo, de suas imperfeições iniciais, analisaram-se: esforços, deslocamentos e rotações, para diferentes comprimentos de balanço e inclinação dos cabos de içamento, utilizando a planilha eletrônica *VT Lifting Analysis* (2013). As análises mostraram que a suspensão na ausência de balanços interfere consideravelmente nos esforços, deslocamentos e rotações. Além disso, observou-se que a utilização de cabos retos

é aconselhada, visto que, essa configuração favorece uma diminuição dos esforços de compressão na viga, se comparado com a utilização de cabos inclinados.

Zhang (2017) realiza um estudo analítico baseado no modelo de Mast (1989). Ela negligencia o efeito da torção, por ser considerado muito pequeno, e considera o caso como um problema de flexão lateral simples e equilíbrio. Para isso, é realizado o levantamento de tensões atuantes no ponto crítico da seção transversal, seção esta, considerada no canto superior esquerdo conforme mostrado na Figura 12. Foram consideradas as seguintes solicitações: peso próprio, força de protensão e esforço causado pela inclinação dos cabos de içamento. As componentes utilizadas podem ser identificadas na Figura 12.

Figura 12 – Forças e momentos aplicados na seção transversal



Fonte: Zhang (2017).

Dessa forma, foi calculada a fórmula da tensão de tração atuante no ponto crítico e igualada à resistência característica de tração do concreto. Com a utilização da simplificação para pequenos ângulos e organização da equação, o ângulo de inclinação da viga foi isolado e foi denominado ângulo crítico, por ser o ângulo encontrado no momento em que a tensão de tração se iguala à resistência do concreto à tração, conforme se pode observar na Equação 10.

$$\theta_{cr} = \left[f_{ctm+} \frac{(P_{lift} + P_\phi)}{A_c} - \frac{M_p(h - y_{cg})}{I_{zz}} + \frac{(M_{zz,max} + M_{zz,\phi})(h - y_{cg})}{I_{zz}} - \frac{M_{yy,\phi}b_1}{2I_{yy}} \right] \frac{16I_{yy}}{b_1 q l_a^2} \quad (10)$$

Considerando que:

P_{lift} = Força de compressão longitudinal causada pela protensão.

P_ϕ = Força de compressão longitudinal representada pela componente horizontal da força causada pela inclinação dos cabos de içamento.

M_p = Momento causado pela protensão.

$M_{zz,max}$ = Componente de momento em torno do eixo z, causado pelo peso próprio.

$M_{yy,max}$ = Componente de momento em torno do eixo y, causado pelo peso próprio.

$M_{zz,\varphi}$ = Componente de momento no eixo z, causado pela inclinação dos cabos.

$M_{yy,\varphi}$ = Componente de momento no eixo y, causado pela inclinação dos cabos.

A_c = Área da seção transversal.

I_{zz} = Momento de inércia no eixo z.

I_{yy} = Momento de inércia no eixo y.

h = Altura da seção transversal

y_{cg} = Distância do centro de gravidade até o eixo z.

$\frac{b_1}{2}$ = Distância do centro de gravidade até o eixo y.

l_a = Distância longitudinal entre os pontos de içamento.

f_{ctm} = Resistência característica do concreto à tração.

Nessa formulação, o efeito favorável do peso próprio dos balanços foi negligenciado e o ângulo crítico calculado se resume ao ângulo de fissuração, considerando-se que após o início da fissuração até a ruptura a viga perde rigidez, mas sofre uma parcela de giro. Conclui-se então que esse estudo se encontra conservador quanto à segurança.

Por conseguinte, Zhang (2017) usou o fator de segurança proposto por Mast (1989), descrito pela Equação 7, considerando a estrutura segura nos casos em que o resultado se mostrar maior que 1. Para o cálculo desse fator de segurança, foram consideradas as Equações 11, 12 e 13.

$$y_r = h + h_{lift} - y_{cg} - \delta_G \quad (11)$$

$$e_i = e_o + \frac{2f}{3} \quad (12)$$

$$z_0 = \frac{q}{12lEI_{yy}} \left(\frac{1}{10} l_a^5 - a^2 l_a^3 + \frac{5}{6} a^5 \right) \quad (13)$$

Considerando que:

h_{lift} = Acréscimo de altura no ponto de içamento (barra rígida/yoke).

a = Comprimento do balanço.

e_o = Excentricidade lateral dos pontos de içamento.

f = Excentricidade inicial da viga.

Seguindo sua proposição analítica, Zhang (2017) realiza um estudo paramétrico, com o objetivo de analisar as possibilidades de ruptura em função de cada fator, sendo esses: geometria da

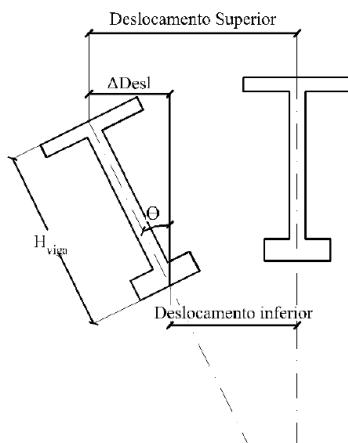
seção transversal, comprimento da viga, posicionamento dos pontos de içamento (balanços), excentricidade inicial devido às imperfeições e resistência do concreto.

Zhang (2017) conclui que as normas atuais levam em consideração, quando à instabilidade durante o içamento, apenas a influência da geometria da viga e que outros fatores, tais como o módulo de elasticidade, protensão e resistência do concreto são de grande importância na análise. Além disso, concluiu que a mesa inferior da seção transversal influencia com muito maior grandeza na estabilidade da viga.

Por fim, Zhang (2017) propõe fórmulas simplificadas para checar e projetar estruturas pré-moldadas quanto à instabilidade lateral durante as operações de içamento e reitera que esse equacionamento poderia ser utilizado como base para integrar futuras normas, visto que, como já citado, ela considera os códigos atuais deficientes para tratar da instabilidade lateral.

Lima (2018) realizou uma pesquisa, onde propôs a análise da instabilidade lateral, por abordagem numérica, utilizando o software ANSYS 18.1. Inicialmente ele propôs uma modelagem que conseguisse tratar o problema do içamento pelo método dos elementos finitos, considerando que, por se tratar de instabilidade, o problema se configura como hipostático e o método dos elementos finitos não consegue lidar com esse tipo de situação. Dessa forma, foram medidos os deslocamentos verticais, no meio do vão, tanto para a face superior da viga quanto para a face inferior, conforme Figura 13, de forma a propor a equação para cálculo do ângulo de equilíbrio da viga, conforme apresentado pela Equação 14.

Figura 13 – Modelo de cálculo do ângulo de equilíbrio



Fonte: Lima (2018).

$$\theta_{eq} = \arcsen \left(\frac{\Delta_{Desl}}{H_{viga}} \right) \quad (14)$$

Lima (2018) também realizou uma análise paramétrica em regime elástico linear físico e geométrico, inicialmente em uma viga de 42,40 metros de comprimento e seção transversal padronizada designada por PCI BT-72, e em seguida procedeu com um estudo de caso de uma situação de colapso de viga em içamento, ocorrida em uma fábrica na cidade de Uberlândia-MG, cujo comprimento era de 28,57 metros e altura de 1,25 metros.

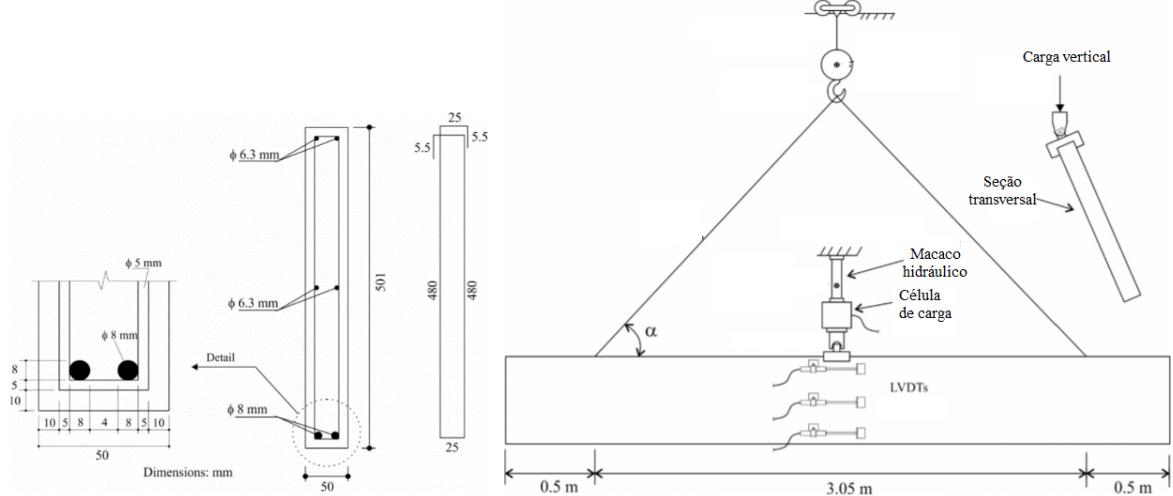
Na análise paramétrica, Lima (2018) considerou as seguintes variáveis: comprimento dos balanços, desvio lateral do posicionamento dos pontos de içamento, excentricidade inicial devido às imperfeições, inclinação dos cabos de içamento e altura da barra rígida.

No estudo de caso, Lima (2018) propôs algumas modificações na modelagem da viga original, de forma que, ao se comparar com o ângulo crítico calculado através das formulações de Zhang (2017), observou-se quais modificações foram favoráveis para que o ângulo de equilíbrio da viga se mostrasse menor que o ângulo crítico calculado. Dessa forma, concluiu-se que o aumento dos balanços, o aumento na largura mesa superior e aumento da resistência a compressão do concreto são variáveis que contribuíram para estabilizar a viga durante o içamento, em contrapartida, o aumento da largura da alma não conferiu mais estabilidade.

Lima (2018), recomendou que devem ser medidos os desvios existentes tanto no posicionamento dos pontos de içamento quanto a excentricidade lateral inicial antes do içamento. Uma vez conhecidos esses desvios, para situações críticas, pode ser necessário buscar soluções para aumentar a segurança nessa fase transitória, como por exemplo, o uso de barra rígida. Além disso, ele recomenda que o tempo de cura seja cumprido, uma vez que, a resistência do concreto influencia tanto no giro de corpo rígido para fissuração, quanto no giro de corpo rígido para equilíbrio.

Krahl *et al* (2019) apresentaram um trabalho cujo objetivo era propor uma solução analítica e experimental para avaliar a instabilidade de vigas de concreto de alta performance (UHPFRC) durante o içamento. Dessa forma, produziu-se vigas de concreto armado com escala reduzida, e o procedimento realizado pode ser observado através da Figura 14.

Figura 14 – Modelo de ensaio de Krahl *et al* (2019), dimensões em milímetros



Fonte: Adaptado de Krahl *et al* (2019).

Portanto, as vigas foram expostas a um aparato que simula o içamento com cabos inclinados, a carga foi concentrada no centro do vão e os deslocamentos sofridos foram acompanhados por meio de estações totais. Nesse procedimento, foram avaliadas as relações entre cargas, tensões e rotação (KRAHL *et al*, 2019).

Os autores também propuseram um estudo analítico, utilizando como base o método de *Rayleigh-Ritz* para encontrar a carga crítica de flambagem. Por fim, concluiu-se que, visto as condições impostas, a capacidade de carga das vigas foi reduzida substancialmente quando comparado com situações com restrições laterais. Além disso, observou-se que o comportamento linear do material foi dominante até chegar-se ao ponto crítico, combinada com grandes deslocamentos. Com base nos resultados experimentais e analíticos, foi proposta uma equação capaz de chegar à carga crítica de flambagem (KRAHL *et al.*, 2019).

Daura Neto (2020) realizou uma análise paramétrica em regime elástico linear físico e geométrico, utilizando o mesmo modelo numérico, no software ANSYS 18.1, proposto por Lima (2018). Todavia, o autor se concentrou a analisar principalmente, a influência que assimetria na seção transversal da viga causa em sua estabilidade. Dessa forma, o autor trabalhou com a análise de duas vigas assimétricas, sendo a primeira delas uma viga de concreto de 45,57 metros de comprimento e seção transversal com presença de parapeito de 40 centímetros, localizado em uma das extremidades da mesa superior, e, a segunda, uma viga de concreto de seção “L” com comprimento de 7,48 metros.

As variáveis consideradas nas análises paramétricas foram: efeito da protensão, posicionamento dos pontos de içamento (balanços), resistência característica do concreto à compressão, desvio

lateral do posicionamento dos pontos de içamento, excentricidade lateral inicial, uso e altura da barra rígida, 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 (DAURA NETO, 2020).

O autor concluiu que as variáveis com maior influência na estabilidade são: posicionamento dos pontos de içamento (balanços), desvio lateral do posicionamento dos pontos de içamento, uso e altura da barra rígida, vão da viga e assimetria da seção transversal (DAURA NETO, 2020).

Considerando-se que a assimetria da seção transversal apresenta grande influência na instabilidade lateral, propõe-se o estudo de seção variando longitudinalmente, considerando que essa análise não foi encontrada em outros estudos quanto ao içamento (DAURA NETO, 2020).

2.4 LIMITES DE NORMAS TÉCNICAS

O tema em estudo possui determinações normativas limitadas. Nessa seção são resumidas as principais determinações dos códigos nacionais e internacionais quanto à análise da estabilidade lateral. Sendo assim, são considerados as seguintes normas:

- a) Brasileiras ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 9062:2017
- b) Internacional FIB Model Code 2010
- c) Americana ACI 318:2014
- d) Europeia Eurocode 2 (2004)
- e) Japonesa JSCE-SSCS nº 15 2007
- f) Britânica BS:8110-1 (2007)

De acordo com El Debs (2017), ocorrem discrepâncias significativas nesses códigos e nem sempre são estabelecidas as diferenças entre situações transitórias e definitivas. A Tabela 1 resume as recomendações normativas para estabilidade lateral de vigas de concreto.

Tabela 1 - Recomendações normativas para estabilidade lateral

Norma/Código	Recomendações
ABNT NBR 6118:2014	Segurança contra instabilidade garantida pela limitação da flambagem lateral em $\leq 2,5$ ou 5 (função do tipo de viga) e $l b \leq 50$.
ABNT NBR 9062:2017	Limitação da esbeltez em $\frac{l_{of}h}{b_f^2} \leq 500$ e $\frac{l_{of}}{b_f} \leq 50$.
FIB Model Code 2010	Limitação da imperfeição geométrica lateral na ordem de $\frac{L}{300}$.
ACI 318:2014	Para vigas que não estejam continuamente contraventadas lateralmente, o espaçamento entre os contraventos laterais não deve exceder 50 vezes a largura mínima da mesa comprimida e esse espaçamento deve levar em consideração a atuação de cargas excêntricas.
Eurocode 2 (2004)	Adoção de imperfeição geométrica na ordem de $\frac{L}{300}$ e os efeitos de segunda ordem relacionados à instabilidade lateral na fase transitória podem ser desprezados se as condições expressas na seguinte equação forem atendidas: $\frac{l_{of}}{b_f} \leq \frac{70}{(\frac{h}{b_f})^{1/3}}$ e $\frac{h}{b_f} \leq 3,5$.
JSCE-SSCS nº15 2007	Vigas retangulares devem ser apoiadas lateralmente a intervalos que não excedam 25 vezes a largura da alma; Vigas que não sejam retangulares, os apoios laterais devem estar a intervalos não superiores a 25 vezes a largura da alma; as vigas devem apresentar espessura da mesa não inferior à metade da largura da alma e a largura efetiva da mesa comprimida não deve exceder quatro vezes a largura da alma.
BS: 8110-1	Limitação da esbeltez em $\frac{l_{of}h}{b_f^2} \leq 250$ e $\frac{l_{of}}{b_f} \leq 60$.

* Considerou-se que: h é a altura da seção, b_f é a largura da mesa comprimida, l_{of} é o vão teórico ou espaçamento entre contraventamento e L é o vão da viga.

Fonte: O autor.

CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO IÇAMENTO COM HASTES METÁLICAS

3.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

Considerando o objetivo dessa pesquisa, quanto à análise dos equipamentos auxiliares de içamento, apresenta-se nesse capítulo a exposição de conceitos e discussões sobre a influência desses equipamentos na segurança das vigas pré-moldadas, com destaque ao içamento com hastes metálicas. Dessa forma, são apresentados os tipos de dispositivos auxiliares, exemplos de aplicação, comentários e comparações sobre a influência dos equipamentos auxiliares no comportamento estrutural no içamento de vigas.

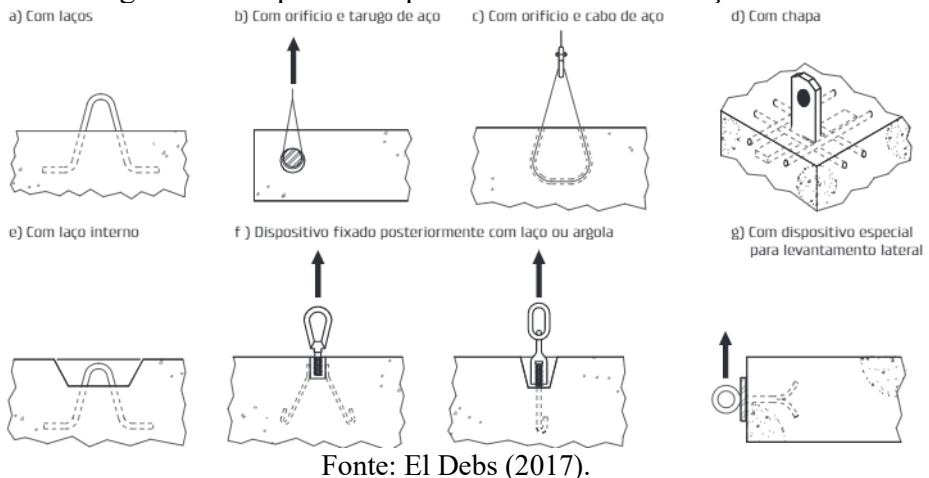
3.2 EQUIPAMENTOS AUXILIARES DE IÇAMENTO

Na ABNT NBR 9062 (2017) são estabelecidos os requisitos para projeto, execução e controle das estruturas de concreto pré-moldado. Para efeito do cálculo estrutural dessas estruturas, devem ser consideradas na análise as diferentes fases pelas quais os elementos passam, sendo essas: fabricação, manuseio, armazenamento, transporte, montagem, etapas transitórias e estado final de utilização.

Na mesma norma, é citado que deve ser apresentado o detalhamento do sistema de içamento adotado, todavia não há parâmetros para a escolha de tal detalhamento. Dessa forma, o projetista deve escolher qual a configuração de içamento é mais propícia para cada situação e apresentar os cálculos e verificações descritos na norma. Com base nisso, é importe que se defina parâmetros quanto à determinação da escolha, de forma a contribuir para a segurança dos processos.

El Debs (2017) cita que entre a desmoldagem de uma peça pré-moldada e a sua colocação em local definitivo essa precisa ser movimentada e para realizar essa movimentação, são necessários equipamentos e dispositivos auxiliares. Os equipamentos auxiliares empregados para o manuseio dos elementos são, na maior parte das vezes, destinados ao içamento e podem ser dos seguintes tipos: laços ou chapas chumbados (alças), orifícios e hastes metálicas (tarugo de aço), laços ou argolas rosqueados posteriormente e dispositivos especiais, assim como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Tipos de dispositivos auxiliares no içamento



Fonte: El Debs (2017).

No momento da escolha dos detalhes do içamento, deve ser levado em consideração os seguintes fatores: segurança, economia e facilidade no processo executivo. El Debs (2017) cita que os laços chumbados, também chamados de alças de içamento, são os mais empregados. Todavia, em uma pesquisa local de casos de içamento de vigas, observou-se a frequente utilização do equipamento auxiliar “orifício e tarugo de aço”, também identificado como içamento por hastes, visto que, identificou-se este no içamento de vigas em várias obras brasileiras, assim como ver-se-á adiante.

Observa-se na Figura 16 o uso de alças como equipamento auxiliar de içamento. Na Figura 16 (a) observa-se o içamento de uma viga no canteiro de obras da empresa *Legran*, em Uberlândia/MG e na Figura 16 (b) observa-se o içamento de vigas em uma ponte sobre rio em Divinópolis/MG na MG-050.

Figura 16 - Içamento de vigas: utilização de alças de içamento



Fonte: Legran (2016); G1 (2019).

Observa-se, ainda, na Figura 17 o uso de alças como equipamento auxiliar de içamento. Na Figura 17 (a) observa-se o içamento de uma viga na construção do “Terminal Jardins” em

Uberlândia/MG e na Figura 17 (b) observa-se o içamento de uma longarina nas obras do “Elevado do Praia”, na mesma cidade.

Figura 17 - Içamento de vigas: utilização de alças de içamento



Fonte: Secretaria de Obras de Uberlândia (2021)

Observa-se na Figura 18 o uso de hastes como equipamento auxiliar de içamento. Na Figura 18 (a) observa-se o içamento de uma viga na construção da “Segunda Ponte”, no centro de São Ludgero/SC e na Figura 18 (b) observa-se o içamento de uma viga na obra da “Ponte da União” em Braço do Norte/SC.

Figura 18 – Içamento de vigas: utilização de hastes



Fonte: Comunicação da Prefeitura de São Ludgero /SC (2018); Sulinfoco (2019).

Observa-se na Figura 19 o içamento de uma viga na obra do “Trevo de Viana”, que liga a BR-101 à BR-262, onde nota-se o uso de hastes como equipamento auxiliar de içamento.

Figura 19 – Içamento de vigas: utilização de hastes



Fonte: Bananal online (2019).

Considerando o exposto, vê-se a importância do estudo da utilização das hastes como equipamento auxiliar de içamento, visto que, ainda não existe estudo dedicado a esse material. Ainda, considerando a bibliografia disponível, vê-se necessário comparar a influência que o uso de alças ou hastes causa na segurança de vigas em situação de içamento.

3.3 IÇAMENTO POR HASTES: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ESTUDO

Inicialmente, é necessário pontuar as três configurações de içamento analisadas nessa pesquisa. A primeira configuração se trata do uso de um ou mais pontos de içamento (alças), distribuídos no sentido longitudinal da viga. Nessa situação pode ser considerado o uso de barra rígida, também chamada de *yoke*, que se trata de um dispositivo capaz de possibilitar maior distância entre o centro de gravidade da viga e eixo de giro. Pode ser observado na Figura 20 um caso de içamento onde foram usadas duas alças posicionadas no sentido longitudinal de cada extremidade da viga e, além disso, observa-se o uso da barra rígida.

Figura 20 – Içamento por duas alças no sentido longitudinal



Fonte: Germán (2015).

A segunda configuração de içamento ainda se trata do uso de alças, mas, dessa vez, posicionadas no sentido transversal da viga. Observa-se na Figura 21a o içamento utilizando dois cabos, posicionados no sentido transversal e em cada extremidade da viga, com o uso de cabos inclinados. Já na Figura 21b nota-se o uso de cabos retos para a mesma situação comentada.

Figura 21 – Içamento por duas alças no sentido transversal



Fonte: Cunzolo (2021).

Por fim, a terceira configuração de içamento se trata do uso de hastes. As hastes são inseridas na alma da viga, por meio de um orifício e os cabos de içamento são acoplados a cada uma das extremidades dessas hastes. Observa-se na Figura 22 o içamento por meio de hastes onde, nessa situação, foi feito o uso de cabos inclinados.

Figura 22 – Içamento por hastes: detalhe



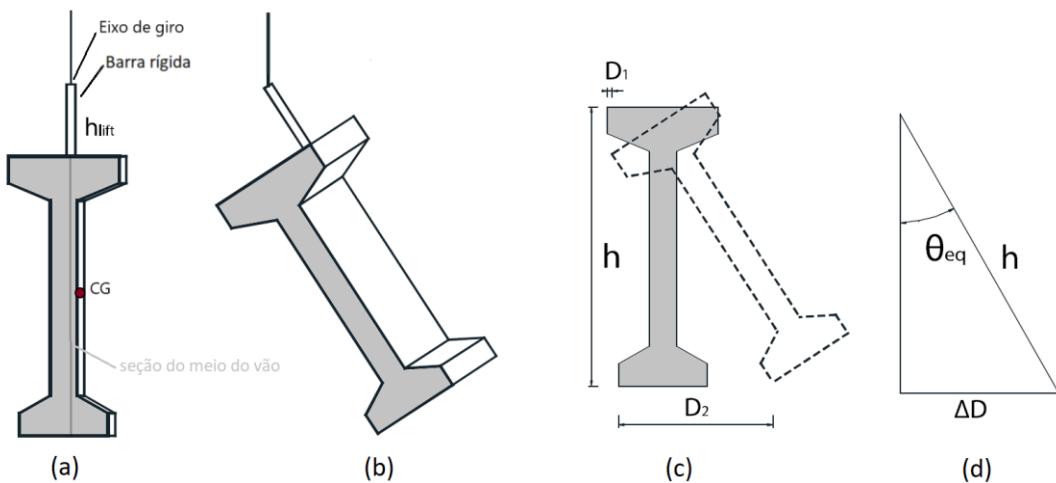
Fonte: SINDTRAN (2011).

Com base no exposto, busca-se detalhar o comportamento estrutural ocorrido em cada uma dessas configurações. Inicialmente, no caso de cabos posicionados longitudinalmente, será comentado sobre o comportamento do uso de apenas um cabo em cada extremidade, visto que o uso de mais cabos contribui para aumentar a quantidade de restrições verticais da viga, mas

não oferece nenhuma restrição lateral e, devido a isso, o comportamento de ambos os casos é similar.

O comportamento da viga no içamento com alças posicionadas longitudinalmente foi comentado com detalhes no Capítulo 2, considerando que em todas as pesquisas foi considerado esse tipo de configuração de içamento. Observa-se na Figura 23 o esquema de comportamento desse tipo de içamento.

Figura 23 – Comportamento do içamento com alças posicionadas longitudinalmente



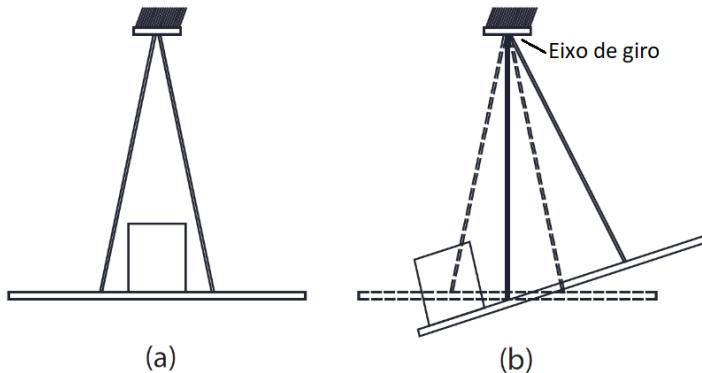
Fonte: O autor.

Portanto, inicialmente sabe-se que a viga possui uma excentricidade lateral e esta é responsável por causar um desalinhamento entre o centro de gravidade e o eixo de giro, como observado na Figura 23a. Considerando que, necessariamente, para que o equilíbrio seja garantido, o centro de gravidade deve estar no mesmo plano que o eixo de giro, a viga sofre uma rotação e predominante flexão bilateral, como visto na Figura 23b.

Observa-se na Figura 23c a seção do meio do vão antes e após o giro de corpo rígido e dessa forma, vê-se que o comportamento resulta na ocorrência de deslocamento vertical (ΔD) e de um ângulo de equilíbrio da viga (Figura 23d). Lembra-se que, nesse caso, o cabo de içamento permanece no eixo vertical durante toda a situação.

Quanto ao içamento com duas alças posicionadas transversalmente, entende-se que o comportamento se desenvolve com o giro de toda a estrutura entorno do ponto de ligação entre o guindaste e o cabo (eixo de giro). Nota-se na Figura 24a um esquema ilustrativo formado por dois cabos que sustentam uma barra (referência à seção transversal da viga) e não há impedimento de rotação na junção entre os cabos. Quando se é colocado um peso no centro dessa barra, os dois cabos sofrem solicitações idênticas e não existe deslocamento no sistema.

Figura 24 – Esquema de comportamento do içamento com duas alças posicionadas transversalmente



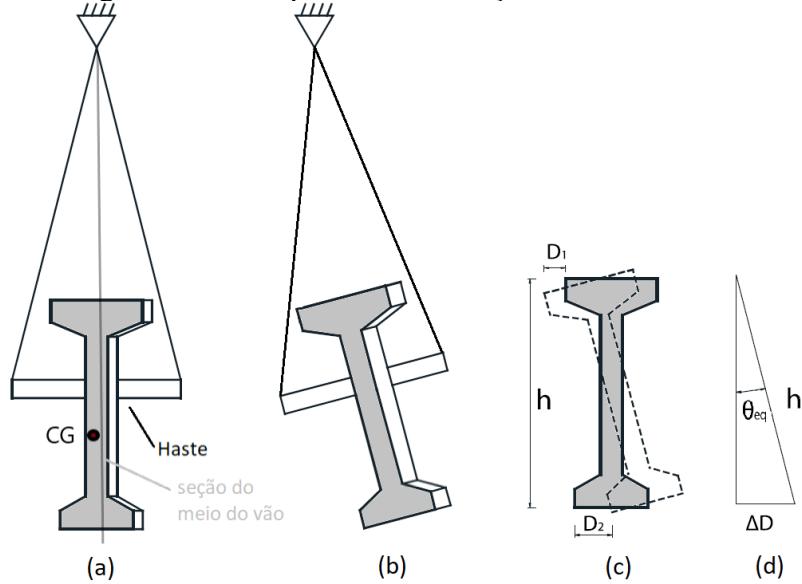
Fonte: O autor.

Considerando a Figura 24b, quando o peso é deslocado para fora do centro da barra é gerado um momento e há uma variação da intensidade das solicitações entre os dois cabos. Considerando que a força resultante deve estar no sentido e direção da gravidade e considerando a diferença de solicitação entre os cabos causada pela situação, o sistema sofre rotação até o equilíbrio.

A situação citada é bem representativa, pois, no caso de vigas perfeitamente retas e simétricas, o centro de gravidade está posicionado no centro da seção transversal, refletindo a situação de peso no centro da barra. No caso de vigas assimétricas e com imperfeições, o centro de gravidade está posicionado fora do centro da seção transversal, o que representa a situação de peso deslocado do centro da barra.

Quanto ao içamento com hastes, o comportamento é similar ao citado, todavia, o espaçamento entre os cabos não é limitado pela largura da mesa superior da viga, mas pelo comprimento da haste. Além disso, a haste é posicionada na alma da viga, e, portanto, mais próxima do centro de gravidade. Observa-se na Figura 25a a definição do problema, representando o desalinhamento entre o eixo de giro e o centro de gravidade da viga e dessa forma, na Figura 25b vê-se a ocorrência de giro até a posição de equilíbrio. Assim como nos casos já citados, há a ocorrência de deslocamento lateral e formação de um ângulo de equilíbrio da viga (Figura 25c,d).

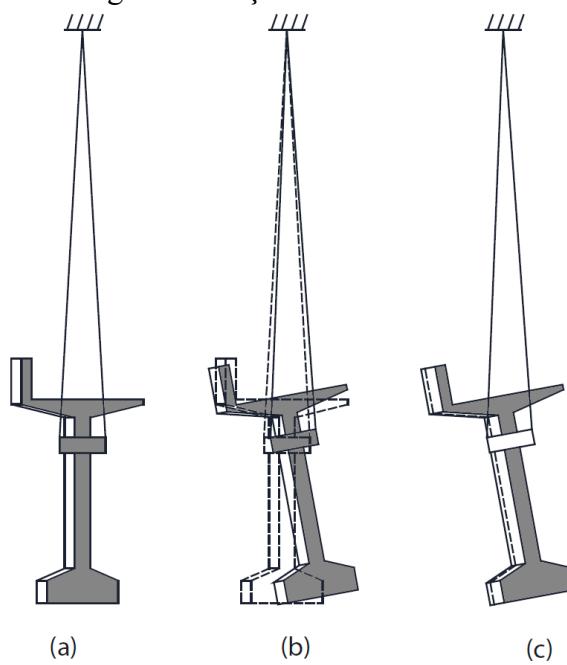
Figura 25 – Comportamento do içamento com hastes



Fonte: O autor.

Considerando o comportamento citado, pode se observar na Figura 26 (a) a vista lateral do içamento de uma viga. A seção transversal da viga na posição do apoio está sombreada e a parte à esquerda se refere à imperfeição geométrica inicial, que é causadora de movimentação do centro de gravidade nessa e que causa um esforço de momento na mesma direção.

Figura 26 – Içamento com hastes



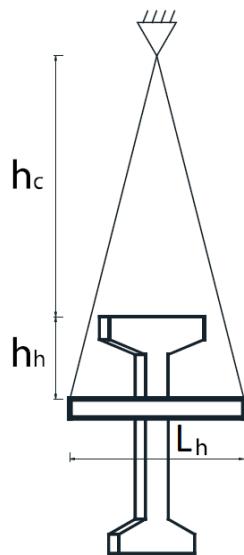
Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 26 (b) que o esforço gerado causa um giro no sistema e o cabo que é mais solicitado se desloca, tendendo ao eixo vertical. Assim como já citado no Capítulo 2, observa-

se na Figura 26 (c) que a imperfeição geométrica inicial era dada pela linha pontilhada e que após o giro, a viga sofre uma deformação e deslocamento lateral.

Portanto, quanto ao içamento por hastes, determinou-se que três parâmetros podem ser capazes de interferir no comportamento estrutural, sendo esses: o comprimento no eixo vertical dos cabos (h_c), o comprimento da haste (L_h) e o posicionamento da haste ao longo da seção transversal da viga (h_h). Esses parâmetros são melhor entendidos observando-se o esquema da Figura 27 e considera-se que a estrutura está seccionada na seção do apoio.

Figura 27 – Definição dos parâmetros de estudo: içamento por hastes



Fonte: O autor.

Portanto, entendendo-se o comportamento de cada tipo de situação de içamento, foram realizadas modelagens numéricas para simular esses tipos de comportamento e avaliar a influência causada na segurança estrutural por cada um deles.

CAPÍTULO 4

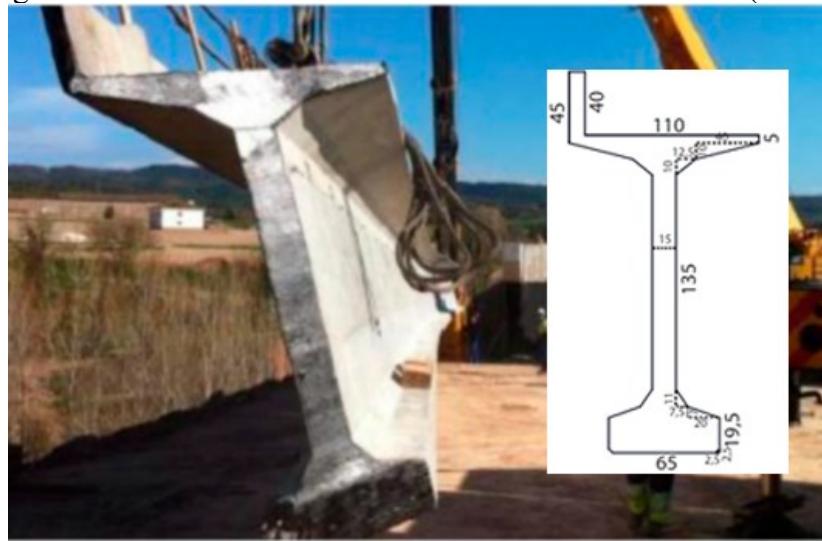
MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA COM ASSIMETRIA NA SEÇÃO TRANSVERSAL

4.1 DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Este capítulo apresenta análises numéricas realizadas pelo método dos elementos finitos por meio do *software ANSYS, versão 19.2*, plataforma *workbench*. Logo, são identificados os parâmetros utilizados nas modelagens, tais como: propriedades geométricas, definição da malha, metodologia de cálculo do ângulo de equilíbrio, materiais utilizados, condições de contorno e propriedades relacionadas com os equipamentos auxiliares de içamento.

Dessa forma, o foco das análises é o caso do içamento de uma viga de concreto protendido com 45,57 metros de vão e seção transversal com assimetria (parapeito) ocorrido em Oslot, Espanha, a fim de observar a influência do equipamento auxiliar de içamento no comportamento da viga, utilizando modelagem numérica. Apresenta-se na Figura 28 uma imagem real do caso juntamente com as características da seção transversal da viga, visto que, todas as dimensões apresentadas são dadas em centímetros.

Figura 28 - Caso de instabilidade lateral ocorrido em Oslot (em cm)



Fonte: Adaptada de Germán (2015).

Um modelo é utilizado para representar a estrutura em análise e é formado por hipóteses baseadas em leis físicas de equilíbrio entre forças e tensões, a compatibilidade entre deslocamentos e deformações e as leis constitutivas dos materiais. A criação do modelo estrutural de uma estrutura é feita representando o comportamento real desta, onde é adotada

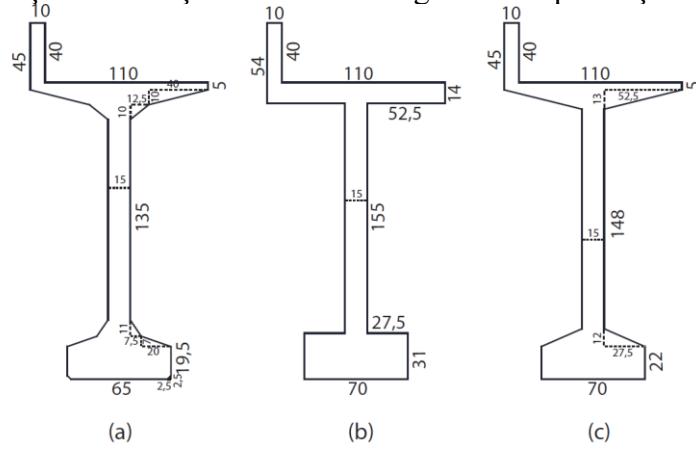
uma série de hipóteses simplificadoras do comportamento físico. Lembra-se que o modelo deve ser embasado em resultados experimentais e estatísticos (OLIVEIRA, 2008).

Cita-se que as análises realizadas se tratam de análises lineares físicas e não-lineares geométricas, que foi a metodologia considerada como mais vantajosa para cumprir o objetivo em tempo hábil. Quanto ao tempo ressalta-se que, por se tratar de uma análise inicial do caso (não existem pesquisas que tratam do içamento por hastas) foram realizadas várias simulações, e com a adoção de uma análise não-linear física geraria grandes períodos de processamento e não seria possível a concretização de todo o processo. Além disso, por ser um estudo de caráter comparativo onde foi utilizada a mesma metodologia em todas as análises, é viável a análise linear física.

4.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

A viga em questão apresenta seção transversal do tipo “I” com parapeito em um dos lados da mesa superior. Foi considerado que a representação fidedigna da seção transversal causaria grandes problemas no momento de definição da malha e foi proposta uma simplificação. Daura Neto (2020) também propôs uma simplificação para a seção transversal, todavia foi considerado que a alteração proposta interfere nos resultados. Observa-se na Figura 29, respectivamente, as dimensões da seção transversal original (a), da seção adaptada por Daura Neto (2020) (b) e da seção proposta neste trabalho (c).

Figura 29 - Comparação entre seção transversal original e simplificações propostas (em cm)



Fonte: O autor.

Não foram aferidos os valores de excentricidade lateral inicial do caso real e destaca-se que, durante o içamento, a viga rapidamente apresentou um grande deslocamento lateral e os profissionais optaram por não continuar o procedimento e os serviços foram paralisados. Nas

modelagens não foi considerado o desvio de posicionamento das alças, e o valor da excentricidade lateral inicial foi adotado como $L/500$, sendo L o valor do comprimento total da viga (vão).

Quanto aos equipamentos auxiliares de içamento da situação real foram definidos laços, posicionados a uma distância de 1,00 m de cada extremidade e foi utilizada barra rígida (*yoke*) com 30 cm de comprimento. Foi realizado o cálculo das propriedades geométricas da viga e os resultados estão organizados na Tabela 2. Na Tabela 2 também estão descritos os parâmetros considerados constantes nas simulações.

Tabela 2 – Propriedades geométricas da viga

Parâmetros		Valor	Unidade
L	Comprimento da viga	4.557,00	cm
l_a	Comprimento da viga no intervalo compreendido entre as alças de içamento	4.357,00	cm
a	Comprimento da viga no intervalo compreendido entre uma extremidade e a alça de içamento mais próxima	100,00	cm
a/L	Posição relativa do balanço	2,19	%
e_i	Excentricidade lateral inicial	9,11	cm
h_{lift}	Comprimento da barra rígida (<i>yoke</i>)	30,00	cm
α	Ângulo de inclinação entre os cabos de içamento e a viga	90,00	graus
H	Altura da seção	240,00	cm
A_c	Área bruta da seção	6.147,50	cm^2
y_{CG}	Distância vertical entre o centro de gravidade da seção transversal e sua base.	104,71	cm
x_{CG}	Distância horizontal entre o centro de gravidade da seção transversal e o eixo da alma.	4,28	cm
I_x	Inércia em torno do eixo horizontal	37.728.991,13	cm^4
I_y	Inércia em torno do eixo vertical	3.171.382,22	cm^4

Fonte: O autor.

4.3 MALHA E ELEMENTOS FINITOS

A viga de concreto foi modelada com uso de elementos sólidos, sem inserção de armaduras, com o comprimento longitudinal definido por um arco de circunferência, de tal forma que no meio do vão o deslocamento lateral é máximo e correspondente à excentricidade lateral assumida. Visto que a viga estudada é simétrica longitudinalmente (eixo x), foi modelada apenas uma metade da viga e foi aplicado o comando “*Symmetry Region*” na seção do meio do vão, ou seja, a metade não modelada é considerada pelo programa como um espelho da seção definida.

Na modelagem da viga de concreto, da barra rígida e das hastes metálicas, usou-se elementos finitos sólidos que foram definidos automaticamente pelo programa utilizado (SOLID 186),

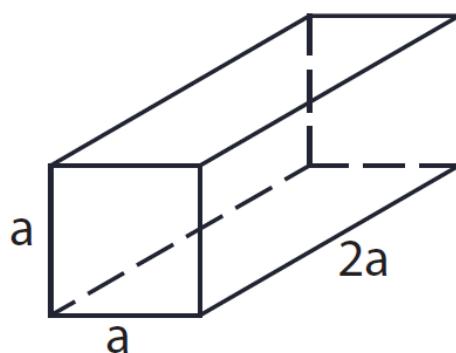
visto que este considerou a escolha com base nos materiais associados a cada geometria, na forma da geometria e nas configurações impostas. Na modelagem dos cabos de içamento, usou-se elementos finitos lineares que foram definidos como *link*, por meio de comandos da plataforma APDL do mesmo *software* (*LINK 180*).

A interação entre os equipamentos auxiliares de içamento e a viga de concreto foi feita por meio de um comando de contato colado (*bonded*) onde o software definiu um elemento do tipo CONTA 174. Os cabos de içamento foram ligados aos equipamentos auxiliares por meio da união dos nós coincidentes. Teve-se o cuidado de modelar-se os elementos de forma que os nós favorecerem a construção da malha e promovessem a conexão entre os elementos (viga, equipamentos auxiliares e cabos de içamento).

Por se tratar de uma análise numérica, é conveniente a realização de um estudo do refinamento da malha, e assim definir qual configuração apresenta uma melhor relação entre precisão e tempo de processamento, tendo em vista que é realizado um processo iterativo e o tempo de processamento é um grande aliado nesse tipo de modelagem.

Conforme citado na ABNT NBR 6118 (2014) as vigas são elementos lineares em que a flexão é preponderante. Portanto, o elemento linear é aquele em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, sendo também denominado “barra”. Com base nessa definição optou-se por uma relação padrão para os elementos sólidos sendo esses com mesma altura e largura e o comprimento sendo o dobro dessas dimensões ($a/a/2a$), conforme observado na Figura 30. Dessa forma, variou-se o valor padrão (a) para prosseguir com as análises, conforme se observa na Tabela 3.

Figura 30 – Definição do elemento sólido padrão



Fonte: O autor.

Tabela 3 – Estudo da malha

Análise	Dimensões (cm)	Deslocamento lateral (mm)	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Tempo
01	7,50x7,50x15,00	128,94	-19,40	15,05	5'42"
02	5,00x5,00x10,00	128,82	-19,39	15,04	4 h 11'
03	3,50x3,50x7,00	128,61	-19,39	15,04	11 h 17'

Fonte: O autor.

Observando a Tabela 3 acima, concluiu-se que os modelos 01 e 02 apresentaram variações na ordem de 0,02% para deslocamento lateral máximo, 0,05% para tensão máxima de compressão, 0,07% para tensão máxima de tração e 97,72% para tempo de processamento. Entre os modelos 02 e 03 observou-se variações na ordem de 0,16% para deslocamento lateral máximo, 0,00% para tensão máxima de compressão, 0,00 % para tensão máxima de tração e 69,72% para tempo de processamento. Considerando o descrito, o modelo de malha “01” foi considerado o mais vantajoso para as análises.

4.4 MATERIAIS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesse item são apresentadas as configurações de materiais, condições de apoio e carregamento adotados para todas as simulações. Considerou-se para toda a viga o material concreto, sem discretização das armaduras e para os cabos de içamento, hastes e barra rígida considerou-se o material aço estrutural.

Quanto a geometria dos elementos, a viga de concreto foi modelada de acordo com as informações apresentadas em 4.2, a barra rígida foi considerada um prisma de base quadrada (10x10cm), a haste metálica foi considerada um cilindro com 10 cm de diâmetro e os cabos de içamento foram considerados com diâmetro de 5 cm.

A situação citada também foi estudada por Germán (2015), Zhang (2017) e Daura Neto (2020) e os autores citaram algumas especificações do projeto. Segundo os autores, a resistência a compressão do concreto estipulada para a fase de serviço (f_{ck}) foi de 60 MPa e para as fases transitórias (f_{cj}) 35 MPa, visto que para as simulações considerou-se a resistência proposta para as fases transitórias.

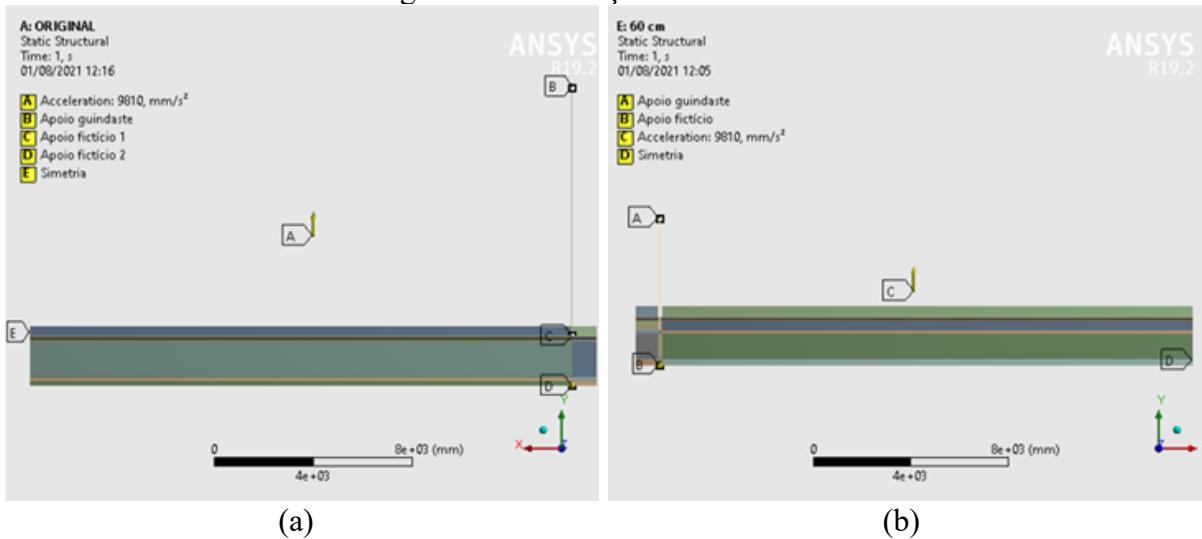
Quanto ao aço estrutural, considerou-se para módulo de elasticidade o valor de $E=200$ GPa e para o coeficiente de *Poisson* o valor de 0,3. Quanto o concreto, considerou-se o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor de resistência característica à compressão (f_{ck})

conforme a Equação 15 determinada pela ABNT NBR 6118 (2014). Quanto ao coeficiente de *Poisson* do concreto, o valor estabelecido em todas as análises foi de 0,2.

$$E_{CS} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \alpha_e \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \quad \text{se } 20 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (15)$$

Quanto às condições de apoio, foram adotadas as seguintes restrições: restrição em x, y e z no topo do cabo de içamento, representando o guindaste, restrição em x no meio do vão da viga, representando a simetria, e restrição em z para garantir que o problema seja isostático e com a condição que a reação de apoio nessa restrição seja nula. É importante lembrar que o sistema só estará em equilíbrio após a imposição de deslocamentos iterativos no local da restrição em z, até que ocorra a sua nulidade assim como já foi exposto com detalhes na pesquisa de Daura Neto (2020). Observa-se na Figura 31(a) as condições para uso de alças e na Figura 31(b) as condições para uso de hastes.

Figura 31 – Condições de contorno



Fonte: O autor.

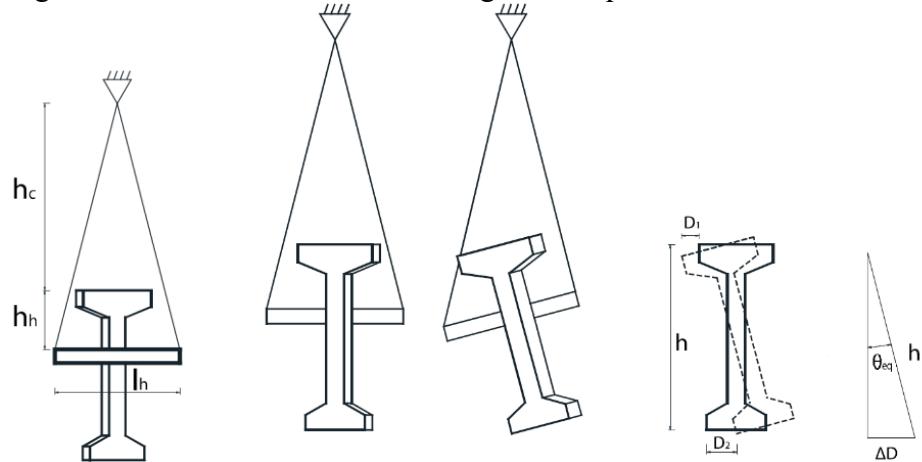
Quanto ao carregamento, adotou-se apenas a influência do peso próprio, sendo este aplicado em 20 incrementos de carga. Para o cálculo do peso próprio, adota-se a massa específica do concreto armado como 2400 kg/m³ e a aceleração da gravidade como 9,803 m/s².

4.5 CÁLCULO DO ÂNGULO DE EQUILÍBRIO

Para se definir o ângulo de equilíbrio foram anotados os valores referentes aos deslocamentos laterais ocorridos no meio do vão, após a imposição dos deslocamentos necessários para garantir a nulidade das restrições no eixo lateral. Dessa forma, observa-se na Figura 32 o

comportamento observado para realizar o cálculo do ângulo de equilíbrio (θ_{eq}) para içamento com hastas, visto que o comportamento estrutural já foi citado no Capítulo 3.

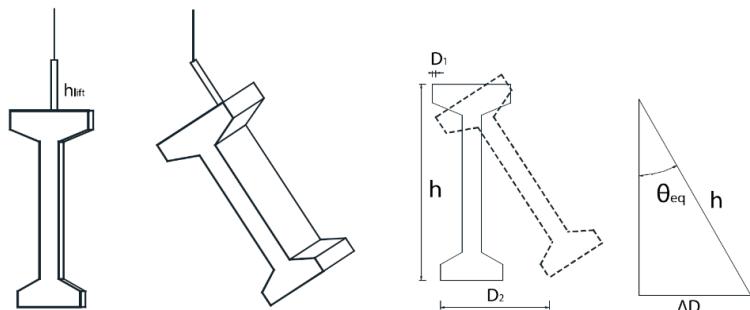
Figura 32 – Modelo de cálculo do ângulo de equilíbrio: orifício e haste



Fonte: O autor.

Assim como já dito por Lima (2018), apresenta-se na Figura 33 o comportamento de equilíbrio da viga no içamento por alças considerando os parâmetros necessários para o cálculo do ângulo de equilíbrio (θ_{eq}).

Figura 33 – Modelo de cálculo do ângulo de equilíbrio: laços



Fonte: O autor.

Portanto, após análise do comportamento de giro, o cálculo do ângulo de rotação do corpo rígido (θ_{eq} ou ângulo de equilíbrio) foi realizado conforme a Equação 16 proposta por Lima (2018).

$$\theta_{eq} = \arcsen \left(\frac{\Delta_D}{h} \right) \quad (16)$$

Segue abaixo a definição dos parâmetros:

θ_{eq} = Ângulo de equilíbrio considerando a posição da seção transversal no meio do vão;

Δ_D = Variação do deslocamento lateral da viga (Deslocamento inferior (D_2) – deslocamento superior (D_1));

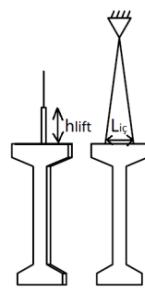
h = Altura da seção transversal da viga.

4.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ANÁLISES

4.6.1 Içamento por alças

Com o objetivo de analisar o comportamento do içamento com uso de alças, foram realizadas simulações numéricas considerando duas situações de posicionamento das alças, sendo essas o uso de apenas uma alça e barra rígida (*yoke*) e o uso de duas alças. Com base no exposto, dois parâmetros foram utilizados, sendo esses o comprimento da barra rígida (h_{lift}) e o distanciamento entre as alças (L_{ic}), conforme observado na Figura 34.

Figura 34 – Vista da seção transversal no ponto de içamento: parâmetros de análise para alças



Fonte: O autor.

Os valores atribuídos para o comprimento da barra rígida foram definidos conforme o princípio definido por Mast (1989), onde relata que posições de ponto de içamento mais afastadas do centro de gravidade ocasionam menores ângulos de equilíbrio. Dessa forma, partiu-se da pior situação ($h_{lift}=0\text{cm}$) e aumentou-se o comprimento para se observar o comportamento em cada situação. Quanto ao uso de dois cabos, o princípio geral de atribuição dos valores foi a limitação máxima do distanciamento ao comprimento da base da mesa superior, visto que esses cabos são ligados a essa parte da estrutura, e, portanto, foram definidos três valores dentro desse intervalo.

Por fim, relacionado ao uso de dois cabos, quanto ao comprimento dos cabos, com base na observação de casos reais (imagens), foi notado que valores entre 2 e 12 metros são usuais e, devido a isso, foram realizadas simulações para analisar a influência dessa variação. Observa-se na Tabela 4 os valores adotados para os parâmetros citados.

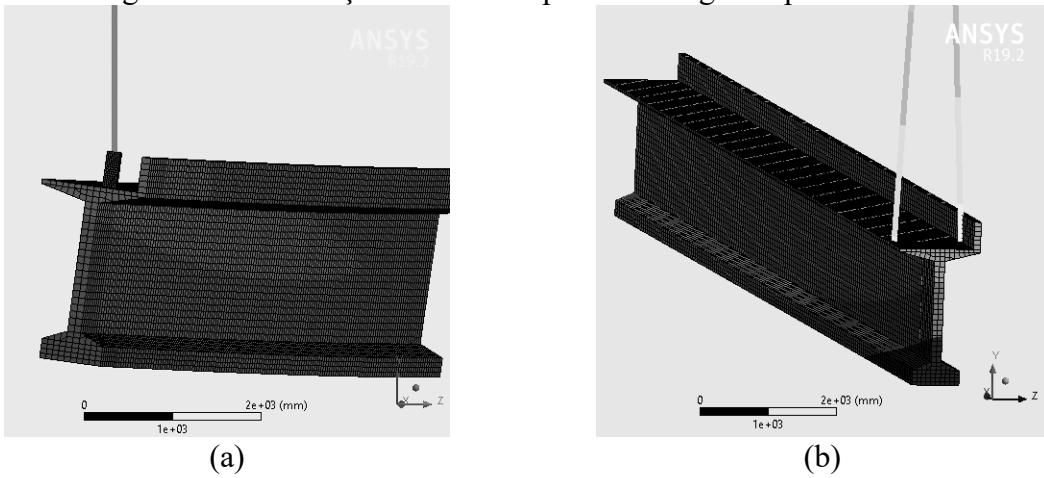
Tabela 4 – Valores adotados: alças de içamento

Bloco	Parâmetro	Valores adotados (cm)				
1	h_{lift}	Comprimento da barra rígida (<i>yoke</i>)	0,00	10,00	20,00	30,00
2	L_{ic}	Distância entre as alças	7,50	28,50	50,00	-
3	h_c	Comprimento vertical dos cabos de içamento	200,00	400,00	600,00	800,00
						1200,00

Fonte: O autor.

Com base nos valores apresentados, foi realizada uma simulação para cada valor dos parâmetros de comprimento da barra rígida e distanciamento entre duas alças, totalizando 9 simulações. Quanto à altura dos cabos, foram realizadas uma simulação para cada valor atribuído (5 simulações), considerando em todas o valor de 28,50 cm para o distanciamento entre as alças. Observa-se na Figura 35 duas das simulações realizadas, apresentando-se em (a) a simulação para $h_{lift} = 40$ cm e em (b) a simulação para $L_{ic} = 50$ cm.

Figura 35 – Simulações realizadas para barra rígida e para dois cabos



Fonte: O autor.

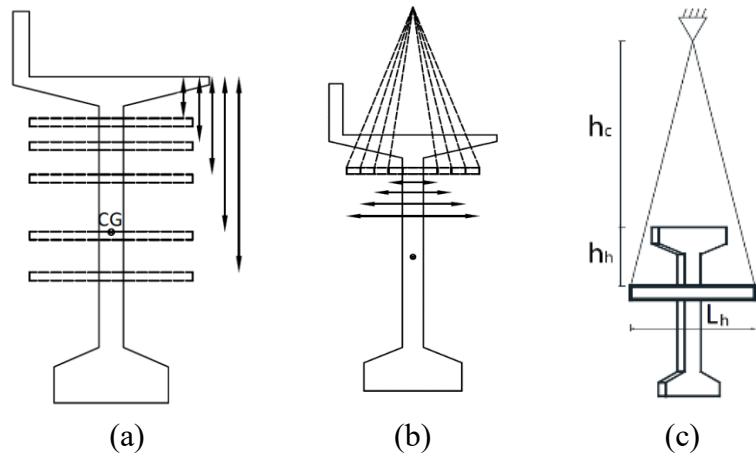
4.6.2 Içamento por hastas metálicas

Com o objetivo de analisar o comportamento do içamento por hastas, foram realizadas simulações numéricas considerando a variação de três parâmetros de influência, sendo esses: o posicionamento da haste (h_h), o comprimento dos cabos (h_c) e o comprimento da haste (L_h).

A metodologia geral se trata da adoção de valores praticados, com base na observação de casos reais, e adoção de valores próximos desses para avaliar os casos praticados e verificar a tendência que a variação dos valores causa na segurança do conjunto.

Quanto ao posicionamento da haste, levou-se em consideração o princípio definido por Mast (1989), onde posicionar o ponto de içamento distante do centro de gravidade é visto como uma técnica a favor da segurança. Ainda, sabe-se que, para o presente caso, o ponto mais distante do centro de gravidade se localiza na região de intersecção entre alma e mesa superior. Para observar se o princípio de Mast (1989) se aplica ao presente caso, foi definido um intervalo de valores que percorressem o comprimento da alma da viga até um ponto abaixo do centro de gravidade (ponto crítico). Observando a Figura 36(a), a proposta citada pode ser melhor entendida.

Figura 36 – Vista da seção transversal no ponto de içamento



Fonte: O autor.

Quanto ao comprimento da haste, observando a Figura 36b, vê-se que em vigas do tipo “I” com alma esbelta, para que não seja feito recorte da mesa no local de posicionamento das hastes, a haste deve possuir comprimento maior que a base da mesa superior. Todavia, mesmo que não considerado nesse trabalho, sabe-se que ao trabalhar com hastes muito compridas há a possibilidade de ocorrência de problemas como a flexão da haste e instabilidade da ligação entre viga e haste.

Além disso, na maior parte dos casos reais observados, viu-se a ligação do cabo na haste com bastante proximidade da alma, e, portanto, considerou-se como ponto de partida um comprimento de haste bastante próximo da alma considerando-se um acréscimo estimado de 10 cm de cada lado para fixação da alça. Dessa forma acresceu-se valores de 10 cm de cada lado, a cada variação, para observar a influência desse parâmetro.

Quanto ao comprimento dos cabos observou-se uma grande variação de comprimentos, visto os casos observados (imagens), onde foi notado que valores entre 2 e 12 metros são usuais. Portanto, observa-se na Tabela 5 os valores adotados para os parâmetros.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados: içamento por hastes

Parâmetros		Valores adotados (cm)				
h_h	Posicionamento da haste	25,5	40,0	60,0	95,0	120,0
h_c	Comprimento dos cabos	200	400	800	1200	-
L_h	Comprimento da haste	35	55	75	95	-

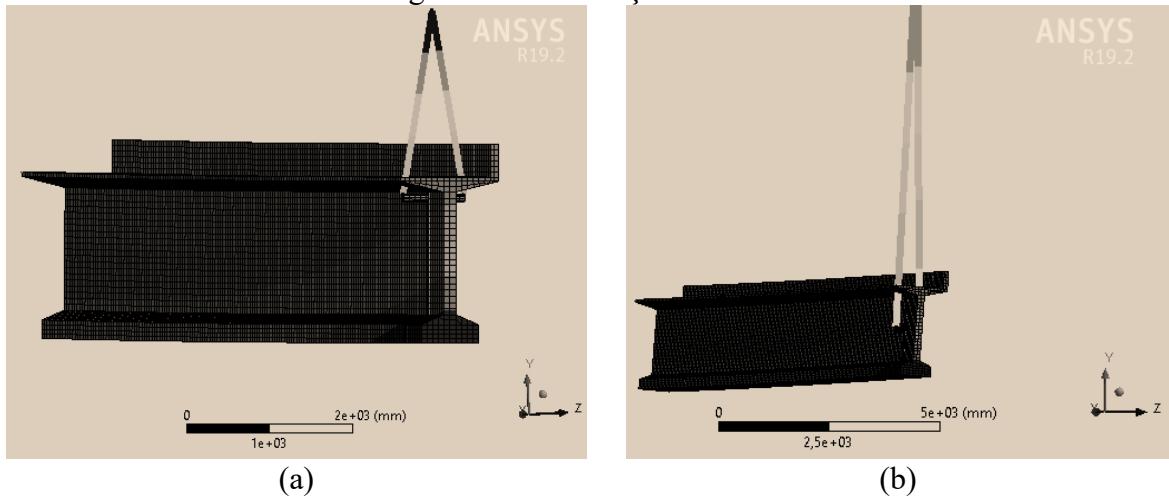
Fonte: O autor.

É válido citar que, nesse caso, todos os comprimentos de haste foram menores que o comprimento da base da mesa superior, e para que não haja contato e interferência entre os cabos de içamento e essa parte da viga, foi necessário modelar um desgaste (descontinuidade

da mesa superior) nas regiões da viga onde foram posicionados os equipamentos auxiliares de içamento.

Com base nos valores apresentados, eles foram combinados de forma a resultar 80 simulações, ou seja, todas as combinações diferentes possíveis utilizando os três parâmetros citados e foi calculado para cada uma das situações o valor do ângulo de equilíbrio de içamento. Observa-se na Figura 37 as imagens referentes a duas das simulações realizadas, em (a) $h_h25,5h_c200L_h75$ e em (b) $h_h95h_c800L_h55$.

Figura 37 – Simulações realizadas



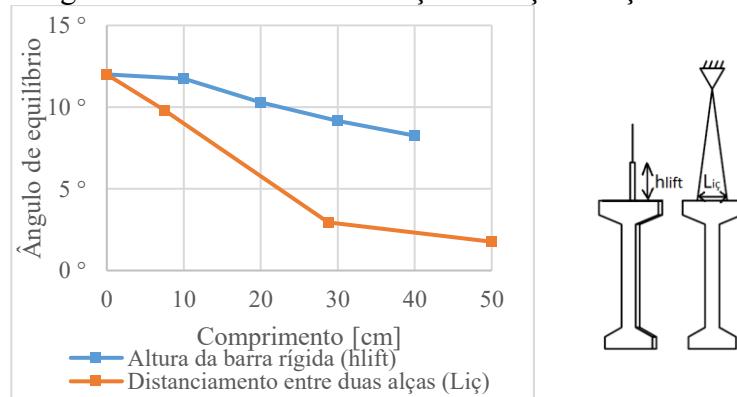
Fonte: O autor.

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

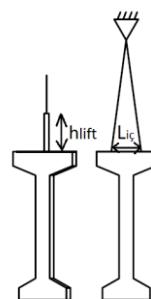
4.7.1 Içamento por alças

Quanto às simulações referentes ao uso de alças de içamento, os resultados estão organizados no gráfico dado pela Figura 38.

Figura 38 – Análise da utilização de alças de içamento



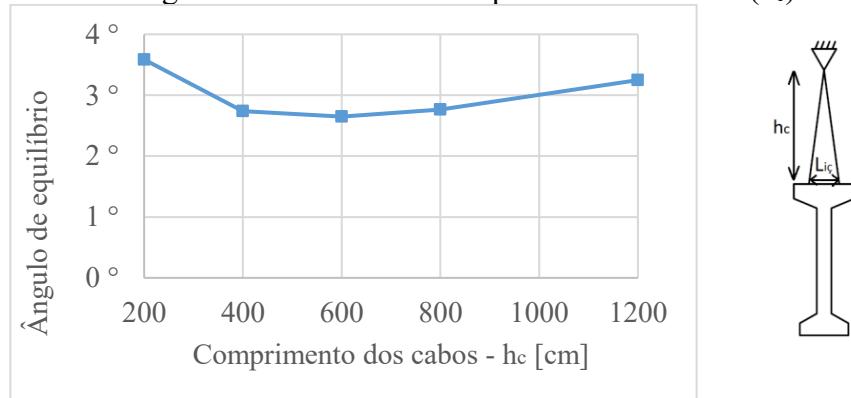
Fonte: O autor.



Inicialmente, quanto ao uso de barra rígida, observou-se que o princípio de Mast (1989) foi cumprido, visto que, quanto maiores foram os valores atribuídos ao comprimento da barra rígida menores valores foram obtidos para ângulo de equilíbrio, ou seja, posicionar o ponto de içamento afastado do centro de gravidade da viga contribui para menores resultados de ângulo de equilíbrio e, consequentemente, maior segurança no içamento. Quanto ao uso de duas alças, notou-se claramente queda nos resultados de ângulo de equilíbrio à medida que se aumentou os valores do parâmetro citado.

Considerando o uso de dois cabos, distanciados entre si a 28,75 cm, foi simulada a variação de comprimento vertical dos cabos de içamento, conforme já citado. Observa-se na Figura 39 os resultados obtidos

Figura 39 – Análise do comprimento dos cabos (h_c)



Fonte: O autor.

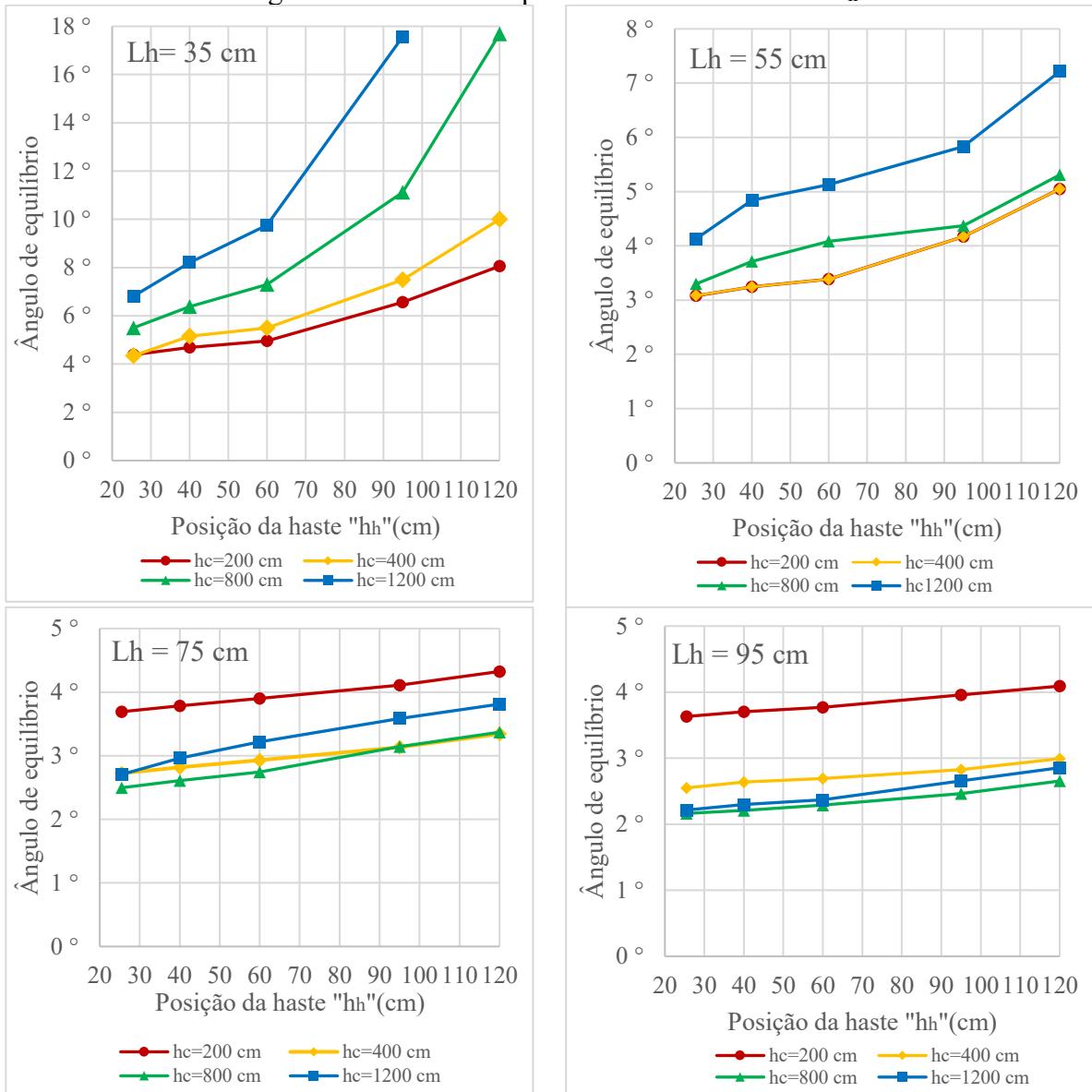
Nota-se inicialmente que os menores valores de ângulo de equilíbrio ocorreram no intervalo $400\text{cm} < h_c < 800\text{cm}$. Além disso foi visto que a maior variação de ângulo observada foi de $0,94^\circ$ e considerando que a menor variação de ângulo influenciada pelo uso de barra rígida foi de $2,19^\circ$ há 57,11% de diferença constatando que nesse caso o comprimento dos cabos pouco influencia nos resultados.

Conclui-se que, assim como já citado por Mast (1989), o uso de barra rígida influencia na diminuição do ângulo de equilíbrio das vigas no içamento, mas a adoção de duas alças posicionadas na mesa superior apresenta uma influência mais significativa.

4.7.2 Içamento por hastas metálicas

Quanto às análises realizadas para o uso de orifício e haste metálica, observa-se no gráfico da Figura 40 os resultados obtidos considerando como abscissa a posição da haste (h_h) e como ordenada o ângulo de equilíbrio (θ_{eq}).

Figura 40 – Análise do posicionamento da haste “ h_h ”



Fonte: O autor.

Os resultados de $L_h=35\text{cm}$ apresentaram os maiores valores de ângulo, em todos os posicionamentos de haste considerados, visto que quanto maior foi o valor de posicionamento (h_h), maior foi o ângulo de equilíbrio resultante. Os resultados de $L_h=55\text{cm}$ ainda sofreram influência do posicionamento da haste, mas discreta, se considerado o caso anterior. Para os demais comprimentos de haste, o posicionamento pouco influenciou nos resultados, visto que apresentou um comportamento praticamente constante.

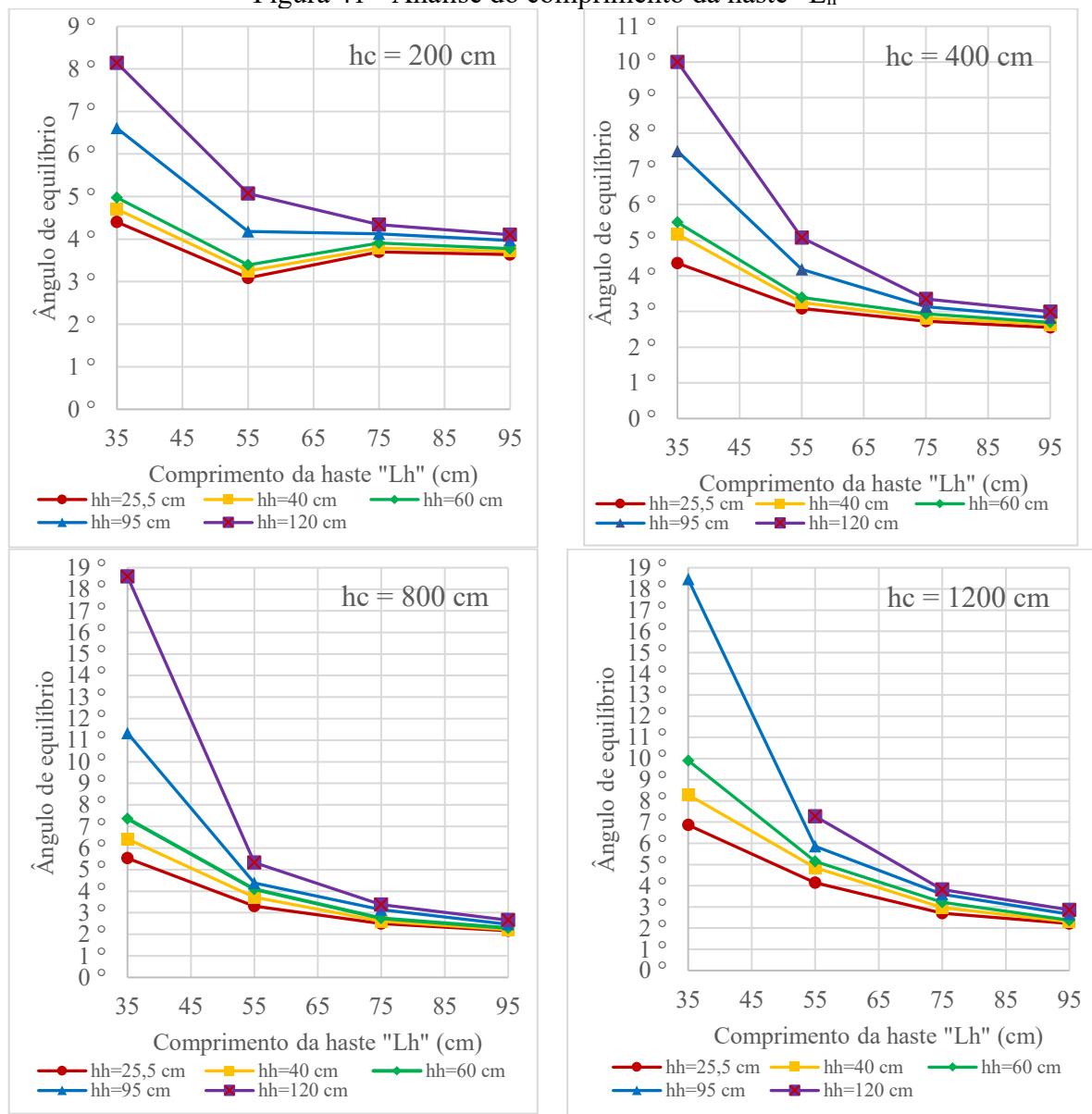
Quanto aos comprimentos da haste de 75 e 95 cm, viu-se que quanto maior o valor desse parâmetro, menores foram os resultados para ângulo de equilíbrio, considerando a organização padronizada das cores. Todavia, no intervalo $55 < L_h < 95$ a redução do valor do ângulo foi

pequena (5° de diferença entre o pior e o melhor caso) se considerado a variação no comprimento da haste em 40 cm.

É notório que quanto mais próximo a haste se localizar do topo da viga melhores resultados serão obtidos, todavia, a depender da configuração definida para os outros parâmetros, essa variável apresenta pouca influência na segurança e em casos de necessidade de locação desse equipamento deslocando-se no sentido do centro de gravidade, vê-se a aceitação de tal prática.

Observa-se com maior clareza no gráfico da Figura 41 os resultados obtidos considerando como base de análise o comprimento da haste (L_h).

Figura 41 - Análise do comprimento da haste “ L_h ”



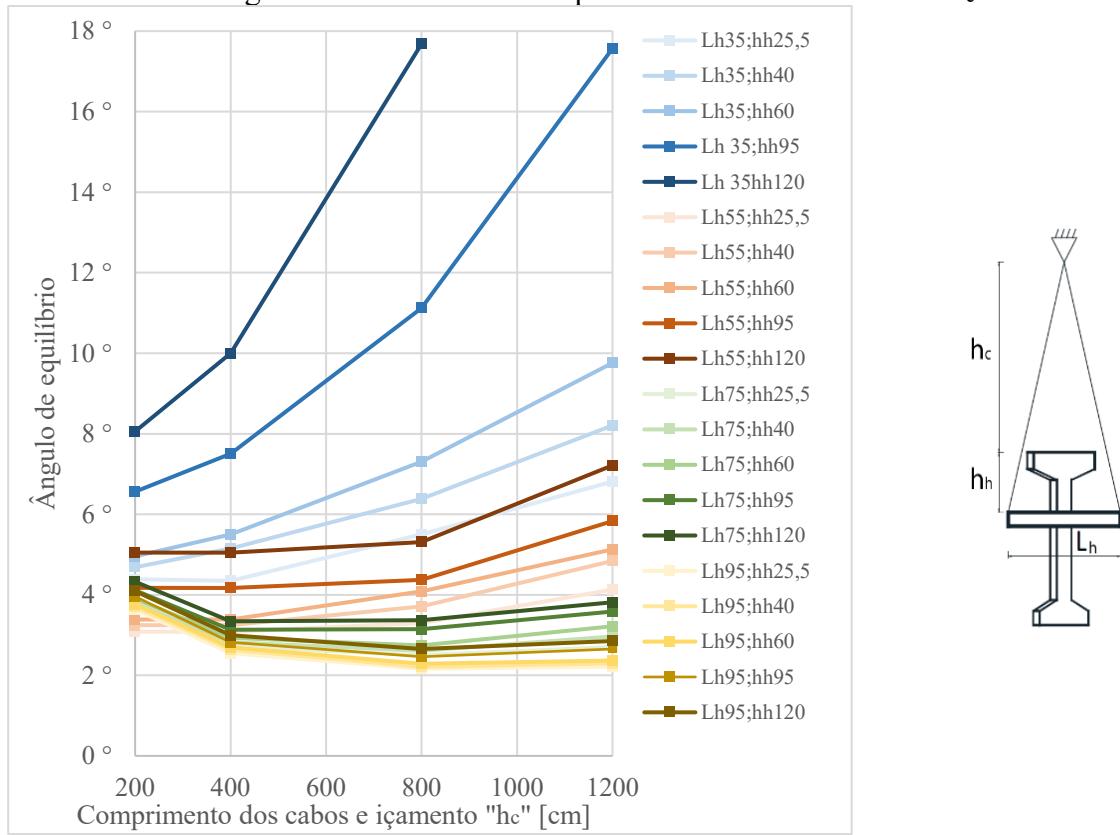
Fonte: O autor.

Inicialmente, assim como já citado, é notória a influência que o comprimento da haste exerce na redução do ângulo de equilíbrio entre 35 e 55 cm, seguido de relativa constância nos valores ($L_h > 55\text{cm}$).

Vê-se no caso de grandes comprimentos de cabos, essas situações apresentam valores de extremo em máximo e mínimo a depender da combinação utilizada para comprimento da haste (L_h), ou seja, para $h_c=1200\text{cm}$ e $L_h=35\text{cm}$ têm-se a pior situação e para $h_c=1200\text{cm}$ e $L_h=95\text{cm}$ têm-se a melhor situação de ângulo de equilíbrio. Com essa constatação, foi possível identificar uma relação entre o comportamento de giro da viga e o ângulo formado entre os cabos de içamento na ligação com o guindaste.

Observa-se no gráfico da Figura 42 os resultados obtidos considerando como base de análise o comprimento dos cabos (h_c).

Figura 42 – Análise do comprimento vertical dos cabos “ h_c ”



Fonte: O autor.

Três comportamentos são identificados, inicialmente para $L_h=35\text{cm}$ (azul), vê-se que o comprimento dos cabos é diretamente proporcional ao resultado de ângulo de equilíbrio. Além disso, vê-se que a influência do comprimento dos cabos (h_c) nesse caso é notável e considerando

que é praticado na realidade o uso de haste com a ligação dos cabos bastante próximo da face da alma, nesses casos é importante adotar pequenos valores para comprimento dos cabos.

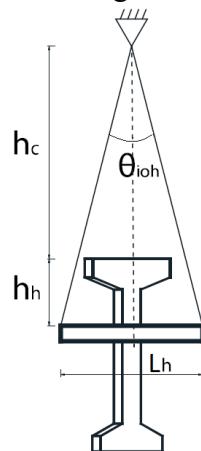
Em seguida, cita-se o comportamento observado quando $L_h=35\text{cm}$ e observa-se que o comprimento dos cabos ainda é diretamente proporcional ao resultado de ângulo de equilíbrio. Ainda, para $200 < h_c < 800$ há uma pequena variação de resultados seguido de maior variação para o valor de 1200 cm.

Por fim, para $L_h=75=95\text{cm}$ vê-se que o pior caso ocorre com $h_c=200\text{cm}$ e o melhor caso com $h_c=800\text{cm}$. Ainda se nota que para $400 < h_c < 1200\text{cm}$ a variação dos resultados é bastante pequena. Atenta-se que o uso de comprimentos de cabo muito pequenos para comprimentos maiores de haste não é uma escolha vantajosa.

Assim como já comentado, foi notada uma relação entre a geometria formada pela configuração dos cabos e os resultados de ângulo de equilíbrio e, portanto, foi realizada uma análise para discorrer se o ângulo formado entre os cabos de içamento possui uma relação direta com os resultados de equilíbrio.

Considerando o citado foi definido o ângulo de içamento por hastes “ θ_{ih} ”. Esse parâmetro é dependente das variáveis relacionadas ao içamento por hastes e é melhor entendido observando a Figura 43. Além disso, o seu cálculo é dado pela Equação 17.

Figura 43 – Definição do ângulo de içamento por hastes

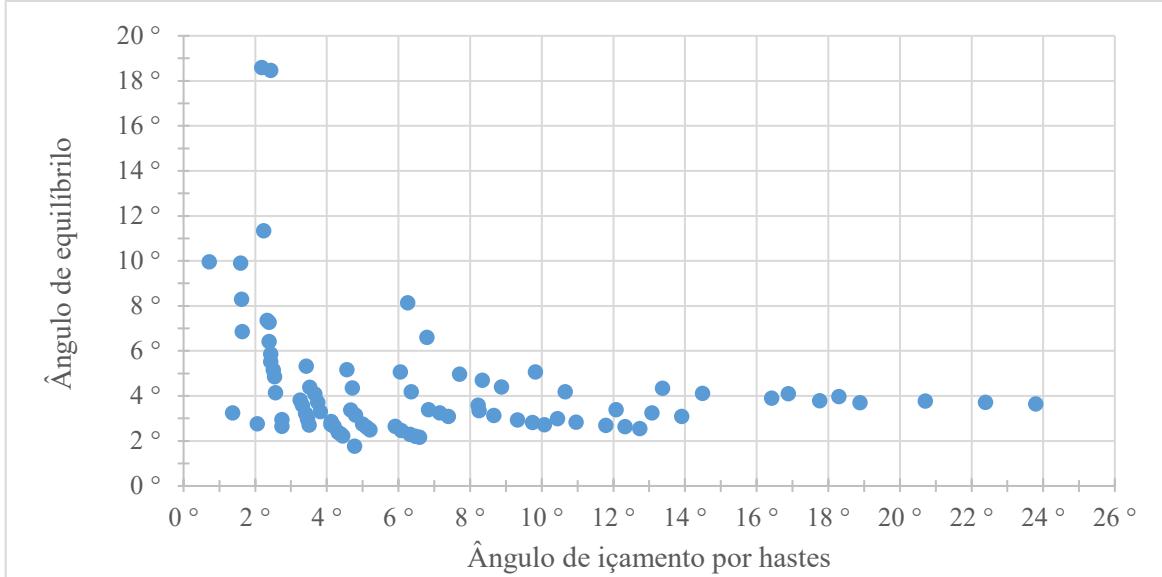


Fonte: O autor.

$$\theta_{ih} = 2 \arctg \left(\frac{0,5l_h}{h_c + h_h} \right) \quad (17)$$

Os resultados de ângulo de içamento por hastes (θ_{ih}) foram relacionados com os resultados de ângulo de equilíbrio (θ_{eq}), conforme observado no gráfico da Figura 44.

Figura 44 – Análise do ângulo de içamento por orifício e haste



Fonte: O autor.

Observa-se que não há relação direta entre o ângulo de içamento e os resultados de ângulo de equilíbrio, mas com a definição desse parâmetro é possível realizar uma análise mais apurada e observar o comportamento com maior facilidade.

Com base nas simulações realizadas, a melhor situação ocorre em $h_c=1200$ $L_h=95$ $h_h=25,5$, visto que o ângulo de equilíbrio resultou em $2,22^\circ$. Em contrapartida, a pior situação ocorre em $h_c=1200$ $L_h=35$ $h_h=120$, visto que o ângulo de equilíbrio resultou em $18,59^\circ$. Além disso, o ângulo de içamento por hastes resultou em $\theta_{ih}=4,44^\circ$ para o melhor caso e $\theta_{ih}=2,18^\circ$ para o pior caso.

Por meio da análise dos pontos críticos conclui-se que estes ocorreram nos pontos de menor comprimento de haste e maior posição da haste, mas que em ambos os casos o comprimento do cabo foi o mesmo. Assim, se entende que o comprimento do cabo é um parâmetro que é dependente dos demais, pois no uso de apenas um cabo, o seu comprimento não influencia no comportamento e permanece sempre na posição vertical. Ressalta-se que no içamento por hastes é notória a influência do comprimento dos cabos, mas que não há uma influência padrão desse parâmetro, visto que em dada combinação dos outros parâmetros ele intensifica a tendência de comportamento apresentada.

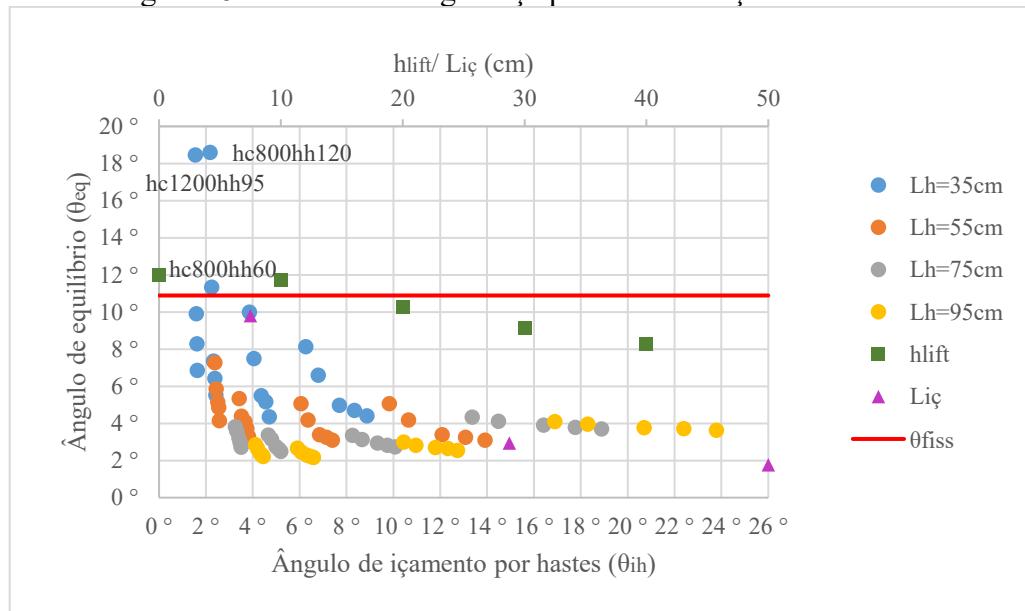
4.7.3 Análise geral do caso

Com a finalidade de discorrer sobre a segurança em todas as simulações apresentadas, foi realizado o cálculo analítico do ângulo de fissuração da viga no içamento através da Equação 10 (item 2.3) proposta por Zhang (2017). Considerando a impossibilidade de aplicar-se o fator de segurança proposto por Mast (1994) no içamento por hastes, por não se tratar do mesmo comportamento e mesmas variáveis de estudo, foi proposta a análise por meio do fator de segurança calculado pela Equação 19, que faz uma relação entre fissuração e equilíbrio.

$$FS = \frac{\theta_{fiss}}{\theta_{eq}} \quad (19)$$

Portanto, o ângulo de fissuração para o presente caso resultou em $\theta_{fiss}=10,89^\circ$ e é possível observar na Figura 45 a disposição de todos os resultados encontrados para ângulo de equilíbrio nas simulações realizadas e o limite de fissuração analítico da viga (em vermelho).

Figura 45 – Análise da segurança para as simulações realizadas



Fonte: O autor.

Inicialmente considera-se que, para a situação analisada, o içamento por uma alça, sem utilização de barra rígida, está em situação de instabilidade lateral, considerando que apresentou o valor de fator de segurança menor que 1 (0,91). Apenas com o uso de barra rígida de comprimento a partir de 20 cm o içamento por uma alça pode ser considerado seguro, mas, mesmo assim, bastante próximo da ruptura, pois $F.S.= 1,06$.

Em questão de segurança no içamento, comparado o melhor caso simulado de uso de barra rígida (F.S.=1,32) com o melhor caso para uso de hastes (F.S.=5) vê-se uma vantagem de 73,60% para o uso de hastes. Por fim, o uso de duas alças apresentou todos os resultados abaixo do valor estipulado para fissuração, e para seu melhor caso, apresentou o menor resultado de ângulo de equilíbrio dentre todas as simulações.

CAPÍTULO 5

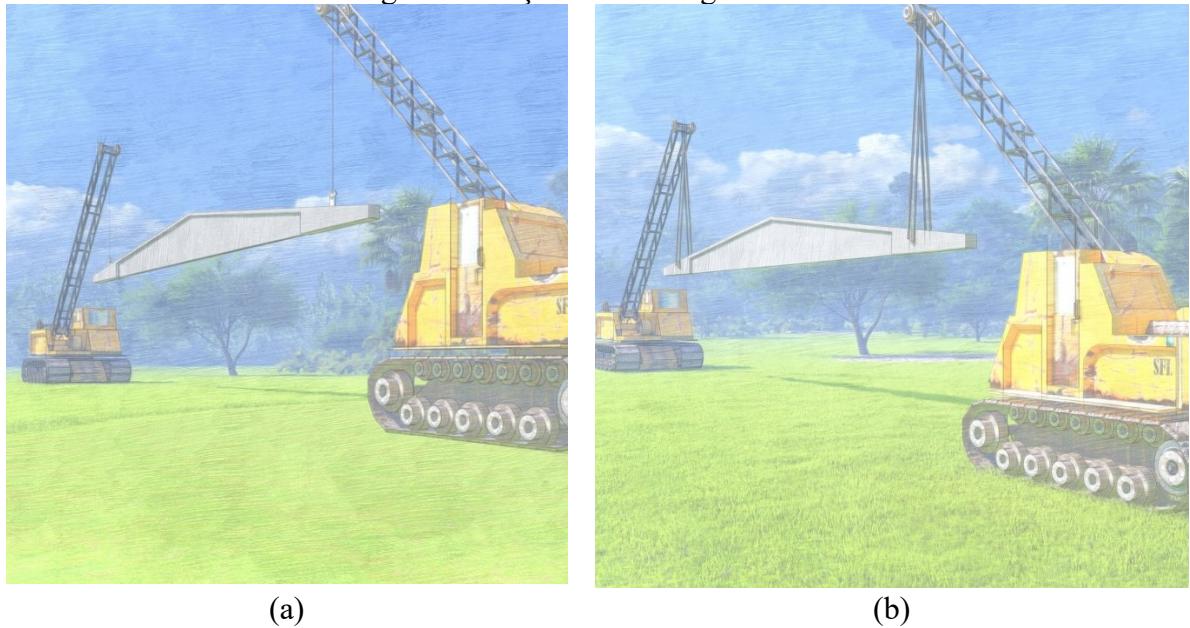
MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA COM SEÇÃO TRANSVERSAL VARIÁVEL LONGITUDINALMENTE

5.1 DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Assim como no Capítulo 4, este capítulo apresenta análises numéricas pelo método dos elementos finitos por meio do *software ANSYS, versão 19.2*, plataforma *workbench*. Logo, expõe-se os parâmetros utilizados nas modelagens, tais como: propriedades geométricas, definição da malha, materiais utilizados, condições de contorno e propriedades relacionadas com os equipamentos auxiliares de içamento.

Dessa forma, é realizado o estudo de uma viga tesoura, também analisada por Lima (2002). A estrutura se trata de uma viga protendida com 19,60 m de vão e seção transversal variável longitudinalmente, produzida comercialmente pela empresa *Marka Sistemas Construtivos em Concreto Estrutural*. Não existem imagens reais da estrutura citada, mas é ilustrado pela Figura 46 a estrutura estudada sendo içada por meio de alças em (a) e por meio de hastes em (b).

Figura 46 – Içamento de viga tesoura



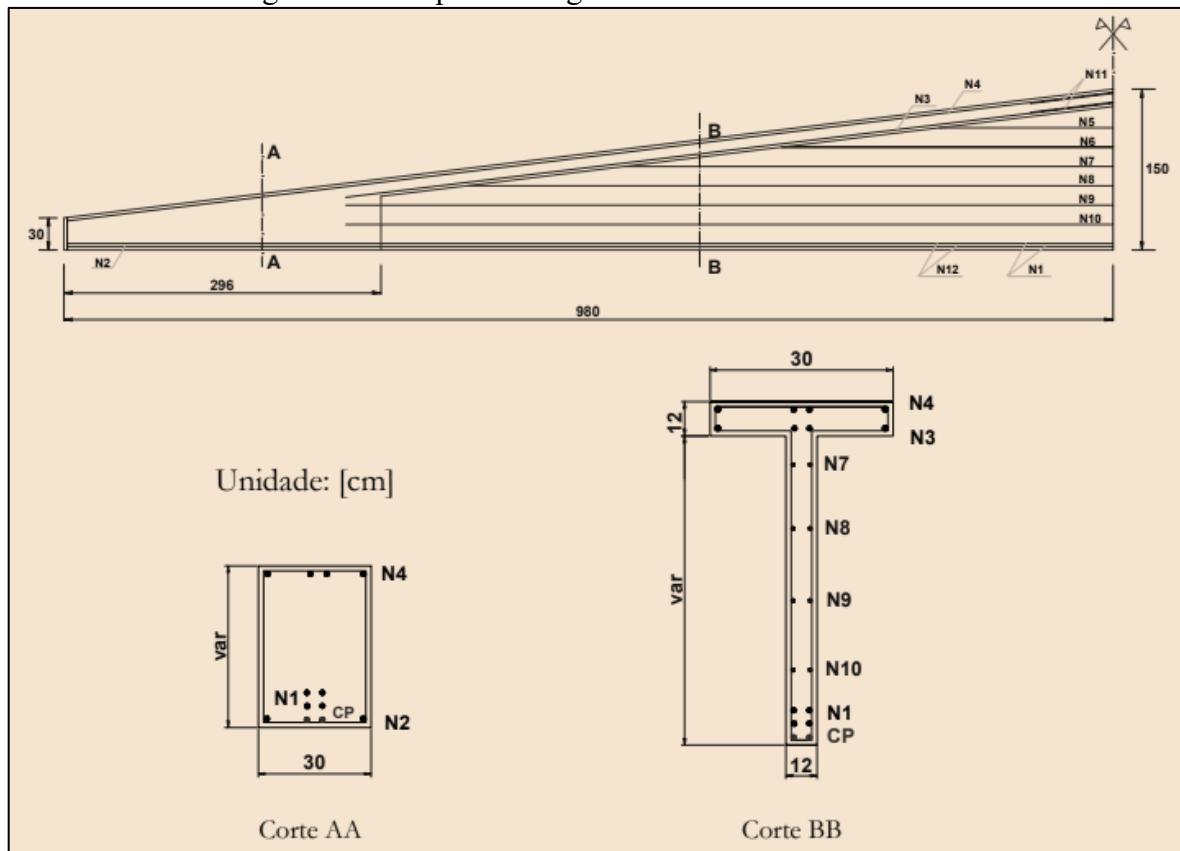
Fonte: O autor.

Assim como foi citado no Capítulo 4, as análises realizadas se tratam de análises lineares físicas e não-lineares geométricas, que foi a metodologia considerada como mais vantajosa para cumprir o objetivo proposto.

5.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

A viga em questão apresenta seção transversal quadrada (30x30cm) em suas extremidades, a altura da seção aumenta ao longo que se aproxima do meio do vão e a partir dos 2,96 m de comprimento, toma a forma de “T”. Os detalhes geométricos da viga foram abordados por Lima (2002) e podem ser observados na Figura 47.

Figura 47 – Propriedades geométricas do caso de estudo



Fonte: Lima (2002).

Não foram citadas outras propriedades da situação real, e os valores de posicionamento das alças e excentricidade lateral inicial foram adotados conforme caso estudado por Lima (2002). Portanto, no estudo de Lima (2002), quanto aos equipamentos auxiliares de içamento foram definidas alças, posicionadas a uma distância de 2,44 m de cada extremidade. Quanto ao valor da excentricidade lateral inicial foi adotado como $L/500$.

Foi realizado o cálculo das propriedades geométricas da viga e os resultados estão organizados na Tabela 6. Na Tabela 6 também se expõe os parâmetros considerados constantes nas simulações.

Tabela 6 – Propriedades geométricas do caso em estudo

Parâmetro	Valor	Unidade
L Comprimento da viga	1.960,00	cm
l_a Comprimento da viga no intervalo compreendido entre as alças de içamento	1.472,00	cm
a Comprimento da viga no intervalo compreendido entre uma extremidade e a alça de içamento mais próxima	244,00	cm
a/L Posição relativa do balanço	12,45	%
e_i Excentricidade lateral inicial	4,00	cm
α Ângulo de inclinação entre os cabos de içamento e a viga	90,00	graus
H Altura da seção	30,00/150,00	cm
Ac Área bruta da seção	2.016,00	cm ²
yCG Distância vertical entre o centro de gravidade da seção transversal e sua base.	82,39	cm
xCG Distância horizontal entre o centro de gravidade da seção transversal e o eixo da alma.	0,00	cm
I _x Inércia em torno do eixo horizontal	4.295.784,87	cm ⁴
I _y Inércia em torno do eixo vertical	46.872,00	cm ⁴

Fonte: O autor.

5.3 MALHA, ELEMENTOS FINITOS, MATERIAIS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A viga de concreto foi modelada com uso de elementos sólidos, sem inserção de armaduras, com o comprimento longitudinal definido por um arco de circunferência, de tal forma que no meio do vão o deslocamento lateral é máximo e correspondente à excentricidade lateral assumida. Mesmo que a viga estudada tenha seção transversal variável longitudinalmente, ela é simétrica, e, portanto, foi modelada apenas uma metade e foi aplicado o comando “*Symmetry Region*” na seção do meio do vão, ou seja, a metade não modelada é considerada pelo programa como um espelho da seção definida.

Na modelagem da viga de concreto, da barra rígida e das hastes metálicas, usou-se elementos finitos sólidos que foram definidos automaticamente pelo programa utilizado, visto que este considerou a escolha com base nos materiais associados a cada geometria, na forma da geometria e nas configurações impostas. Na modelagem dos cabos de içamento, usou-se elementos finitos lineares que foram definidos como *link*, por meio de comandos da plataforma APDL do mesmo *software*. A malha foi definida conforme estudo apresentado no item 4.3.

Quanto a geometria dos elementos, a viga de concreto foi modelada de acordo com as informações apresentadas em 5.2, a barra rígida foi considerada um prisma de base quadrada (10x10cm), a haste metálica foi considerada um cilindro com 10 cm de diâmetro e os cabos de içamento foram considerados com diâmetro de 5 cm.

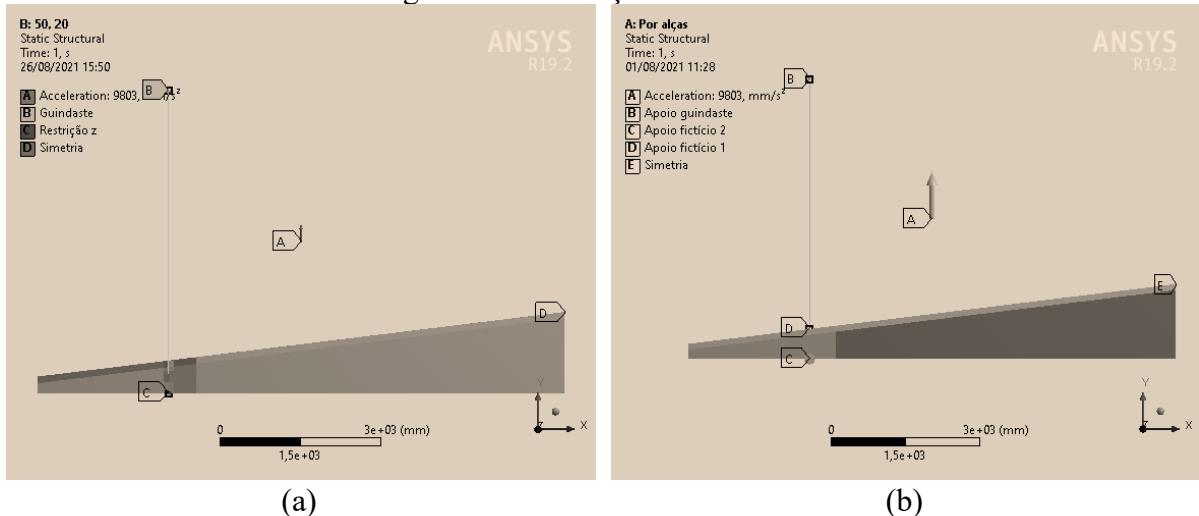
Quanto ao carregamento, adotou-se apenas a influência do peso próprio, sendo este aplicado em 20 incrementos de carga. Para o cálculo do peso próprio, adota-se a massa específica do concreto armado como 2400 kg/m^3 e a aceleração da gravidade como $9,803 \text{ m/s}^2$.

Considerou-se para toda a viga o material concreto, sem discretização das armaduras e para os cabos de içamento, barra rígida e hastes metálicas considerou-se o material aço estrutural. Assim como definido em 4.4, quanto ao aço estrutural, considerou-se para módulo de elasticidade o valor de $E=200 \text{ GPa}$ e para o coeficiente de *Poisson* o valor de 0,30.

Lima (2002) citou algumas especificações do projeto e segundo ela, a resistência a compressão para as fases transitórias (f_{cj}) foi considerada 30 MPa. Portanto, quanto ao concreto, considerou-se o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor de resistência característica à compressão (f_{ck}), conforme a Equação 15 (Item 5.3) determinada pela ABNT NBR 6118 (2014). Quanto ao coeficiente de *Poisson* do concreto foi de 0,2.

A condições de contorno foram definidas em semelhança ao citado em 4.4, e observa-se na Figura 48 as condições impostas para o içamento por alças (a) e por hastes (b). O ângulo de equilíbrio foi calculado conforme citado em 4.5.

Figura 48 – Condições de contorno



Fonte: O autor.

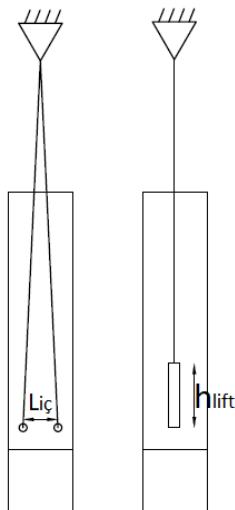
5.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ANÁLISES

5.4.1 Içamento por alças

Com o objetivo de analisar o comportamento do içamento com uso de alças, foram realizadas simulações numéricas considerando duas situações de posicionamento das alças, sendo essas o

uso de apenas uma alça (sem barra rígida), o uso de barra rígida (*yoke*) e o uso de duas alças fixadas na face superior da viga. Com base no exposto, dois parâmetros foram utilizados, sendo esses o comprimento da barra rígida (h_{lift}) e o distanciamento entre as alças ($L_{iç}$), conforme observado na Figura 49.

Figura 49 – Vista lateral da viga estudada: parâmetros de içamento por alças



Fonte: O autor.

Os valores atribuídos para o comprimento da barra rígida foram definidos conforme o princípio definido por Mast (1989), onde posições de ponto de içamento mais afastadas do centro de gravidade ocasionam menores ângulos de equilíbrio. Lembra-se que, para esse caso, o centro de gravidade geral da viga se localiza acima da seção transversal do ponto de içamento, visto que a altura da seção transversal do ponto de içamento é de 59,88 cm e a altura do centro de gravidade geral da viga é de 82,39 cm.

Dessa forma, partiu-se da pior situação ($h_{lift}=0\text{cm}$) e aumentou-se o comprimento de 10 e 10 centímetros para se observar o comportamento em cada situação, ressaltando que os dois últimos valores propostos são superiores ao centro de gravidade. Quanto ao uso de dois cabos, o princípio geral de atribuição dos valores foi a limitação do distanciamento máximo ao comprimento da base da mesa superior, visto que esses cabos são ligados a essa parte da estrutura, e, portanto, foram definidos três valores dentro desse intervalo.

Por fim, relacionado ao uso de dois cabos, quanto ao comprimento dos cabos, com base na observação de casos reais (imagens), foi notado que valores entre 2 e 12 metros são usuais e, devido a isso, foram realizadas simulações para analisar a influência dessa variação. Observa-se na Tabela 7 os valores adotados para os parâmetros citados.

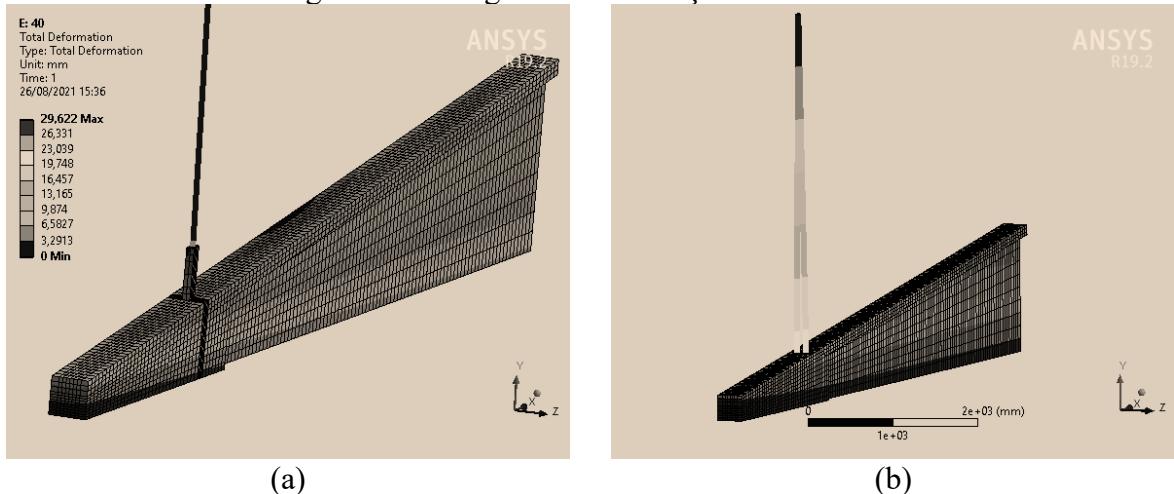
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações: alças

Bloco	Parâmetro	Valores adotados (cm)						
1	h_{lift}	Comprimento da barra rígida (<i>yoke</i>)	0,00	10,00	15,00	20,00	30,00	40,00
2	$L_{iç}$	Distância entre as alças	6,00	12,00	15,00	-	-	-
3	h_c	Comprimento vertical dos cabos de içamento	200	400	600	800	1200	-

Fonte: O autor.

Com base nos valores apresentados, foi realizada uma simulação para cada valor dos parâmetros de comprimento da barra rígida e distanciamento entre duas alças, totalizando 9 simulações. Quanto à altura dos cabos, foram realizadas uma simulação para cada valor adotado (5 simulações), considerando em todas o valor de 12 cm para o distanciamento das alças. Observa-se na Figura 50 as simulações realizadas, apresentando-se em (a) a simulação para $h_{lift} = 40$ cm e em (b) a simulação para $L_{iç} = 15$ cm.

Figura 50 – Imagens das simulações realizadas



Fonte: O autor.

5.4.2 Içamento por hastas metálicas

Com o objetivo de analisar o comportamento do içamento com uso de hastas, foram realizadas simulações numéricas considerando a variação de três parâmetros de influência, sendo esses: o posicionamento da haste (h_h), o comprimento dos cabos (h_c) e o comprimento da haste (L_h).

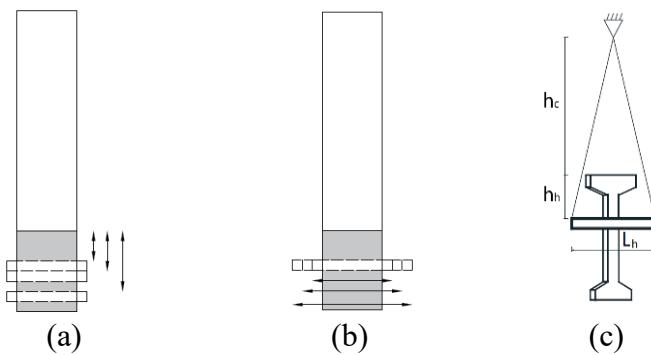
Os valores atribuídos aos parâmetros foram obtidos por meio da observação dos casos práticos e considerando a possibilidade de execução das configurações. O método de atribuição dos valores para os parâmetros foi o mesmo adotado no item 4.6.

Quanto ao presente caso, por se tratar de uma viga com seção transversal variável longitudinalmente, o centro de gravidade se localiza acima de qualquer ponto da seção

transversal do ponto de içamento, mas, mesmo assim, foi estipulado três valores para o posicionamento, partindo do local da seção transversal mais acima e logo abaixo das armaduras superiores, em seguida um valor intermediário e por fim um valor próximo à base, logo acima das armaduras inferiores, conforme observado na Figura 51 (a).

Lembrando que se adotou valores com base nas observações de casos praticados, quanto ao comprimento da haste, se tratando de uma seção transversal retangular com base de 30 cm, partiu-se dessa dimensão mínima e adotou-se intervalos de acréscimo de comprimento de 10 cm, 5cm e 5cm de cada lado para três casos de análise, respectivamente, conforme observado na Figura 51(b).

Figura 51 – Parâmetros de içamento por hastas



Fonte: O autor.

Quanto ao comprimento da haste, nesse caso, a seção do apoio é uma seção retangular ou “seção cheia” o que diferente da seção “I” já favorece a inserção da haste metálica, sem necessidade de recorte, a o menor valor para comprimento de haste já é um valor considerável. Nesse caso também se considerou como ponto de partida um comprimento de haste bastante próximo da haste e acresceu-se valores de 5 cm de cada lado e a cada variação para observa-se a influência desse parâmetro.

Quanto ao comprimento dos cabos (h_c conforme Figura 51c) observou-se pelos resultados do Capítulo 4 que valores entre 4 e 8 metros apresentaram resultados a favor da segurança e devido a isso foram especificados três valores dentro desse intervalo. Portanto, observa-se na Tabela 8 os valores adotados para os parâmetros.

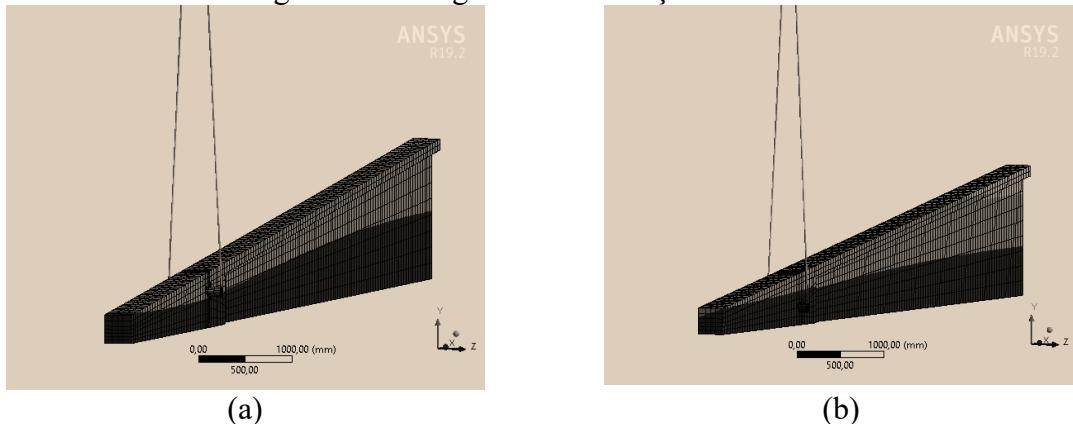
Tabela 8 – Parâmetros utilizados nas simulações: içamento por hastas

Parâmetros	Descrição	Valores adotados (cm)		
h_h	Posicionamento da haste	15,00	20,00	30,00
h_c	Comprimento dos cabos	400,00	500,00	600,00
L_h	Comprimento da haste	50,00	60,00	70,00

Fonte: O autor.

Com base nos valores apresentados, eles foram combinados de forma a resultar 27 simulações, ou seja, todas as combinações diferentes possíveis utilizando os três parâmetros citados e os valores definidos foram consideradas situações de estudo (uma simulação) e foi calculado para cada uma das situações o valor do ângulo de equilíbrio de içamento. Observa-se na Figura 52 duas das simulações realizadas, onde em (a) tem-se $h_h15h_c600L_h60$ e em (b) tem-se $h_h30h_c400L_h50$.

Figura 52 – Imagens das simulações realizadas



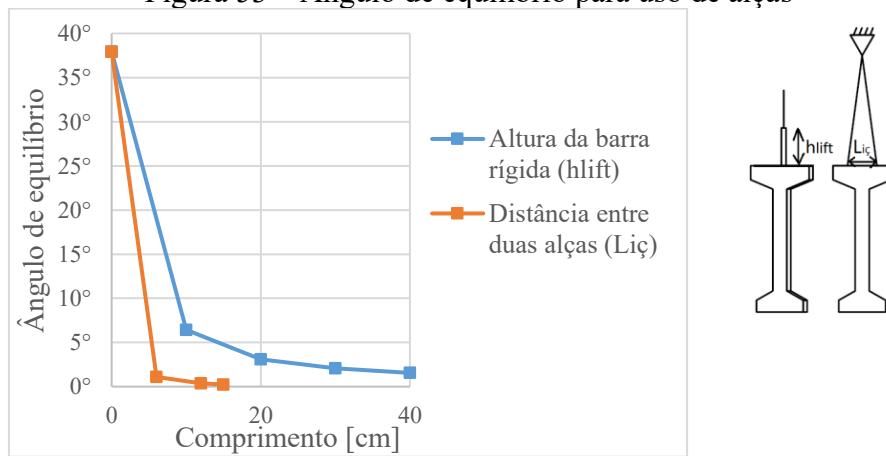
Fonte: O autor.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.5.1 Içamento por alças

Os resultados obtidos com a análise do comportamento utilizando alças estão organizados no gráfico da Figura 53.

Figura 53 – Ângulo de equilíbrio para uso de alças

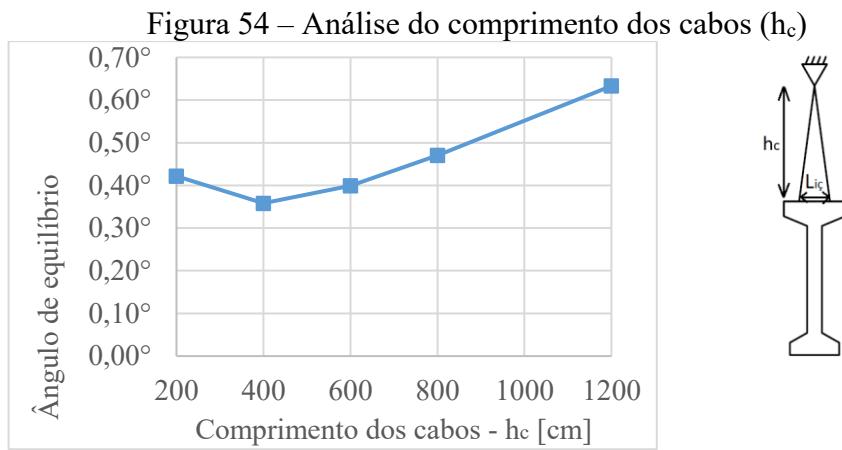


Fonte: O autor.

Observou-se que, tanto para o caso de uso de barra rígida quanto para o caso do uso do conjunto de dois pontos de içamento, houve uma queda substancial do ângulo à medida que os valores

dos parâmetros aumentaram. Também foi notado que já com um pequeno distanciamento entre as alças (6cm) houve uma queda de 97,11% no resultado de ângulo de equilíbrio e para um comprimento de barra rígida de 10 cm observou-se uma queda de 83,03%, ambos comparados ao caso de içamento por uma alça realizado diretamente na face da mesa superior. Além disso, para $h_{lift} > 10\text{cm}$ e $L_{iç} > 6\text{cm}$ ainda houve queda nos resultados de ângulo de equilíbrio, mas discreta, na ordem dos 10 %.

Observa-se na Figura 54 os resultados obtidos para comprimento dos cabos.



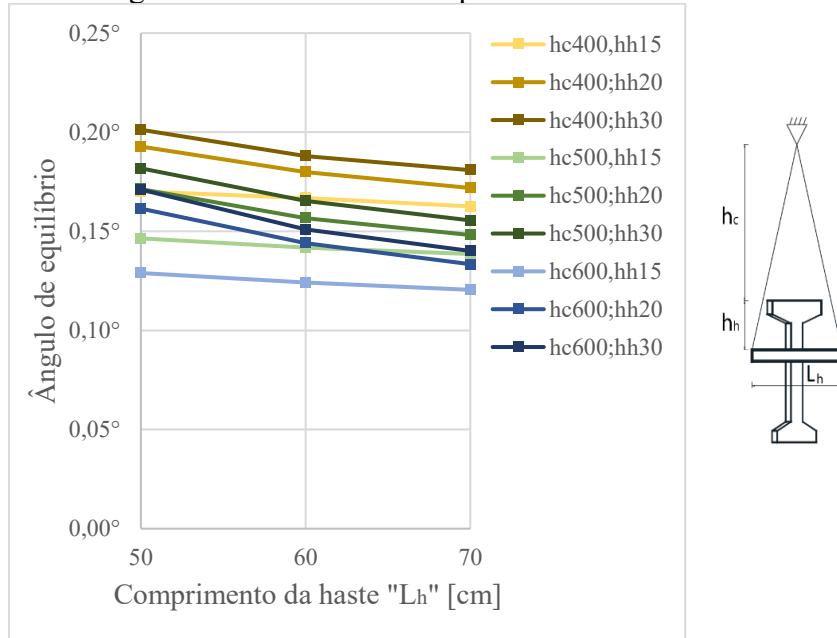
Fonte: O autor.

Notou-se um comportamento próximo ao visto no caso anterior, considerando que o comprimento que favoreceu o menor resultado de ângulo de equilíbrio foi $h_c=400\text{cm}$. Vê-se também que, nesse caso (viga tesoura), valores altos para esse parâmetro não oferecem os melhores resultados e o menor valor, mesmo que não ofereça o melhor resultado, se distancia pouco essa posição (15%). Esse comportamento foi relacionado ao tipo de geometria da viga.

5.5.2 Içamento por hastas

Os resultados obtidos com a análise do comportamento do içamento por hastas são apresentados a seguir. Inicialmente foi gerado um gráfico com destaque ao comprimento da haste, como visto na Figura 55.

Figura 55 – Análise do comprimento da haste “ L_h ”



Fonte: O autor.

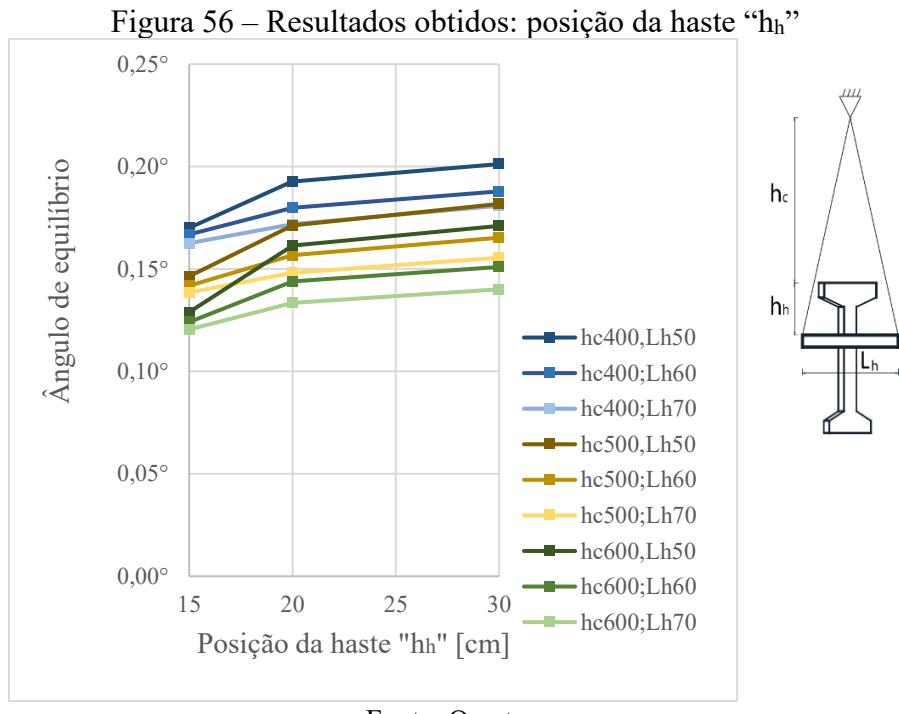
É importante citar que os dados foram organizados por meio escala de cores, visto que para cada comprimento de cabo (h_c) foi definida uma cor diferente e para cada posicionamento de haste (h_h) foi definido um tom, visto que quanto mais claro o tom, menor é o comprimento.

Inicialmente, vê-se que os presentes resultados validam o comportamento identificado no Capítulo 4, visto que foi utilizado um intervalo de valores de parâmetros a favor da segurança e os resultados variaram entre $0,12^\circ$ e $0,20^\circ$, e se comparado com o resultado obtido pela situação de içamento por uma alça sem uso de barra rígida ($37,94^\circ$), nota-se uma redução média de 99,58%. Mesmo que a variação de resultados tenha sido muito pequena, é possível discorrer sobre as tendências apresentadas.

Quanto ao comprimento da haste (L_h) notou-se em todos os casos que à medida que se aumentou o comprimento da haste houve redução nos resultados de ângulo de equilíbrio. Os resultados da cor amarela ($h_c=400\text{cm}$) apresentaram os maiores valores de ângulo, em todos os posicionamentos de haste considerados, visto que quanto maior foi o valor de posicionamento (h_h), maior foi o ângulo de equilíbrio resultante.

Notou-se que a combinação entre o maior valor de altura dos cabos e o menor valor de posicionamento da haste formou uma tendência (azul clara) que se distanciou das demais e apresentou os melhores (menores) resultados para ângulo, em todos os comprimentos de haste considerados.

Apresenta-se na Figura 56 a relação de resultados com foco na posição da haste.



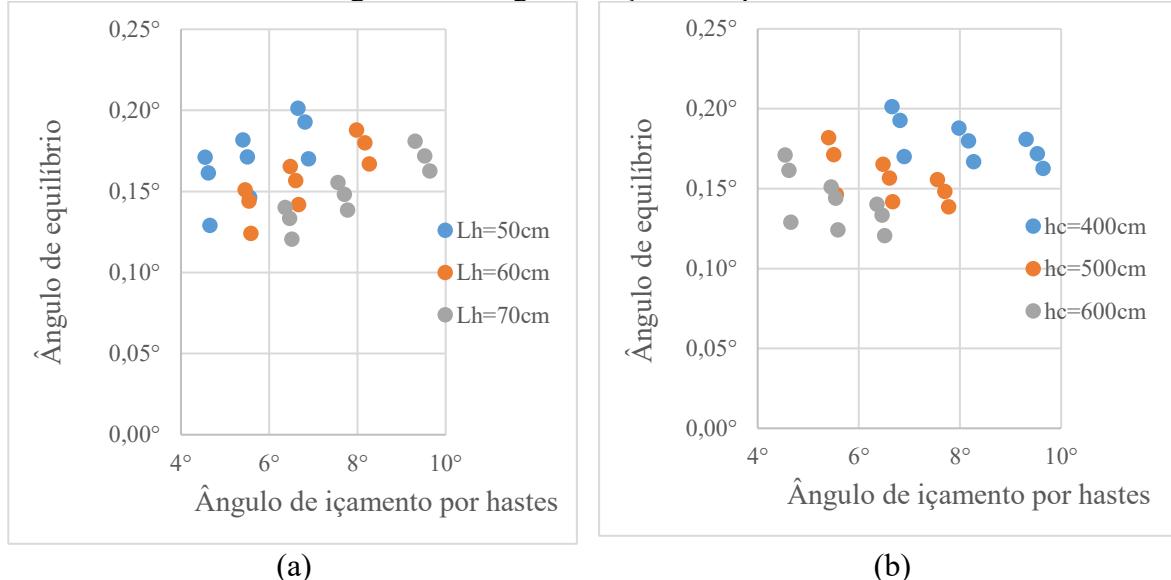
Fonte: O autor.

Pela análise do gráfico é notório a ocorrência de dois comportamentos, primeiro quanto ao posicionamento da haste, onde quanto menor o distanciamento do topo da viga melhores foram os resultados (menores valores de ângulo de equilíbrio) e segundo quanto ao comprimento dos cabos, onde, nesse caso, quanto maior o comprimento, menores foram os resultados de ângulo (escala de cores).

Ainda quanto ao posicionamento da haste, viu-se uma tendência, para todos os casos, de uma variação mais acentuada nos resultados se comparados os valores 15 e 20 cm seguido de uma variação mais branda entre os valores 20 e 30 cm. Entende-se que, considerando a variação entre 15 e 20 cm, por se tratar de uma pequena variação (5 cm) com maior interferência nos resultados, é importante que se defina o posicionamento da haste com o menor valor possível de ser executado no caso real, visto que qualquer valor acima, mesmo próximo, exerce influência no comportamento.

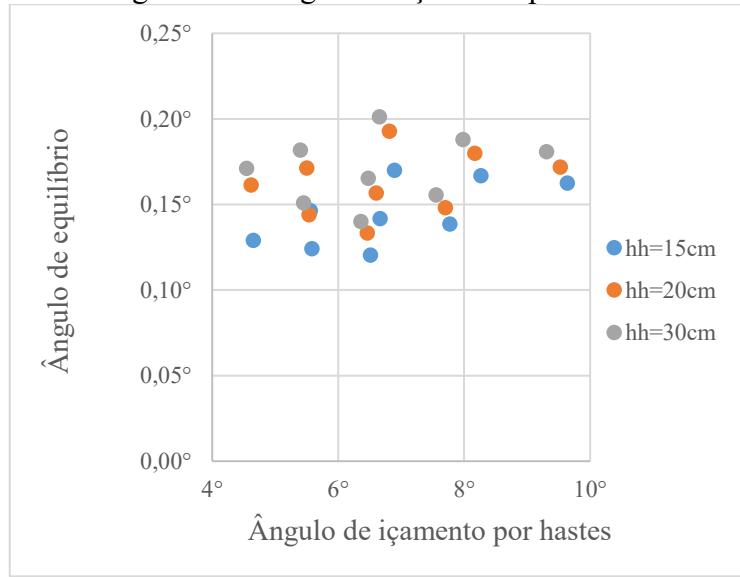
Assim como definido em 4.7.2 foi definido o ângulo de içamento por hastes “ θ_{ih} ”, calculado pela Equação 17. Observa-se em Figura 57 e Figura 58 a relação entre ângulos de equilíbrio e ângulos de içamento por hastes para esse caso.

Figura 57 - Ângulo de içamento por hastes



Fonte: O autor.

Figura 58 – Ângulo de içamento por hastes



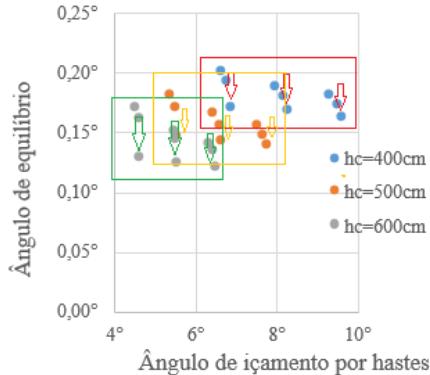
Fonte: O autor.

Quanto à disposição dos gráficos, para os mesmos resultados, eles foram organizados de forma a identificar os parâmetros trabalhados, separando em três gráficos, cada um com enfoque em uma das variáveis (L_h , h_h e h_c). Notou-se pelos gráficos da Figura 57 (a) e (b) que houve um agrupamento de resultados padrão, visto que, é possível notar agrupamentos de três em três resultados espalhados pelo gráfico.

Portanto foi notado um comportamento, melhor visto pela Figura 59, onde os pontos indicados por seta se tratam do posicionamento da haste de 15 cm, e se encontram distanciados dos outros

dois do agrupamento. Com base nisso, entende-se a importância de se trabalhar com o posicionamento da haste quanto mais próximo possível da mesa superior.

Figura 59 – Detalhe: Influência do posicionamento da haste



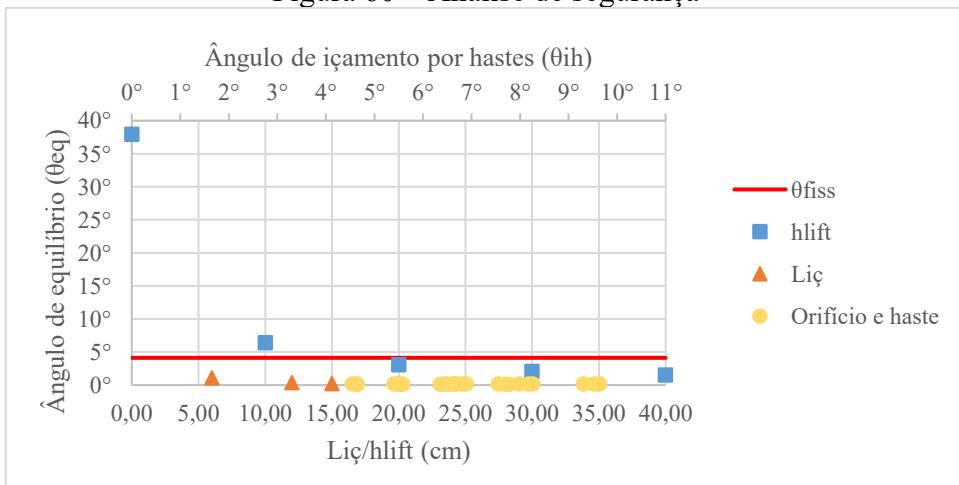
Fonte: O autor.

5.5.3 Análise geral do caso

Com a finalidade de discorrer sobre a segurança em todas as simulações apresentadas, foi realizado o cálculo analítico do ângulo de fissuração da viga através da Equação 10 (item 2.3) proposta por Zhang (2017). Considerando a impossibilidade de aplicar-se o fator de segurança proposto por Mast (1994) no içamento por hastes, por não se tratar do mesmo comportamento e mesmas variáveis de estudo, foi proposta a análise por meio do fator de segurança calculado pela Equação 19 (item 4.7.3), que faz uma relação entre fissuração e equilíbrio.

Portanto, o ângulo de fissuração para o presente caso resultou em $\theta_{fiss}=4,13^\circ$ e é possível observar na Figura 60 todos os resultados encontrados para ângulo de equilíbrio e o limite de fissuração da viga (em vermelho).

Figura 60 – Análise de segurança



Fonte: O autor.

Inicialmente considera-se que o içamento por uma alça, sem utilização de barra rígida, está claramente em situação de instabilidade lateral, considerando que apresentou o valor de fator de segurança menor que 1 (0,11). Apenas com o uso de barra rígida de a partir de 20 cm o içamento por uma alça pode ser considerado seguro e com pequena margem, pois F.S.= 1,33.

Em questão de segurança no içamento, comparado o melhor caso de uso de barra rígida (F.S.=2,66) com o melhor caso para uso de hastes (F.S.=33,28) vê-se uma vantagem de 91,02% para o uso de hastes. Nessa análise, todas as simulações de içamento com hastes apresentaram ótimos valores de equilíbrio (F.S.>20,52) e a causa desse fato é relacionada à escolha dos valores dos parâmetros e à geometria da viga (seção variável longitudinalmente).

Quanto à geometria da viga, por haver maior quantidade de massa próximo do meio do vão, o efeito da instabilidade lateral é intensificado e foi notado que a escolha do equipamento auxiliar foi crucial, visto que, como já citado, no içamento por alças sem uso de barra rígida o caso apresentou uma situação evidente de instabilidade e já com a utilização de barra rígida, haste ou duas alças o valor de ângulo de equilíbrio reduziu substancialmente.

Além disso, por se tratar de um caso onde a condição de inserção da haste na viga favorece um grande comprimento de haste (seção retangular), e não se trabalhou com valores de L_h muito baixos, já se esperava que os resultados se apresentassem com valores de ângulo de equilíbrio bastante baixos. Portanto, viu-se que utilizar seção quadrada, ou de base espessa no local de posicionamento dos cabos de içamento é um fator vantajoso quanto à segurança no içamento por hastes.

CAPÍTULO 6

MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGA DE SEÇÃO “I” SIMÉTRICA E ANÁLISE DA SEGURANÇA

6.1 DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Este capítulo apresenta análises numéricas desenvolvidas pelo método dos elementos finitos, por meio do *software ANSYS, versão 19.2*, plataforma *workbench*. O foco das análises é o estudo de um caso real de falha estrutural durante o içamento, também analisado por Lima (2018). O objetivo do estudo é avaliar a segurança da viga citada, considerando o seu caso real e realizar a simulação de casos onde haja a variação do tipo e posicionamento do equipamento auxiliar de içamento, de forma a verificar a influência causada na segurança. Para isso, foi realizado o cálculo do ângulo de fissuração numérico da viga, por meio de uma análise não-linear física e geométrica, em seguida foi calculado o ângulo de equilíbrio para cada caso de análise e, por fim, esses ângulos foram utilizados para encontrar o fator de segurança de cada situação.

O caso se trata do içamento de uma viga de concreto pretendido com 28,57 metros de vão que foi produzida pela empresa *Legran Engenharia*, localizada em Uberlândia/MG. Essa viga sofreu colapso durante o içamento e com base nessa ocorrência vê-se a importância do seu estudo. Não foram aferidos os valores de excentricidade lateral inicial da viga e destaca-se que, durante o içamento, ela rapidamente apresentou um grande deslocamento lateral, com aparecimento de várias fissuras próximo aos terços do vão e ao continuar a suspensão a viga se rompeu em três partes. Observa-se na Figura 61 as imagens do caso citado.

Figura 61 – Imagens do rompimento de viga ocorrido em fábrica de Uberlândia/MG

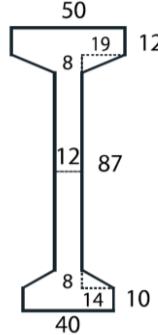


Fonte: Lima (2018).

6.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Apresenta-se na Figura 62 as características da seção transversal da viga citada, visto que todas as dimensões apresentadas são dadas em centímetros.

Figura 62 – Seção transversal (cm)



Fonte: Adaptada de Lima (2018).

Nas modelagens não foi considerado o desvio de posicionamento das alças, e o valor da excentricidade lateral inicial foi adotado como $L/500$, sendo L o valor do comprimento total da viga (vão). Quanto aos equipamentos auxiliares de içamento da situação real foram definidos laços, posicionados respectivamente a uma distância de 120 cm e 240 cm de cada extremidade e não foi utilizada barra rígida (*yoke*).

Foi realizado o cálculo das propriedades geométricas da viga e os resultados estão organizados na Tabela 9. Na Tabela 9 também estão descritos os parâmetros considerados constantes nas simulações.

Tabela 9 – Propriedades geométricas da viga

Parâmetros		Valor	Unidade
L	Comprimento da viga	2.857,00	cm
l_a	Comprimento da viga no intervalo compreendido entre as alças de içamento	2.377,00	cm
a	Comprimento da viga no intervalo compreendido entre uma extremidade e a alça de içamento mais próxima	120,00	cm
a/L	Posição relativa do balanço	4,20	%
e_i	Excentricidade lateral inicial	5,71	cm
α	Ângulo de inclinação entre os cabos de içamento e a viga	16,70	graus
H	Altura da seção	125,00	cm
A_c	Área bruta da seção	2.500,00	cm^2
y_{CG}	Distância vertical entre o centro de gravidade da seção transversal e sua base.	67,04	cm
x_{CG}	Distância horizontal entre o centro de gravidade da seção transversal e o eixo da alma.	0,00	cm
I_x	Inércia em torno do eixo horizontal	233.292,80	cm^4
I_y	Inércia em torno do eixo vertical	4.917.557,93	cm^4

Fonte: O autor.

6.3 CÁLCULO NUMÉRICO DO ÂNGULO DE FISSURAÇÃO NO IÇAMENTO

6.3.1 Definições preliminares

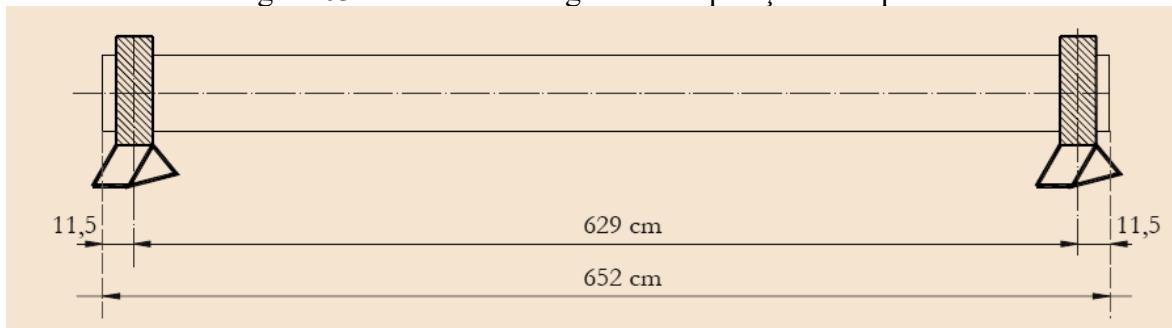
German (2015), Zhang (2017) e Lima (2018) determinaram métodos de se encontrar o ângulo de fissuração analiticamente. Nesse trabalho, esse parâmetro será estudado numericamente, de forma a comparar o resultado obtido para ângulo de fissuração da estrutura com os resultados analíticos e discorrer sobre a segurança no içamento.

6.3.2 Parâmetros de não-linearidade física para a modelagem numérica

Considerando que nessa pesquisa foi feito o uso do *software ANSYS 19.2*, plataforma *workbench*, foi realizada uma análise baseada no trabalho experimental de Lima (2002) com a finalidade de definir os parâmetros a serem utilizados na análise não-linear, com objetivo de representar o comportamento de falha de vigas pré-moldadas durante o içamento e encontrar seu ângulo de fissuração. O estudo da viga apresentada se faz necessário, visto que é um caso experimental representativo do fenômeno de instabilidade lateral e se torna um parâmetro comparativo para as análises realizadas nessa pesquisa.

Na pesquisa de Lima (2002) foram ensaiadas duas vigas em escala reduzida, na proporção 1:2, submetidas apenas ao efeito do peso-próprio, correspondente à situação real das vigas pré-moldadas durante as fases transitórias. Na presente pesquisa, realizou-se a modelagem numérica da viga V1 e a Figura 63 mostra a dimensão longitudinal da viga citada e a posição dos apoios

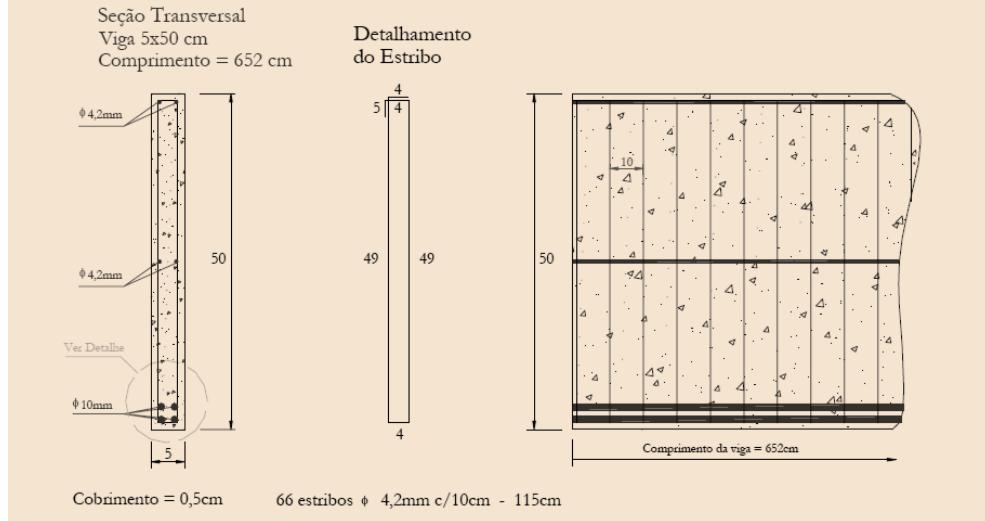
Figura 63 – Dimensão longitudinal e posição dos apoios



Fonte: Lima (2002).

Na Figura 64 são apresentadas as dimensões da seção transversal da viga e a definição das armaduras.

Figura 64 - Viga ensaiada por Lima (2002): parâmetros geométricos e construtivos



Fonte: Lima (2002).

O equipamento de ensaio consistiu na aplicação de uma inclinação gradual à viga retangular esbelta, por meio de um sistema composto por um cabo de aço preso à ponte rolante e por outro cabo que liga as duas extremidades da viga, conforme observado na Figura 65.

Figura 65 – Aparato utilizado para variação de imposição de giro



Fonte: Lima (2002).

O ensaio foi programado para etapas de giro imposto de 5 em 5 graus nos dois apoios. A fim de acompanhar o ângulo imposto foram realizadas medidas de deslocamentos laterais na face superior da viga para definir as etapas de leitura de deslocamentos e das deformações. É importante destacar que as primeiras fissuras foram identificadas visualmente quando se atingiu 19,80° de giro do corpo rígido. A realização do ensaio pode ser observada pela Figura 66.

Figura 66 – Realização do ensaio



Fonte: Lima (2002).

Conforme definido por Lima (2002), a Viga V1 foi constituída concreto com 36,4 MPa de resistência característica à compressão e 27800 MPa de módulo de elasticidade. As armaduras utilizadas, conforme observado na Figura 64, são compostas por aço CA-50.

Nessa pesquisa, para avaliar o comportamento do concreto, os critérios de *Drucker-Prager* e *Menetrey-Willam* foram aplicados aos modelos e comparados aos resultados experimentais para, assim, definir o modelo que melhor representa a situação evidenciada.

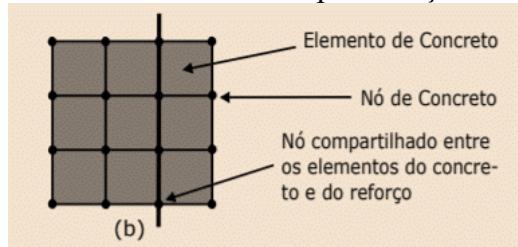
Considerando as definições já expostas, a viga em questão foi simulada adotando-se os ângulos de giro imposto, assim como os experimentos de Lima (2002). Dessa forma, partindo-se da posição 0°, a cada simulação inclinou-se a viga em 5° até chegar à posição onde o resultado não convergiria, significando que houve falha dos materiais. Cita-se que não foi considerada nenhuma excentricidade inicial para a viga em questão.

Considerando que, no experimento de Lima (2002), as primeiras fissuras foram identificadas visualmente quando se atingiu 19,80° de giro do corpo rígido, entende-se que esse seria o limite de convergência experimental, pois considera-se nas simulações o comportamento dos materiais até a fissuração. As simulações foram realizadas em dois blocos, visto que, no primeiro bloco o material concreto foi composto pelo modelo constitutivo de *Menetrey-Willam* e no segundo bloco pelo modelo constitutivo de *Drucker-Prager*.

Quanto à modelagem numérica dessa pesquisa, a viga foi modelada considerando elementos sólidos para representar o concreto e elementos de barra (*beam*) para representar as armaduras longitudinais e transversais. A ligação entre aço e concreto foi considerada pelo modelo discreto, ou seja, a malha foi discretizada de forma que haja pontos em comum entre os

elementos sólidos e os elementos de barra. Por fim, de forma a caracterizar a interface entre aço e concreto, os nós comuns entre os elementos sólidos e de barras são unidos, conforme observado na Figura 67.

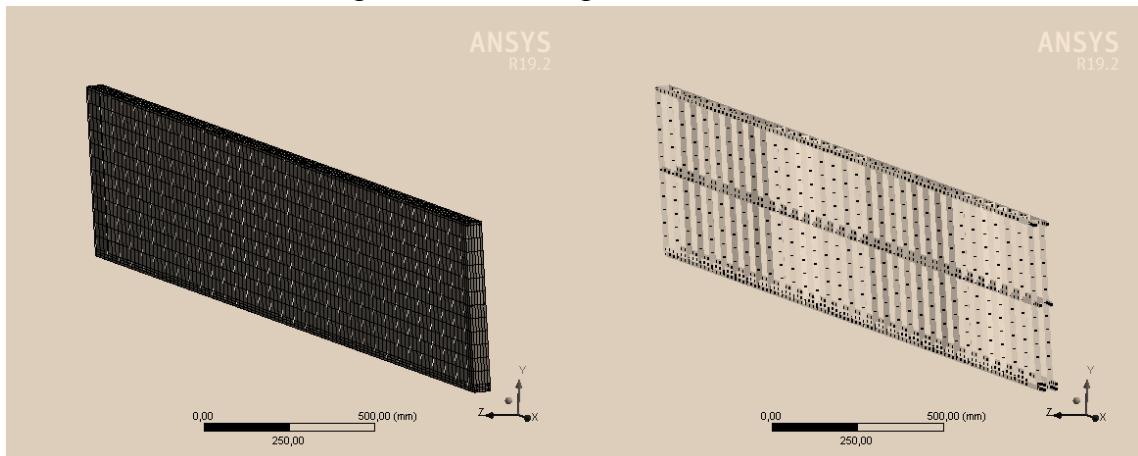
Figura 67 - Modelo discreto de representação as armaduras



Fonte: El-mezaini e Citipitioglu (1992).

Os elementos finitos foram atribuídos automaticamente pelo *software* levando em consideração as características geométricas e dos materiais atribuídas aos elementos. Aos elementos sólidos foi atribuído o material concreto (SOLID 186) e aos elementos de barra (BEAM 188) foi atribuído o material aço, visto que, adiante serão citados todos os parâmetros atribuídos a esses materiais. Observa-se na Figura 68 a modelagem dos elementos sólidos e de barra.

Figura 68 – Modelagem dos elementos



Fonte: O autor.

A malha foi definida levando em consideração primeiramente a interface entre aço e concreto e com base no resultado encontrado, cada elemento formado foi subdividido até se encontrar constância nos valores de deslocamento.

Para que as condições de contorno da modelagem numérica fossem definidas, analisou-se inicialmente o aparato utilizado no ensaio experimental de Lima (2002) conforme a Figura 69.

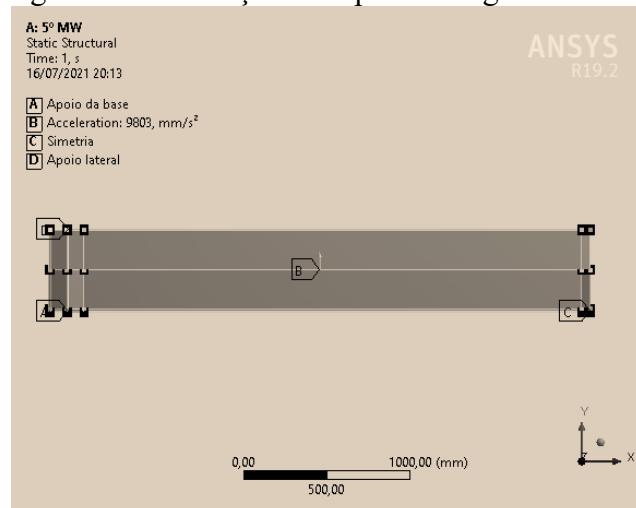
Figura 69 - Condições de contorno reais



Fonte: Lima (2002).

Portanto, foram definidos apoios de forma a caracterizar o caso de estudo de forma simplificada. Inicialmente, cita-se que por se tratar de uma estrutura simétrica, apenas uma metade da viga foi modelada e foi aplicada na seção transversal do meio do vão o comando de simetria. Portanto, viu-se necessário inserir uma restrição ao eixo x, representado pelo marcador “C” na seção do meio do vão para a simetria do modelo. Observa-se na Figura 70 os apoios definidos.

Figura 70 – Condições de apoio da viga em estudo



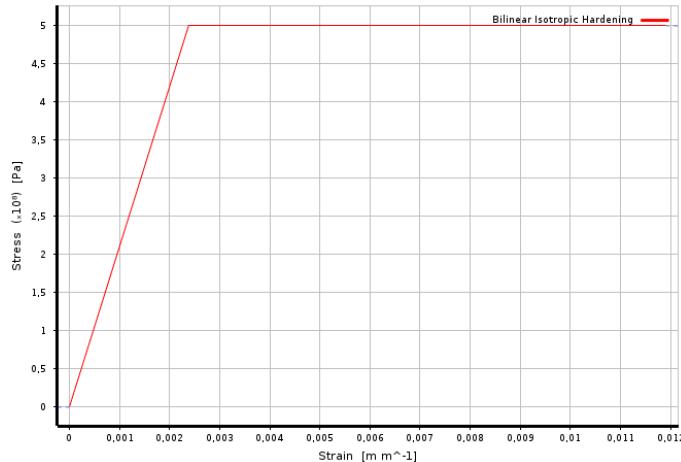
Fonte: O autor.

Conforme observado na Figura 70, as simulações foram realizadas considerando a viga fixa em um dado ângulo, considerou-se que os apoios “A” e “D” seriam aplicados o primeiro na base da seção transversal da viga na posição definida para o apoio e o segundo na aresta lateral dessa mesma seção transversal, ambos restringindo os movimentos na direção dos eixos y e z.

Quanto ao aço, considerou-se o módulo de elasticidade $E=200$ GPa e o coeficiente de *Poisson* de 0,3 e foi adotado um material representativo do aço CA-50, simplificando o seu

comportamento por um modelo de plastificação bilinear, com comportamento elástico até a tensão de escoamento (500MPa) e a partir de então plastificação constante. Observa-se na Figura 71 o gráfico gerado pelo *software ANSYS*.

Figura 71 – Modelo não-linear do aço



Fonte: O autor.

Quanto ao concreto, foi considerado o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor do f_{ck} , pela Equação 15 (Item 5.3), conforme ABNT NBR 6118 (2014). Mesmo que o módulo de elasticidade experimental tenha sido obtido por Lima (2002), será considerado o módulo de elasticidade secante, visto que este será utilizado nas demais simulações desse trabalho e dessa forma é necessário se ter esse padrão por motivo comparativo e de análise.

O valor da resistência à compressão uniaxial foi adotado como o f_{ck} cujo valor foi obtido experimentalmente por Lima (2002). O valor da resistência à tração uniaxial foi considerado como o resultado da Equação 19 e o valor da resistência à compressão biaxial foi considerado o valor da compressão uniaxial acrescida de 20%.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (19)$$

Aos demais valores, assim como citado, foi realizado o teste de aplicação de dois modelos constitutivos, tomando como base os parâmetros pré-definidos pelo programa *ANSYS* e variando-se até se encontrar resultados mais próximos dos experimentais.

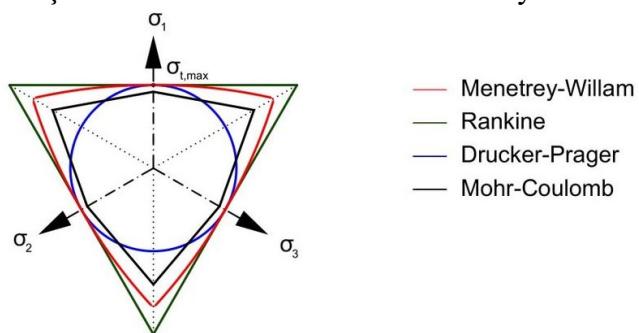
6.3.2.1 Modelo constitutivo *Menetrey-Willam*

O modelo constitutivo de *Menetrey-Willam* foi baseado na superfície de ruptura de *Willam-Warnke*. Este modelo compartilha algumas características do modelo de *Drucker-Prager* e,

portanto, é capaz de modelar materiais semelhantes, todavia o modelo de *Menetrey-Willam* é geralmente melhor para simular o comportamento de agregados ligados, como o concreto.

Segundo Hokes (2015) o Critério de Menetrey-Willam provém da superfície de *William-Warnke*, descrevendo a resistência triaxial do concreto em termos de três invariantes independentes de tensão. A superfície não apresenta arestas vivas, apesar de ser bastante parecida a representação de *Mohr-Coulomb* conforme mostrado na Figura 72. As arestas tornam-se mais circulares com o aumento do confinamento.

Figura 72 – Comparação Critérios de Resistência Menetrey-Willam e Mohr-Coulomb



Fonte: Hokes (2015).

Segundo o autor, é o modelo mais indicado para simular o comportamento de agregados ligados, como é o caso do concreto. Esse modelo é capaz de representar muitos comportamentos mecânicos importantes do concreto: resistência à tração e compressão, endurecimento não linear, amolecimento e dilatação. Observa-se na Tabela 10 os parâmetros definidos para a modelagem em questão.

Tabela 10 - Parâmetros de entrada do modelo *Menetrey-Willam Concrete*

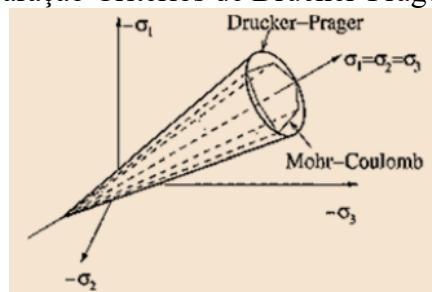
Parâmetro	Valor atribuído	Unidade de medida
E	33124	MPa
v	0,2	-
μ	2400	kg/m ³
R _c	36,40	MPa
R _t	3,29	MPa
R _b	43,68	MPa
ψ	10	graus
κ _{cm}	0,0012317	-
κ _{cr}	0,0025	-
Ω _{ci}	0,33	-
Ω _{cr}	0,1	-
κ _{tr}	0,0005	-
Ω _{tr}	0,2	-

Fonte: O autor.

6.3.2.2 Modelo constitutivo Drucker-Prager

Segundo Guerra (2017) o critério de Drucker Prager foi proposto a partir de uma adaptação do modelo de Mohr-Coulomb. Conforme a o modelo de Mohr-Coulomb apresenta cantos agudos na função no espaço octaédrico das tensões principais, o que implica em singularidades nas funções de viscosidade. Tais singularidades são tratadas utilizando uma função que envolve a superfície de plastificação (Figura 73).

Figura 73 – Comparação Critérios de Drucker-Prager e Mohr-Coulomb



Fonte: Guerra (2017).

No entanto, mesmo que o critério represente o concreto de forma satisfatória, a autora ressalta que ele apresenta falhas no que se refere à relação entre a tensão octaédrica e a tensão cisalhante octaédrica, e a independência em relação ao ângulo de similaridade. Dessa forma, quando submetido a altas tensões de compressão, o modelo não é adequado para representar o comportamento do concreto.

Observa-se na Tabela 11 os parâmetros definidos para a modelagem em questão.

Tabela 11 - Parâmetros de entrada do modelo *Drucker-Prager Concrete*

Parâmetro	Valor atribuído	Unidade de medida
E	33124	MPa
v	0,2	-
μ	2400	kg/m ³
R _c	36,40	MPa
R _t	3,29	MPa
R _b	43,68	MPa
δ _t	0,25	-
δ _c	1,00	-
κ _{cm}	0,0012317	-
κ _{cr}	0,0025	-
Ω _{ci}	0,33	-
Ω _{cr}	0,1	-
κ _{tr}	0,0005	-
Ω _{tr}	0,2	-

Fonte: O autor.

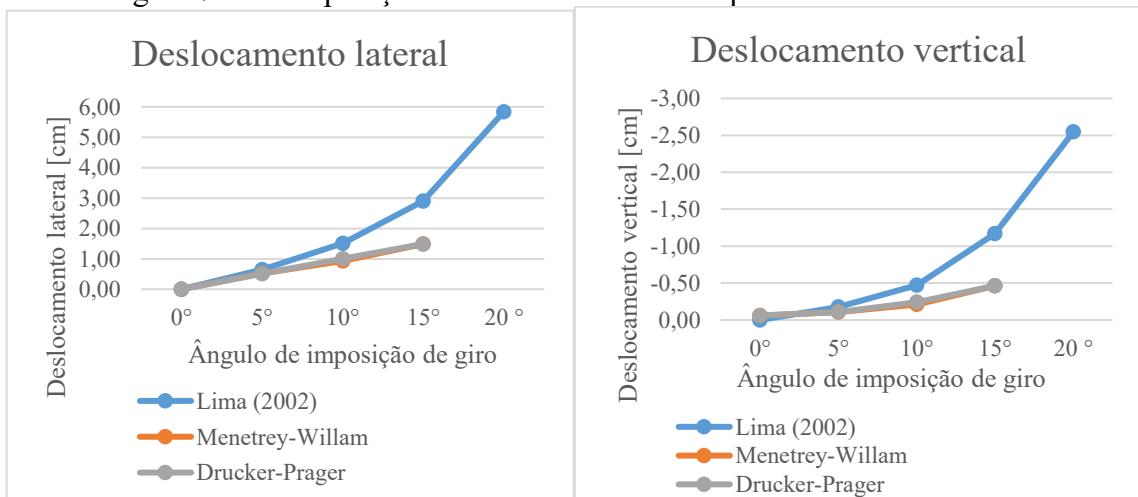
6.3.2.3 Conclusão sobre o modelo não-linear

Inicialmente, destaca-se que as simulações convergiram até a rotação de 15° , ou seja, não houve convergência de resultados para o ângulo de rotação de 20° , assim como a resposta experimental de Lima (2002). Conclui-se com essa situação que houve uma boa representação numérica do comportamento dos materiais frente à ruptura.

Após a definição do resultado citado, buscou-se encontrar o ângulo limite de fissuração com precisão de 1° e concluiu-se que se trata do ângulo de 15° visto que foi realizada uma simulação aos 16° de rotação e os resultados não convergiram.

Observa-se no gráfico a seguir os resultados encontrados para deslocamento lateral e vertical no meio do vão, tendo como ponto de referência a viga posicionada nos ângulos de rotação impostos descritos, em contrapartida ao adotado por Lima (2002), que considera como ponto de referência a viga posicionada sem nenhuma rotação. Considerando o citado, os resultados de Lima (2002) foram adaptados de tal forma que os deslocamentos referentes à imposição de giro foram subtraídos. O gráfico citado pode ser observado pela Figura 74.

Figura 74 – Comparação entre deslocamentos experimentais e numéricos

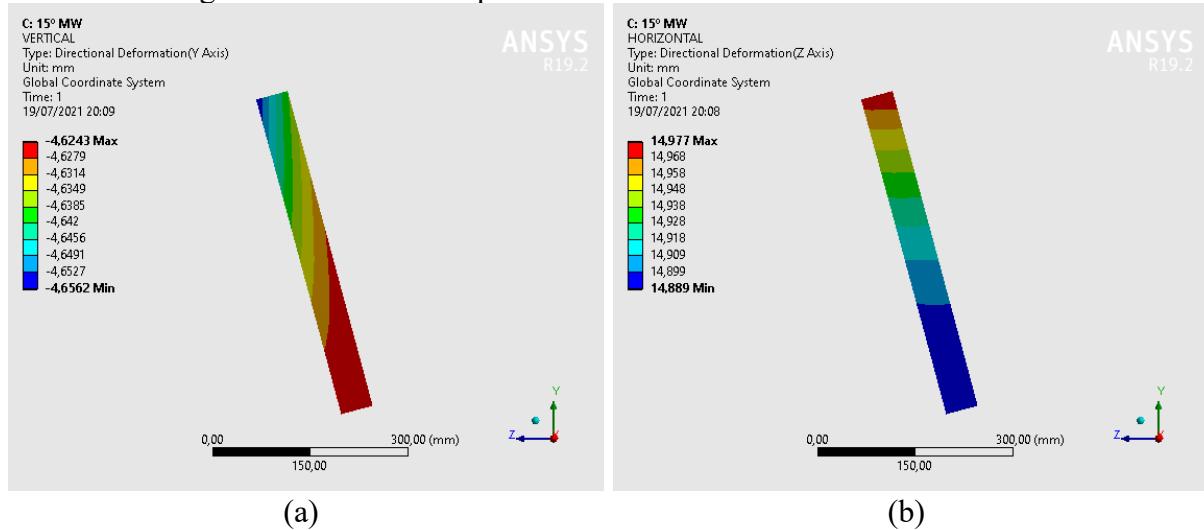


Fonte: O autor

Observa-se que o modelo proposto apresentou resultados concordantes com os experimentais de Lima (2002). Percebeu-se também que os resultados de Lima (2002) para deslocamentos foram maiores que o resultados dos modelos testados, fato que era esperado, visto que os modelos testados consideram a falha dos materiais, mas não considera a fissuração progressiva. No caso experimental, as micro-fissurações do concreto, imperceptíveis ao olho nu, contribuem para alcançar um maior valor de deslocamento.

Além disso, a viga foi considerada perfeitamente reta, ou seja, não se considerou as imperfeições laterais iniciais. Esse fato também contribui para que os resultados de deslocamento do modelo sejam menores que os resultados experimentais. Observa-se na Figura 75 os resultados encontrados para deslocamento vertical e deslocamento lateral no meio do vão para a etapa de giro de 15°.

Figura 75 – Resultados para deslocamento lateral e vertical aos 15°



Fonte: O autor

Através do gráfico da Figura 76 são apresentados os resultados experimentais e numéricos encontrados para deformação normal no concreto, obtidos na posição do meio do vão no ponto mais crítico à tração. Esse ponto é representado pelo valor máximo dado pela Figura 77 (a) no caso do modelo *Menetrey-Willam*, pela Figura 77 (b) no caso do modelo *Drucker-Prager* e pelo valor do extensômetro 6 (Figura 76).

Figura 76 – Comparação entre deformações normais experimentais e numéricas

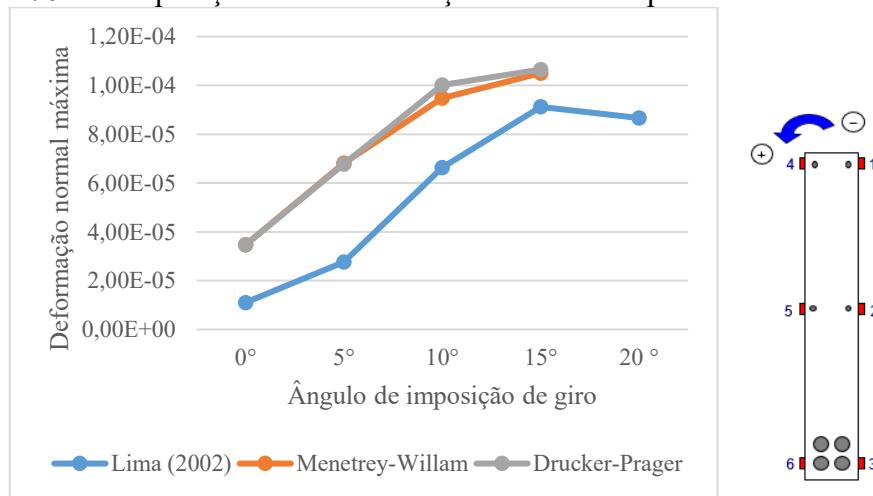
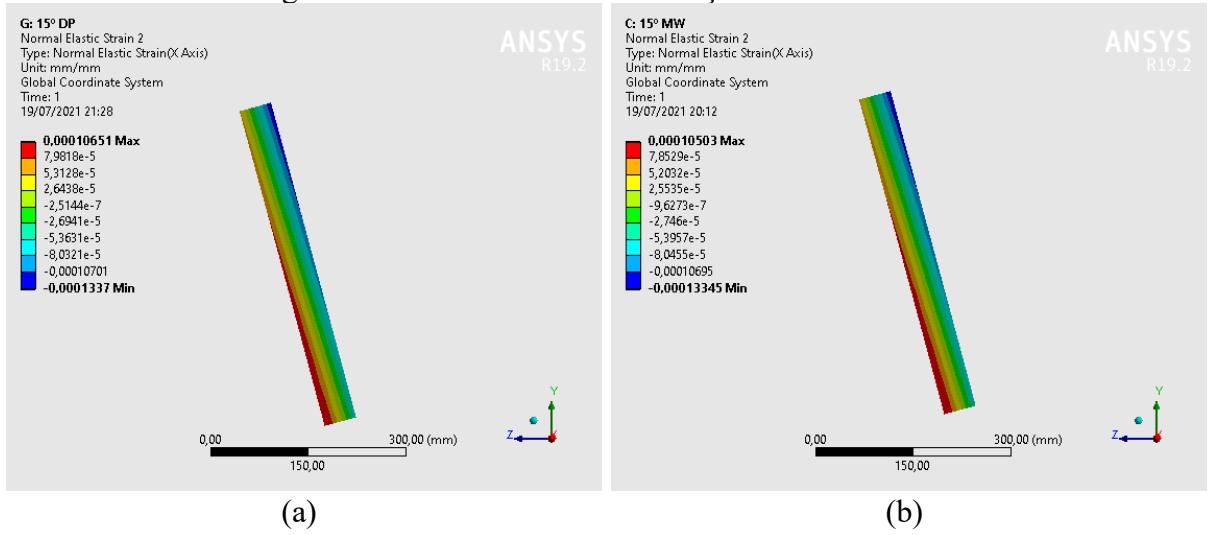


Figura 77 – Resultados de deformação normal aos 15°



Fonte: O autor.

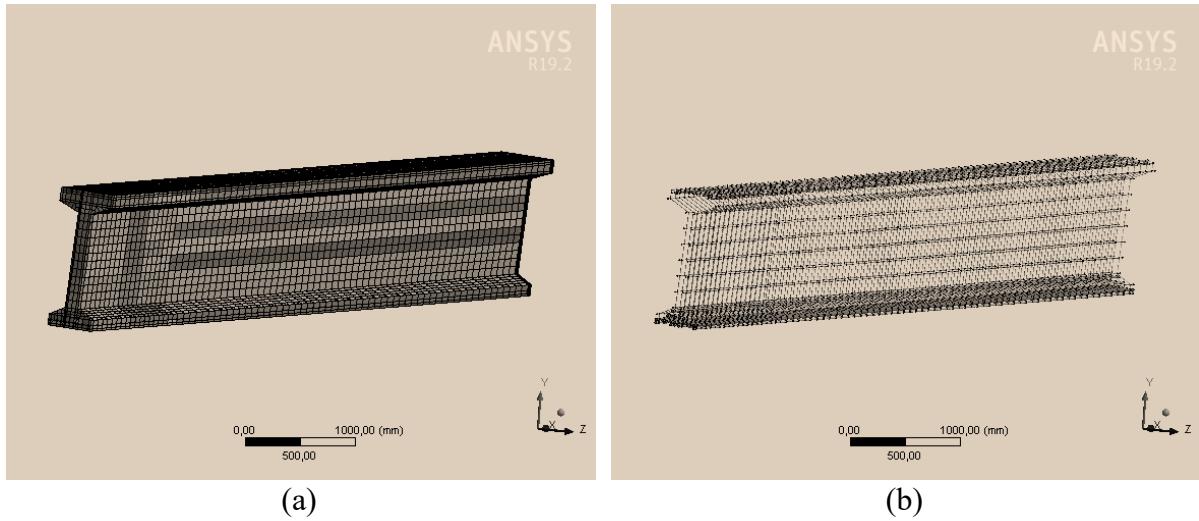
Observou-se que os resultados de deformação normal representaram o comportamento real do material, pois, mesmo que não se mostraram idênticos, apresentam a mesma tendência de comportamento. Observou-se também que a divergência de resultados entre os modelos *Menetrey-Willam* e *Drucker-Prager* foi praticamente nula. Dessa forma, considerando os dizeres teóricos será adotado nessa pesquisa o modelo constitutivo de *Menetrey-Willam*.

6.3.3 Definições da modelagem

O objetivo da análise não-linear foi encontrar o máximo giro em que os materiais permanecem sem apresentar ruptura ou fissuração, ou seja, o ângulo máximo de fissuração do elemento. Dessa forma, modelou-se estruturas de concreto armado, e não foi considerado o efeito da protensão.

Assim como já citado no estudo da viga de Lima (2002), se tratando de um modelo de concreto armado, o concreto foi definido por elementos sólidos e as armaduras longitudinais e transversais definidas por elementos *beam*. A interface entre concreto e armadura foi realizada pelo modelo discreto, ou seja, houve a definição de nós de intersecção entre os dois elementos e união desses nós. Observa-se na Figura 78 as imagens da simulação realizada, em (a) observa-se os elementos sólidos (concreto) e em (b) observa-se os elementos *beam* (armaduras).

Figura 78 – Imagens das simulações realizadas



Fonte: O autor.

6.3.4 Definição dos materiais

O modelo constitutivo escolhido para modelagem numérica do concreto foi o critério de *Menetrey-Willam*, que está disponível na biblioteca interna do *ANSYS (Geomechanical Materials)*. A curva do material foi inserida no modelo numérico de acordo com a verificação realizada na subseção 6.3.1.

O módulo de elasticidade do concreto foi considerado pelo módulo de elasticidade secante dado pela Equação 15 (Item 5.3), conforme ABNT NBR 6118 (2014). Adotou-se o valor de 0,20 para coeficiente de *Poisson*.

A resistência do material à compressão uniaxial foi considerada igual ao f_{ck} , a resistência à compressão biaxial foi considerada por $1,2f_{ck}$ e a resistência à tração foi considerada pelo resultado da Equação 19 (item 6.3.1), conforme dado pela ABNT NBR 6118 (2014).

Para as armaduras passivas considerou-se constituídas por aço CA-50 com módulo de elasticidade $E=200$ GPa, coeficiente de *Poisson* de 0,3 e representação do comportamento da resistência material por gráfico bilinear com plastificação constante após o limite de escoamento (Figura 71). Como se sabe, a resistência de escoamento do aço CA-50 é de 500 MPa.

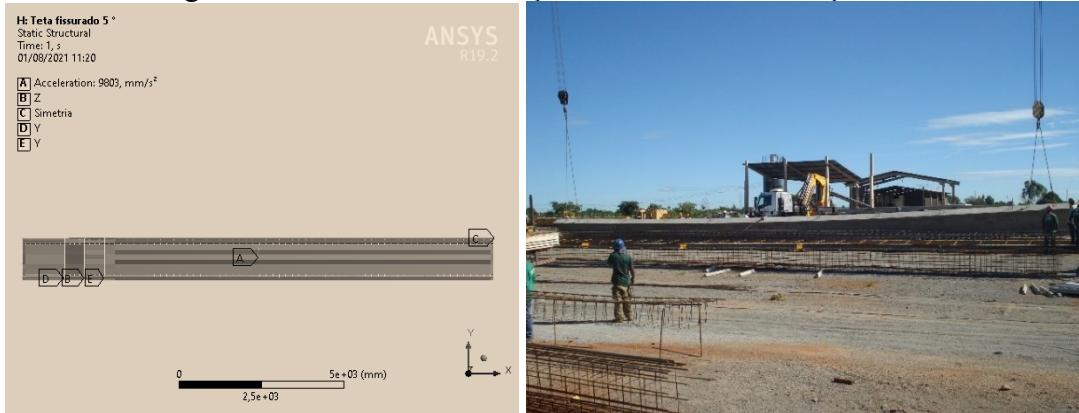
6.3.5 Condições de contorno

O modelo de condições de contorno foi definido com embasamento no experimento de Lima (2002). Dessa forma, foi imposta uma restrição em x (coordenadas conforme Figura 79) na

seção transversal do meio do vão para representar a simetria, uma restrição em y na seção transversal onde se ligam os cabos de içamento à viga e uma restrição no eixo z na seção transversal, pertencente ao plano yz, onde ocorre a ligação entre os cabos de içamento e o guindaste.

Sem alterar as condições de contorno, houve a imposição de giro à viga, iterativamente, até se encontrar o máximo ângulo de giro o qual ainda existe convergência do *software*, ou seja, o máximo ângulo em que os materiais não apresentam ruptura. Observa-se as restrições impostas na Figura 79.

Figura 79 – Modelo de condição de contorno x situação real



Fonte: O autor.

Quanto ao carregamento, adotou-se apenas a influência do peso próprio, sendo este aplicado em incrementos de carga por meio de *substeps* (inicial 400, mínimo 200 e máximo 10⁹). Para o cálculo do peso próprio, adotou-se a massa específica do concreto como 2400 kg/m³, do aço 7850 kg/m³ e a aceleração da gravidade como 9,803 m/s².

6.4 CÁLCULO NUMÉRICO DO ÂNGULO DE EQUILÍBRIO NO IÇAMENTO

6.4.1 Definições preliminares

Assim como já realizado nos Capítulos 4 e 5, nessa seção apresenta-se uma análise numérica com objetivo de encontrar o ângulo de equilíbrio para caso citado nesse capítulo. Dessa forma, apresenta-se a seguir as definições básicas da modelagem e os parâmetros definidos para o estudo do içamento por alças e por hastas.

6.4.2 Malha, elementos finitos, materiais e condições de contorno

A viga de concreto foi modelada com uso de elementos sólidos, sem inserção de armaduras, com o comprimento longitudinal definido por um arco de circunferência, de tal forma que no meio do vão o deslocamento lateral é máximo e correspondente à excentricidade lateral assumida. A viga estudada é simétrica, e, portanto, foi modelada apenas uma metade da viga e foi aplicado o comando “*Symmetry Region*” na seção do meio do vão, ou seja, a metade não modelada é considerada pelo programa como um espelho da seção definida.

Na modelagem da viga de concreto, da barra rígida e das hastes metálicas, usou-se elementos finitos sólidos que foram definidos automaticamente pelo programa utilizado, visto que este considerou a escolha com base nos materiais associados a cada geometria, na forma da geometria e nas configurações impostas. Na modelagem dos cabos de içamento, usou-se elementos finitos lineares que foram definidos como *link*, por meio de comandos da plataforma APDL do mesmo *software*. A malha foi definida conforme estudo apresentado no item 4.3.

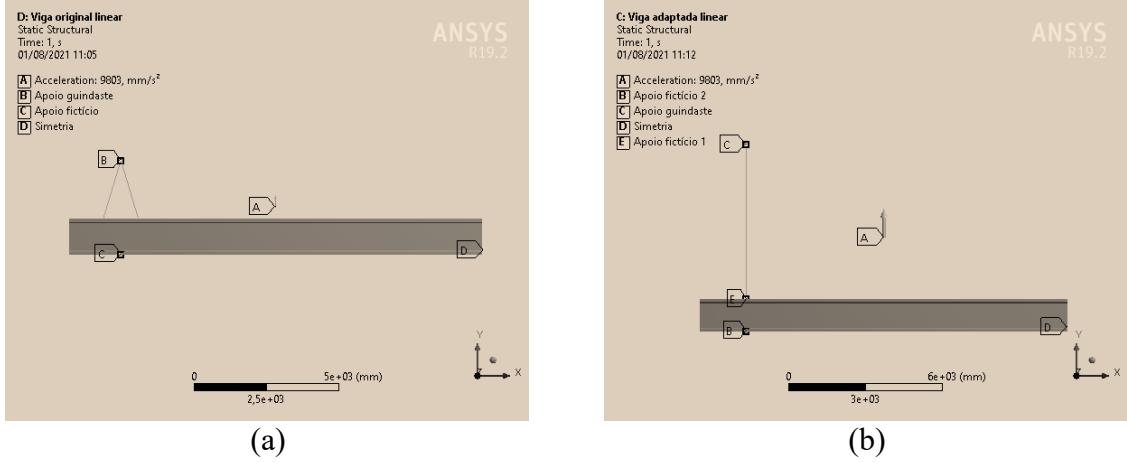
Quanto ao carregamento, adotou-se apenas a influência do peso próprio, sendo este aplicado em 20 incrementos de carga. Para o cálculo do peso próprio, adota-se a massa específica do concreto armado como 2400 kg/m^3 e a aceleração da gravidade como $9,803 \text{ m/s}^2$.

Considerou-se para toda a viga o material concreto, sem discretização das armaduras e para os cabos de içamento considerou-se o material aço estrutural e a seção transversal com 5 cm de diâmetro. Assim como definido em 4.4, quanto ao aço estrutural, considerou-se para módulo de elasticidade o valor de $E=200 \text{ GPa}$, para densidade o valor de 7860 kg/m^3 e para o coeficiente de *Poisson* o valor de 0,30.

Segundo Lima (2018) para o caso real citado a resistência a compressão do concreto estipulada para a fase de serviço (f_{ck}) foi de 40 MPa e para as fases transitórias (f_{cj}) 24 MPa, visto que para as simulações numéricas considera-se a resistência proposta para as fases transitórias. Portanto, quanto ao concreto, considerou-se o módulo de elasticidade secante dado a partir do valor de resistência característica à compressão (f_{ck}), conforme a Equação 15 (Item 5.3), determinada pela ABNT NBR 6118 (2014). Quanto ao coeficiente de *Poisson* do concreto, o valor estabelecido em todas as análises foi de 0,2.

A condições de contorno foram definidas em semelhança ao citado em 4.4, e observa-se na Figura 80 as condições impostas para o içamento da situação real (a) e da situação adaptada (b). O ângulo de equilíbrio foi calculado conforme citado em 4.5.

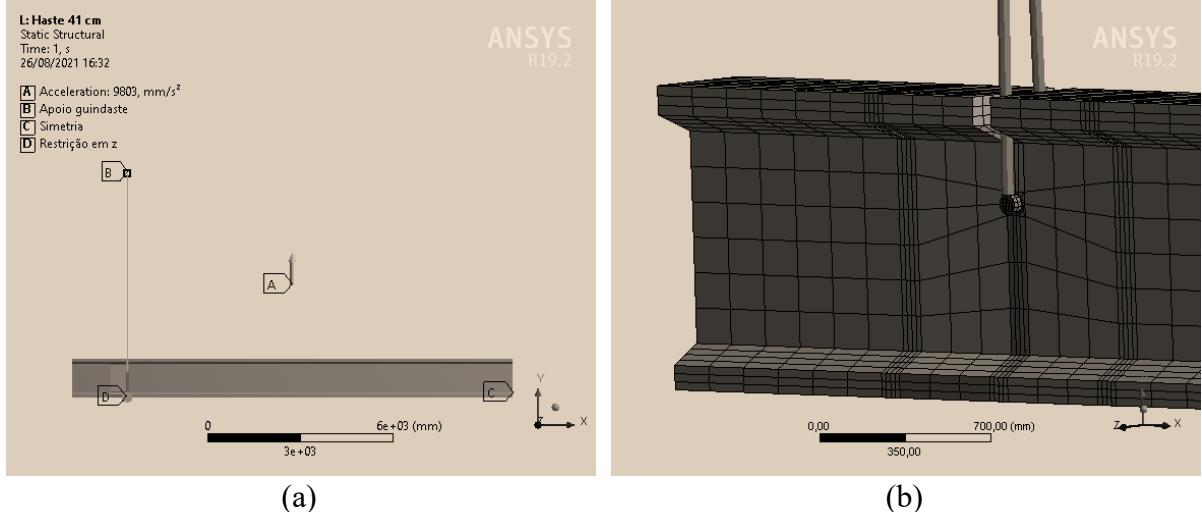
Figura 80 – Condições de contorno: Içamento por alças



Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 81 em (a) as condições de contorno impostas para o içamento por hastes e em (b) o detalhe da modelagem da haste e cabos.

Figura 81 – Condições de contorno: Içamento por hastes



Fonte: O autor.

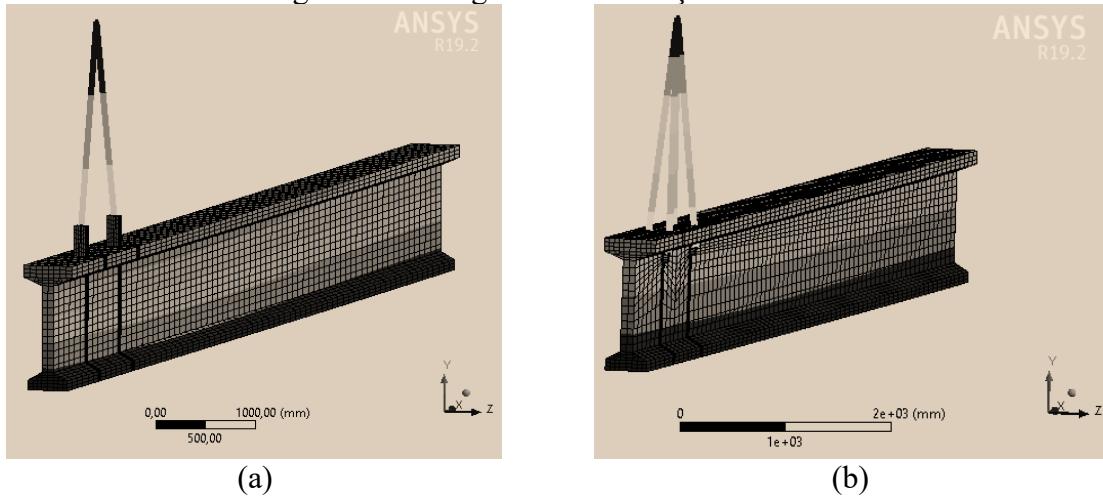
6.4.3 Determinação dos parâmetros das análises

6.4.3.1 Caso real

Assim como nos Capítulos 4 e 5, foram realizadas análises numéricas com o objetivo de se encontrar o ângulo de equilíbrio para algumas situações. Inicialmente foram realizadas 3 simulações, considerando o posicionamento dos pontos de içamento assim como no caso real.

Portanto, realizou-se duas simulações com utilização de alças de içamento, a primeira com ($h_{lift}=30\text{cm}$) e a outra sem inclusão de barra rígida. Realizou-se também uma simulação com utilização de orifício e haste metálica ($h_{h21\text{cm}}, h_{c200\text{cm}}, L_{h22\text{cm}}$). Observa-se na Figura 82 em (a) a simulação com uso de barra rígida e em (b) a simulação de içamento por hastas.

Figura 82 – Imagens das simulações realizadas



Fonte: O autor.

6.4.3.2 Caso adaptado

Considerando que nas demais análises dessa pesquisa considerou-se o uso de um ponto de içamento em cada extremidade e sabendo que o uso de dois pontos de içamento (assim como no caso real) em cada extremidade pode apresentar efeitos que venham a interferir na análise do comportamento do içamento, foi proposto um caso adaptado, onde é considerado o posicionamento de apenas um ponto de içamento em cada extremidade, distando destas 180cm.

Para o caso adaptado foram realizadas simulações para içamento com hastas, variando-se o distanciamento do posicionamento das hastas (h_h) e para o içamento com alças, variando o comprimento da barra rígida (*yoke*). Assim como já comentado nos Capítulos 4 e 5, a escolha dos valores dos parâmetros foi definida com base na literatura e na análise de casos concretos de içamento. Observa-se na Tabela 12 os valores adotados para os parâmetros de análise.

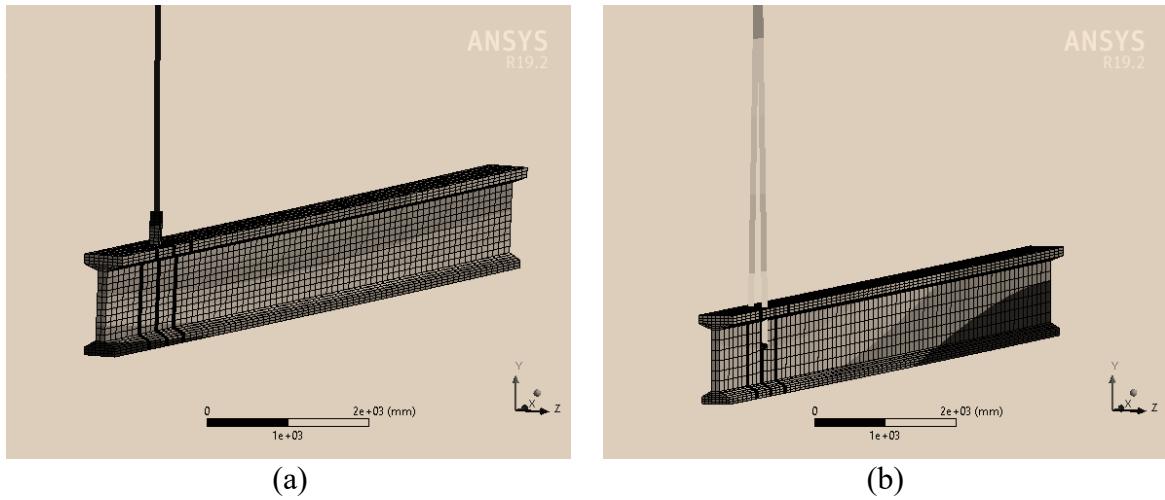
Tabela 12 – Parâmetros adotados: caso adaptado

Parâmetro	Valores adotados (cm)					
h_{lift} Comprimento da barra rígida (<i>yoke</i>)	0,00	5,00	10,00	20,00	30,00	40,00
h_h Posicionamento da haste ao longo da seção transversal da viga	21,00	31,00	41,00	51,00	71,00	-

Fonte: O autor.

Com base nos valores apresentados, foi realizada uma simulação para cada valor dos parâmetros de comprimento da barra rígida e posicionamento da haste, totalizando 11 simulações. Quanto ao posicionamento da haste foram realizadas 5 simulações, em todas considerando constante os valores de comprimento dos cabos e da haste ($h_c=600\text{cm}$, $L_h=22\text{cm}$). Observa-se na Figura 83 duas das simulações realizadas, apresentando-se em (a) a simulação para $h_{lift}=40\text{ cm}$ e em (b) a simulação para $h_h=51\text{cm}$.

Figura 83 – Imagens das simulações realizadas



Fonte: O autor.

6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.5.1 Ângulo de fissuração

Após a realização das simulações não-lineares encontrou-se o valor de $\theta_{fiss}=4,0^\circ$ para a última iteração convergente, considerando-se este valor como o ângulo de fissuração numérico. Além disso, o valor encontrado para ângulo de fissuração, segundo Zhang (2017), foi de $3,32^\circ$.

Houve a tentativa de se encontrar resultados de fissuração para a viga adaptada (apenas uma seção de içamento), todavia, sem a imposição de rotação já não houve resultado convergente. Entende-se que a viga foi projetada para distribuição de esforços em dois apoios para cada extremidade e para que a viga suporte a distribuição dos esforços em apenas um apoio seria necessário que esta apresentasse maior resistência ($f_{ck}=40\text{MPa}$). Mesmo assim, para as análises considerando a situação adaptada será considerado como parâmetro de comparação o ângulo de fissuração encontrado para a situação real.

6.5.2 Ângulo de equilíbrio

Quanto às análises lineares, inicialmente para o caso real, encontrou-se um ângulo de equilíbrio de $3,18^\circ$ (θ_{eq}) com utilização de alças de içamento (sem barra rígida), $\theta_{eq} = 0,80^\circ$ com utilização de barra rígida de 30 cm e $\theta_{eq} = 0,75^\circ$ com utilização de orifício e haste metálica. Com essa simples comparação já é notória a vantajosidade da utilização da haste como equipamento auxiliar de içamento, visto que houve uma redução de 76,42% no valor do ângulo de equilíbrio frente à situação sem barra rígida. Comparando-se com a situação com uso de barra rígida houve uma redução de 6,25% nos resultados de ângulo.

Se comparados esses resultados (situação real) com o ângulo de fissuração observa-se que todos os valores se encontram abaixo de $\theta_{fiss} = 4,0^\circ$ e considera-se que de acordo com os parâmetros utilizados e simplificações propostas, essas situações se encontram em estado de segurança.

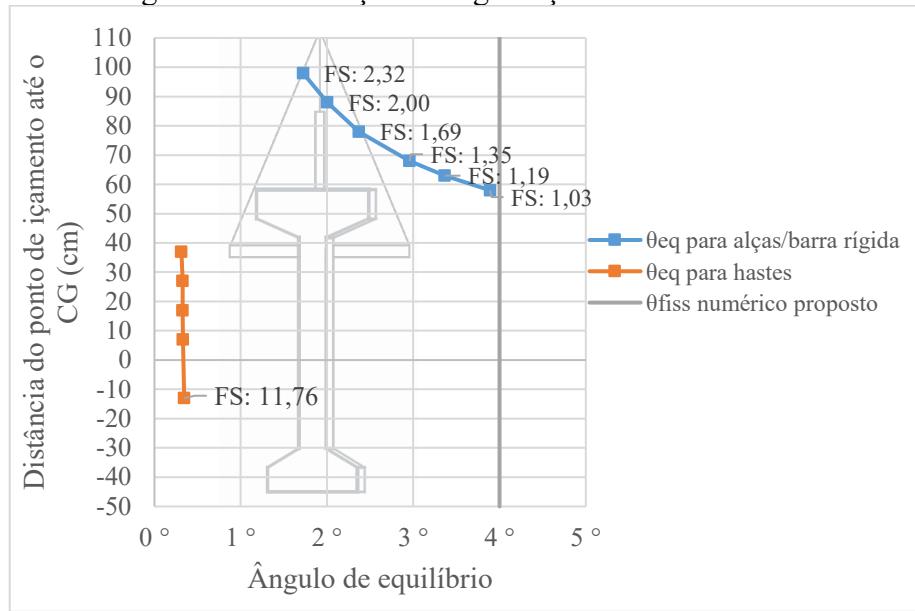
Outra comparação que é válida de se observar é a situação real frente à situação adaptada. Observou-se que a situação real apresentou $\theta_{eq} = 3,18^\circ$, conforme já citado, e a situação adaptada apresentou $\theta_{eq} = 3,89^\circ$. Com base nessa simples comparação, vê-se que o ângulo de equilíbrio apresentou uma variação de 22,33% quando comparados os casos real e adaptado. Portanto, visto que foram realizadas considerações do caso adaptado frente o comportamento de fissuração do caso real, considera-se que essas análises estão a favor da segurança

6.5.3 Análise da segurança

De posse dos resultados de ângulo de fissuração e ângulo de equilíbrio das vigas, é possível estabelecer uma relação de segurança (fator de segurança) pela razão entre esses valores. O cálculo do fator de segurança é dado pela Equação 18 (Item 4.7.3).

Dessa forma foram calculados os fatores de segurança utilizando os ângulos de fissuração numérico desta pesquisa e analítico segundo Zhang (2017). Os resultados obtidos para a variação do posicionamento dos equipamentos de içamento ao longo da altura da viga (situação adaptada) em comparação com o limite de fissuração numérico e os respectivos fatores de segurança estão expostos no gráfico da Figura 84. Os valores de posicionamento foram adequados de forma que todos tenham como ponto de referência o centro de gravidade da viga.

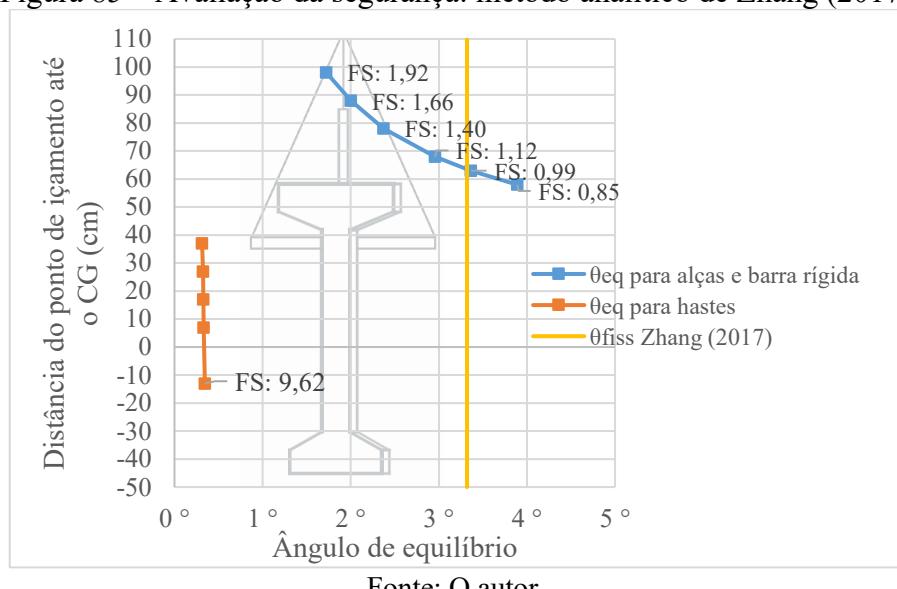
Figura 84 – Avaliação da segurança: método numérico



Fonte: O autor.

Observa-se que a utilização de orifício e haste metálica contribuiu para a queda substancial dos valores de ângulo de equilíbrio e mesmo quando a haste foi posicionada próxima e até abaixo do centro de gravidade os resultados de ângulo de equilíbrio permaneceram baixos (aproximadamente 0,30°). Nota-se também que, quanto ao uso de alças, à medida que se distancia do centro de gravidade há queda nos valores de ângulo de equilíbrio, mas esta queda não foi tamanha quanto a sofrida com o uso de orifício e haste. Na Figura 85 apresenta-se um gráfico com análise da segurança dos casos simulados frente ao método analítico de Zhang (2017).

Figura 85 – Avaliação da segurança: método analítico de Zhang (2017)



Fonte: O autor.

Considerando-se o limite de fissuração de Zhang (2017), observa-se que duas simulações estão em estado de fissuração, referentes ao içamento por alças sem barra rígida e com barra rígida de 5 cm de

altura. Sabe-se que a formulação de Zhang (2017) não considera a influência positiva dos balanços e se encontra a favor da segurança e entende-se que é devido a isso que há divergência entre os resultados analíticos e numéricos.

Considerando os cálculos de ângulo de fissuração, conforme Zhang (2017) e fator de segurança conforme Mast (1993) observou-se que claramente a situação real analisada está em situação de instabilidade. Mesmo que as equações analíticas desses autores estejam a favor da segurança, um valor de 0,37 para fator de segurança (MAST, 1993) indica um problema claro na estabilidade da viga.

Observou-se que, frente ao ângulo de fissuração numérico, nenhuma das situações apresentou problemas com instabilidade ($F.S. < 1$), todavia, é possível notar valores de fator de segurança bastante próximos do limite de segurança. Considerando que não se tem valores para excentricidade lateral da viga real nem resultados de testes que comprovam o f_{ck} da viga citada no momento do içamento, entende-se que, considerando o caso real (sem barra rígida) qualquer dispersão nos valores adotados para excentricidade e resistência do concreto é suficiente para justificar a ruptura. Já quanto ao uso de orifício e haste metálica, a probabilidade de ter-se problemas com segurança é menor, visto a observação de maiores valores de fator de segurança.

Considerando o que foi dito, observou-se que o uso de barra rígida contribui para a segurança, visto que à medida que se aumentou os valores do comprimento da barra rígida resultou-se menores valores de ângulo de equilíbrio, todavia, para chegar a valores de ângulo similares aos encontrados com uso de haste encontrar-se-ia valores muito altos desse parâmetro.

Por fim, notou-se que a variação no posicionamento da haste, mesmo abaixo do centro de gravidade apresentou pouca influência no ângulo de equilíbrio. Todavia, a ligação entre haste e viga foi considerada, nas modelagens, coladas e não foi realizada análise dessas ligações e esse fator pode ser determinante na definição da interferência do posicionamento vertical da haste.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a análise da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas durante o içamento, considerando a interferência do equipamento auxiliar de içamento, por meio de análise numérica.

Viu-se que o uso de uma alça em cada extremidade da viga, ligada diretamente à mesa (sem barra rígida), se trata da pior situação para todos os casos e que com o uso de barra rígida, capaz de afastar o ponto de içamento do centro de gravidade, à medida que são adotados comprimentos maiores, o ângulo de equilíbrio diminui, o que pode ser suficiente para garantir a segurança no içamento. Além disso, nota-se maior influência desse equipamento na viga tesoura, com seção transversal variável longitudinalmente, devido a posição do centro de gravidade nesse caso.

Ainda no içamento por alças, o uso de duas alças posicionadas transversalmente na mesa superior se trata da melhor situação para todos os casos de estudo e quanto maior o espaçamento entre as alças, menor foi o resultado de ângulo de equilíbrio o que, consequentemente, favorece a segurança.

Quanto ao içamento por hastes, com orifício na alma da viga, observa-se que, em todos os casos, o comprimento da haste (L_h) é o fator de maior influência na segurança. Entretanto, é necessário avaliar o comprimento, não devendo ser suficiente para tornar os efeitos de flexão da mesma significativos. Nota-se também que mesmo que o ponto de posicionamento da haste se encontre próximo ou abaixo do centro de gravidade da seção transversal da viga, o que é indesejável para garantir a segurança, esse equipamento é capaz de promover menores ângulos de equilíbrio. O uso de hastes de maior comprimento e de posicionamento o mais próximo possível da mesa superior é a situação mais favorável para o equilíbrio.

Quanto à geometria, viu-se que independente simetria da viga, o comportamento estrutural relacionado com os equipamentos auxiliares de içamento apresentou intensidades de interferência diferentes, mas com mesma tendência. Além disso, viu-se que é necessário prever em cada caso, adaptações no momento da execução real do içamento visto que, no caso do comprimento de base da mesa superior ser maior que o comprimento da haste, deve ser

dimensionado um desgaste da estrutura no local de interferência do cabo de içamento para que não haja contato entre esses dois elementos.

Com o estudo de caso real realizado (Viga “I” simétrica), é possível também avaliar a segurança da situação por meio da análise numérica da fissuração do elemento. Com base no limite de fissuração encontrado, conclui-se que a simples modificação do equipamento de içamento por orifício e haste metálica pode evitar a ruptura da viga. Por meio do estudo numérico da fissuração no içamento também se viu que o resultado se aproximou do valor analítico proposto por Zhang (2017).

Por fim, as análises realizadas contribuíram para confirmar a capacidade de influência que os equipamentos auxiliares de içamento causam na segurança estrutural, concluindo-se que é inviável o içamento por alças ligadas diretamente na mesa superior das vigas sem a barra rígida, a não ser que sejam usadas duas alças posicionadas transversalmente no ponto de içamento. Além disso, concluiu-se que o uso de hastes posicionadas na alma é viável, mas que se deve priorizar o uso de hastes de maior comprimento e posicionadas o quanto mais distantes do centro de gravidade (próximo da mesa superior).

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentado um estudo da avaliação da influência do uso de orifício e haste metálica como equipamento auxiliar de içamento, sem considerar o efeito da protensão e do contato entre cabos, haste e viga. Portanto, recomenda-se a realização de um estudo que considere esses efeitos.

Realização de um estudo com base em princípios de otimização para analisar, além dos parâmetros avaliados nessa pesquisa, os demais parâmetros de influência na instabilidade lateral, tais como, comprimento de balanço, inclinação de cabos, vão da viga, excentricidade inicial, geometria da viga e desvio de posicionamento dos cabos.

Realização de uma aplicação experimental não destrutiva, em duas vigas esbeltas com dimensões reduzidas (capaz de ser realizado em laboratório), içamento por meio de hastes e de alças para analisar o ângulo de equilíbrio e comprovar as simulações numéricas realizadas. É possível se encontrar experimentalmente o ângulo de equilíbrio por meio da tecnologia *Model Updating*.

Por fim, sugere-se o estudo de dimensionamento de equipamentos, com os devidos detalhamentos, a serem utilizados no içamento de vigas de forma a promover a estabilidade no içamento.

REFERÊNCIAS

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

ANSYS. v. 19.2. **ANSYS**, Inc.

ARAÚJO, F. A. de P. **A importância da estatística e suas aplicações**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **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.

BRUNA, P. **Arquitetura, industrialização e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP/Perspectiva, 1976. Coleção Debates, número 135.

CARDOSO, M. T. S. A. **Instabilidade lateral de vigas pré-moldadas sobre apoios elastoméricos considerando o efeito das imperfeições geométricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, FECIV, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

CARDOSO, M. T. S. A.; LIMA, M. C. V.; QUEIROZ, L. F. Efeito das formas de içamento no comportamento estrutural de vigas pré-moldadas de concreto. In: **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 14 n. 3, p. 55-78, 2017.

<https://doi.org/10.5335/rsaee.v14i3.6915>

COJOCARU, R. **Lifting analysis of precast prestressed concrete beams**. 2012. 94 f. Dissertação (Master of science in Civil Engineering). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2012.

<https://doi.org/10.15554/pci.rr.misc-002>

CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO. **Relatório N° 00210.001273/2014-18 OS nº 201411476**. 2014. Disponível em: auditoria.cgu.gov.br. Acesso em: 21, set. 2020.

DAURA NETO, I. A. **Análise numérica da estabilidade lateral de vigas pré-moldadas de concreto com seção transversal assimétrica em içamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, FECIV, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2020.

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. Dissertação (Màster – Enginyeria de Camins, Canals i Ports) – Escola Tècnica Superior d’Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Barcelona, Espanha, 2015.

GUERRA, M.B.B.F. **Modelos de concepção para estruturas em concreto armado com comportamento não linear obtidos pelo método de bielas e tirantes e otimização topológica**. 206 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

<https://doi.org/10.5335/rsaee.v14i1.6510>

HOKES, F. Selected aspects of modelling of non-linear behaviour of concrete during tensile test using multiplas library. **Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava Civil Engineering Series**, n. 2, v. 15, 2015.

<https://doi.org/10.1515/tvzb-2015-0009>

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.

<https://doi.org/10.15554/pcij.11011987.86.101>

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

KRAHL, P. A.; MARTINS, D. O.; CARRAZEDO R.; SILVA, I.; EL DEBS, M. K. Experimental and analytical studies on the lateral instability of UHPFRC beams lifted by cables. **Composite Structures**. ELSEVIER, v. 209, p. 652-667, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.002>

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>

LIMA, M. C. V. **Instabilidade lateral das vigas pré-moldadas em regime de serviço e durante a fase transitória**. 1995. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

LIMA, M. C. V. **Contribuição ao estudo da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

LIMA, D. F. P. **Avaliação da segurança durante o içamento de vigas pré-moldadas**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – 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, p.34-53, jan.-fev., 1989.
<https://doi.org/10.15554/pcij.01011989.34.53>

MAST, R. F. Lateral stability of long prestressed concrete beams – Part 2. **PCI Journal**, v. 38, n. 1, p.70-88, jan.-fev., 1993.
<https://doi.org/10.15554/pcij.01011993.70.88>

MAST, R. F. Lateral bending test to destruction of a 149 ft prestressed concrete I-beam. **PCI Journal**, v. 39, n. 4, p.54-62, jul.-ago., 1994.
<https://doi.org/10.15554/pcij.07011994.54.62>

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

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.

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>

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

TRAHAIR, N. S. **Flexural-Torsional Buckling of Structures**. 1993.
<https://doi.org/10.1201/9781482271218>

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