



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VICTOR JUCÁ TÁVORA

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM NOVO SISTEMA
PARA CONSTRUÇÃO DE LAJES

FORTALEZA

2017

VICTOR JUCÁ TÁVORA

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM NOVO SISTEMA
PARA CONSTRUÇÃO DE LAJES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- T237d Távora, Victor Jucá.
Desempenho estrutural de um novo sistema para construção de lajes / Victor Jucá Távora. – 2017.
73 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.
1. Vigota. 2. Simulação. 3. Ensaio. 4. Laje. I. Título.

CDD 620

VICTOR JUCÁ TÁVORA

DESEMPENHO ESTRUTURAL DE UM NOVO SISTEMA
PARA CONSTRUÇÃO DE LAJES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 20/11/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Magnólia Maria Campelo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Marcela Moreira da Rocha Almeida
Instituto Federal - Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

A meus pais, Maria Angélica e Raimundo Nonato, pela dedicação, cuidado e formação.

Ao Professor Augusto Teixeira, pela orientação e disponibilidade em meio a tanto trabalho.

À empresa Impacto, pela concessão dos dados utilizados no trabalho e por permitir participação no processo de desenvolvimento do sistema em estudo.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação, desde a primeira escola até o fim da graduação.

A toda a minha família: irmão, avós, tios e primos, pelo incentivo e apoio.

A todos os amigos da faculdade que tornam o dia a dia da graduação mais fácil e me ajudaram com caronas, tirando dúvidas e com suas amizades.

RESUMO

O estudo de maneiras alternativas para realizar processos que são feitos ordinariamente é uma forma de se inovar e reduzir custos. Nessa perspectiva, esse trabalho apresenta um estudo realizado a partir da tentativa de desenvolver um novo sistema para a construção de lajes. Esse novo sistema, inspirado no uso de vigotas pré-moldadas com armadura treliçada, traria benefícios em relação ao já existente, como a possibilidade da reutilização da estrutura de forma, o que permitiria o uso de elementos estruturalmente mais eficientes e a consequente diminuição da quantidade de escoras, além da redução na quantidade de aço utilizado. Para isso, a vigota usada atualmente seria substituída por outra, removível depois da concretagem. Para a criação dessa vigota, foram idealizados alguns modelos que precisavam ser capazes de suportar o carregamento de uma concretagem sem exceder limites de serviço e limites últimos impostos por normas. Nesse trabalho, são avaliados os desempenhos dessas vigotas em relação ao estado limite de serviço, que limita o deslocamento vertical do elemento. Para isso, foram feitas análises teóricas, com auxílio de softwares, e ensaios de deslocamento de cinco vigotas idealizadas. Apesar de as análises apresentarem resultados otimistas em relação ao limite normativo, os resultados dos ensaios foram bem diferentes, impossibilitando o uso das vigotas devido aos critérios normativos. Com isso, foram discutidas as possibilidades de falhas nos modelos que geraram resultados muito diferentes dos reais.

Palavras-chave: Vigota. Simulação. Ensaio. Laje.

ABSTRACT

The study of alternative ways to make ordinary activities is a form to inovate and reduce costs. In this perspective, the present work shows a study that started from the attemp to develop a new system for building slabs. This new system is inspired by the prefabricated truss floor slab and would bring benefits if compared to the current system, like the possibility of reusing the mold structure, what allows the structural improvement of materials and the consequent reducing of struts and rebars used in a building. For this, the concrete joists used nowadays would be replaced by other elements, removable after the slab concreting. To create this joist, the models idealized had to be capable to support the concreting and live load without exceed limits imposed by norm. This work evaluate this new system's performance in terms of serviceability limit, that limitates the vertical displacement of the mold structure. To do that, the joists displacements were studied by softwares simulations and experiments. Altought the theoretical analysis show optimistic values, the experiments had quite different results from the simulations that would impossibilitate the system application. Also, the causes of differences between theory and reality for this specific strucure were discussed.

Key words: Joist. Simulation. Assay. Slab

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Tipos de vigotas e blocos de enchimento	17
Figura 2	– Detalhes das treliças	18
Figura 3	– Estocagem de vigotas treliçadas	19
Figura 4	– Esquema do uso da calha “J”	21
Figura 5	– Forma lateral em madeira	21
Figura 6	– Exemplo de fissuras devido à retração do concreto	22
Figura 7	– Vigota no instante da ruína	24
Figura 8	– Lajes lisas nervuradas unidirecionais com vigas-faixas e vigotas treliçadas ..	27
Figura 9	– Vigota da Novatreliça	28
Figura 10	– Vigotas prontas para serem carregadas	31
Figura 11	– Foto do relógio 5 ao início de um ensaio	32
Figura 12	– Exemplo de montagem com intereixo de 40cm	33
Figura 13	– Modelo do escoramento das vigotas	36
Figura 14	– Corte transversal do Modelo 1, em milímetros	37
Figura 15	– Modelagem utilizada para análise do Modelo 1	38
Figura 16	– Modelagem utilizada para análise do Modelo 2	39
Figura 17	– Corte transversal do Modelo 3, em milímetros	40
Figura 18	– Modelagem utilizada para análise do Modelo 3	41
Figura 19	– Confeção da vigota do Modelo 4	42
Figura 20	– Vigota pronta para ser usada	42
Figura 21	– Modelagem utilizada para análise do Modelo 4	43
Figura 22	– Corte transversal do Modelo 5, em milímetros	44
Figura 23	– Modelagem utilizada para análise do Modelo 5	45
Figura 24	– Seção transversal considerada para o Modelo 1	46

Figura 25 – Condições para a análise – Modelo 1	47
Figura 26 – Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros – Modelo 1 ...	47
Figura 27 – Numeração dos relógios para o primeiro ensaio	47
Figura 28 – Carga x Deslocamento – Ensaio 1	49
Figura 29 – Seção transversal considerada para o Modelo 2	49
Figura 30 – Condições para a análise – Modelo 2	50
Figura 31 – Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros – Modelo 2 ...	50
Figura 32 – Numeração dos relógios para o segundo ensaio	51
Figura 33 – Carga x Deslocamento – Ensaio 2	53
Figura 34 – Seção transversal considerada para o Modelo 3	53
Figura 35 – Condições para a análise - Modelo 3	53
Figura 36 – Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros – Modelo 3 ..	54
Figura 37 – Numeração dos relógios para o terceiro ensaio	55
Figura 38 – Carga x Deslocamento – Ensaio 3	56
Figura 39 – Seção transversal considerada para o Modelo 4	56
Figura 40 – Condições para a análise – Modelo 4	57
Figura 41 – Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros – Modelo 4 ..	57
Figura 42 – Numeração dos relógios para o quarto ensaio	58
Figura 43 – Carga x Deslocamento – Ensaio 4	59
Figura 44 – Seção transversal considerada para o Modelo 5	59
Figura 45 – Condições para a análise – Modelo 5	60
Figura 46 – Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros – Modelo 5 ..	60
Figura 47 – Numeração dos relógios para o quinto ensaio	61
Figura 48 – Carga x Deslocamento – Ensaio 5	62
Figura 49 – Comparação entre análise e ensaio – Modelo 1	63
Figura 50 – Comparação entre análise e ensaio – Modelo 2	63

Figura 51 – Comparação entre análise e ensaio – Modelo 3	64
Figura 52 – Comparação entre análise e ensaio – Modelo 4	64
Figura 53 – Comparação entre análise e ensaio – Modelo 5	65
Figura 54 – Vigota em teste preliminar sem carregamento	67
Figura 55 – Vigota em teste preliminar com carregamento	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Carregamento para o Modelo 1	37
Tabela 2	– Carregamento para o Modelo 2	39
Tabela 3	– Carregamento para o Modelo 3	40
Tabela 4	– Carregamento para o Modelo 4	42
Tabela 5	– Carregamento para o Modelo 5	44
Tabela 6	– Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 1	47
Tabela 7	– Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 1	48
Tabela 8	– Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 2	51
Tabela 9	– Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 2	52
Tabela 10	– Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 3	54
Tabela 11	– Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 3	55
Tabela 12	– Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 4	57
Tabela 13	– Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 4	58
Tabela 14	– Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 5	61
Tabela 15	– Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 5	62
Tabela 16	– Eficiência das rigidezes dos modelos ensaiados tendo as análises teóricas como referência	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	14
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	14
1.2	Estrutura da Monografia	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Apresentação da laje nervurada	16
2.2	Execução da laje nervurada com vigotas treliçadas	18
2.3	Estado da arte	23
2.4	Perspectivas de inovações	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1	Pesquisa Laboratorial	30
3.2	Pesquisa Teórica	34
3.3	Descrição dos modelos	35
3.3.1	<i>Modelo 1</i>	35
3.3.2	<i>Modelo 2</i>	38
3.3.3	<i>Modelo 3</i>	39
3.3.4	<i>Modelo 4</i>	41
3.3.5	<i>Modelo 5</i>	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Modelo 1	46
4.1.1	<i>Análise Teórica</i>	46
4.1.2	<i>Ensaio</i>	48
4.2	Modelo 2	49
4.2.1	<i>Análise Teórica</i>	49
4.2.2	<i>Ensaio</i>	51
4.3	Modelo 3	52
4.3.1	<i>Análise Teórica</i>	52
4.3.2	<i>Ensaio</i>	54
4.4	Modelo 4	56
4.4.1	<i>Análise Teórica</i>	56
4.4.2	<i>Ensaio</i>	58

4.5	Modelo 5	59
4.5.1	<i>Análise Teórica</i>	59
4.5.2	<i>Ensaio</i>	61
4.6	Comparação dos Resultados	62
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Existem na construção civil diversos sistemas que podem ser usados para compor a estrutura de uma edificação. Para cada elemento estrutural, como vigas, pilares e lajes, há uma gama de possibilidades que cabe ao projetista escolher a mais eficiente para cada caso. Para as lajes, existem soluções como lajes maciças, nervuradas, planas diretamente apoiadas em pilares e pré-fabricadas com ou sem o uso de protensão. Um tipo de laje muito utilizado em edificações de pequeno e médio porte é a pré-fabricada, formada por vigotas treliçadas.

A popularidade desse sistema nesse tipo de edificação se deve ao fato de que sua execução é simples, pois não requer mão de obra especializada e os materiais utilizados são facilmente obtidos. Além disso, o custo dessa laje, quando comparado à maciça, é menor, devido ao menor uso de formas, escoras e concreto. Por esses motivos, mesmo sem ser tão eficiente para grandes carregamentos e grandes vãos, esse sistema é uma excelente opção para determinados tipos de construção.

Apesar de ser um sistema já utilizado há algumas décadas no Brasil e ter uma quantidade razoável de estudos, a construção com esse tipo de laje, assim como qualquer outro processo, pode ser aperfeiçoada. Durante a concretagem, quando sujeita à flexão, por exemplo, a vigota fica com a parte de concreto tracionada e com a barra superior de aço comprimida. Nessa situação é possível observar certa ineficiência do processo, visto que o concreto possui pouca resistência à tração, cerca de 10% de sua resistência à compressão, e uma barra de aço quando comprimida geralmente não chega ao escoamento antes de flambar, sendo esse, em geral, o ponto de ruína da vigota.

Com o intuito de criar um sistema mais eficiente, foi idealizado por Joaquim Antônio Caracas Nogueira e por Augusto Teixeira de Albuquerque um sistema de execução de lajes com a utilização de estruturas metálicas removíveis. A ideia desse sistema é que a vigota usada na construção seja reaproveitável, de modo que se possa usar um material mais eficiente estruturalmente, reduzindo inclusive a quantidade de escoras necessárias. Essa vigota seria composta por um perfil metálico ou de concreto conectado a uma treliça, que ficaria sob o perfil.

O sistema possui uma patente publicada em 06/03/2007, cujo título é “Sistema construtivo para fabricação de lajes pré-moldadas em concreto estrutural, com a utilização de estruturas metálicas removíveis”. Apesar disso, o sistema ainda não foi posto em prática e sua estrutura não foi totalmente definida. Nesse trabalho serão apresentados e analisados modelos da vigota que estão sendo desenvolvidos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de modelos de vigotas para a construção de lajes em relação ao ponto 4.3.2 da NBR 15696/2009 – Formas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Fazer simulações computacionais dos modelos de vigotas idealizados a fim de se obter seus deslocamentos verticais máximos;
- Realizar ensaios em modelos das vigotas e medir seus deslocamentos verticais;
- Comparar os resultados das análises com os dos ensaios e identificar as causas das possíveis diferenças;
- Verificar se os modelos testados cumprem o limite de deslocamento imposto por norma.

1.2 Estrutura da Monografia

O trabalho será composto por cinco capítulos, que serão distribuídos conforme a ordem abaixo:

1. Introdução: São apresentados alguns tipos de lajes, em especial a laje com vigotas treliçadas. É descrito o sistema construtivo a ser testado ao longo do trabalho. Além disso, são descritos os objetivos do trabalho.
2. Revisão Bibliográfica: É feito um apanhado sobre estado da arte de lajes nervuradas. É mostrado um potencial de aprimoramento do sistema de lajes construídas com vigotas pré-moldadas com armadura treliçada.
3. Material e Métodos: É relatado o processo do desenvolvimento do sistema. Os modelos de vigotas idealizados são caracterizados, assim como a metodologia do ensaio e das análises.
4. Resultados e discussão: Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes feitos ao longo de todo o processo de desenvolvimento do sistema. Além disso, são comparados resultados obtidos por análises e ensaios.

5. Conclusão: São apresentadas as conclusões do trabalho, como uma resposta aos objetivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o início da utilização do concreto armado, a partir da segunda metade do século XIX, houve um rápido desenvolvimento de técnicas construtivas em geral e logo apareceram lajes maciças, armadas com barras de aço (GASPAR, 1997). Esse tipo de laje é executado até hoje. Ela é feita com o uso de formas de madeira, que são responsáveis por dar forma ao elemento e por sustentar os materiais constituintes da laje enquanto o concreto não atinge resistência suficiente.

A introdução do aço no concreto é uma maneira de contornar uma deficiência do concreto simples, que é a baixa resistência a esforços de tração. Por esse motivo, as lajes maciças, que estão submetidas basicamente à flexão, são armadas, geralmente, na região inferior, onde há esforços de tração, sendo o próprio concreto o responsável por resistir à compressão que atua na parte superior do elemento. No entanto, para o caso de grandes carregamentos ou grandes vãos, a laje deve ter sua altura aumentada, o que gera um grande consumo de concreto e, por consequência, um grande aumento do peso.

Há, para o caso das lajes maciças, um problema evidente, que é o uso de concreto na parte inferior, zona em que ele não resiste bem aos esforços de tração atuantes. A fim de se reduzir esse desperdício, surgiram lajes que são capazes de reduzir em grande quantidade o concreto que seria subutilizado, sendo o mesmo substituído por outro material de baixo custo, que sirva somente para preenchimento dos vazios, são as chamadas lajes nervuradas, que “[...] constituíram-se em uma evolução natural da laje maciça, resultante da eliminação da maior parte do concreto abaixo da linha neutra” (FRANCA; FUSCO, 1997).

Franco e Fusco (1997) resumem a justificativa do uso de lajes nervuradas afirmando que permitem um alívio no peso próprio e um aproveitamento mais eficiente do aço e do concreto. Acrescentam ainda que essa redução do peso próprio é muito significativa, tendo em vista que o consumo de concreto com lajes maciças chega usualmente a quase dois terços do volume total da estrutura.

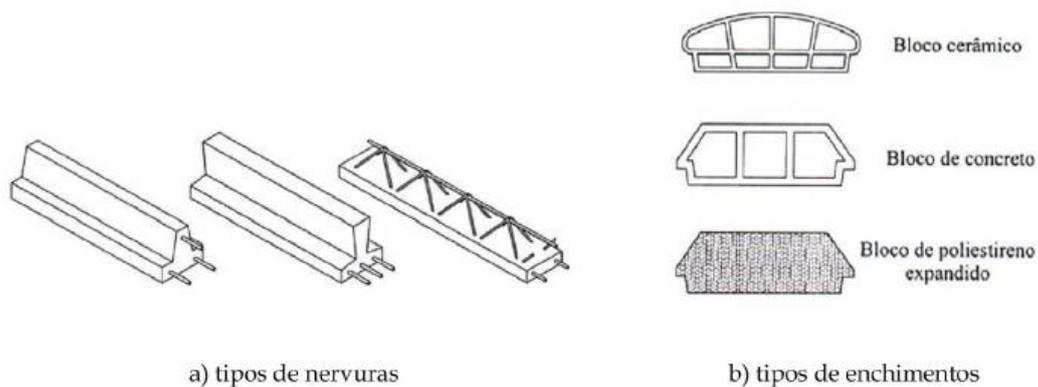
2.1 Apresentação da laje nervurada

Lajes nervuradas, segundo a norma NBR 6118/2014, são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Para a execução das lajes moldadas no local, são posicionadas cubetas plásticas ou blocos de poliestireno expandido

(EPS), que têm função de evitar o uso desnecessário de concreto na zona de tração. Essas formas são apoiadas por sistemas de escoramento e não têm função estrutural, de modo que, após a concretagem, podem inclusive ser retiradas, como é feito com as cubetas plásticas, deixando a laje com espaços vazios.

Já para a construção de lajes nervuradas com o uso de nervuras pré-moldadas são usadas vigotas que podem ter forma de T invertido ou uma armadura formada por treliça que tem parte fora da seção de concreto. As vigotas podem, inclusive, ser protendidas. Os blocos responsáveis por substituir o concreto na parte inferior podem ser de cerâmica, EPS ou até concreto. A Figura 1 apresenta os tipos de vigotas e de blocos de enchimento.

Figura 1 - Tipos de vigotas e blocos de enchimento

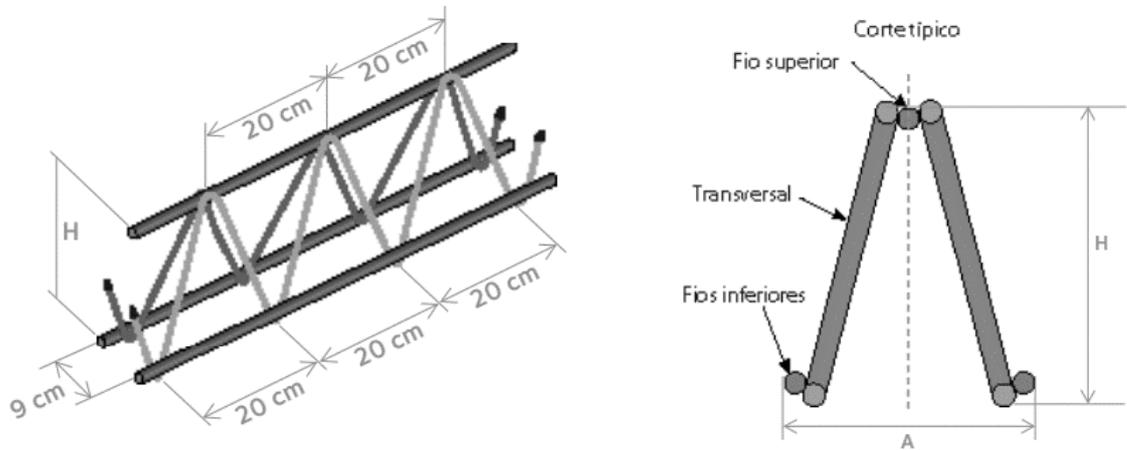


Fonte: El Debs (2000)

Apesar de serem comumente chamadas de lajes pré-moldadas, a execução do elemento envolve concretagem *in loco*. Esse concreto dispensa forma na base, visto que esta é formada pelas vigotas pré-moldadas e pelos blocos de enchimento, e praticamente se limitará à zona superior da laje, onde ele estará submetido à compressão. Os materiais que constituem a vigota treliçada são uma base de concreto, dentro da qual fica o banzo inferior de uma treliça de aço.

As treliças usadas são padronizadas e podem ser escolhidas pelos projetistas com o auxílio de tabelas feitas por fornecedores em função do vão e do carregamento de utilização da laje. Podem ser acrescentadas ao banzo inferior da treliça, que é a parte que será solicitada à tração devido à flexão da laje, barras de aço, em função do vão e do carregamento. Algumas dimensões das treliças são fixas, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Detalhes das treliças



Fonte: Manual Técnico de Lajes Treliçadas, ArcelorMittal (2010)

A altura da treliça (H), é dada entre as superfícies limites dos banzos inferior e superior, têm padrões de 8cm, 12cm, 16cm, 20cm, 25cm e 30cm. A base (b) é a distância entre os fios do banzo inferior, no caso de 9cm. O passo é a distância entre os nós da treliça, no caso de 20cm. A nomenclatura da treliça é dada em função de sua altura e da bitola dos fios que a compõem. Por exemplo a treliça TR16745 possui altura de 16 cm, conforme os 2 primeiros algarismos, bitola do banzo superior de 7mm, do fio da diagonal de 4,2mm, e de 5mm no banzo inferior.

2.2 Execução da laje nervurada com vigotas treliçadas

Para a execução das lajes com vigotas pré-fabricadas, deve-se seguir tanto a norma NBR 14931, que fala sobre a execução de estruturas de concreto, como a norma NBR 9062, que fala sobre a execução de estruturas de concreto pré-moldado. Segundo Brandalise e Wessling (2015), sua execução pode ser dividida nas seguintes etapas:

1. Fabricação das vigotas;
2. Armazenamento e transporte;
3. Instalação e escoramento das vigotas;
4. Preenchimento;
5. Colocação da armadura de distribuição;
6. Instalação das guias de acabamento;
7. Lançamento e cura do concreto;

1. Fabricação das vigotas

Apresentada como uma vantagem, a fabricação da vigota treliçada pode se dar em fábrica ou, devido à facilidade, no próprio canteiro de obras. Requerendo apenas formas metálicas, separadores e desmoldante, além dos materiais constituintes, concreto e treliça, a fabricação da vigota representa um baixo custo de mão de obra. Além disso, quando feita no próprio canteiro, elimina a etapa de transporte, que possui um custo e pode ser um problema para elementos pré-moldados.

Apesar da facilidade, a produção em obra deve ser controlada, principalmente no que diz respeito ao cobrimento do aço do banzo inferior da treliça e à vibração do concreto, de modo que sejam evitadas patologias no futuro.

2. Armazenamento e transporte

Após a concretagem, faz-se a desforma com um intervalo de pelo menos 16h, para um concreto de 20 MPa, que é o mínimo recomendado. Até o transporte para a obra ou até a montagem, deve-se esperar três dias. Pode-se usar cimento de alta resistência inicial para diminuição desses prazos. O armazenamento deve se dar com vigotas empilhadas, apoiadas em sarrafos espaçados de no máximo 2,5m, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Estocagem de vigotas treliçadas



Fonte: Autor (2017)

3. Instalação e escoramento das vigotas

O processo de instalação consiste em posicionar os elementos pré-moldados de acordo com o indicado no projeto. São usados os blocos de enchimento nessa fase para que os elementos sejam colocados com o espaçamento adequado.

Logo após a instalação de todas as vigotas, são colocadas as linhas de escoras. É

importante que essas tarefas sejam feitas juntas, para evitar que qualquer sobrecarga atue nas vigotas sem que estejam devidamente escoradas. Isso porque esses elementos não foram feitos para resistirem sozinhos à flexão, sem que o concreto esteja na zona de compressão, na parte superior da laje. Sem o correto escoramento, os elementos estão sujeitos a flechas acima do permitido e até a ruína.

Gaspar (1997), em um estudo pioneiro sobre a segurança de lajes pré-fabricadas na etapa de construção, afirma que a distância entre as linhas de escoras deve ser observada com um cuidado especial. Nesse estudo, ele faz experimentos e análises sobre o espaçamento entre linhas de escoras para lajes de diferentes alturas. A partir de então, outros estudos surgiram sobre o tema e, hoje, existem programas e tabelas que fornecem o espaçamento máximo entre as linhas de escora em função de algumas variáveis.

Vale ressaltar que essa etapa requer um tempo considerável da mão de obra, o que significa que melhorias que venham a otimizar esse sistema podem representar uma redução de custo igualmente considerável.

4. Preenchimento

Com as vigotas devidamente posicionadas e escoradas, são colocados os blocos de enchimento. Naturalmente, os blocos de EPS são mais fáceis de serem colocados por serem mais leves. No entanto, por apresentarem outras funções além de evitar o consumo excessivo de concreto, como reduzir a propagação de ruídos, a escolha pelo tipo de material fica a critério do projetista ou construtor.

5. Colocação da armadura de distribuição

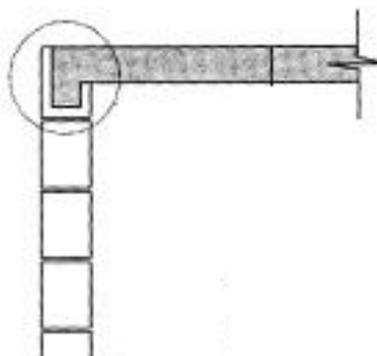
Nessa fase são colocadas as armaduras de distribuição, que ficarão na parte superior da laje, zona de compressão, para combater fissuras causadas pela retração e, como o próprio nome diz, distribuir cargas pontuais para uma área maior da laje, diminuindo assim a tensão aplicada. Essa armadura tem bitolas pequenas e podem ser adquiridas soldadas umas nas outras, em forma de tela. O tipo da tela deve ser especificado em projeto, e, assim como a informação do espaçamento das linhas de escoras, por exemplo, existem tabelas de fabricantes que indicam qual tela deve ser usada em função de algumas variáveis.

6. Instalação das guias de acabamento

Podendo se dar antes mesmo da colocação das armaduras, a instalação das guias de acabamento pode ser a única fase que requer o uso de madeira para a forma da laje, quando esta está apoiada em vigas de concreto armado, como optado na construção mostrada na Figura 5. No entanto, essa fase pode ser evitada caso se use o sistema de alvenaria estrutural com o bloco especial de calha J para execução das cintas das paredes, de modo que o próprio bloco faça o

papel de forma das bordas da laje, visto na Figura 4.

Figura 4 - Esquema do uso da calha "J"



Fonte: PRUDÊNCIO, Luiz R.; OLIVEIRA, Alexandre L., BEDIM, Carlos A. (2002)

Figura 5 - Forma lateral em madeira



Fonte: Autor (2017)

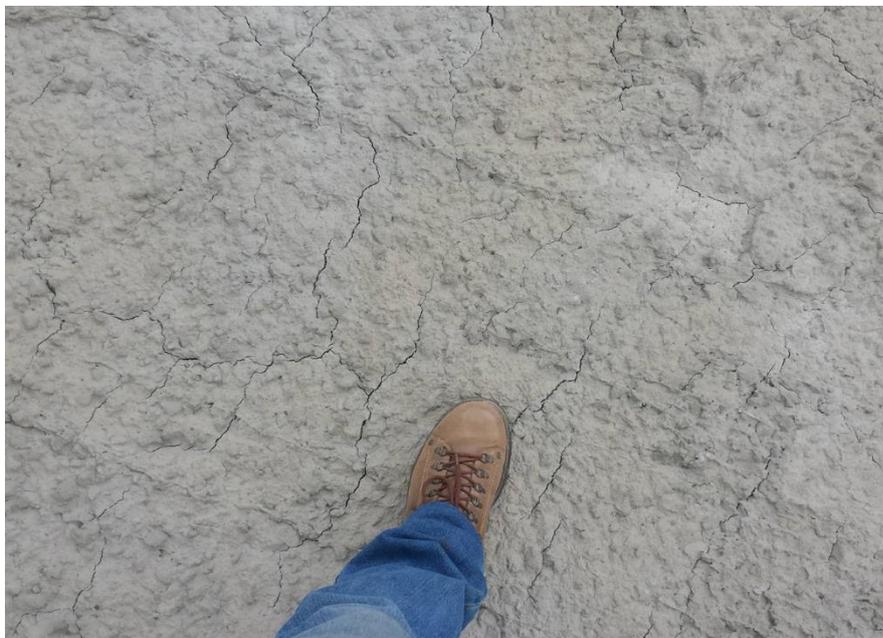
7. Lançamento e cura do concreto

Para o lançamento do concreto, deve-se certificar que todas as regiões da laje estão sem falha em relação ao material de enchimento, para garantir que não haverá vazamento. Deve-se também certificar também que todas as instalações elétricas e sanitárias estão corretamente postas, para evitar retrabalhos futuros.

Além disso, é muito importante que os materiais que estarão em contato com o concreto fresco e têm potencial para absorção de água, como o bloco cerâmico ou o de concreto, estejam molhados durante a concretagem. Essa prática serve para evitar a perda de água do

concreto para esses elementos. Caso contrário, poderão surgir fissuras ou trincas devido à retração, como na laje mostrada na Figura 6.

Figura 6 - Exemplo de fissuras devido à retração do concreto



Fonte: Autor (2017)

Após a concretagem, para evitar as mesmas fissuras por retração, porém devido à perda de água por evaporação, a superfície da laje deve permanecer úmida até, segundo a norma NBR 14931/04, atingir resistência característica à compressão de 15 MPa. Na prática, encontram-se recomendações para molhar a laje durante 3 a 7 dias após a concretagem.

Nesse contexto, a execução não é a única etapa em que a vigota pré-moldada será solicitada. De acordo com El Debs (2000, *apud* FERREIRA, 2016), o processo de produção de estruturas pré-moldadas vai desde a execução do elemento pré-moldado, até a execução da estrutura definitiva, passando por transporte, montagem da estrutura. Cada uma dessas etapas apresenta dificuldades e podem ser críticas para o elemento pré-moldado.

2.3 Estado da arte

O estudo sobre esse tipo de laje não é muito antigo no Brasil. Segundo Carvalho (2005), no início da década de 1990, “[...] o engenheiro que quisesse desenvolver um projeto com lajes pré-fabricadas com vigotas de concreto não contaria com literatura para se orientar.”. Carvalho (2005) acrescenta que o material mais antigo que possui informações técnicas sobre

o tema é da empresa MEDITERRÂNEA PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO, a qual possui um manual que inclui tabelas para dimensionamento das lajes, do ano de 1992.

Ainda no início dos anos noventa, Di Pietro (1993) publica sua dissertação que aborda sob um ponto de vista geral os aspectos da laje com vigotas pré-fabricadas. Nesse trabalho, Di Pietro faz um apanhado com informações nacionais e internacionais acerca desse sistema com o qual já se vinha construindo com grande incidência no País, desde a parte técnica que diz respeito ao projeto até a parte prática, que envolve execução, controle da produtividade e custos. Basicamente, esse trabalho visava à padronização das práticas que já vinham sendo feitas, muitas vezes sem observar os critérios por ele estabelecidos, bem como dar base para pesquisas futuras e estabelecer subsídios para futura homologação desse tipo de laje pré-moldada.

Bocchi Júnior (1995), em sua dissertação de mestrado, compara a solução de vigotas pré-fabricadas com a de lajes maciças. Conclui que em alguns casos o custo daquela solução é menor. Além disso, são detalhadas questões de dimensionamento e verificações de projeto, usando recomendações da NB-1/78 e de bibliografias consagradas. É demonstrado nesse trabalho que na maioria dos casos é inviável considerar o engaste de lajes nervuradas, devido à pequena área de concreto existente das bordas da laje e aos grandes esforços que gerariam o engastamento.

Em relação ao estudo do escoramento de lajes com vigotas pré-fabricadas, Gaspar (1997) realiza um trabalho pioneiro experimental e teórico a respeito do espaçamento entre linhas de escoras que são colocadas como suporte para as vigotas. A otimização dessa etapa é bastante importante, não somente pelo fato de que o escoramento representa grande parte do tempo gasto para preparação da laje, mas também pelo perigo que representa a execução desse sistema sem o devido controle.

A análise dos elementos da laje durante a construção, mais especificamente na concretagem, é diferente do dimensionamento da laje depois de pronta, como é explicada por Gaspar (1997).

Durante a fase de construção, o concreto, ainda fresco, não desempenha nenhuma função resistente. Assim, à medida que os painéis de lajes vão sendo carregados, a barra superior das vigotas com armadura treliçada vai sendo gradualmente comprimida e poderá chegar até a ruína se, nesta barra, ocorrer o fenômeno da instabilidade, também conhecida como flambagem.

Em sua análise, foram ensaiadas vigotas com treliças de 8cm e 12cm de altura até o ponto de ruína, caracterizada pela flambagem local da barra do banzo superior, conforme a Figura 7. A partir dos resultados, foram calculados os momentos fletores críticos para as vigotas.

Figura 7 - Vigota no instante da ruína



Fonte: Gaspar (1997)

Com isso, foi modelada a construção da laje, com apoio nas extremidades fazendo o papel das vigas ou paredes e no centro para simular as linhas de escoras. Definido o carregamento, foi possível então encontrar o espaçamento máximo entre os apoios para que fossem resistidos, com segurança, os esforços atuantes.

Em sua conclusão, Gaspar (1997) afirma que “[...] o processo construtivo das lajes pré-fabricadas deve ser cuidadosamente observado, especialmente no que diz respeito à distância entre linhas de escoras”. Além disso, declara que em vigotas com treliças de 8cm de altura devem ser montadas linhas de escoras a cada 0,55m, o que é inviável no caso de vãos relativamente grandes. Já com o uso de treliças de 12cm, deve-se montar linhas de escoras a cada 1,10m. Vale ressaltar que os resultados encontrados dizem respeito ao carregamento com o uso de *jericas*, que concentram uma carga elevada em uma pequena região.

Um ponto a ser destacado que foi observado por esse estudo é o fato de que a ruína da vigota com armadura treliçada durante a fase de construção é caracterizada pela flambagem da barra do banzo superior. No entanto, após o ganho de resistência do concreto, a barra perde quase que completamente sua função estrutural.

Caixeta (1998, *apud* CARVALHO *et al.*, 2005) realiza um trabalho, também comparando análises teóricas com experimentos, a partir do qual conclui que é necessário considerar o efeito da fissuração do concreto para as análises. Além disso, observa que “[...] a armadura diagonal da treliça de aço que não tem banzo superior ancorado acima da linha neutra praticamente não tem tensão atuante a não ser quando se aproxima do colapso da mesma.”. Ou seja, assim como é mostrado a partir do trabalho de Gaspar (1997) que, após a construção da laje, a armadura do banzo superior da treliça perde em grande parte sua função estrutural,

também é mostrado por Caixeta (1998, *apud* CARVALHO *et al.*, 2005) que o mesmo ocorre com a armadura das diagonais da treliça.

Droppa Júnior (1999) em seu trabalho que contém análises e recomendações de lajes formadas por vigotas treliçadas unidirecionais e bidirecionais reforça a afirmação de que a fissuração do concreto tem grande influência no cálculo das flechas. Para essa consideração, afirma que a adoção da relação momento x curvatura e da fórmula de Branson, para análise não-linear são satisfatórios para a avaliação das flechas em serviço.

Em 2002, foram publicadas diversas normas pela ABNT sobre lajes pré-moldadas:

- NBR 9062 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado.
- NBR 14859 (Parte 1) – Laje pré-fabricada – Requisitos Parte 1: Lajes unidirecionais.
- NBR 14859 (Parte 2) – Laje pré-fabricada – Requisitos Parte 2: Lajes bidirecionais.
- NBR 14860 (Parte 1) – Laje pré-fabricada – Pré-Laje – Requisitos Parte 1: Lajes unidirecionais.
- NBR 14860 (Parte 2) – Laje pré-fabricada – Pré-Laje – Requisitos Parte 1: Lajes bidirecionais.
- NBR 14862 – Armaduras treliçadas eletrossoldadas – Requisitos.

Forni (2005) realiza sua dissertação e a apresenta no 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré-moldado. Nesse trabalho é analisado o custo de lajes com vigotas pré-fabricadas, considerando as etapas de produção, transporte, montagem e concretagem. Nele busca-se analisar os custos da produção por meio da otimização da função custo, com auxílio de um método de otimização de gradiente reduzido genérico. Entre as conclusões, é afirmado que o insumo de maior influência na composição do custo dessa laje é o aço, que, em alguns casos do estudo, chega a representar até 45,5% do custo total. Outra conclusão interessante é que em lajes quadradas bidirecionais a redução de custo em relação a unidirecionais pode chegar a até 11,2%.

Albuquerque *et al* (2005), também no 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré-moldado, apresentam um trabalho em que mostra o desenvolvimento de uma vigota na qual tenta-se unir vantagens das vigotas treliçadas e das protendidas, fazendo uma vigota protendida com adição de armadura passiva. Ao fazer a comparação do custo para diversos vãos e solicitações entre a vigota protendida com e sem armadura passiva, conclui que “[...] além de demonstrar melhor viabilidade econômica quando comparada às vigotas protendidas, as lajes treliçadas (pré-tração) apresentam algumas vantagens construtivas.”.

Dentre essas vantagens construtivas, é citado o fato de que, com um aumento de solicitação, pode-se simplesmente aumentar a armadura passiva para o caso das vigotas protendidas treliçadas, enquanto que na protendida deve-se aumentar a força de protensão. Ademais, fala-se da presença da armadura treliçada que pode colaborar no combate ao esforço cortante e melhorar a transferência de esforços entre a capa de concreto e a sapata de concreto, tornando o elemento mais monolítico.

Lima *et al* (2013) realiza um estudo experimental sobre o escoramento em lajes formadas por vigotas pré-moldadas protendidas e com armadura treliçada com base na ABNT NBR 15696, com justificativa de que a bibliografia carecia de informações. O trabalho teve como objetivo colaborar com a pesquisa sobre esse sistema, buscando analisar a forma de ruptura e registrar a metodologia para obtenção do espaçamento entre linhas de escoras que respeitasse o limite de deslocamento vertical imposto pela norma, dado pela Equação 1, com unidades em milímetros.

$$u_{lim} = \frac{L}{500} + 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

Entre as principais conclusões, é afirmado que as vigotas têm como ponto crítico para rompimento a flambagem da armadura do banzo superior da treliça. É dito também que, até o início da flambagem, é observado um comportamento praticamente linear para todas as vigotas ensaiadas, seguido por grandes deslocamentos e aumento de fissuração na sapata de concreto. É ainda definido um espaçamento entre linhas de escora de 2,6m para a vigota do tipo TR12846, com dois fios de protensão de 5mm cada.

Avilla Junior (2009) trata em sua dissertação da construção de lajes lisas com o uso de vigotas treliçadas, um sistema pouco usado e conhecido no Brasil, como é afirmado pelo próprio autor. Seu trabalho teve como objetivo obter informações acerca do uso desse sistema construtivo no Brasil, por meio de entrevistas com projetista. Além disso, Avilla buscou fornecer subsídios, como esclarecer de dúvidas sobre aspectos técnicos e comparar o custo do sistema com o de lajes nervuradas moldadas no local e lajes maciças, a fim de fomentar o uso desse sistema.

Entre as conclusões, Avilla Junior (2009) afirma que “[...] muitos projetistas ainda não elaboram projetos utilizando lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas. Os poucos que elaboram apresentam dúvidas relativas ao sistema.”. Uma das justificativas entre os projetistas para o pouco uso é a inexistência ou carência da bibliografia sobre o tema. O autor

conclui ainda que, em seu estudo de caso, a opção pelo uso de vigotas pré-moldadas para a construção de laje lisa representou uma economia de 21,4% quando comparada com laje nervurada moldada no local. Na Figura 8 é mostrada uma construção em que foi optado pelo uso desse sistema estrutural.

Figura 8 - Lajes lisas nervuradas unidirecionais com vigas-faixas e vigotas treliçadas.



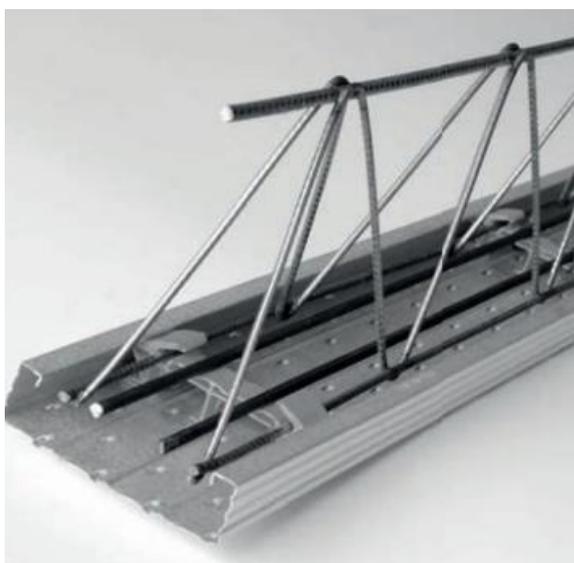
Fonte: Avilla Junior (2009)

2.4 Perspectivas de inovações

Mesmo apresentando vantagens em relação a outros sistemas estruturais, as vigotas treliçadas, assim como quase todos produtos e serviços oferecidos dentro ou fora da área da construção civil, ainda têm potencial para se tornarem mais eficientes, tanto em relação à economia quanto à produtividade. Essa busca por melhorias é notada por pesquisas e experimentos feitos a fim de melhor conhecer as partes que compõem o sistema. No caso em questão, destacam-se estudos de otimização da estrutura, dos custos e do escoramento. Além disso, a experiência da mudança de materiais ou da forma de execução de um processo pode gerar grandes benefícios em relação a métodos tradicionais, como visto com a protensão da vigota treliçada.

Nesse mesmo contexto, a Novatreliça, por exemplo, da empresa ArcelorMittal, substitui a base de concreto da vigota por um perfil metálico de aço zincado, de cerca de 1mm de espessura, o que reduz o peso em aproximadamente 80%, de acordo com o fabricante. Com isso, ganha-se em produtividade, de modo que um só operário consiga manusear e instalar as vigotas para execução com muita facilidade, sendo necessária uma quantidade menor de mão de obra. Além disso, o transporte é feito com menor custo, mais agilidade e menor risco de perdas. Pode-se visualizar na Figura 9 a vigota utilizada nesse sistema.

Figura 9 - Vigota da Novatreliça



Fonte: Trelifácil® (2017)

Esse tipo de inovação mostra uma tendência de industrialização da construção civil, não somente devido ao uso de pré-moldados, visto que segundo Vasconcellos (2002, *apud* PIGOZZO, SERRA, FERREIRA, 2005), a pré-moldagem de elementos de concreto começou junto com a invenção do concreto armado, mas sim pela busca de eficiência e padronização dos elementos, bem como facilidade na execução das peças e reutilização dos materiais.

Da mesma forma da Novatreliça, o novo sistema em potencial relatado por este trabalho tem como objetivo otimizar características de um sistema construtivo já existente, de lajes feitas com vigotas pré-moldadas com armadura treliçada, a partir de relatos que indicam seus pontos fracos. A partir dos estudos feitos por Gaspar (1997) e por Caixeta (1998, *apud* CARVALHO *et al.*, 2005), vê-se que as armaduras além das do banzo inferior da treliça perdem grande parte de sua função estrutural após o ganho de resistência do concreto. Esse fato é de grande importância, pois, de acordo com Forni (2005), o custo do aço nesse sistema pode representar até 45,5% do total. Em uma treliça comumente utilizada, como a TR08645, por

exemplo, essa parte que perde parte de sua função estrutural representa 74,7% do volume total de aço.

Os critérios de avaliação dos sistemas testados são baseados na verificação de estado limite de serviço da ABNT NBR 15696:2009, que trata de forma e escoramento de estruturas de concreto. Além disso, os vários tipos de vigotas testados serão analisados no software ANSYS a fim de se entender melhor a distribuição de tensões e saber se o modelo representa bem o experimento real ao comparar as flechas obtidas por ambos. Como uma forma de aceitação do modelo, os deslocamentos verticais também serão calculados manualmente considerando apoios simples, a partir da expressão da resistência dos materiais:

$$w = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

w – Deslocamento ao centro

q – Carga distribuída

L – Vão entre apoios

E – Módulo de Elasticidade

I – Momento de Inércia da seção transversal

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em uma pesquisa quantitativa laboratorial e teórica, tendo em vista que foram realizados experimentos controlados e análises teóricas desses mesmos experimentos. Os valores obtidos por ambos os métodos foram comparados entre si e discutidos, a fim de se estabelecer uma relação entre a prática e a teoria para ensaios esses em específico.

3.1 Pesquisa laboratorial

Para a avaliação dos diferentes tipos de vigotas estudados, foram realizados ensaios a fim de testar seus desempenhos em relação ao item 4.3.2 da NBR 15696, que trata do deslocamento vertical máximo aceitável de estruturas de forma ou escoramento. Tais ensaios consistem em simular a carga vertical que atuaria nessas estruturas durante a concretagem e verificar seu deslocamento vertical máximo.

Os ensaios foram realizados em Fortaleza-CE, em um galpão de uma empresa do ramo da Construção Civil. Além das vigotas a serem testadas, foram utilizados relógios medidores de deslocamento e perfis de aço para simular a carga. A opção por esses perfis se deu pelo fato de a empresa usá-los como longarinas em serviços de cimbramento e por isso existir em grande quantidade no local. Pelo fato de os ensaios acontecerem ao longo de um tempo relativamente grande, durante os anos de 2016 e 2017, diferentes objetos serviram de apoio para as vigotas, como tripés e mesas metálicas.

Para cada ensaio, eram usadas duas vigotas paralelas entre si que recebiam a carga dos perfis, que era dividida igualmente. Para a montagem do ensaio, marcavam-se os pontos onde ficariam os apoios em função do comprimento da vigota e do comprimento da longarina, para que esta pudesse ser apoiada pelas duas vigotas.

Para que as vigotas ficassem nas posições desejadas, conforme a Figura 10, foram também usados trena e nível de bolha. Esse controle é importante para que os perfis metálicos que fossem colocados sobre as vigotas pudessem ser apoiados igualmente por ambos os lados, gerando o mesmo carregamento nos dois elementos ensaiados.

Depois disso, eram instalados os relógios responsáveis por medir o deslocamento, posicionados abaixo das vigotas e sobre longarinas metálicas, para que pudessem ser fixados pelo ímã que possuem na base. Por não haver uma metodologia definida desde o início dos testes, os relógios não foram postos sempre nos mesmos pontos. No entanto, em todos os

ensaios foram colocados relógios no centro das vigotas, onde há o maior deslocamento vertical.

Os relógios não necessariamente começavam a marcação estando zerados. Por isso, o deslocamento real é obtido subtraindo o valor da leitura na situação que se deseja pela marcação inicial do relógio. Esse equipamento possui limite de marcação de 20 mm, mas, ainda assim, quando se deseja continuar o ensaio além desse limite, pode-se zerar o relógio manualmente e continuar a leitura considerando a última marcação. A Figura 10 mostra alguns dos elementos utilizados.

Figura 10 - Vigotas prontas para serem carregadas



Fonte: Impacto, adaptada pelo autor (2016)

- 1 – Relógio medidor de deslocamento;
- 2 – Longarinas usadas para simular carregamento;
- 3 – Mesa metálica para apoio;
- 4 – Longarinas para fixação da base dos relógios.

Com os relógios posicionados, eram feitos registros fotográficos de seus medidores sem que tivesse sido aplicado o carregamento com os perfis metálicos, para que se soubesse a marcação inicial de cada um, como na Figura 11. Feito isso, as longarinas eram colocadas sobre os perfis até que se completasse uma camada de carregamento distribuído e fosse feito outro registro de cada relógio. Esse procedimento era repetido até que se chegasse a um deslocamento excessivo ou à ruptura da peça. No caso de se optar por levar a vigota à ruptura, os medidores eram retirados antes da ruína. Apesar de estar fora do escopo do teste, essa prática poderia ser

útil para encontrar algum ponto crítico da estrutura.

Figura 11 - Foto do relógio 5 ao início de um ensaio

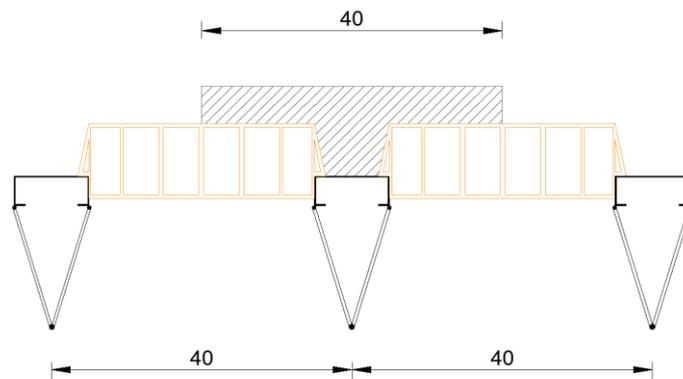


Fonte: Impacto (2016)

Terminado o ensaio, os dados dos relógios fotografados eram passados para planilhas eletrônicas, a fim de facilitar o cálculo do deslocamento em cada ponto. Assim, era possível analisar o deslocamento em função da carga para cada ponto onde se posicionava o relógio. Para isso, era necessário simplesmente transformar a carga das longarinas em uma carga equivalente à da laje que o ensaio simulava.

Sabendo que a carga usada em lajes é dada em função da área, deve-se usar a área de influência de uma vigota para se determinar a carga linear a qual um único elemento está sujeito. Para um intereixo de 0,40 m, que é a distância entre o eixo das vigotas quando colocadas na laje, como ilustrado na Figura 12, a área de influência é encontrada multiplicando seu comprimento por 40 cm. Essa área seria usada caso se desejasse encontrar o carregamento total atuante em uma vigota, mas, nesse caso, deseja-se encontrar a carga que atua em cada metro da vigota. Para isso, basta multiplicar a carga atuante na laje pelos 0,40 m, que é a largura de influência de uma vigota.

Figura 12 - Exemplo de montagem com intereixo de 40cm



Fonte: Autor (2017)

$$q_{linear} = q_{laje} \times 0,4 \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo

q_{linear} – Carga aplicada em uma vigota (kN/m);

q_{laje} – Carga aplicada na laje (kN/m²).

Sabendo que o peso de uma longarina é 9,25 kgf, ou 90,74N, para encontrar a carga atuante na vigota ensaiada, é necessário encontrar a carga total das longarinas atuantes e dividi-la pelo comprimento da vigota. Para isso, é necessário que os perfis sejam colocados ao longo de todo o comprimento da vigota, espaçados uniformemente, simulando uma carga uniformemente distribuída.

Dessa forma, pôde-se elaborar o gráfico que relaciona a carga atuante na laje, simulada pelo carregamento das longarinas, com o deslocamento máximo que ocorre ao centro da vigota, medido no ensaio pelo relógio. Com isso, tendo sido calculada a carga de interesse, que é indicada pela NBR 15696, é possível definir o valor da flecha encontrado no ensaio. Segundo a NBR 15696, a carga que gerará o deslocamento a ser verificado deve considerar o peso próprio do concreto e sobrecarga de 1 kN.m⁻², sem aplicação de qualquer coeficiente de segurança. Para esse carregamento, a flecha limite para conformidade com a norma é dada pela Equação 1.

3.2 Pesquisa teórica

A fim de se obter resultados de análises teóricas, foi usado o software ANSYS para a simulação das vigotas. Esse programa analisa a estrutura por elementos finitos e pode fornecer informações úteis para o desenvolvimento e aprimoramento de protótipos, como tensões em pontos críticos e deslocamentos.

Para a validação de resultados das análises teóricas, foi usada a Equação 2 para obter valores de deslocamento vertical. Essa validação é importante pelo fato de que qualquer erro na modelagem pode alterar significativamente os resultados, sendo necessário portanto haver alguma forma de controle para evitar tais equívocos.

Para todas as variáveis necessárias dessa equação, com exceção do momento de inércia, foram usados os mesmos valores que os usados nas simulações pelo software. Para a obtenção do momento de inércia, as seções transversais das vigotas foram desenhadas no AutoCAD e foi usado um comando que fornece informação das propriedades do perfil.

As diagonais da treliça possuem um formato parecido com um senoide. Por esse motivo, sua posição na seção transversal varia ao longo do comprimento da vigota, variando assim o momento de inércia da seção, visto que ora estão próximas e ora estão mais distantes do centroide. Para o cálculo do momento de inércia, esses elementos foram considerados como barras de diâmetro igual ao da diagonal numa posição fixa, localizada em sua altura média da treliça.

Vale ressaltar que em perfis que possuem diferentes materiais, o momento de inércia considerado foi calculado considerando as características do aço, tendo sido a geometria dos materiais diferentes alterada em função da relação entre os Módulos de Elasticidade.

A partir dos resultados obtidos, foram calculadas as eficiências dos modelos, comparando as rigidezes das vigotas reais com as consideradas em análise. Para isso, as demais variáveis da simulação e do ensaio são consideradas iguais e são feitas relações entre as rigidezes de cada modelo.

$$e = \frac{(EI)_{ensaio}}{(EI)_{análise}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$w_{ensaio} = \frac{5qL^4}{384(EI)_{ensaio}}$$

$$w_{real} = \frac{5qL^4}{384(EI)_{real}}$$

$$(EI)_{ensaio} = \frac{5qL^4}{384 w_{ensaio}} \quad \Bigg| \quad (EI)_{real} = \frac{5qL^4}{384 w_{real}}$$

$$e = \frac{(EI)_{ensaio}}{(EI)_{análise}} = \frac{\frac{5qL^4}{384 w_{ensaio}}}{\frac{5qL^4}{384 w_{real}}} = \frac{w_{real}}{w_{ensaio}}$$

$$e = \frac{w_{real}}{w_{ensaio}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo

e – Eficiência do modelo ensaiado;

w – Deslocamento máximo;

q – Carga distribuída;

L – Vão;

EI – Rigidez da seção transversal;

3.3 Descrição dos modelos

Neste tópico serão descritos os modelos das vigotas que foram idealizadas e passaram por ensaios e análises. Serão caracterizados cinco modelos, sendo apresentadas suas características geométricas e seus materiais. Considerou-se o Módulo de Elasticidade do aço e do concreto iguais a 200 GPa e 25 GPa, respectivamente.

Para o cálculo do peso do concreto que atuaria na vigota, foi considerado o volume necessário para se construir uma laje de 12cm de altura, com pelo menos 4cm de capa. Como os modelos possuem diferentes geometrias, foram requeridos diferentes blocos de enchimento. Foram considerados blocos cerâmicos com altura de 10cm e 12cm.

3.3.1 Modelo 1

O primeiro modelo de vigota testado tinha como objetivo servir para construção de lajes de até 4m, com linhas de escoras apenas nas duas extremidades distanciadas de 3,8m. A linha de apoio passaria por dentro das treliças e seria apoiada por escoras, semelhante ao

esquema mostrado na Figura 13.

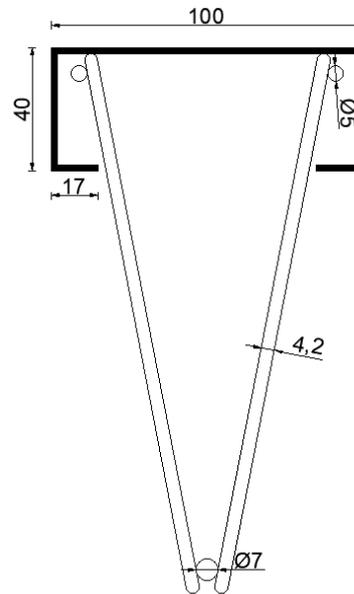
Figura 13 – Modelo do escoramento das vigotas



Fonte: Autor (2017)

Esse modelo consistia em uma treliça TR16745 soldada em um perfil UDC enrijecido, de aço SAE 1008/1012, com 2mm de espessura, 100mm de largura, 40mm de altura e abas internas de 17mm. O perfil seria usado com a face aberta para baixo, para que pudesse ser reutilizado depois de concretado. Para uma laje com 12cm de altura, usando esse modelo, a altura do bloco de enchimento deveria ser de 10cm. A seção transversal do modelo pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Corte transversal do Modelo 1, em milímetros



Fonte: Autor (2017)

A carga de interesse, que é aquela indicada pela NBR 15696 para verificação da flecha, é a soma do peso dos materiais com uma sobrecarga de 1 kN.m^{-2} . Para esse modelo, o valor encontrado para essa carga é de $1,2304 \text{ kN.m}^{-1}$, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Carregamento para o Modelo 1

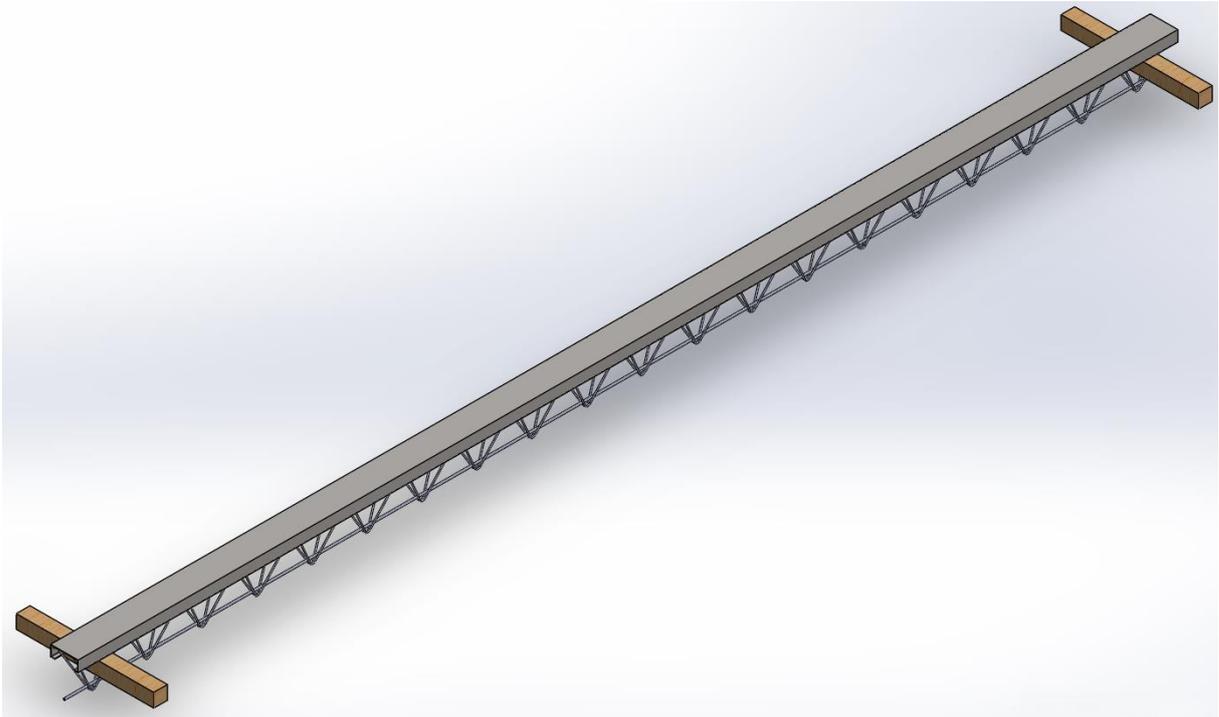
Elemento	Carga	
	kN/m	kN/m ²
Concreto	0,6488	1,6219
Peso próprio	0,0406	0,1016
Lajotas cerâmicas (H12)	0,1410	0,3525
Sobrecarga	0,4000	1,0000
Total:	1,2304	3,0759

Fonte: Autor (2017)

A modelagem utilizada para análise por elementos finitos está ilustrada na Figura

15.

Figura 15 - Modelagem utilizada para análise do Modelo 1



Fonte: Autor (2017)

3.3.2 Modelo 2

O segundo modelo, também testado em 2016, é praticamente igual ao primeiro, diferenciando-se pelo fato de possuir uma treliça adicional de mesmo modelo amarrada à primeira por arames recozidos. Idealizado para se testar também em um vão de 3,8m, o perfil metálico usado e a forma de escoramento são similares ao modelo anterior.

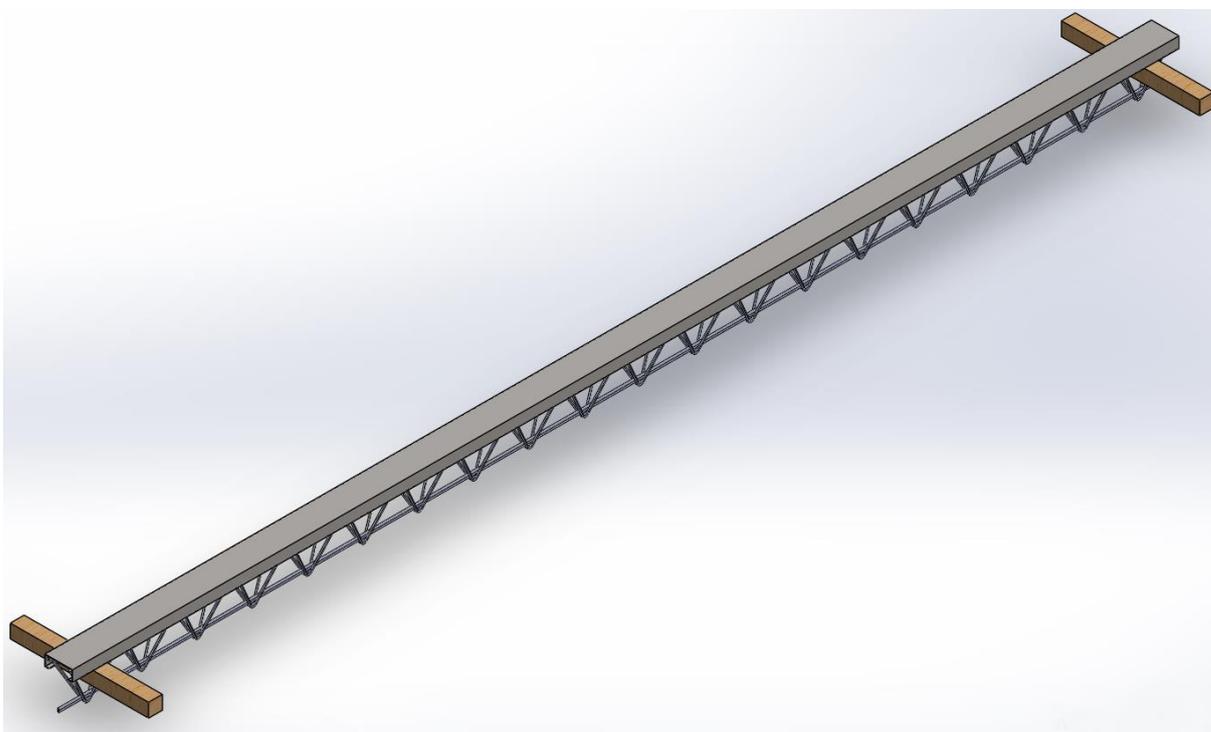
Para esse modelo, a carga de teste exigida pela NBR 15696 para verificação da flecha é muito semelhante à usada no Modelo 1, um pouco maior, no entanto, devido ao acréscimo da treliça. Também foram consideradas lajotas cerâmicas de 10cm de altura, a mesma área de concreto e mesma sobrecarga devido ao intereixo de 40cm, resultando num carregamento de $1,2407 \text{ kN.m}^{-1}$. O detalhamento da carga e o modelo usado para simulação estão na Tabela 2 e na Figura 16, respectivamente.

Tabela 2 - Carregamento para o Modelo 2

Elemento	Carga	
	kN/m	kN/m ²
Concreto	0,6488	1,6219
Peso próprio	0,0509	0,1274
Lajotas cerâmicas H10	0,1410	0,3525
Sobrecarga	0,4000	1,0000
Total	1,2407	3,1017

Fonte: Autor (2017)

Figura 16 - Modelagem utilizada para análise do Modelo 2

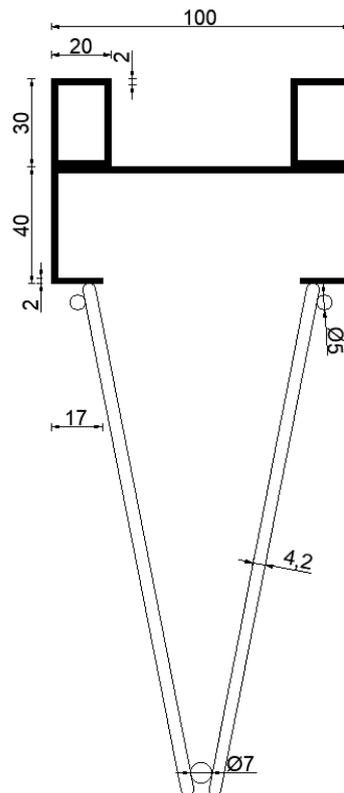


Fonte: Autor (2017)

3.3.3 Modelo 3

No terceiro modelo, último testado em 2016, com o mesmo objetivo de vencer um vão entre apoios de 3,8m, tentou-se aumentar a inércia da vigota não com uma treliça a mais, mas com perfis metálicos retangulares acima do perfil que vinha sendo usado, mostrado na Figura 17. Esses perfis, além de melhorar a inércia da peça, permitiriam o alinhamento entre as faces inferiores dos blocos cerâmicos e do concreto. A vigota ainda seria totalmente reutilizável e o escoramento se daria da mesma forma. A treliça usada foi a mesma dos modelos anteriores.

Figura 17 – Corte transversal do Modelo 3, em milímetros



Fonte: Autor (2017)

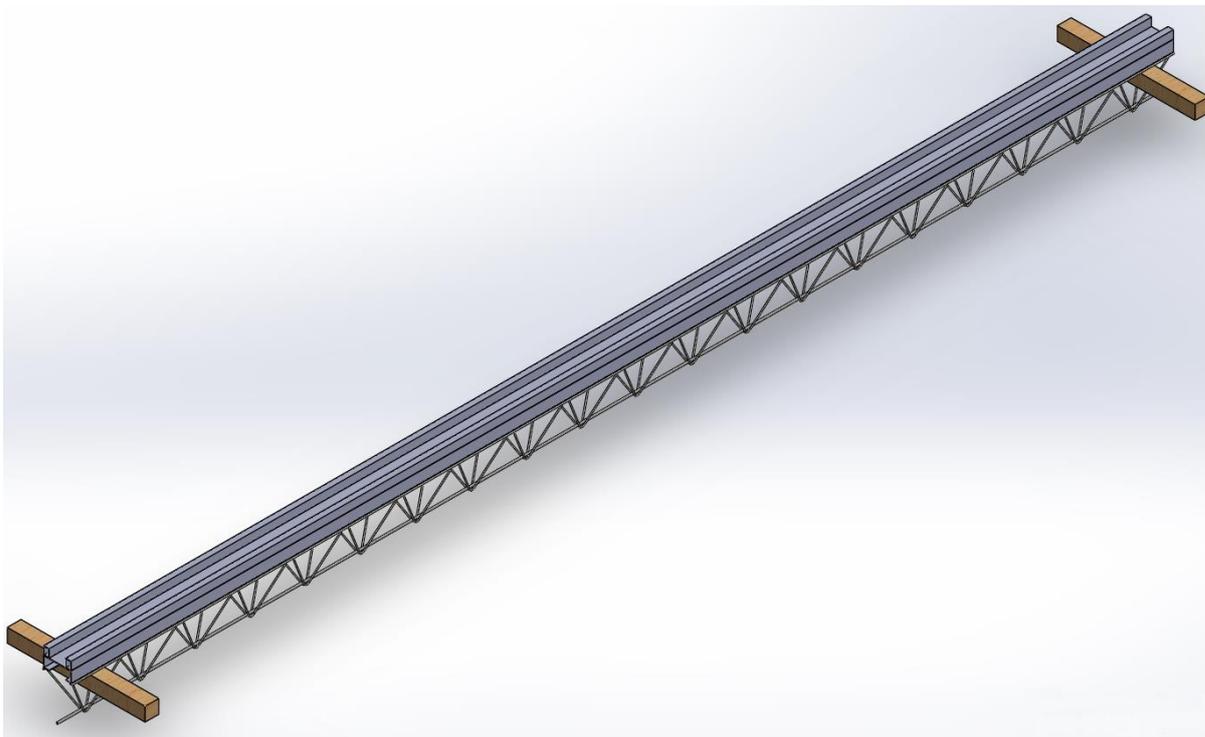
Para a consideração das cargas a serem usadas, a utilização desse modelo permite a redução da área de concreto e a utilização de blocos de enchimento com altura menor, o que fez com que o carregamento encontrado tenha sido um pouco menor que os demais. A descrição detalhada está a seguir na Tabela 3. Já o modelo para a simulação é mostrado na Figura 18.

Tabela 3 - Carregamento para o Modelo 3

Elemento	Carga	
	kN/m	kN/m ²
Concreto	0,5945	1,4863
Peso próprio	0,0697	0,1743
Lajotas cerâmicas (H10)	0,1400	0,3500
Sobrecarga	0,4000	1,0000
Total:	1,2042	3,0106

Fonte: Autor (2017)

Figura 18 - Modelagem utilizada para análise do Modelo 3



Fonte: Autor (2017)

3.3.4 Modelo 4

O quarto modelo testado tinha como objetivo vencer um vão de 2m, com distância entre apoios de 1,9m. Era constituído por uma treliça TR16745 e uma vigota de concreto com 12cm de largura e 4cm de altura, sendo que nas extremidades a altura era o dobro, com presença de pequenos estribos, para suportar a solicitação do esforço cortante. A conexão da treliça com a vigota de concreto foi feita por meio de parafusos, com ligações nas duas extremidades da vigota. Os parafusos foram posicionados dentro da forma, sendo concretados junto com a vigota. Depois disso, a treliça foi fixada na parte do parafuso que ficava externa ao concreto.

Até que se chegasse no modelo final, testou-se um modelo com seção constante de concreto, sem o ressalto nas extremidades. No entanto, a ruína por cisalhamento era crítica, evidenciando a necessidade do reforço nos pontos de cortante máximo. Tentou-se também fazer conexões entre a treliça e a seção de concreto com arames, que tinham parte dentro do concreto e seriam amarrados à treliça posteriormente, mas não se optou por continuar com a ideia. As Figuras 19 e 20 mostram o processo de fabricação da vigota e a vigota já fabricada, respectivamente.

Figura 19 - Confecção da vigota do Modelo 4



Fonte: Impacto (2017)

Figura 20 - Vigota pronta para ser usada



Fonte: Impacto (2017)

Nesse modelo, o entreixo das vigotas é de 0,42 m e, para a construção de uma laje com 12 cm de altura seriam usados blocos de enchimento de 12 cm. Pelo fato de a carga representada pelo concreto ser maior que a dos perfis de aço usados em outros modelos, a carga para verificação da flecha é um pouco maior que as demais. Seu valor é de $1,3751 \text{ kN.m}^{-1}$, como detalhado na Tabela 4.

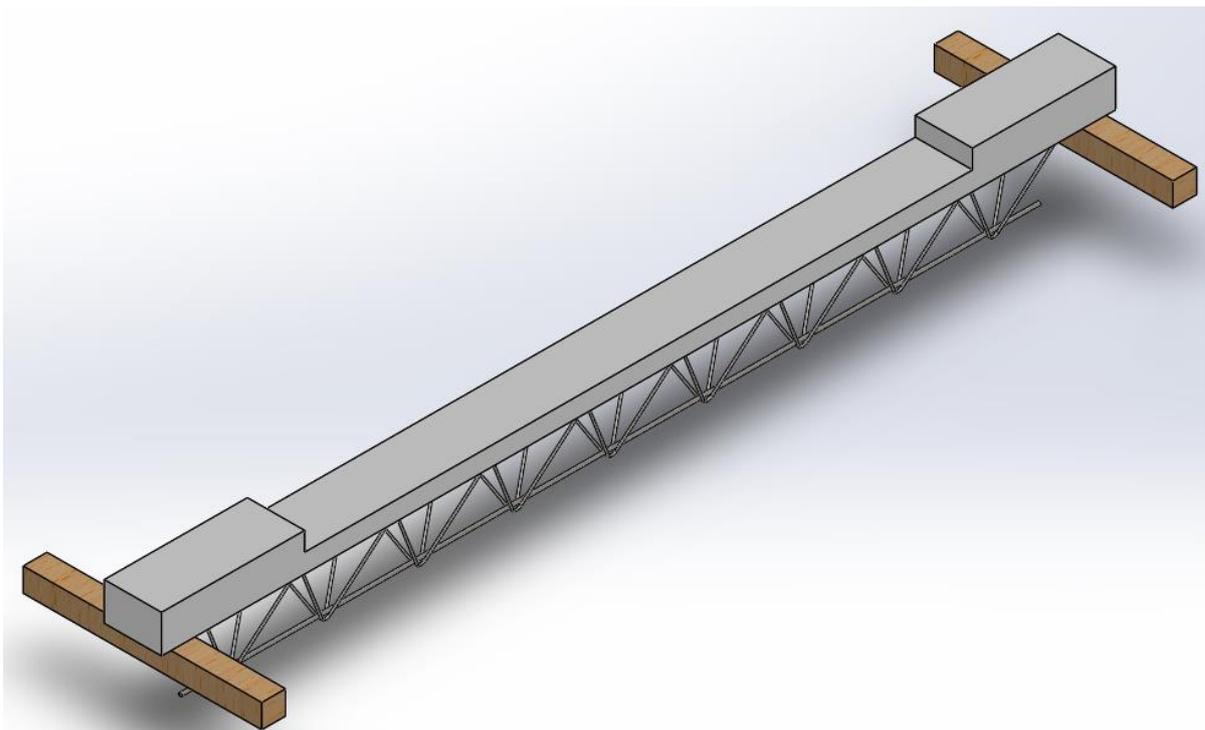
Tabela 4 – Carregamento para o Modelo 4

Elemento	Carga	
	kN/m	kN/m ²
Concreto	0,6838	1,7094
Peso próprio	0,1303	0,3258
Lajotas cerâmicas H12	0,1410	0,3525
Sobrecarga	0,4200	1,0000
Total	1,3751	3,3877

Fonte: Autor (2017)

As condições de contato entre a seção de concreto e a treliça para a simulação computacional foram feitas como se esses elementos fossem ligados diretamente, tangentes um ao outro, por simplicidade. No entanto, na realidade foram usadas conexões por parafusos nas extremidades, conforme a Figura 19. O modelo simulado por elementos finitos está representado na Figura 21.

Figura 21 - Modelagem para análise do Modelo 4

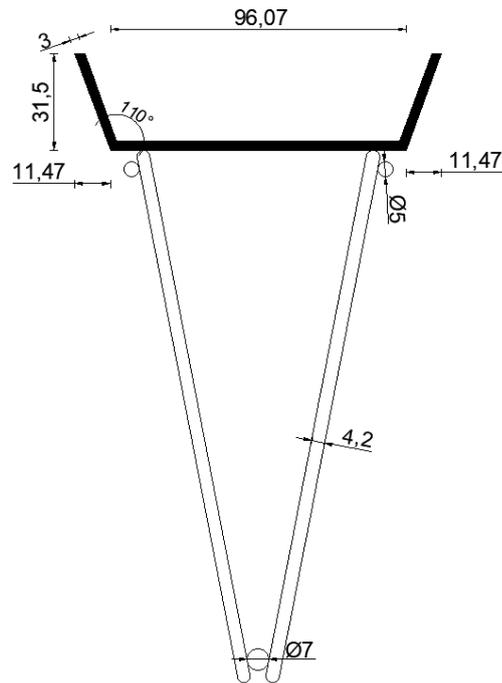


Fonte: Autor (2017)

3.3.5 Modelo 5

O quinto modelo consistia em uma treliça TR16745 soldada a um perfil metálico, com vão entre apoios de 1,8m. O escoramento se deu por barras que passavam dentro da treliça, assim como nos três primeiros modelos. Esse modelo surgiu como uma alternativa ao quarto, devido à dificuldade que seria o processo de conexão da treliça com a seção de concreto por parafusos. A geometria no perfil está detalhada na Figura 22.

Figura 22 – Corte transversal do Modelo 5, em milímetros



Fonte: Autor (2017)

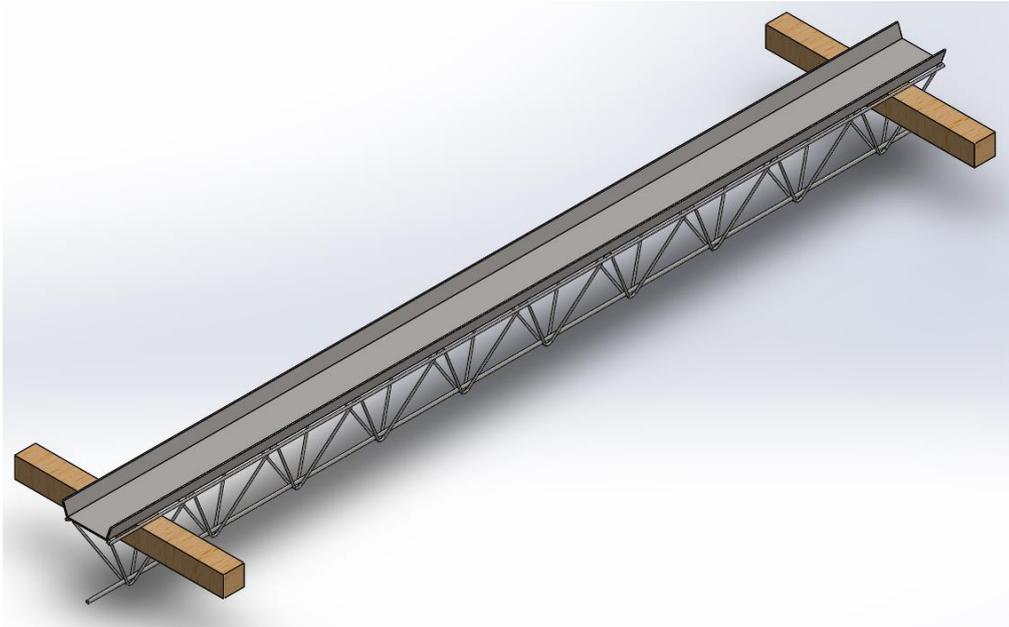
O carregamento para verificação do deslocamento máximo foi obtido considerando o uso de blocos cerâmicos com 10cm de altura. Com um intereixo de 42cm, a sobrecarga de 1 kN/m² gerou um carregamento de 0,42 kN/m. Ao todo, o carregamento de interesse é de 1,3007 kN/m, conforme descrito na Tabela 5. O modelo utilizado para simulação é mostrado na Figura 23.

Tabela 5 - Carregamento para o Modelo 5

Elemento	Carga	
	kN/m	kN/m ²
Concreto	0,6191	1,5477
Peso próprio	0,1216	0,3039
Lajotas cerâmicas H10	0,1400	0,3500
Sobrecarga	0,4200	1,0000
Total	1,3007	3,2017

Fonte: Autor (2017)

Figura 23 - Modelagem para análise do Modelo 5



Fonte: Autor (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

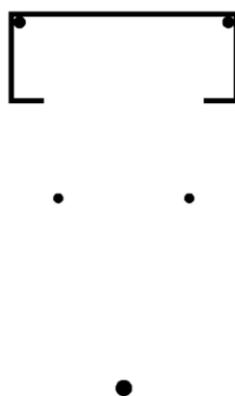
Neste tópico serão apresentados os resultados dos deslocamentos máximos em função dos carregamentos obtidos a partir das análises e dos ensaios para os cinco modelos de vigotas.

4.1 Modelo 1

4.1.1 Análise Teórica

O momento de inércia calculado para o primeiro modelo foi de $100,82 \times 10^{-8} \text{ m}^4$. Vale lembrar que as duas barras isoladas a meia altura mostradas na Figura 24 representam as diagonais da treliça, que variam sua posição ao longo do comprimento da vigota.

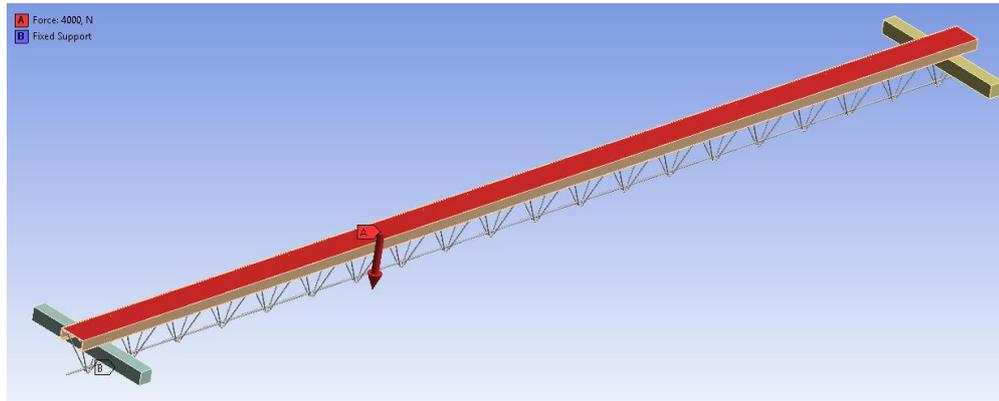
Figura 24 – Seção transversal considerada para o Modelo 1



Fonte: Autor (2017)

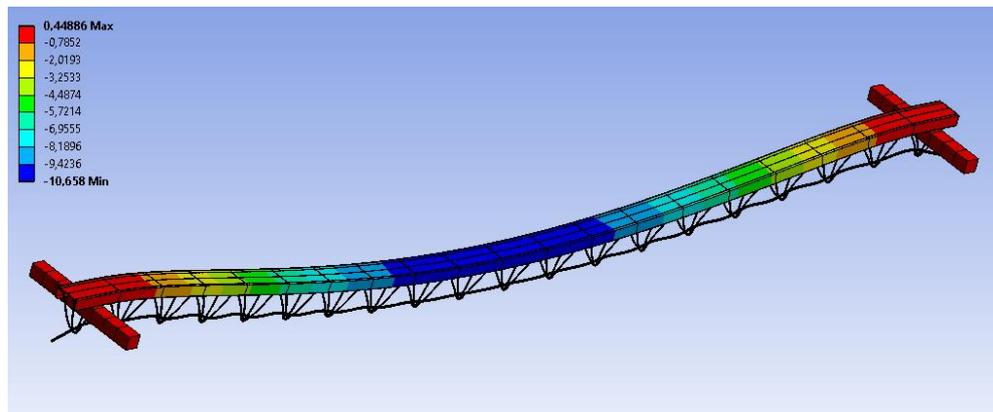
Para o modelo usado no software, foram considerados apoios fixos nas bases de ambas as barras que representam o apoio, localizadas nas extremidades da vigota. Além disso, a carga foi distribuída na face superior do perfil metálico, como mostra a Figura 25. Nessa simulação, foi aplicada uma carga de 4000 N, ou 1 kN.m^{-1} , visto que o perfil possui 4 m. O resultado da análise para essas condições é apresentado na Figura 26.

Figura 25 - Condições para a análise – Modelo 1



Fonte: Autor (2017)

Figura 26 - Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros - Modelo 1



Fonte: Autor (2017)

Os valores obtidos para os deslocamentos máximos pela Teoria da Elasticidade (TE) e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Deslocamento por métodos teóricos - Modelo 1

Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	
	TE	MEF
0,00	0,00	0,00
0,50	6,73	5,33
1,00	13,46	10,66
1,23	16,57	13,11
1,50	20,20	15,99

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.1.2 Ensaio

A numeração dos relógios, bem como o ensaio montado pronto para ser iniciado, pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 - Numeração dos relógios para o primeiro ensaio



Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

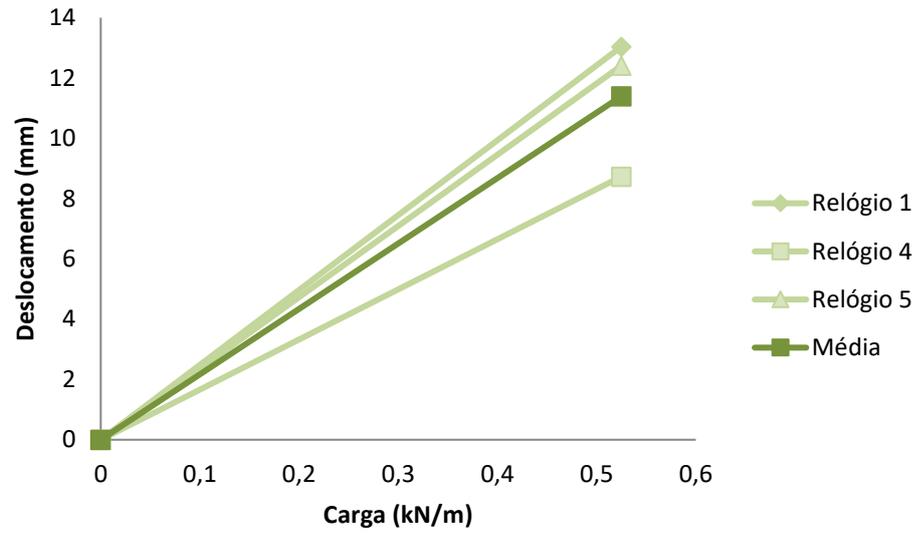
Nesse ensaio os relógios atingiram seus deslocamentos limites rapidamente e não foram zerados para que se obtivessem mais leituras. Além disso, foram perdidos dados dos relógios 2 e 3. A seguir estão a Tabela 7 e a Figura 28, que mostram o deslocamento em função da carga para cada relógio.

Tabela 7 - Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 1

Carga (kN/m)	Relógio 1	Relógio 2	Relógio 3	Relógio 4	Relógio 5	Relógio 6
0,000	0	0	0	0	0	0
0,525	13,04	Perdido	Perdido	8,73	12,41	13,00

Fonte: Impacto, adaptada pelo autor (2017)

Figura 28 – Carga x Deslocamento - Ensaio 1



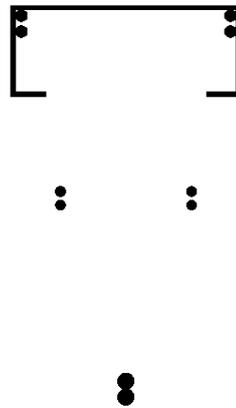
Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.2 Modelo 2

4.2.1 Análise Teórica

O momento de inércia calculado para seção transversal considerada para o segundo modelo foi de $185,27 \times 10^{-8} \text{ m}^4$. A seção considerada é mostrada na Figura 29, sendo as barras isoladas a meia altura a representação das diagonais das treliças.

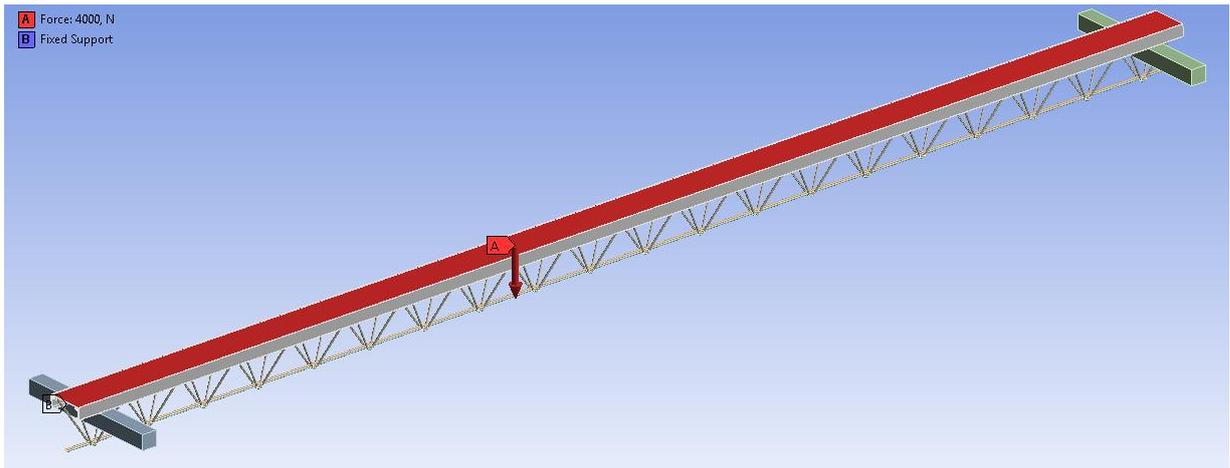
Figura 29 - Seção transversal considerada para o Modelo 2



Fonte: Autor (2017)

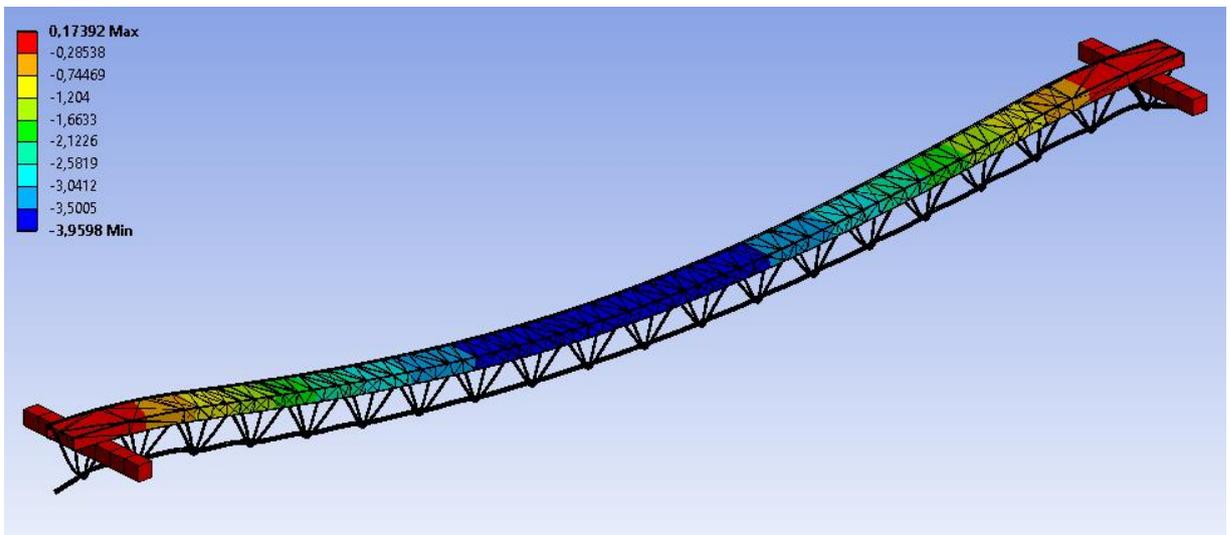
A Figura 30 retrata as condições aplicadas à simulação. Foram fixadas as bases dos apoios localizados nas extremidades da vigota. Como exemplo é mostrada a simulação para carga de 1 kN.m^{-1} . Já na Figura 31 se visualiza o resultado do deslocamento vertical dessa simulação.

Figura 30 - Condições para a análise - Modelo 2



Fonte: Autor (2017)

Figura 31 - Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros - Modelo 2



Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 8 se encontram as flechas máximas em função da carga para ambos os métodos de análise teórica.

Tabela 8 - Deslocamento por métodos teóricos – Modelo 2

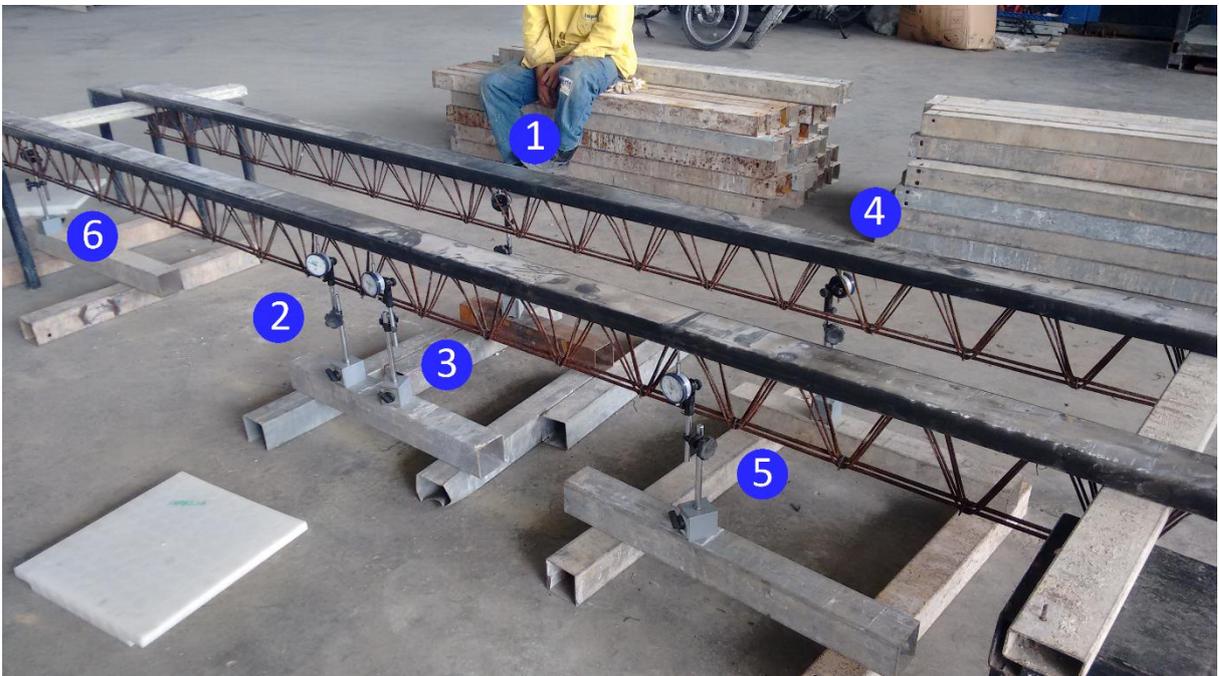
Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	
	TE	MEF
0,00	0,00	0,00
0,50	3,66	1,98
1,00	7,33	3,96
1,24	9,09	4,91
1,50	10,99	5,94

Fonte: Autor (2017)

4.2.2 Ensaio

Diferentemente do esquema disposto no primeiro modelo, optou-se por controlar o deslocamento da vigota em um ponto próximo ao apoio, o que foi feito pelo relógio 6. Os relógios considerados para a verificação da flecha máxima foram os relógios 1, 2 e 3, por estarem no centro das duas vigotas, conforme a Figura 32.

Figura 32 - Numeração dos relógios para o segundo ensaio



Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

Foram usadas 40 longarinas em cada camada, o que resulta em uma carga de $0,5 \text{ kN.m}^{-1}$ por camada. Segue abaixo a Tabela 9, com os deslocamentos em função da carga, assim como a Figura 33, do gráfico de deslocamento em função da carga para os relógios 1, 2 e 3 e a

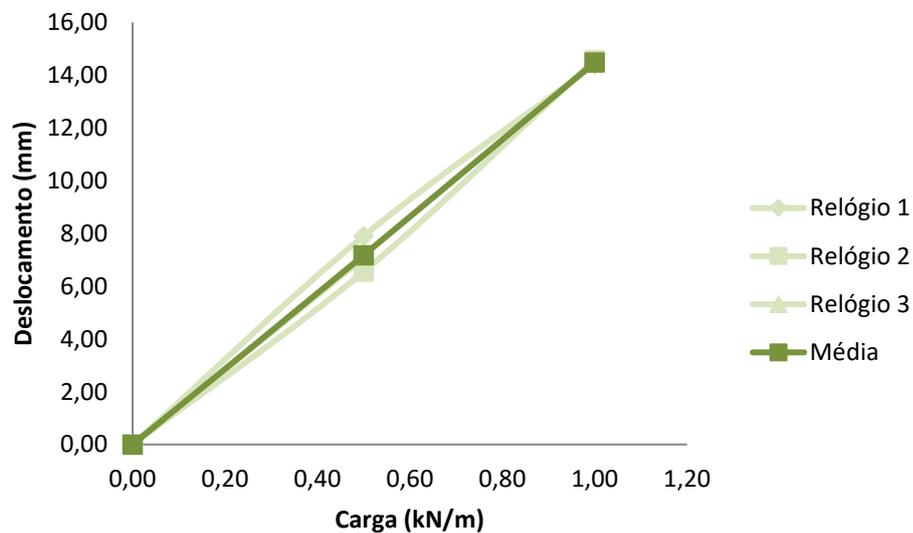
para a média desses relógios.

Tabela 9 - Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 2

Carga (kN/m)	Relógio 1	Relógio 2	Relógio 3	Relógio 4	Relógio 5	Relógio 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	7,90	6,55	7,07	4,91	5,45	1,19
1,00	14,40	14,57	Perdido	9,55	10,21	1,62

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

Figura 33 – Carga x Deslocamento - Ensaio 2



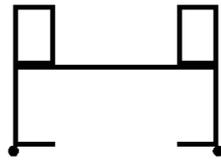
Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.3 Modelo 3

4.3.1 Análise Teórica

Novamente desconsiderando a variação da altura da diagonal da treliça, o terceiro modelo possui seção transversal constante ao longo de seu comprimento, com momento de inércia igual a $280,37 \times 10^{-8} \text{ m}^4$. Na Figura 34 se visualiza a seção considerada para o cálculo do momento de inércia.

Figura 34 - Seção transversal considerada para o Modelo 3



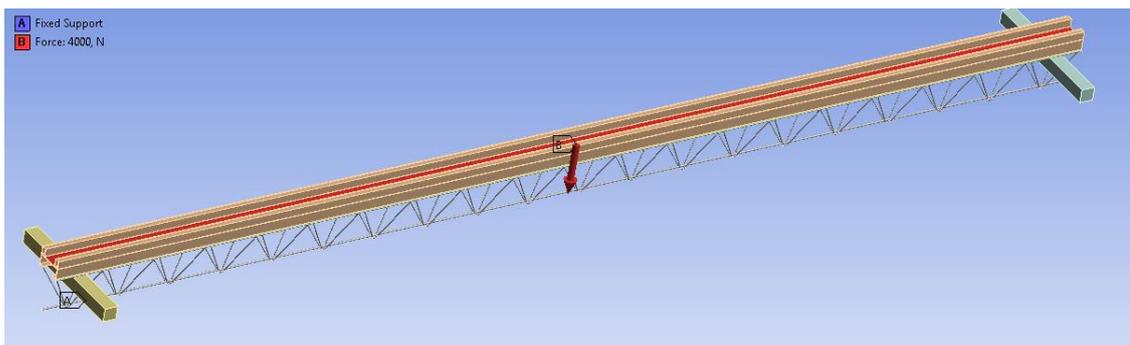
• •

•

Fonte: Autor (2017)

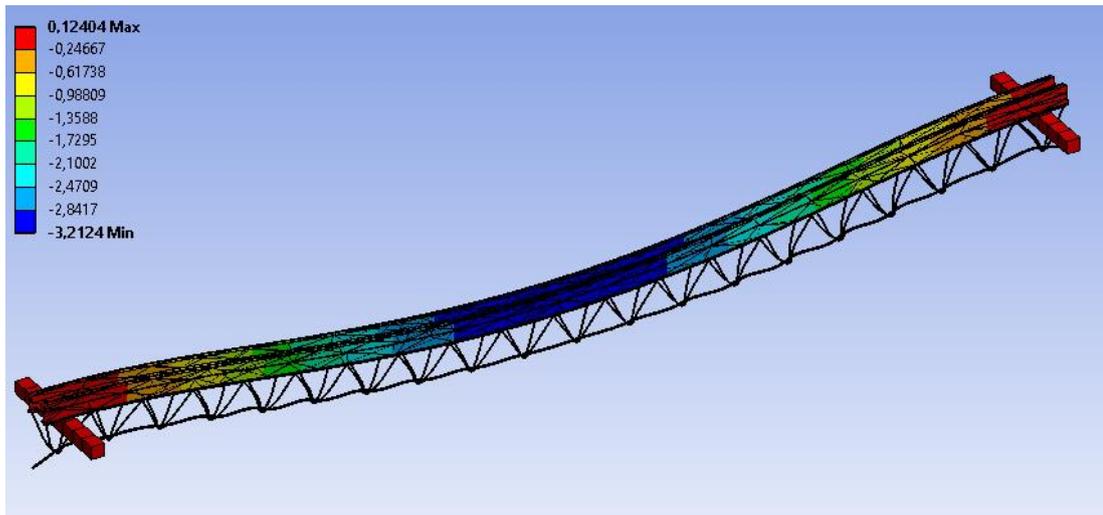
Para a análise no software, foram considerados apoios fixos as bases das barras localizadas nas extremidades. A carga foi uniformemente distribuída na parte central da face superior do perfil sobre a treliça, conforme a Figura 35, na qual também podem ser visualizadas as condições para análise para a carga de 1 kN/m. O resultado da simulação é apresentado na Figura 36.

Figura 35 - Condições para a análise - Modelo 3



Fonte: Autor (2017)

Figura 36 - Resultados analítico do deslocamento vertical, em milímetros - Modelo 3



Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 10 se encontram as flechas máximas em função da carga para ambos os métodos de análise teóricos.

Tabela 10 - Deslocamento por métodos teóricos - Modelo 3

Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	
	TE	MEF
0,00	0,00	0,00
0,50	2,18	1,61
1,00	4,35	3,21
1,20	5,24	3,87
1,50	6,53	4,82

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.3.2 Ensaio

Nesse ensaio, todos os relógios foram usados em apenas uma vigota, apesar de o ensaio ter sido feito com duas. Foram colocados três relógios próximos aos apoios, dois ao centro e um a 1/4 do vão, conforme disposição apresentada na Figura 37.

Figura 37 - Numeração dos relógios para o terceiro ensaio



Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

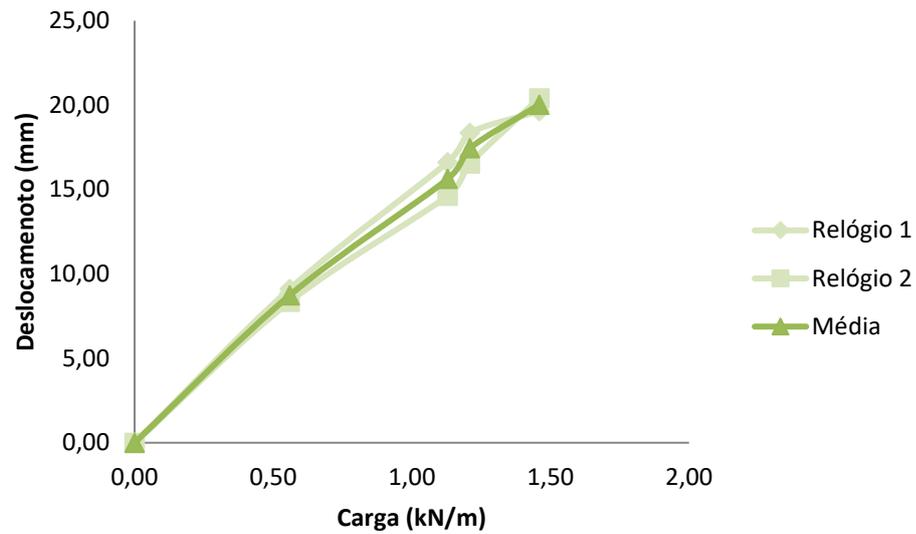
Durante o ensaio, quando próximos de atingirem o limite de 20mm, os relógios foram zerados para se ter as informações do deslocamento para as últimas camadas de longarinas que foram colocadas. Foram realizadas leituras dos relógios em mais camadas, de modo que foi possível traçar um gráfico carga x deslocamento com mais pontos. Seguem abaixo a Tabela 11 e a Figura 38 com o gráfico dos deslocamentos em função da carga.

Tabela 11 - Deslocamento, em milímetros, em função da carga – Ensaio 3

Carga (kN/m)	Relógio 1	Relógio 2	Relógio 3	Relógio 4	Relógio 5	Relógio 6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,56	9,12	8,36	4,31	7,33	0,31	0,66
1,13	16,63	14,64	5,73	12,80	1,49	0,74
1,21	18,36	16,55	5,91	13,92	1,66	0,67
1,46	19,65	20,41	6,36	16,21	2,05	0,60

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

Figura 38 – Carga x Deslocamento - Ensaio 3



Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.4 Modelo 4

4.4.1 Análise Teórica

Para o quarto modelo, considerou-se a seção central para o cálculo do momento de inércia. Com os materiais já homogeneizados, com base no módulo de elasticidade do aço, o momento de inércia obtido foi de $150,93 \times 10^{-8} \text{ m}^4$. A Figura 39 mostra a seção considerada para cálculo do momento de inércia, ainda não homogeneizada.

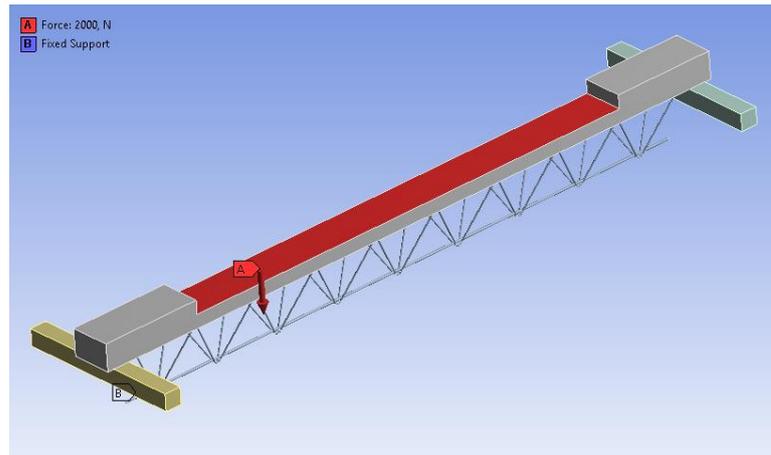
Figura 39 - Seção transversal considerada para o Modelo 4



Fonte: Autor (2017)

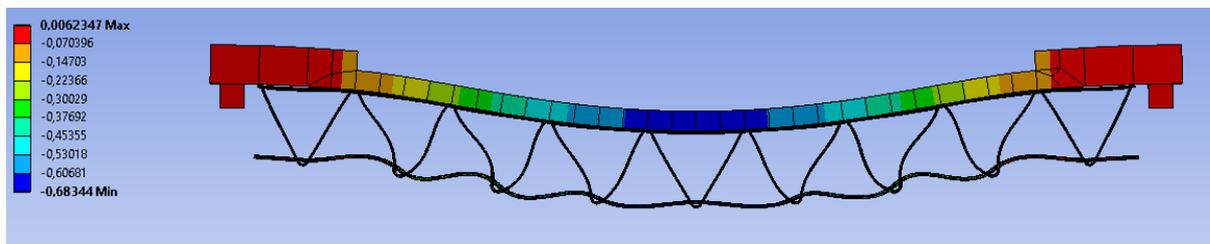
Para a simulação no software, considerou-se apoio fixo a base de ambas as barras que apoiam as extremidades do concreto. A carga distribuída se restringiu à parte mais baixa da seção de concreto, conforme a Figura 40. Nessa simulação, foram aplicados 2000N para uma vigota de comprimento total de 2m. O resultado do deslocamento vertical para esse caso é mostrado na Figura 41.

Figura 40 - Condições para análise - Modelo 4



Fonte: Autor (2017)

Figura 41 - Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros - Modelo 4



Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 12 são apresentados os valores das flechas máximas em função das cargas, para as duas análises realizadas.

Tabela 12 - Deslocamento por métodos teóricos - Modelo 4

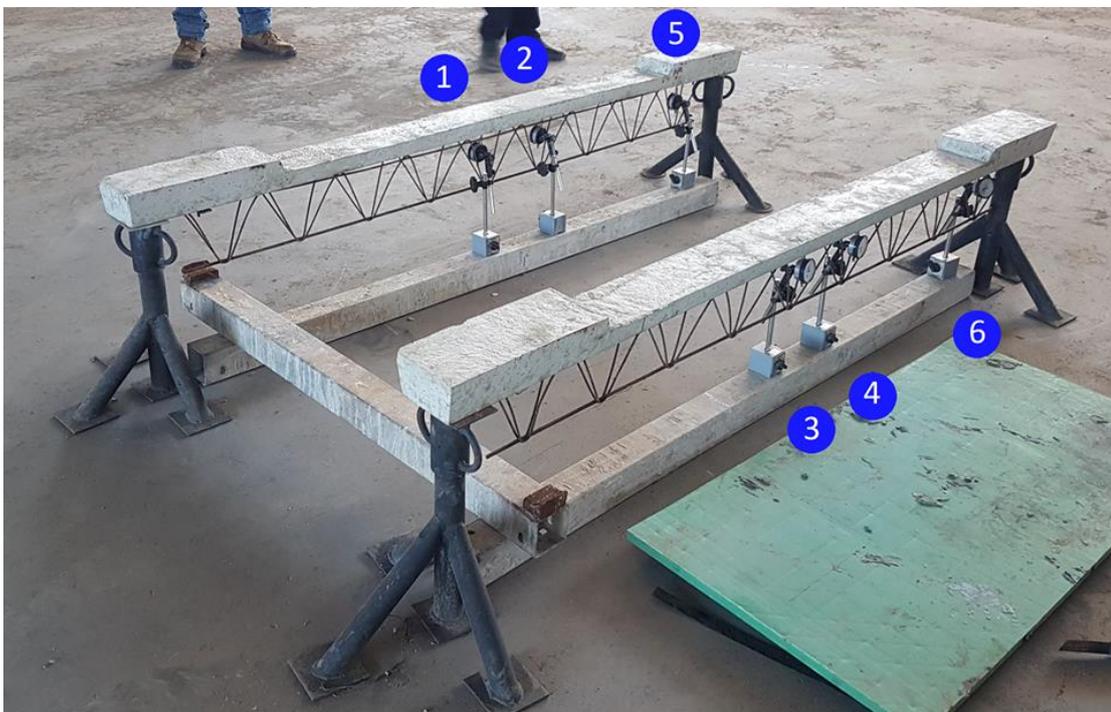
Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	
	TE	MEF
0,00	0,00	0,00
0,50	0,28	0,34
1,00	0,56	0,68
1,38	0,77	0,94
1,50	0,84	1,03

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.4.2 Ensaio

Nesse ensaio o apoio se deu pela vigota de concreto, em contato direto com um tripé metálico. Os relógios que medem os deslocamentos foram colocados ao centro e próximos aos apoios. Na Figura 42 visualizam-se as posições de cada um, tendo sido considerados os relógios 1, 2, 3 e 4 para a verificação da flecha máxima.

Figura 42 - Numeração dos relógios para o quarto ensaio



Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

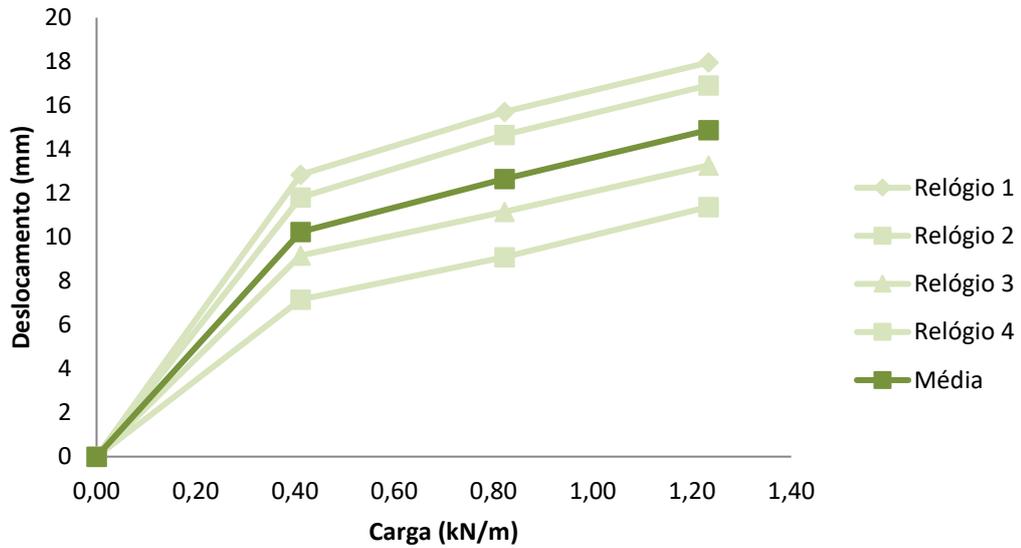
Para esse ensaio, as vigotas foram levadas à ruína. Os relógios foram usados até a terceira camada de longarinas, que representava uma carga de $1,23 \text{ kN.m}^{-1}$. Seguem abaixo a Tabela 13, com o deslocamento em função da carga, bem como a Figura 43, com o gráfico de carga x deslocamento.

Tabela 13 - Deslocamento, em milímetros, em função da carga - Ensaio 4

Carga (kN/m)	Relógio 1	Relógio 2	Relógio 3	Relógio 4	Relógio 5	Relógio 6
0,00	0	0	0	0	0	0
0,41	12,85	11,81	9,17	7,15	1,66	1,17
0,82	15,71	14,66	11,15	9,09	3,04	2,04
1,23	17,96	16,92	13,27	11,38	4,4	3,16

Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

Figura 43 – Carga x Deslocamento - Ensaio 4



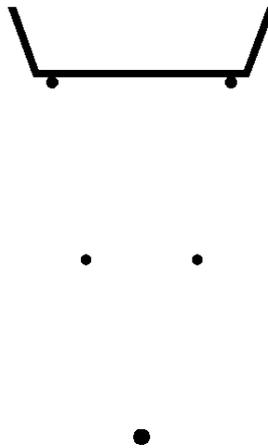
Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.5 Modelo 5

4.5.1 Análise Teórica

Para o último modelo idealizado, o momento de inércia obtido para a seção transversal foi de $122,84 \times 10^{-8} \text{ m}^4$. A seção transversal considerada é mostrada na Figura 44.

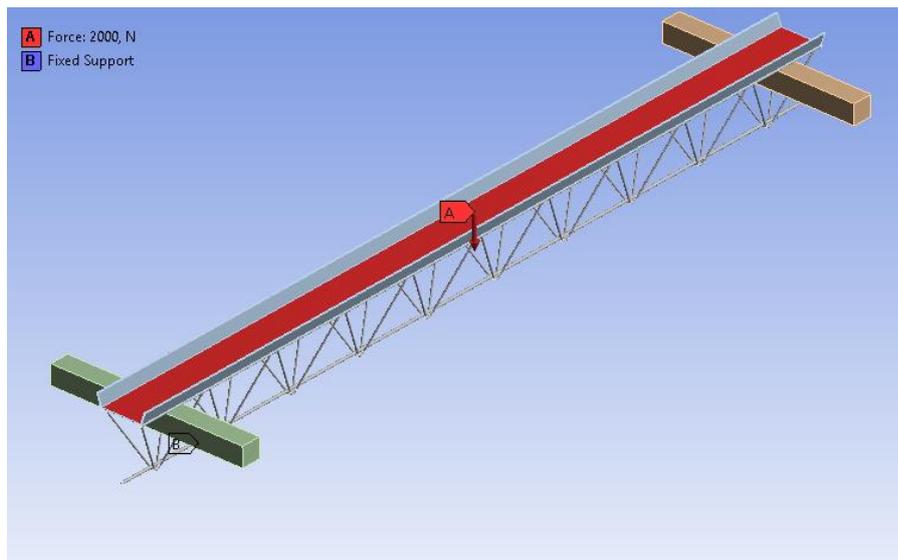
Figura 44 - Seção transversal considerada para o Modelo 5



Fonte: Autor (2017)

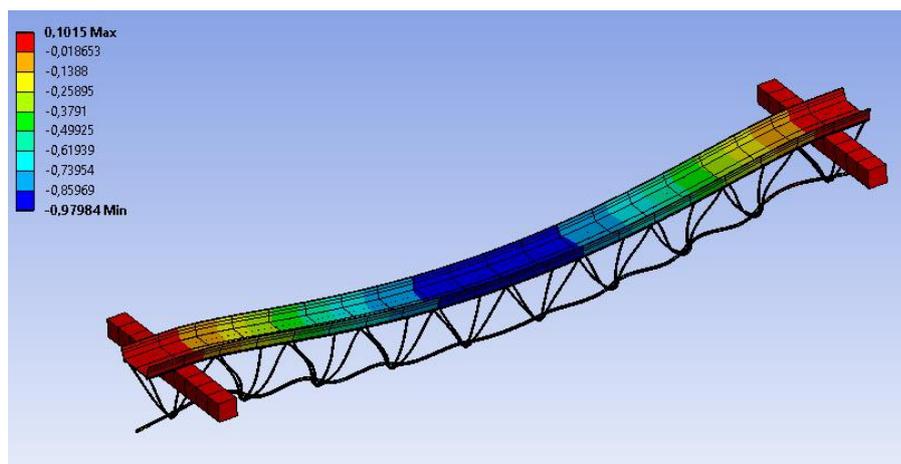
Para a simulação foram considerados apoios fixos nas bases das barras que servem de apoio para a vigota. A carga foi distribuída ao longo de todo o perfil, como pode ser visto na Figura 45. Nesse caso foi aplicada uma carga de 2000 N, o que representa um carregamento distribuído de 1 kN.m^{-1} . O resultado do deslocamento vertical obtido a partir dessas condições é mostrado na Figura 46.

Figura 45 - Condições para análise - Modelo 5



Fonte: Autor (2017)

Figura 46 - Resultado analítico do deslocamento vertical, em milímetros - Modelo 5



Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 14 se encontram as flechas máximas em função da carga para ambos os métodos de análise.

Tabela 14 - Deslocamentos por métodos teóricos - Modelo 5

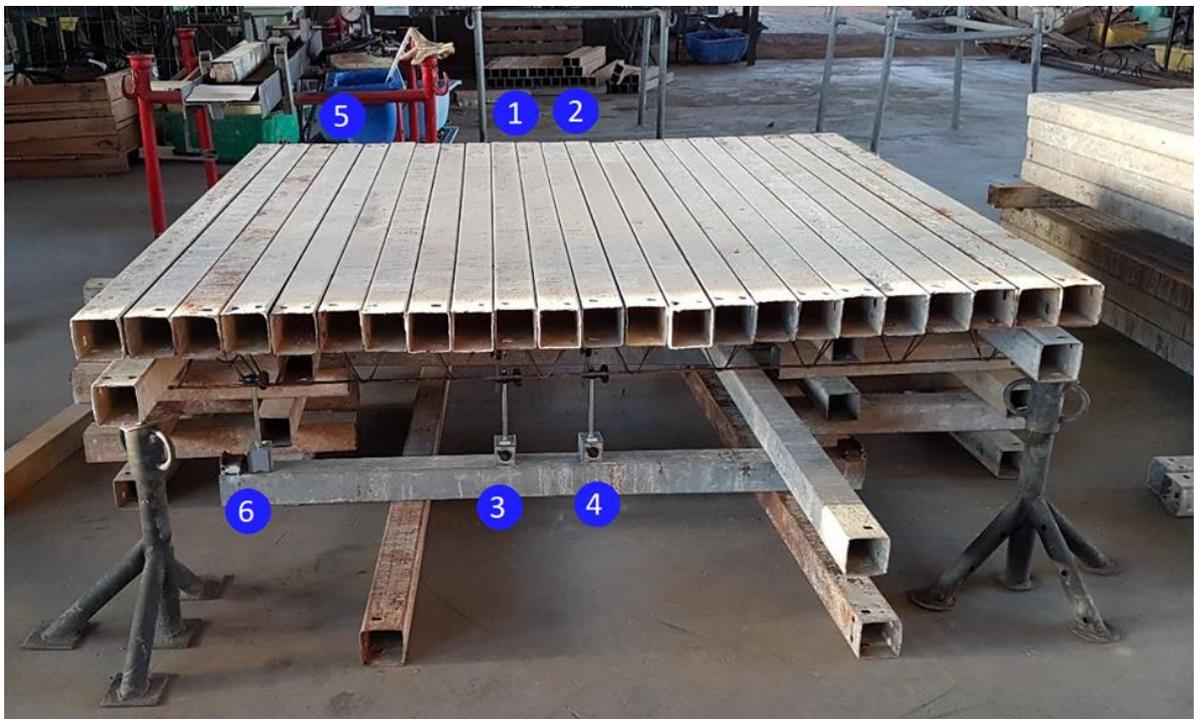
Carga (kN/m)	Deslocamento (mm)	
	T.E	MEF
0,00	0,00	0,00
0,50	0,28	0,49
1,00	0,56	0,98
1,30	0,72	1,28
1,50	0,83	1,47
2,50	1,39	2,45

Fonte: Autor (2017)

4.5.2 Ensaio

Para o quinto ensaio, os relógios foram dispostos igualmente em ambas as vigotas, dois ao centro e um próximo ao apoio, tendo sido utilizados os relógios 1, 2, 3 e 4 para determinação do deslocamento máximo. A numeração dos relógios é mostrada na Figura 47. Foram feitos registros de quatro camadas, com cerca de 21 longarinas em cada uma.

Figura 47 - Numeração dos relógios para o quinto ensaio



Fonte: Impacto, adaptada pelo autor (2017)

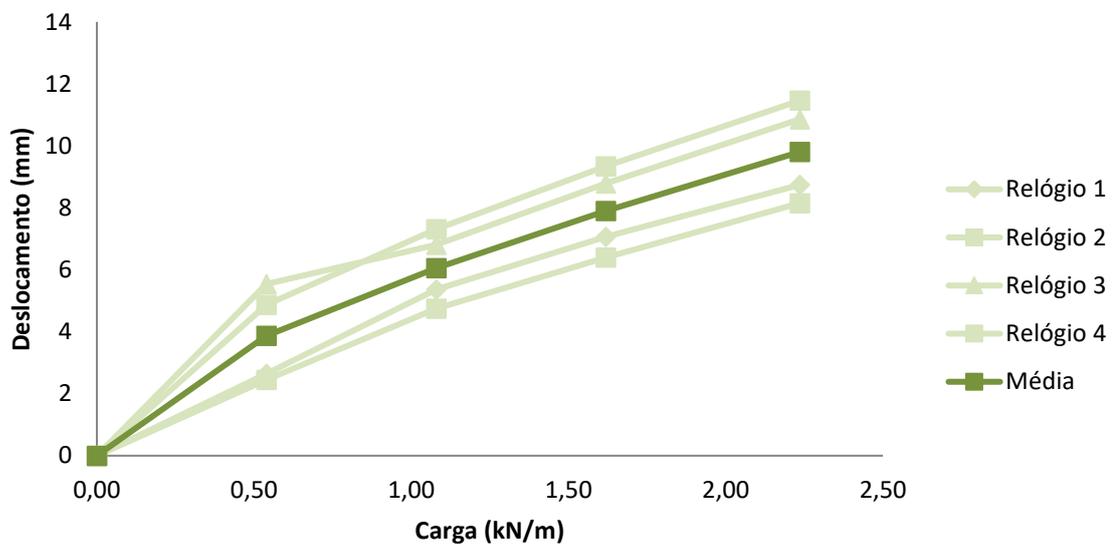
A Tabela 15 e a Figura 48 mostram os resultados do deslocamento em função do carregamento.

Tabela 15 – Deslocamento, em milímetros, em função da carga - Ensaio 5

Carga (kN/m)	Relógio 1	Relógio 2	Relógio 3	Relógio 4	Relógio 5	Relógio 6
0,00	0	0	0	0	0	0
0,54	2,64	2,45	5,54	4,87	1,64	1,6
1,08	5,36	4,75	6,81	7,31	-1,15	3,3
1,62	7,07	6,4	8,79	9,34	-1,01	5,47
2,24	8,74	8,15	10,86	11,46	-0,47	5,44

Fonte: Impacto, adaptada pelo autor (2017)

Figura 48 – Carga x Deslocamento - Ensaio 5

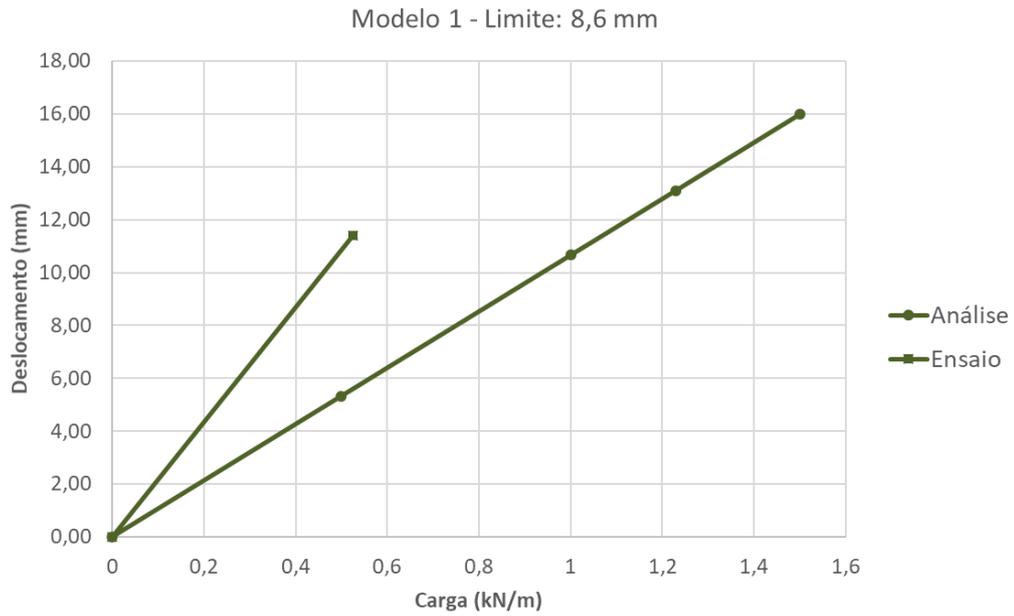


Fonte: Impacto, adaptado pelo autor (2017)

4.6 Comparação dos Resultados

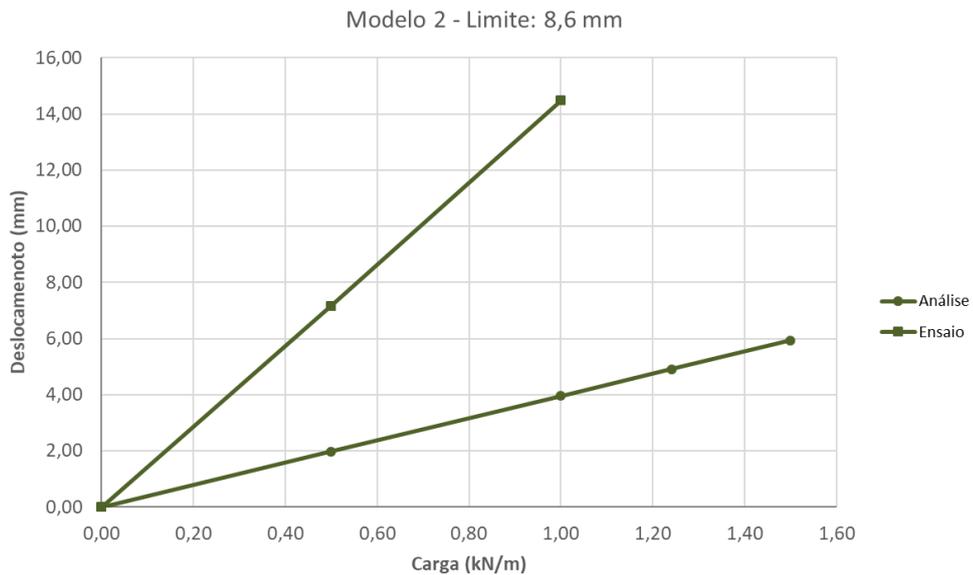
A seguir estão as Figuras 49, 50, 51, 52 e 53, que contêm os gráficos que permitem a comparação entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e pelos ensaios. É notável a diferença obtida entre os métodos. Para todos os modelos, as flechas reais foram maiores que as teóricas.

Figura 49 - Comparação entre análise e ensaio - Modelo 1



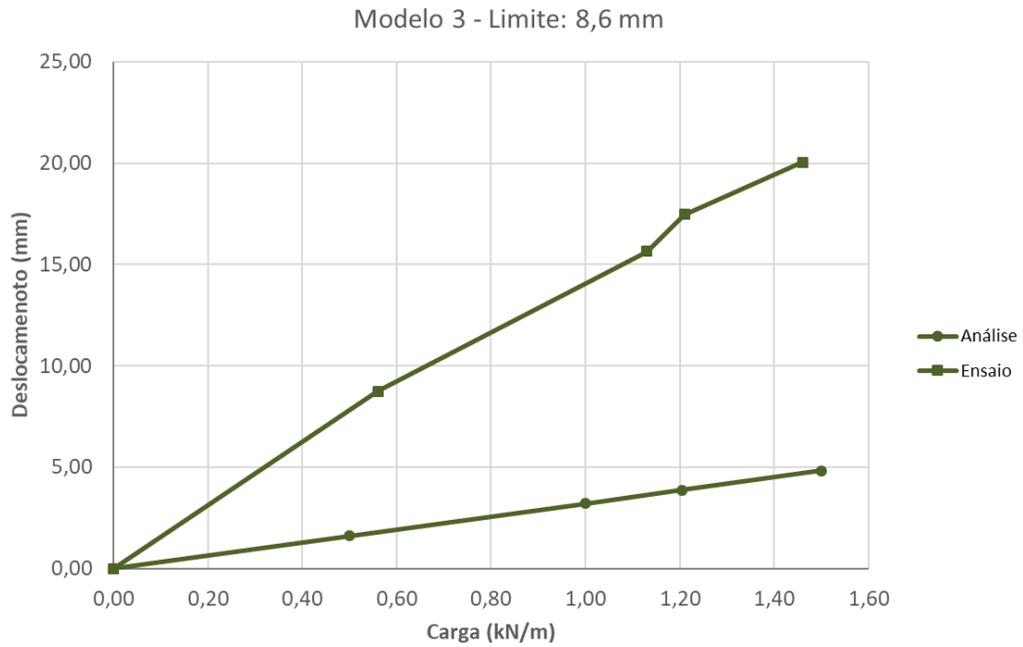
Fonte: Autor (2017)

Figura 50 - Comparação entre análise e ensaio - Modelo 2



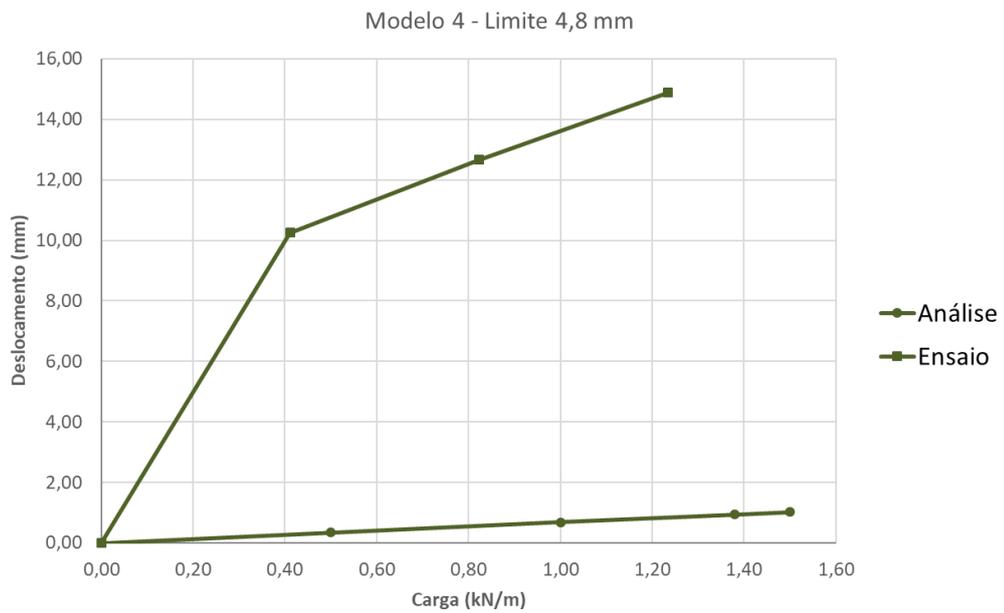
Fonte: Autor (2017)

Figura 51 - Comparação entre análise e ensaio - Modelo 3



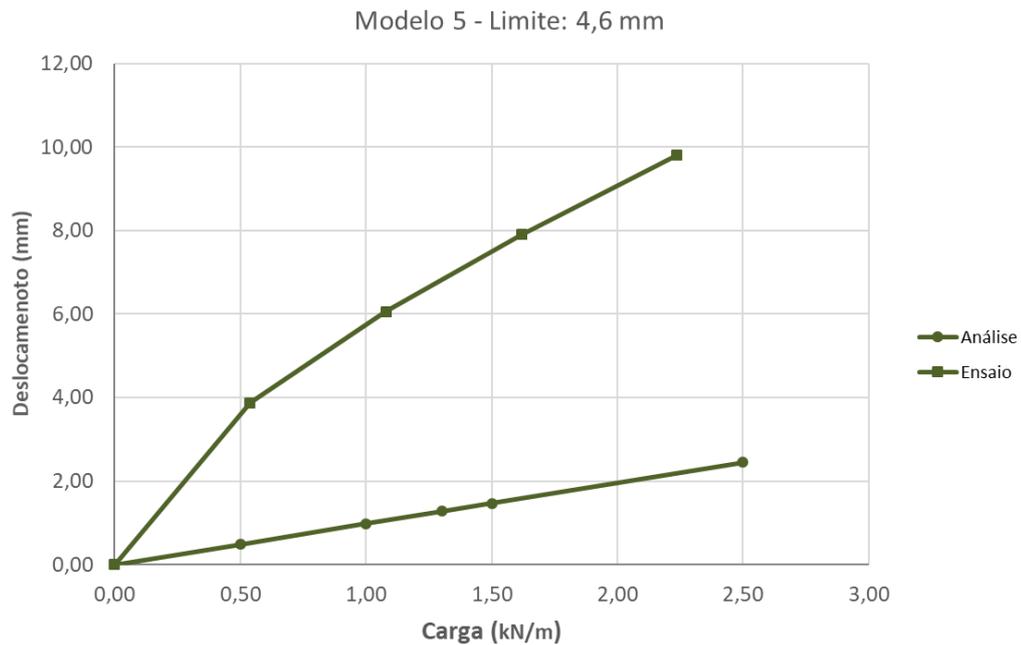
Fonte: Autor (2017)

Figura 52 - Comparação entre análise e ensaio - Modelo 4



Fonte: Autor (2017)

Figura 53 - Comparação entre análise e ensaio - Modelo 5



Fonte: Autor (2017)

Apesar de ter sido validada pelo cálculo do deslocamento segundo a Teoria da Elasticidade, quando comparados com os ensaios, os resultados das análises apresentam valores bem menores que os reais para todos os modelos testados. É difícil saber com precisão o motivo das diferenças encontradas, pois existem uma série de possibilidades para que isso tenha acontecido.

No entanto, para explicar essa diferença entre os resultados de análises e ensaios, é necessário que pelo menos uma das seguintes afirmações seja verdadeira. Ou os modelos têm considerações que não ocorrem na realidade ou houve falha no ensaio - seja de equipamento ou de execução – ou ambos.

Observando a equação do deslocamento máximo para uma barra biapoiada (Equação 2), as variáveis que influenciam no valor da flecha são carga, vão, módulo de elasticidade e momento de inércia. No caso de ter havido falha nos ensaios, as variáveis responsáveis pelos erros seriam carga, vão ou a própria medição dos deslocamentos pelos relógios.

Apesar de a possibilidade de ter havido falha no ensaio não poder ser descartada, por não haver informação suficiente para tal, as variáveis carga e vão são de fácil controle. Já em relação aos relógios, não se usou em ensaio algum apenas um desses equipamentos para a medição dos deslocamentos máximos e em nenhum ensaio houve discordância entre as medidas

dos relógios, o que significa que todos estavam igualmente calibrados.

Ainda em relação à medida da flecha no ensaio, foi feita a desconsideração da deformação dos elementos de apoio. No entanto, por mais que esse deslocamento realmente ocorra, seu valor não é sequer da mesma ordem de grandeza daquela apresentada pelos das vigotas, o que torna razoável desprezá-lo.

Já para a suposição de as análises estarem sendo o motivo da diferença dos resultados, que é a mais provável, a rigidez à flexão considerada na simulação não seria a real. Com isso, pelo menos uma das outras duas variáveis da equação do deslocamento – módulo de elasticidade e momento de inércia - estaria sendo considerada erroneamente. Por se tratarem de elementos industrializados, com exceção do Modelo 4, em que foi usado concreto, o módulo de deformação não é o motivo das diferenças encontradas devido ao rigor que se tem com a qualidade desses materiais em seu processo fabril.

Resta, com isso, o momento de inércia como motivo mais provável para explicar a diferença entre os resultados obtidos por análises e ensaios. Isso não significa que nos modelos analíticos a variável tenha sido mal calculada ou que o software de elementos finitos tenha feito o processamento errado da malha gerada. O que pode ter ocorrido é que os elementos das vigotas não formaram um conjunto harmônico, que trabalhe como uma peça só, ou seja, que tenha havido deslizamento entre peças ou que as conexões não tenham sido capazes de transmitir integralmente os esforços, de modo que parte da vigota não fosse solicitada como se esperava.

Essa condição de não deslizamento e transmissão integral dos esforços de cisalhamento é essencial para que se possa considerar um sistema estrutural que respeite as premissas das equações de flexão. É observado com clareza que essa condição não é cumprida em um teste preliminar de uma vigota. Na Figura 54 é possível identificar que antes de ser carregada, a vigota estava totalmente horizontal, sem flecha, com treliça e perfil metálico juntos. Já na Figura 55, quando foi aplicado um carregamento, nota-se que o perfil deforma e a treliça permanece na horizontal, aparentemente indeformada, fazendo com que tenha um deslocamento relativo entre os elementos nas extremidades da vigota, onde o esforço cortante é máximo.

Figura 54 - Vigota em teste preliminar sem carregamento



Fonte: Impacto (2017)

Figura 55 – Vigota em teste preliminar com carregamento



Fonte: Impacto (2017)

Apesar de esse modelo mostrado não ter sido um dos estudados no trabalho, esse fenômeno pode ter acontecido em menor escala nos ensaios, o que ajuda a compreender tamanha diferença entre a prática e a teoria.

Nesse sentido, foram calculadas as eficiências das vigotas ensaiadas tendo como referência os resultados teóricos. Esse parâmetro, mostrado na Tabela 16, indicaria o quanto da inércia total do conjunto teria sido solicitada ou trabalhado efetivamente, pressupondo, conforme exposto, que a condição de transmissão dos esforços pelas ligações não foi plenamente satisfeita.

Tabela 16 - Eficiência das rigidezes dos modelos ensaiados tendo as análises teóricas como referências

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Eficiência	49,1%	27,3%	23,4%	5,6%	20,1%

Fonte: Autor (2017)

Em relação a atender do limite de deslocamento vertical imposto pela norma, a partir do cálculo teórico de simulação, apenas os Modelo 1 e 2 não atenderiam o requisito. No entanto, com os resultados dos ensaios tendo sido bem maiores que os teóricos, observou-se que nenhum modelo foi capaz de satisfazê-lo. Ainda assim, o último modelo apresentou uma diferença pequena em relação a esse limite.

5 CONCLUSÃO

Apesar de os resultados obtidos terem sido muito diferente do que se esperava, os objetivos de realizar ensaios e simulações nas vigotas idealizadas foram cumpridos. Os valores de deslocamento obtidos a partir da simulação foram bem próximos dos calculados pela Teoria da Elasticidade, o que serviu para validar a simulação.

Tendo em vista a baixa eficiência dos modelos no ensaio comparados à situação ideal representada pela simulação, supõe-se que apenas parte da inércia da peça é solicitada para resistir à flexão devido a falhas nas conexões ou folga entre os elementos. No Modelo 4, por exemplo, é possível observar que inicialmente há um grande deslocamento, evidenciando que parte da inércia do conjunto só é solicitada após certo carregamento.

A título de sugestão, poderiam ser usados extensômetros em pontos das vigotas para verificar a tensão atuante e comparar com a teórica. Além disso, seria interessante o ensaio de algum elemento monolítico, como um perfil de aço, para a validação da metodologia do ensaio. Já para melhorar a eficiência dos modelos, recomenda-se a busca de melhorias na ligação entre a treliça e o perfil.

De toda forma, a partir dos cinco modelos testados e modelados, deve-se afirmar que a análise feita, assim como o cálculo da flecha a partir da equação da Teoria da Elasticidade, não é capaz de representar a realidade para esse caso em específico. Além disso, todos os modelos testados atingiram valores de flecha superiores aos limitados pela NBR 15696.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira; MOTA, Joaquim Eduardo; CARACAS, Joaquim; NOBRE, E. G. **Lajes Treliçadas Protendidas (Pré-Tração)**. 2005. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, São Carlos, 3 e 4 de novembro de 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15696: Fôrmas e escoramento para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos**. Rio de Janeiro, 2009.

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

AVILLA JUNIOR, Jovair. **Contribuição ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2009.

BOCCHI JÚNIOR, Carlos Fernando. **Lajes nervuradas de concreto armado: Projeto e Execução**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BRANDALISE, Guilherme Meurer; WESSLING, Luan Ives. **Estudo comparativo de custo entre laje maciça de vigotas pré-fabricadas treliçadas em edifícios de até quatro pavimentos no município de Pato Branco, Paraná, Brasil**. 2015, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

CARVALHO, Roberto Chust; PARSEKIAN, Guilherme Aris; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo; MACIEL, Andrey Monteiro. **Estado da Arte do Cálculo das Lajes Pré-fabricadas com Vigotas de Concreto**. 2005. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, São Carlos, 3 e 4 de novembro de 2005.

DI PIETRO, João Eduardo. **Projeto, execução e produção de lajes com vigotes pré-moldados de concreto**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

DROPPA JÚNIOR, Alonso. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

DROPPA JÚNIOR, Alonso; EL DEBS, Mounir Khalil. **Análise não-linear de lajes pré-moldadas com armação treliçada: comparação entre valores teóricos com experimentais e simulações numéricas em painéis isolados**. 2001, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos n. 17, p. 105-120.

FERREIRA, Tobias Ribeiro. **Otimização estrutural de lajes formadas por vigotas treliçadas com e sem protensão**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 2016.

FORNI, Daniel. **Custo de lajes formadas por vigotas treliçadas considerando a produção, o transporte, a montagem e a concretagem**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

FRANCA, Argemiro Brito Monteiro da; FUSCO, Pérciles Brasiliense. **As Lajes Nervuradas na Moderna Construção de Edifícios**. 1997. AFALA & ABRAPEX, São Paulo.

GASPAR, Ricardo. **Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LIMA, Maria Crisina Vidigal de; CASTLHO, Vanessa Cristina de; GESUALDO, Francisco A. Romero. **Vigotas treliçadas protendidas: Análise experimental e estudo de escoramento**. 2013, Cadernos de Engenharia de Estrutura, São Carlos.

MERLIN, Andrei José; EL DEBS, Mounir Khalil; TAKEYA, Toshiaki; NETO, Noé Marcos. **Análise do Efeito da Protensão em Lajes Pré-moldadas com Armação Treliçada**. 2005. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, São Carlos, 3 e 4 de novembro de 2005.

MANUAL TÉCNICO DE LAJES TRELIÇADAS. ArcelorMittal, 2010.

PIGOZZO, Bruno Nogueira; SERRA, Sheyla Mara Baptista; FERREIRA, Marcelo de Araújo. **A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado**. 2005. XII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil.

PRUDÊNCIO JUNIOR, Luiz Roberto; OLIVEIRA, Alexandre Lima; BEDIM, Carlos Augusto. **Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto**. Associação Brasileira de Cimento Portland. Florianópolis, 2002.

TRELIFÁCIL®. ArcelorMittal, 2017.