

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE PORTANTE DE VIGOTAS PRÉ-FABRICADAS TRELIÇADAS TR 08645 UTILIZADAS EM LAJES UNIDIRECIONAIS, SUJEITAS A FLEXÃO.

Geovana Rodrigues Costa (1), Alexandre Vargas (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)geovanacosta1@hotmail.com(2)alexandrevargas@unesc.net

RESUMO

Lajes treliçadas unidirecionais tem seu uso cada vez mais difundido em obras usuais. O seu dimensionamento pode ou não levar em conta a capa de compressão como elemento colaborante no combate à flexão, a chamada seção “T”. O presente trabalho consiste, em avaliar, teórica e experimentalmente treliças do tipo TR 08645, quanto à capacidade portante, através de dimensionamento utilizando as teorias do concreto armado e de ensaio de flexão em quatro pontos, nas hipóteses de considerar ou não a seção “T”. Foram moldados dois grupos com três amostras cada. No grupo “A” as amostras foram moldadas como seção “T” e no grupo B como seção retangular. Os dois grupos foram dimensionados de acordo com a NBR 6118:2007. No ensaio foram analisadas as cargas encontradas para atingir a máxima flecha limite de $l/250$ também estabelecida pela NBR 6118:2007, e a carga de ruptura do elemento estrutural. Os resultados experimentais comprovaram o resultado teórico, uma vez que as vigotas com seção “T” tiveram um desempenho médio superior em 5,05% para carga quando atingida a flecha limite e 8% na carga de ruptura.

Palavras-Chave: lajes treliçadas, vigotas treliçadas, resistência à flexão em lajes.

1 INTRODUÇÃO

As lajes pré-fabricadas treliçadas são utilizadas em grande escala no mercado da construção civil atual, tanto em empreendimentos verticais como em habitações populares. A redução no uso de formas e escoramentos são fatores que contribuem para a popularização desse método construtivo. “Essas lajes são formadas por elementos pré-moldados chamados de vigotas, por lajotas (normalmente cerâmicas) como material de enchimento e por uma “capa de concreto” moldada no local” (CARVALHO ET AL, 2001 p.64). O dimensionamento desses elementos estruturais pode ser elaborado considerando, ou não, a capa de compressão colaborante na resistência a flexão da peça – a chamada seção “T”.

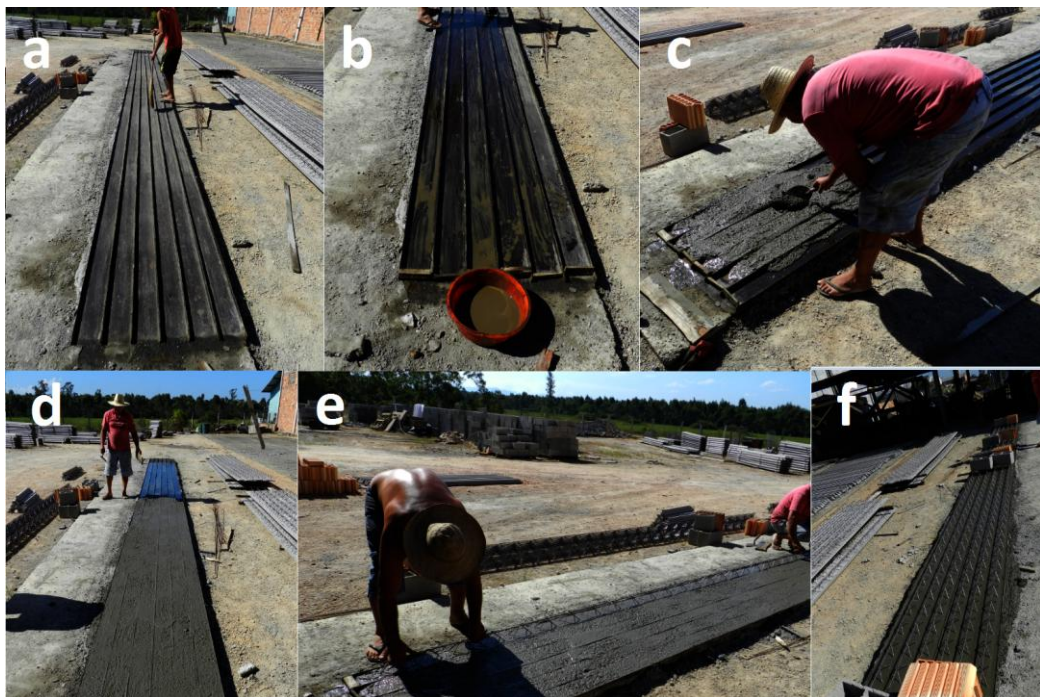
O presente trabalho objetiva avaliar experimentalmente, a diferença no comportamento à flexão do mesmo elemento, moldado como seção retangular e como seção “T”. De acordo com Carvalho et al (2005 p.04) “as informações referenciadas mais antigas sobre as lajes pré-fabricadas no Brasil podem ser encontradas em MEDITERRÂNEA (1992 e 1993)” essa empresa pelo meio de manuais e boletins técnicos apresentava uma série de informações sobre o sistema, incluindo tabelas para o dimensionamento, Carvalho também salienta que Gaspar no ano de 1997 fez uma análise, de forma experimental e teórica, do aspecto de execução de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas. Embora pesquisas a cerca de lajes treliçadas tenham sido feitas, vê-se que a fabricação é predominantemente empírica. Nakao et al (2005 p.03) afirma que “pela sua aparente facilidade de execução e baixo custo de produção, muitas fábricas de vigotas têm sido criadas, já que a armadura treliçada é comercializada em todo o país”, de acordo com o autor a produção não possui uma padronização e controle de qualidade definidos, ele conclui que “os mesmos critérios de cobrimento e de qualidade de concreto que são utilizados na capa de compressão da laje devem ser aplicados na fabricação das vigotas”. A resistência final das vigotas fabricadas tem grande importância para a execução dessas lajes, não só para a resistência do conjunto vigota e capa de compressão, mas também para a segurança dos operários quando na fase de montagem e concretagem das lajes. Caixeta (1998 p.144) afirma que “as lajes treliçadas devem ser tratadas quando do dimensionamento de suas seções (tanto de concreto quanto de armadura) como seção retangular” em contradição às indicações dos catálogos dos fabricantes. De acordo com o autor, a linha neutra corta a mesa da viga “T”, com isso o concreto das laterais pouco ajuda no combate aos esforços de compressão. No intuito de aprofundar conhecimentos no que diz respeito ao processo de fabricação e dimensionamento de vigotas pré-fabricadas treliçadas, foram moldados dois grupos com três amostras cada, submetendo-os a ensaio de flexão simples em quatro pontos, avaliando: carga na flecha máxima estabelecida pela norma NBR 6118:2007 e a carga de ruptura. Esses valores são comparados com os resultados obtidos analiticamente utilizando as teorias preconizadas para o dimensionamento de elementos de concreto armado.

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 MATERIAIS

A pesquisa teve início a partir de uma visita a uma fábrica de artefatos de cimento em Criciúma-SC, no intuito de conhecer todo o processo de fabricação das vigotas para lajes pré-moldadas treliçadas, bem como o traço utilizado. A Figura 1 mostra a sequência da fabricação das amostras que a fábrica fornece às construtoras e que serviram de amostras para o trabalho: (a) - limpeza das formas; (b) – Aplicação de óleo queimado para facilitar a desmoldagem; (c) e (d) - aplicação do concreto; (e) – colocação da armadura; (f) – processo finalizado.

Figura 1 - Processo de fabricação das amostras



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2012).

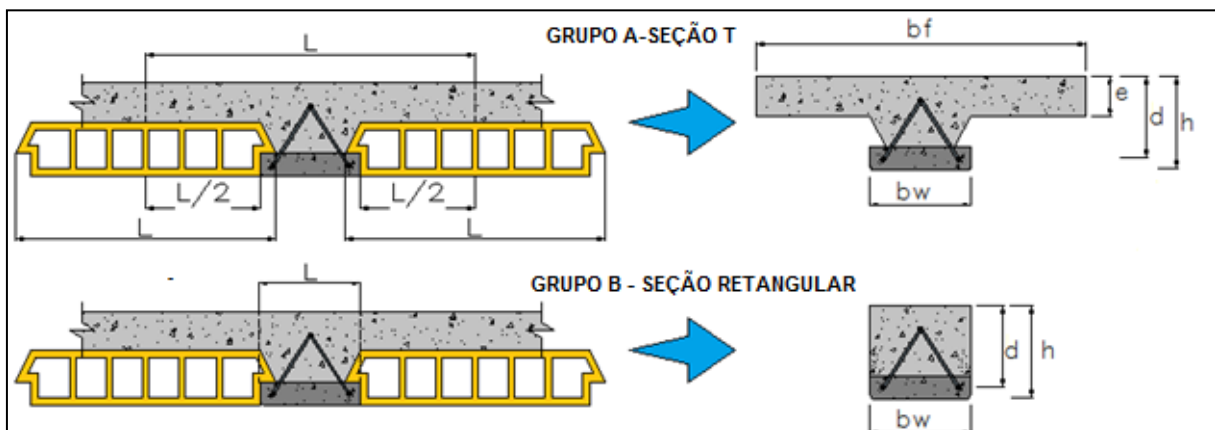
A fabricação foi praticamente manual, sendo que o concreto utilizado foi produzido em betoneira com um traço determinado empiricamente e não houve processos de cura das vigotas. Essa fábrica foi selecionada para o fornecimento das amostras para o estudo, por atender muitas construtoras que utilizam esse produto na construção das casas do programa do governo federal “Minha Casa, Minha Vida”, o que é bastante representativo na região. De acordo com os dados obtidos da análise da fabricação das vigotas, o traço utilizado foi de 1: 2,3: 3 (cimento, pedrisco e

areia). A água foi adicionada até a mistura adquirir certa trabalhabilidade, isto é, sem controle adequado da quantidade.

2.1.1 VIGOTAS E CAPA DE COMPRESSÃO

As amostras foram divididas em dois grupos de três vigotas cada. O grupo **A** foi composto por vigotas com seção T e o grupo **B** por vigotas de seção retangular, conforme representadas na Figura 2. A largura da capa de compressão (b_f) foi definida como sendo de centro a centro do elemento de enchimento, seguindo o estabelecido nas teorias de seção “T”.

Figura 2 – Tipos de seções das amostras dos grupos A (seção “T”) e B (seção ret.)



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2012).

A espessura da capa de compressão (e) da seção “T” foi definida com 4 cm atendendo critérios da NBR 14860-1:2002, e sua concretagem foi realizada utilizando-se concreto usinado C30 disponibilizado por uma construtora da região. No grupo das vigotas com seção “T” foi utilizada malha de distribuição composta de aço CA-60 com cinco milímetros de diâmetro espaçados a cada vinte centímetros nas duas direções. A treliça utilizada é da marca Gerdau tipo **TG8M** de acordo com a norma NBR 14862:2002 possui a designação **TR 08645** tendo como características: altura de 8 cm, banzo inferior com 2 Ø 5mm, aço CA60, banzo superior com 1 Ø 6mm, aço CA60 e diagonais com aço CA60 de 4.2mm de diâmetro.

Não foi utilizada armadura adicional de combate à flexão além da posicionada na treliça. A execução das amostras foi realizada no canteiro de obras da construtora que disponibilizou o concreto e mão de obra para a realização do trabalho.

2.1.2 CONCRETO

Do concreto feito para execução das vigotas, foram moldados seis corpos de prova de acordo com a NBR 5738:2003 para posterior análise da resistência à compressão aos 7,14, e 28 dias após a concretagem conforme preconiza a NBR 5739:2007. O concreto usinado utilizado na capa de compressão passou por controles tecnológicos feitos pela empresa que o disponibilizou para o presente trabalho.

2.2 MÉTODO

Para o estudo foram dimensionadas analiticamente as duas situações propostas (seção retangular e “T”) e, posteriormente, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. Inicialmente seriam três amostras para cada grupo. Porém, devido a problemas de transporte, uma das amostras do grupo de seção retangular apresentou problemas, sendo então descartada do estudo, ficando o grupo com seção T com três amostras e o grupo com seção retangular com duas amostras.

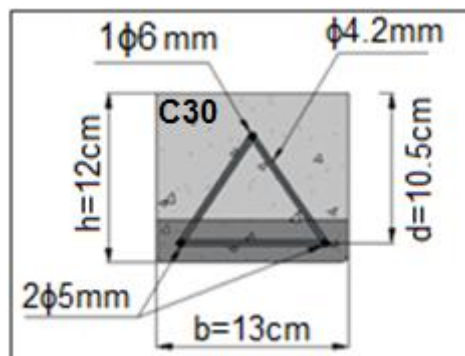
2.2.1 DETERMINAÇÃO DA CARGA DE RUPTURA E FLECHA LIMITE

Para o dimensionamento foram utilizadas as equações básicas da teoria do concreto armado. Encontrou-se o valor teórico da carga para o estado limite de serviço para os dois grupos. O método de cálculo, de ambos os grupos, utilizado levou em consideração as armaduras de combate à flexão, ou seja, não foi considerada no cálculo a armadura das diagonais, visto que essas têm influência nos esforços de cisalhamento e na rigidez da peça. Os resultados foram obtidos utilizando-se um f_{ck} de 30 MPa, visto que foi esse o concreto utilizado na zona de compressão das amostras.

2.2.1.1 SEÇÃO RETANGULAR

Para o cálculo da seção retangular utilizou-se as dimensões da seção que se encontra na Figura 3. As unidades de medida das mesmas encontram-se em centímetros e os diâmetros de aço em milímetros.

Figura 3 – Dimensões e armaduras utilizadas na seção retangular



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

Com os dados extraídos da seção da amostra, encontrou-se o valor máximo de P - carga pontual atuante no cilindro hidráulico - (equação 5) para um ensaio a flexão de quatro pontos através das equações (1), (2), (3) e (4) de dimensionamento de concreto armado:

$$x = \frac{A_s f_{y_d}}{0,68 b w f_{c_d}} = 1,10 \text{ cm} \quad \text{equação (1)}$$

Em que: x = Altura da linha neutra;

A_s = Área de aço;

f_{y_d} = Resistência à tração de cálculo do aço;

$b w$ = Largura da seção transversal;

f_{c_d} = Resistência à compressão de cálculo do concreto armado.

$$M_d = 0,68 f_{c_d} b w x (d - 0,4x) = 2,10 \text{ kNm} \quad \text{equação (2)}$$

Em que: M_d = Momento de Cálculo;

f_{c_d} = Resistência à compressão de cálculo do concreto armado;

$b w$ = Largura da seção transversal;

d = Altura útil

x = Altura da linha neutra.

$$M_k = \frac{M_d}{1,4} = 1,50 \text{ kNm} \quad \text{equação (3)}$$

Em que: M_k = Momento de serviço;

M_d = Momento de cálculo.

$$p' = \frac{M_k - \frac{q l^2}{8}}{a} = 1,84 \text{ kN} \quad \text{equação (4)}$$

Em que: p' = Carga pontual atuante nos roletes metálicos (Figura 5);
 q = Carga distribuída atuante na estrutura conforme NBR 6118:2007;
 l = Vão teórico;
 M_d = Momento de cálculo.

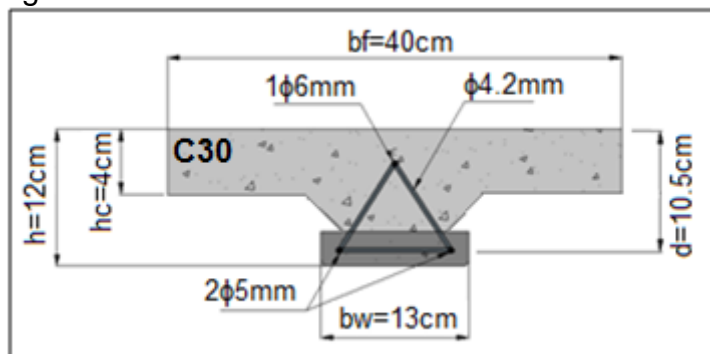
$$P = 2 p' = 3,67 \text{ kN} \quad \text{equação (5)}$$

Em que: P = Carga pontual atuante no cilindro hidráulico (Figura 5);
 p' = Carga pontual atuante nos roletes metálicos.

2.2.1.2 SEÇÃO “T”

Para o cálculo da seção “T” utilizou-se as dimensões da seção que se encontra na Figura 4. As unidades de medida das mesmas encontram-se em centímetros e os diâmetros de aço em milímetros.

Figura 4 – Dimensões e armaduras utilizadas na seção “T”



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

Com os dados extraídos da seção da amostra, encontraram-se os seguintes resultados para as equações (1), (2), (3), (4) e (5):

$$x = \frac{f y_d A_s}{0,68 f_c d b w} = 0,36 \text{ cm} \quad \text{equação (1)}$$

Em que: x = Altura da linha neutra;
 A_s = Área de aço;
 $f y_d$ = Resistência à tração de cálculo do aço;
 $b w$ = Largura da seção transversal;
 $f c_d$ = Resistência à compressão de cálculo do concreto armado.

Como a altura da linha neutra (x) encontrada passa pela mesa, a largura utilizada para o cálculo na equação (2) será $b f$:

$$M_d = 0,68 f_{c_d} b f x (d - 0,4x) = 2,16 \text{ kNm} \quad \text{equação (2)}$$

Em que: M_d = Momento de Cálculo;

f_{c_d} = Resistência à compressão de cálculo do concreto armado;

$b f$ = Largura da colaborante da seção transversal;

d = Altura útil

x = Altura da linha neutra.

$$M_k = \frac{M_d}{1,4} = 1,54 \text{ kNm} \quad \text{equação (3)}$$

Em que: M_k = Momento de serviço;

M_d = Momento de cálculo.

$$p' = \frac{M_k - \frac{q l^2}{8}}{a} = 1,70 \text{ kN} \quad \text{equação (4)}$$

Em que: p' = Carga pontual atuante nos roletes metálicos (Figura 5);

q = Carga distribuída atuante na estrutura conforme NBR 6118:2007;

l = Vão teórico;

M_d = Momento de cálculo.

$$P = 2 p' = 3,41 \text{ kN} \quad \text{equação (5)}$$

Em que: P = Carga pontual atuante no cilindro hidráulico (Figura 5);

p' = Carga pontual atuante nos roletes metálicos (Figura 5).

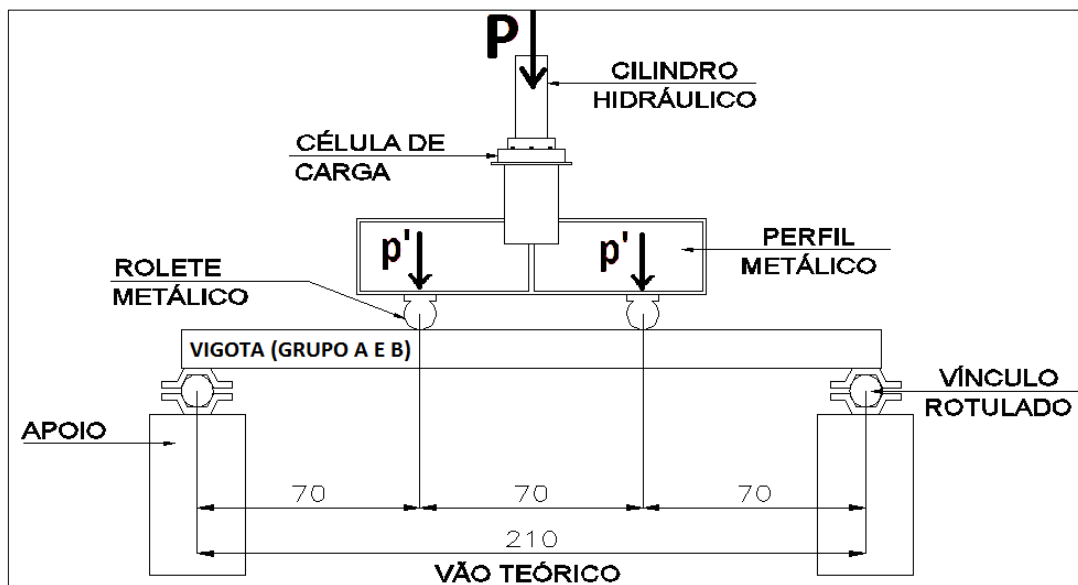
2.2.1.3 FLECHA MÁXIMA DE ACORDO COM A NORMA NBR 6118:2007

De acordo com a NBR 6118:2007 a flecha máxima para uma edificação de uso residencial não pode ultrapassar o valor de $L/250$, considerando-se L o vão teórico do elemento estrutural. As amostras ensaiadas nesse estudo possuíam um vão teórico de 210 cm sendo assim, a flecha máxima permitida, para ambos os grupos, encontrada foi de 8,4 mm.

2.2.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Após serem efetuados os cálculos para obtenção das cargas máximas de serviço foi realizado o ensaio de quatro pontos. Este ensaio consistiu na aplicação de carga por meio de um cilindro hidráulico que, através de uma viga metálica, divide essa carga em duas parcelas pontuais, que foram transferidas por meio de roletes metálicos para a laje em pontos eqüidistantes, conforme a Figura 5.

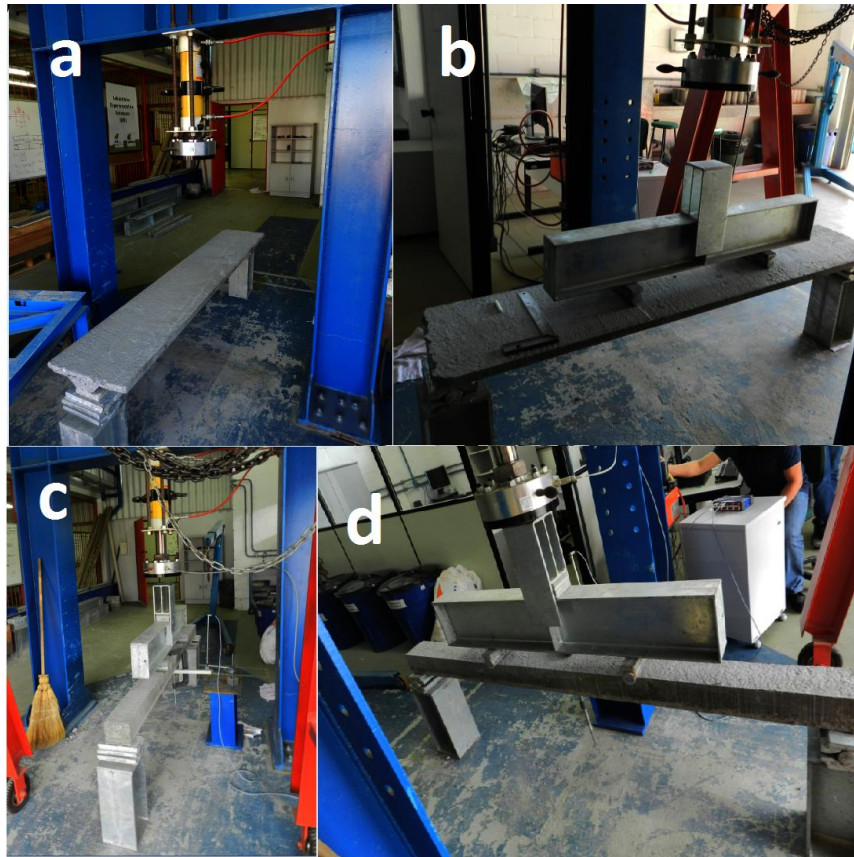
Figura 5 – Esquema de ensaio



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

O ensaio das amostras foi realizado no Iparque - Parque Científico e Tecnológico da UNESC, onde se encontra o LEE - Laboratório Experimental de Estruturas. Para o ensaio foi utilizado um pórtico metálico, o cilindro hidráulico da ENERPAC® com capacidade máxima de 500 kN; para a medição dos deslocamentos foi utilizado o transdutor de deslocamento (LVDT) de 100 mm da HBM® e para a aquisição dos dados utilizou-se o equipamento QUANTUM X que através do software Catman Easy fez as leituras dos dados obtidos (ambos HBM®), a Figura 6 apresenta o método de ensaio utilizado nos dois grupos, as imagens (a) e (b) correspondem às vigotas do **grupo A**, enquanto que (c) e (d) às vigotas do **grupo B**. Devido a dificuldade de transporte uma das amostras do grupo B (seção retangular) não pode ser ensaiada por virtude de quebras e que poderiam comprometer o ensaio. Sendo assim, o grupo A continuou com três amostras e o grupo B com duas amostras para o estudo.

Figura 6 – Ensaio à flexão (grupos A e B)



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2012).

A partir do ensaio de flexão de quatro pontos, analisou-se a aplicação de carga nas amostras, bem como os deslocamentos obtidos, nos seguintes instantes:

- Atingindo-se a flecha máxima permitida pela NBR 6118:2007 ($L/250$);
- Na ruptura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o concreto da fabricação da vigota treliçada encontrou-se uma relação água/cimento aproximada de 0,73 obtida através da curva de Abrams. A tabela 7.1 da NBR 6118:2007 que descreve a correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto estabelece uma relação água/cimento máxima de 0,65. Os ensaios de compressão dos corpos de prova realizados aos 28 dias no laboratório

de Materiais de Construção Civil no Iparque apresentaram os resultados compilados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resistência à compressão (f_c) das amostras

Amostra	Resistência (Mpa)
CP 1	17,5
CP 2	19,3
Média (fck)	18,4
Desvio Padrão	0,9

Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

A NBR 14860-1:2002 determina uma resistência mínima de compressão aos vinte e oito dias de 20 MPa. A média das resistências dos corpos de prova encontra-se 8% abaixo do que a norma prescreve caracterizando um concreto não conforme.

3.1 CARGA NA FLECHA MÁXIMA PERMITIDA POR NORMA

Para a flecha máxima permitida por norma, observou-se que o grupo A (seção “T”) apresentou valores médios de carga 5,05% superiores ao grupo B conforme Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Resultados do Grupo A na flecha máxima de acordo com a norma

GRUPO A (seção T)		
Amostra	Carga(kN)	Flecha (mm)
LT1	4,17	8,40
LT2	3,50	8,40
LT3	3,55	8,40
Média	3,74	8,40
Desvio Padrão	0,37	0,00

Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

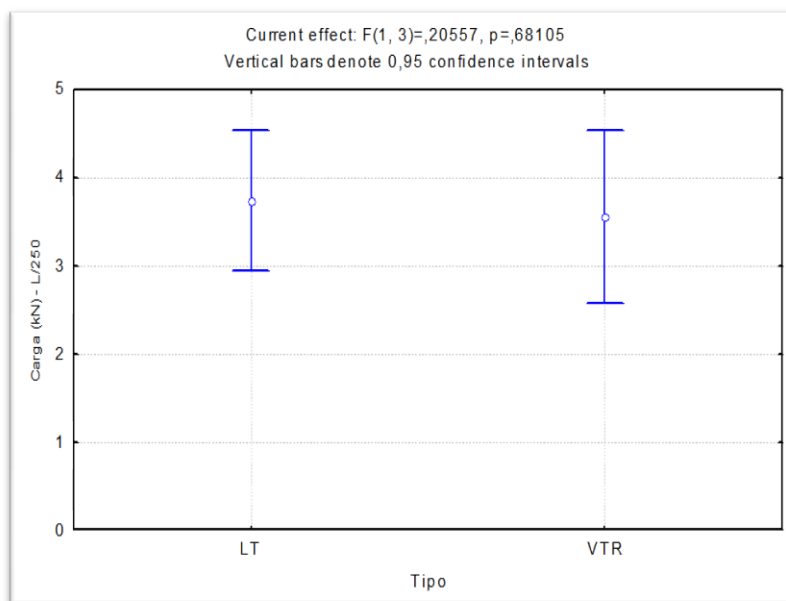
Tabela 3 – Resultados do Grupo B na flecha máxima de acordo com a norma

GRUPO B (seção retangular)		
Amostra	Carga(kN)	Flecha (mm)
VTR1	3,94	8,40
VTR2	3,18	8,40
Média	3,56	8,40
Desvio Padrão	0,54	0,00

Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

Apesar das diferenças numéricas demonstradas, de acordo com o tratamento estatístico utilizado (ANOVA) pode ser observado, através da Figura 7, que as diferenças de valores das amostras não são estatisticamente significativas, ou seja, se o valor de p value é maior que 0,05 os valores de médias obtidos nos diferentes tipos de lajes são considerados iguais.

Figura 7 – Análise estatística para flecha máxima



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

3.2 CARREGAMENTO PARA LEVAR A PEÇA A RUPTURA

Para a finalização do ensaio foram encontradas as cargas de ruptura das amostras, de acordo com os dados das Tabelas 4 e 5, onde se pode observar que o grupo A novamente apresentou um comportamento superior ao grupo B cerca de 6,47% na carga de ruptura além de uma flecha 13,97% superior ao grupo B.

Tabela 4 – Resultados do Grupo A na ruptura

GRUPO A (seção T)		
Amostra	Carga(kN)	Flecha (mm)
LT1	7,67	43,27
LT2	6,88	53,23
LT3	6,19	27,36
Média	6,91	41,28
Desvio Padrão	0,74	13,05

Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

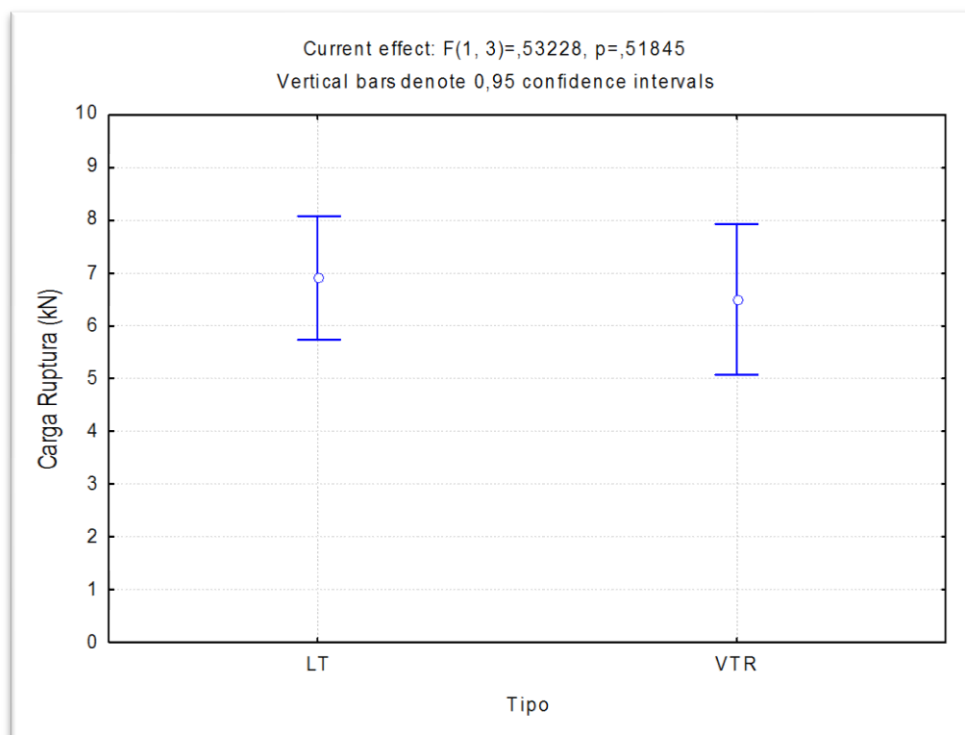
Tabela 5– Resultados do Grupo B na ruptura

GRUPO B (seção retangular)		
Amostra	Carga(kN)	Flecha (mm)
VTR1	6,73	39,28
VTR2	6,25	33,17
Média	6,49	36,22
Desvio Padrão	0,33	4,32

Fonte: Geovana Rodrigues Costa(2013).

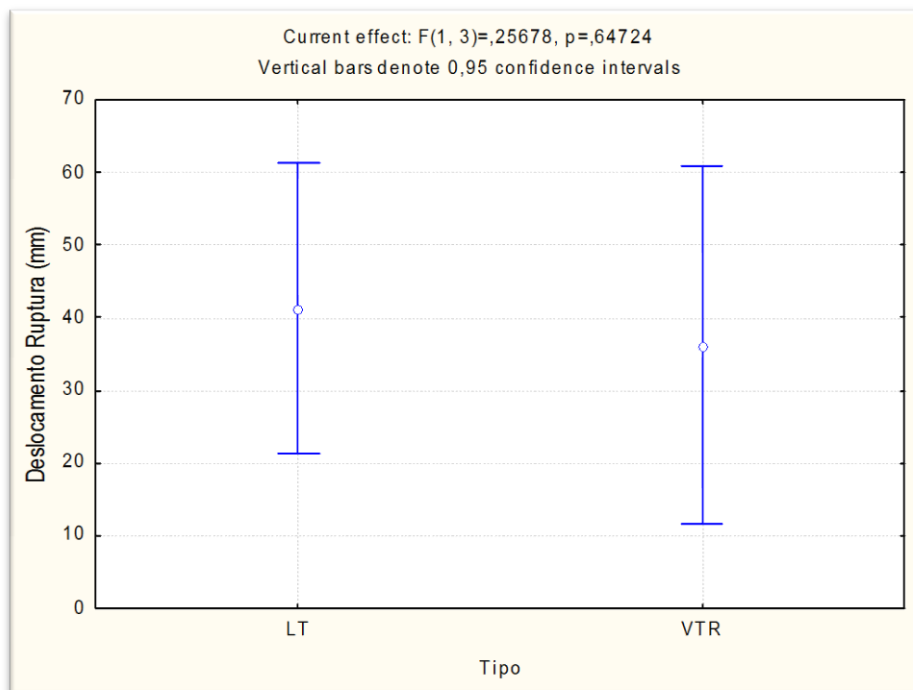
Fazendo novamente a análise estatística para o carregamento na ruptura pode-se observar na Figura 8 (tanto para carregamento como para flecha encontrada no carregamento de ruptura) que as diferenças dos valores obtidos não são estatisticamente significativas ($p \text{ value} > 0,05$).

Figura 8 – Análise estatística para carregamento na ruptura



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

Figura 9 – Análise estatística para deslocamento máximo na ruptura

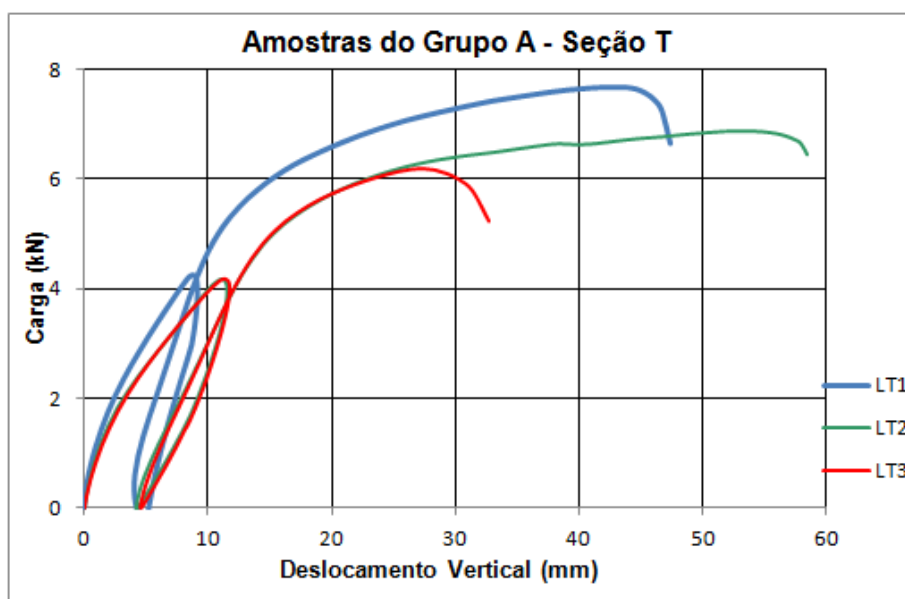


Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

3.3 COMPORTAMENTO GERAL DAS AMOSTRAS

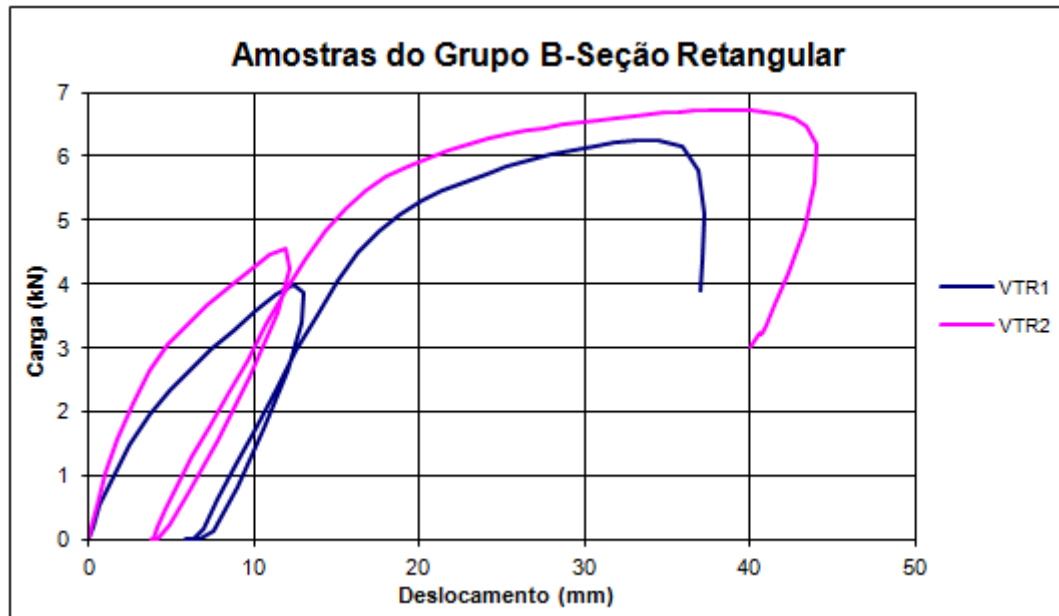
O comportamento das amostras é expresso em um gráfico de carga versus deslocamento apresentados nas Figuras 7 e 8, para os grupos A e B respectivamente.

Figura 10 – Comportamento geral do grupo A



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

Figura 11 – Comportamento geral do grupo B



Fonte: Geovana Rodrigues Costa (2013).

5 CONCLUSÕES

O resultado do ensaio de compressão simples efetuado nos corpos de prova moldados a partir do concreto de fabricação das vigotas mostrou resultados não condizentes com a NBR 6118:2007, cerca de 8% abaixo do que é determinado, esse concreto tem de atender as especificações, pois ele é de suma importância na proteção da armadura da treliça, é elo entre a parte comprimida e a parte tracionada da vigota e sua aderência com o concreto da capa permite maior rigidez e resistência da laje.

Ambos os grupos resistiram ao valor teórico da carga para o estado limite de serviço.

Concluiu-se através da ANOVA que os grupos A e B são estatisticamente iguais, tanto na carga de ruptura quanto na flecha limite permitida por norma, sendo que ao serem analisados numericamente, o grupo A apresentou um valor médio de carga na flecha limite 5,05% superior ao grupo B, e um valor médio de carga de ruptura 6,47% superior em relação ao grupo B, além disso, o grupo A apresentou na carga de ruptura uma média de flecha máxima 13,97% superior em relação ao grupo B.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738- Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739- Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 14860-1: Laje pré-fabricada - Pré-laje – Requisitos – Parte 1: Lajes unidirecionais.** Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 14862: Armaduras treliçadas eletrossoldadas- Requisitos.** Rio de Janeiro, 2002.

CAIXETA, Delma Pereira. **Contribuição ao estudo de lajes pré-fabricadas com vigas treliçadas.** Campinas, SP: Unicamp; 1998.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado:** segundo a NBR 6118:2003. 3 ed. São Carlos, SP: EDUFSCAR, 2011.

CARVALHO, Roberto Chust; ET AL. **Estado da Arte do Cálculo das Lajes Pré-fabricadas com Vigotas de Concreto.** 1º Encontro Nacional de pesquisa, projeto e produção em concreto armado, São Carlos, 2005.

NAKAO, Ricardo; ET AL. **Lajes Pré-Fabricadas Treliçadas: Uma Análise Experimental Regional segundo a NBR 14859.** 1º Encontro Nacional de pesquisa, projeto e produção em concreto armado, São Carlos, 2005.