



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Análise da Força Cortante em Lajes com Vigotas Treliçadas

Rodrigo Bender¹, Christian Donin², Eduardo Rizzatti³, Leonardo Azevedo Massulo⁴, Daniele Martins⁵, Isadora Paczek⁶, Lidiane Kist⁷

¹ Engenheiro Civil / Universidade de Santa Cruz do Sul / bender.rgs@gmail.com

² Professor Doutor, Universidade de Santa Cruz do Sul / Ingaugue Engineering and Technology / donin.eng@gmail.com

³ Professor Doutor / Universidade Federal de Santa Maria / Departamento de Estruturas e Construção Civil / edu_rizzatti@yahoo.com.br

⁴ Professor Engenheiro Civil / Universidade Federal de Santa Maria / Departamento de Estruturas e Construção Civil / Mestrando em Engenharia Civil / PPGEC / engmassulo@gmail.com

⁵ Mestranda em Engenharia Civil / Universidade Federal de Santa Maria / PPGEC / engcivildanielemartins@gmail.com

⁶ Mestranda em Engenharia Civil / Universidade Federal de Santa Maria / PPGEC / engisadorapaczek@gmail.com

⁷ Mestranda em Engenharia Civil / Universidade Federal de Santa Maria / PPGEC / lidianekist@gmail.com

Resumo

O presente trabalho analisa resultados experimentais de ruptura por força cortante em lajes treliçadas e em lajes sem armadura transversal e compara-os visando melhor entender a contribuição da treliça na resistência à força cortante. Através da análise teórica, com base na NBR 6118:2014, obteve-se a força cortante estimada de ruptura e a força cortante resistente de cálculo para cada protótipo. Esses resultados foram comparados com os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Diante disso, com base nos ensaios e nos cálculos realizados, pôde-se concluir que, para o caso estudado, o método de cálculo utilizado pela normalização brasileira subestima a capacidade resistente ao esforço cortante em lajes sem armadura transversal. Além disso, apesar do uso das treliças resultarem em pouca diferença na resistência à força cortante, as mesmas contribuíram significativamente para a ductilidade das lajes.

Palavras-Chave

Laje treliçada; Força cortante; Análise experimental; Análise teórica; Armadura transversal.

1. Introdução

Lajes com vigotas treliçadas cada vez mais tem sido utilizadas na construção civil, muito devido a sua facilidade e rapidez na execução. Além disso, em comparação ao sistema de lajes maciças, essa tipologia de laje possui peso próprio menor, podem ser usadas em vãos maiores e com maiores cargas.

O risco de ruptura de uma laje por cisalhamento é pequeno, pois na maioria das vezes as lajes mantêm sua capacidade de cargas sem armadura de cisalhamento. (LEONHARDT E MÖNNIG, 1977)

A fusão da armadura treliçada ao concreto permite alcançar grandes vãos, pois cada nervura fica armada ao cisalhamento de forma mais eficiente, adaptando altura da treliça à laje. Ademais, devido à existência das barras inclinadas da treliça, conhecidas como sinusóides, pode ser considerado nas verificações de cisalhamento, aplicando a teoria dos estribos inclinados, sendo mais eficientes que estribos perpendiculares (CAIXETA, 1998).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo elucidar a contribuição das treliças na resistência ao corte de lajes pré-moldadas com vigotas treliçadas e compará-las com a resistência ao corte em lajes pré-moldadas com vigotas de concreto armado.

1.1 Cálculo da resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento, é satisfatória, quando simultaneamente atender as seguintes condições (NBR 6118, 2014):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (1)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_C + V_{SW} \quad (2)$$

Onde:

V_{sd} – força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd2} – força cortante resistente de cálculo;

V_{Rd3} – força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto.

Além disso, em lajes sem armadura à força cortante, a seguinte expressão deve ser atendida (NBR 6118, 2014):

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (3)$$

Onde:

V_{Rd1} – força cortante máxima.

Sendo:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1 + 0,15 \sigma_{cp})] b_w d \quad (4)$$

Considerando:

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (5)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \quad (6)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (7)$$

Onde:

A_{sw} – área da armadura de tração, sendo em lajes com vigotas pré-moldadas, a armadura longitudinal total de nervuras no trecho considerado;

d – altura útil;

b_w – largura mínima da seção ao longo de d (100 cm em lajes);

τ_{Rd} – tensão resistente de cisalhamento;

k – coeficiente que tem os seguintes valores:

$k = |1|$ para elementos onde 50% da armadura inferior não chegar até o apoio;

$k = |1,6 - d|$ para os demais casos, considerando d em metros;

N_{sd} – força longitudinal na seção devido à protensão, não havendo protensão na peça, zera-se o σ_{cp} .

1.2 Modelo de cálculo I

Considera-se a analogia de Ritter-Mörsch, chamado de modelo de cálculo I, admitindo o ângulo de 45° entre o eixo longitudinal da estrutura e as bielas de compressão, adotando, o valor da parcela V_c como constante, independentemente a força de cisalhamento solicitante e desprezando a resistência do concreto à tração para o cálculo. (NBR 6118:2014)

Para tanto:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (8)$$

Sendo:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}, \text{ fck em Mpa} \quad (9)$$

O cálculo da armadura transversal é feito conforme a equação, onde:

$$V_{Sw} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) \quad (10)$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_x} = \frac{f_{yk}}{1,15} \leq 435 \text{ MPa} \quad (11)$$

Sendo:

$V_c = 0$, em elementos estruturais tracionados se a linha neutra se situar fora da seção;

$V_c = V_{c0}$, na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

Na flexo-compressão, V_c é definido conforme a equação 12.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$V_c = V_{c0} (1 + M_0 / M_{Sd,m\acute{a}x}) < 2V_{c0} \quad (12)$$

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d \quad (13)$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad (14)$$

Onde:

α é o ângulo de inclinação dos estribos;

f_{ywd} é a tensão máxima no estribo.

2. Programa experimental

2.1 Definição dos protótipos

Os protótipos para as lajes foram definidos com de 42 cm x 50 cm de dimensão, sendo que a largura de 42 cm foi definida devido à largura da nervura, que por sua vez foi definida ter 12 cm pelas dimensões da treliça utilizada.

Considerou-se, também, 30 cm para um material inerte, sendo 15 cm para cada lado da nervura. A altura total da laje foi definida como 12 cm, sendo que 7,6 cm de nervura, devido às dimensões reais do EPS adotado e, portanto, 4,4 cm de capa de concreto. A figura 1 demonstra um esquema com seções transversais das lajes, as quais foram concretadas de forma monolítica, não utilizando vigotas industrializadas.

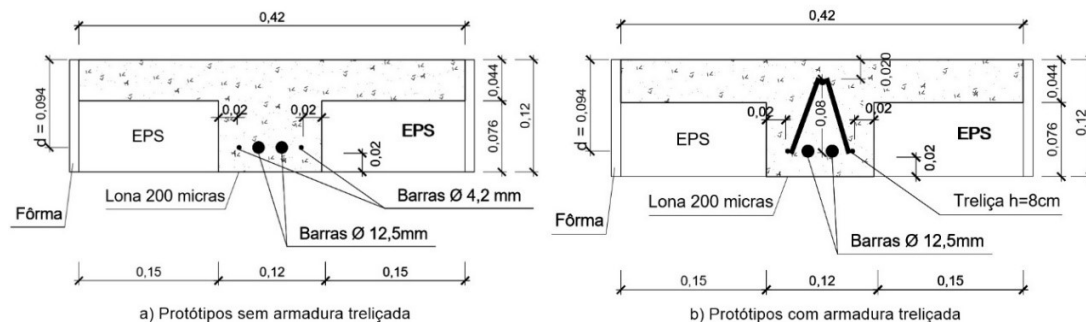


Figura 1 – a) Seção transversal das lajes sem armadura treliçada; b) seção transversal das lajes com armadura treliçada

2.2 Materiais

Foi utilizado cimento de alta resistência inicial (CP V ARI), devido ao curto prazo para realização dos protótipos. Foi utilizado traço 1,0:2,50:3,33:0,535, que corresponde a CP V ARI, areia média, brita 1 e água potável.

Para as lajes treliçadas, adotou-se a treliça TB 8L, sendo uma treliça eletrossoldada CA-60 com altura de 8 cm, banzo superior com diâmetro de 6mm e banzos inferiores com diâmetros de 4,2mm. Além disso, ela possui um espaçamento (S) de 20 cm e um ângulo α de 38,6°. Já nas lajes não-treliçadas utilizaram-se duas barras CA-60 com diâmetro de 4,2mm, idênticas aos banzos inferiores das treliças.

Nos dois modelos de lajes ensaiados foram adotadas duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 12,5mm, a fim de impedir o rompimento central dos protótipos por tração na flexão, permitindo assim a observação dos rompimentos apenas por cisalhamento, que ocorrem nas extremidades.

2.3 Caracterização dos materiais

Para o controle do concreto utilizado nos protótipos foram moldados cinco corpos de prova e ensaiados à compressão, a fim de verificar a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) utilizado na confecção das lajes.

Como a nervura e capa de todos os seis protótipos produzidos foram concretadas juntas a partir de apenas uma betonada, foram executados cinco corpos de prova.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de compressão nos CP's de concreto

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)	Média (f_c)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CP1	28,43			
CP2	28,29			
CP3	28,15	27,85	1,50	5,28
CP4	27,45			
CP5	26,93			

Com estes resultados determina-se a resistência real do concreto à compressão utilizada nos protótipos, sendo que, por haver pequeno número de CP's, a média dos resultados foi utilizada como a resistência à compressão do concreto das lajes.

Além disso, também foi realizado ensaio de tração para cada aço presente nas nervuras das lajes, utilizando três corpos de prova para cada tipo. Os resultados podem ser vistos das tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de tração nas barras da treliça de 4,2mm

Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (f_y)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CP01	771,07			
CP02	778,66	753,97	66,49	8,82
CP03	712,17			

Tabela 3 – Resultados do ensaio de tração nas barras de 4,2mm

Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (f_y)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
CP01	684,34			
CP02	662,78	673,18	21,56	3,20
CP03	672,41			

Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração nas barras de 12,5mm

Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Média (f_y)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de variação (%)
BT-CP01	573,72			
BT-CP02	575,60	577,42	9,22	1,60
BT-CP03	582,94			

2.4 Execução dos protótipos

A execução dos protótipos das lajes treliçadas e armadas se deu através dos seguintes processos:

- a) Confecção das fôrmas: conforme as medidas citadas anteriormente, as fôrmas foram confeccionadas com chapas de compensado plastificado com 14 mm de espessura e após foram cortados e posicionados o EPS, firmados à fôrma por meio de arames;
- b) Posicionamento da armadura da nervura (figura 3): a armadura foi posicionada por meio de arames cravados no EPS, onde foram amarradas com arame recozido, tendo o cuidado de alinhar o centro das barras para que ambas as armaduras compartilhem o mesmo d , usado nos cálculos e garantindo cobertura mínimo de 2 cm. Após foi fixado uma lona de 200 micras, servindo de fôrma do fundo da nervura;
- c) Preparação do concreto: O concreto foi preparado conforme o traço citado anteriormente em apenas uma betonada. Quando a mistura apresentou aparência homogênea, foi feito o *slump test*, a fim de mensurar se estava adequada ao uso a partir de sua consistência. Devido ao traço utilizado ficou definido abatimento do troco do cone de $140 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, sendo que o concreto utilizado apresentou resultado de 125 mm de abatimento, portanto considerado dentro dos limites estabelecidos;
- d) Lançamento do concreto: Preparado o concreto, executou-se seu lançamento na fôrma o qual foi cuidadosamente bem adensado com o uso de um vibrador de concreto, a fim de evitar vazios, prejudiciais ao ensaio. Por fim, foi feito o nivelamento da superfície da laje com uma régua;
- e) Cura: Após pronto todo o processo, executou-se a cura das lajes, molhando todos os dias de modo a impedir o escape da água presente no concreto, necessária para as reações de cristalização dos componentes do concreto;
- f) Por fim procedeu-se a desforma após quatro dias de cura e ao sexto dia removeu-se o EPS com o uso de espátulas.

2.5 Procedimento dos ensaios

Para os ensaios de cisalhamento nos protótipos das lajes, foi utilizado o equipamento EMIC GR048, o qual permite ensaios de tração e compressão. Este equipamento possui capacidade de 300 KN com sistema auto travante e pré aperto por sistema pneumático. Sua parte superior foi utilizada para os ensaios de tração das barras de aço e o módulo que a acompanha, cuja carga máxima é de até 2000 KN foi utilizada para ensaiar os CP's de concreto à compressão.

As lajes de 42 x 50 cm foram posicionadas sobre dois apoios metálicos, que por sua vez foram posicionados a 2,5 cm de cada extremidade da nervura, gerando um vão de 45 cm. A carga foi aplicada em dois pontos, a um terço de cada extremidade do vão de ensaio, conforme esquema da figura 2.

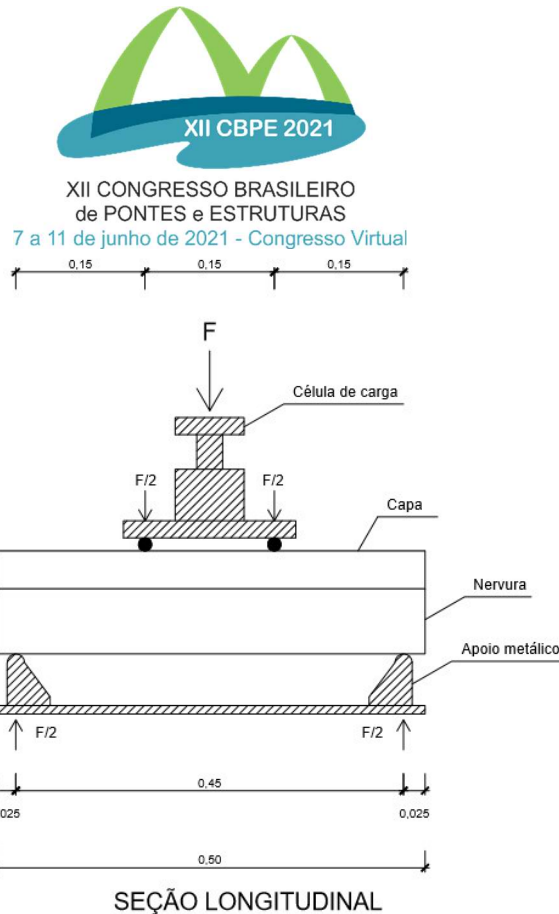


Figura 2 - Esquema de ensaio para análise de resistência à força cortante

4. Resultados

4.1 Resultados teóricos

Para a análise da força cortante resistente de cálculo nas lajes nervuradas treliçadas e armadas utilizaram-se os modelos de cálculos da NBR 6118:2014. Foram utilizados os mesmos parâmetros e dimensões das lajes ensaiadas de modo a permitir comparação entre o modelo teórico e os ensaios práticos.

Tabela 5 - Força cortante pelo modelo de cálculo para lajes não-treliçadas

Parâmetro	Força cortante (KN)
Força cortante resistente de cálculo – V_{Rd1}	11,68
Força cortante estimada de ruptura - $V_{R,est,rup13}$	23,35

Tabela 6 - Força cortante pelo modelo de cálculo para lajes treliçadas

Parâmetro	Força cortante (KN)
Força cortante resistente de cálculo – V_{Rd3}	13,42
Força cortante estimada de ruptura - $V_{R,est,rup3}$	31,09

Além disso, em relação à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{Rd2}) e a estimativa de ruptura das bielas de compressão ($V_{R,est,rup2}$), obteve-se, respectivamente, 53,69 kN e 75,17 kN. Logo, comparando esses resultados ao $V_{R,est,rup1}$ e V_{Rd1} , conclui-se que as lajes não irão romper por esmagamento da biela de compressão, pois romperá muito antes devido a força cortante.

4.2 Resultados experimentais

Depois de realizados os ensaios de cisalhamento nas lajes treliçadas e em concreto armado, foram coletados dados dos carregamentos aplicados e as deformações de cada laje até a ruptura. Deste modo obtiveram-se os resultados demonstrados na tabela 7, sendo que a ruptura ocorreu sete dias após a concretagem.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 7 – Resultados dos ensaios das lajes

Laje sem treliça	Força máxima (KN)	Cortante experimental (KN)	Média experimental (KN)	Desvio Padrão (KN)	Coef. de variação (%)
LNT1	73,94	36,97	33,56	7,50	22,32
LNT2	68,44	34,22			
LNT3	58,95	29,48			
LT1	68,76	34,38	35,83	3,28	9,15
LT2	75,31	37,66			
LT3	70,87	35,44			

5. Análise dos resultados

5.1 Modos de ruptura dos protótipos de lajes

A ruptura das seis lajes ensaiadas (figura 3), tanto treliçadas quanto em concreto armado, se deu por fissuras à aproximadamente 45° partindo do ponto onde as cargas foram aplicadas em direção aos apoios. Nenhuma das lajes apresentou qualquer sinal de fissuras oriundas de flexão, ou seja, a ruptura dos modelos de lajes foram oriundas das forças cortantes, como esperado.

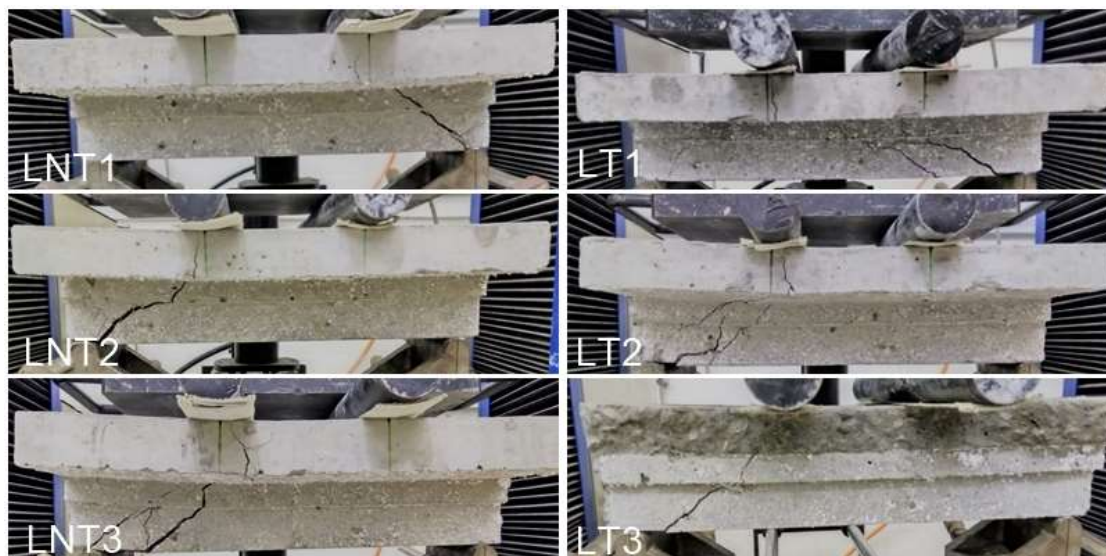


Figura 3 – Rupturas das lajes

O rompimento da laje não-treliçada 1 (LNT1) demonstrou de forma nítida as características de um rompimento por cisalhamento com precisão, tendo sua seção deslocada ao ser movimentada após o ensaio. Além disso, apresentou resistência ao cisalhamento muito além da esperada para uma laje sem armadura transversal.

5.2 Força cortante nas lajes sem armadura transversal

Na figura 4 é possível visualizar os resultados de cada uma das lajes não-treliçadas, a média experimental e os resultados teóricos.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

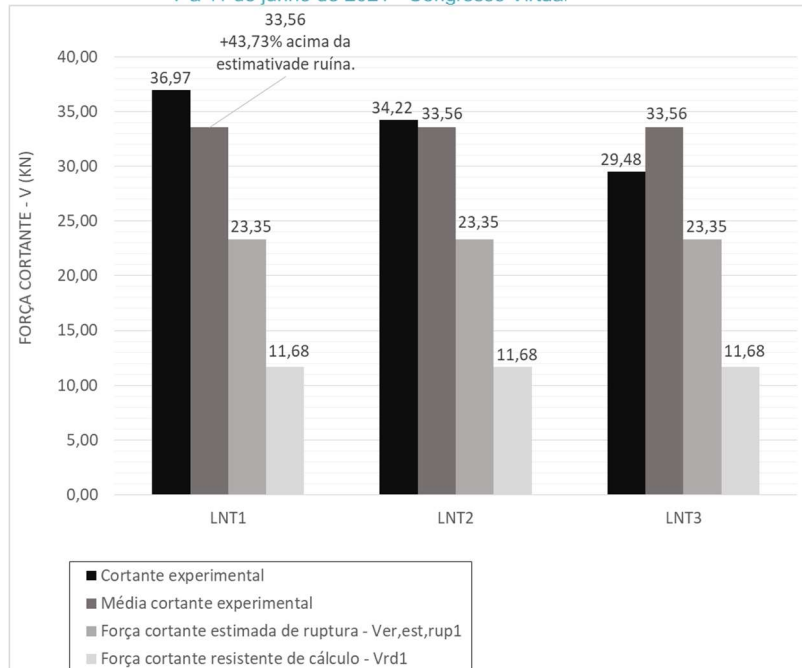


Figura 4 – Comparativo entre cortantes experimentais e teóricos das lajes não-treçadas

Ao analisar os resultados, é possível perceber que todas as lajes não-treçadas apresentaram resistência superior a de cálculo e estimada de ruptura, apesar disso, verifica-se que apresentam grande variabilidade, sendo a média para a força cortante de 33,56kN, desvio padrão de 7,49kN e coeficiente de variação de 22,32%, o que demonstra grande instabilidade nas lajes sem armadura transversal.

5.3 Força cortante nas lajes treçadas

Na figura 8 percebe-se que todas as lajes treçadas romperam acima do valor estimado para ruína, tendo resistido em média 15,25% a mais que o previsto em cálculo, sendo que ao analisar os ensaios separadamente, nota-se que a laje LT1, que apresenta menor resultado de cortante experimental, resistiu 9,13% acima da estimativa e ruína.

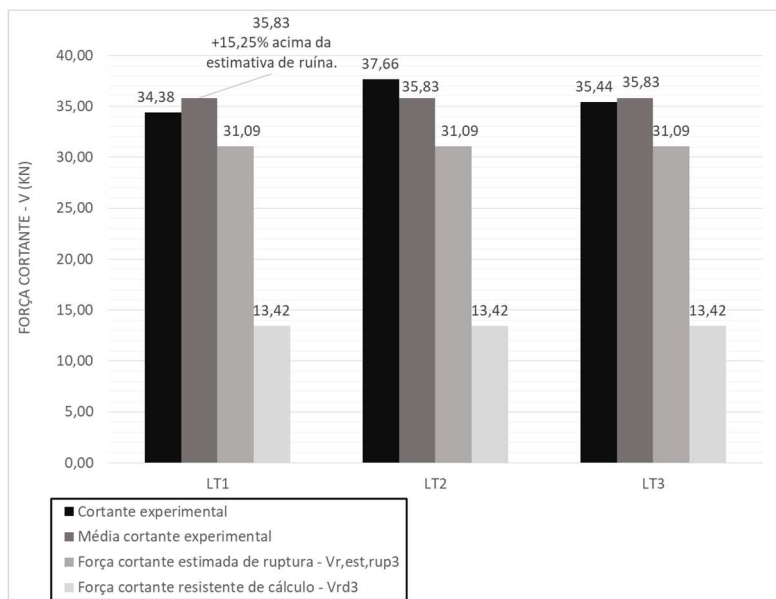


Figura 5 – Comparativo entre cortantes experimentais e valores teóricos das lajes treçadas

Ao analisar os resultados verificou-se baixa variabilidade nas lajes treliçadas, com a média em 35,83kN, desvio padrão de 3,28kN e coeficiente de variação de 9,15%, o que dá confiabilidade ao ensaio.

5.4 Análise comparativa entre resultados experimentais e teóricos

Na figura 6 nota-se facilmente que ambos os protótipos apresentaram ruptura experimental acima da estimativa de cálculo para a ruína. Verifica-se também as diferenças dos valores de força cortante resistente para as lajes treliçadas em comparação com as lajes sem armadura transversal. Em termos de força cortante resistente de cálculo, a laje treliçada deveria apresentar um valor 14,90% superior ao da laje sem treliça. Já quanto à força cortante estimada de ruptura, onde se considerou um fator $\gamma_c = 1,0$, a laje treliçada apresentou um valor de resistência 33,15% superior ao da laje sem treliça. Porém, ao ensaiar em laboratório, notou-se que as lajes treliçadas resistem à força cortante, em média, apenas 6,76% a mais que as lajes não-treliçadas.

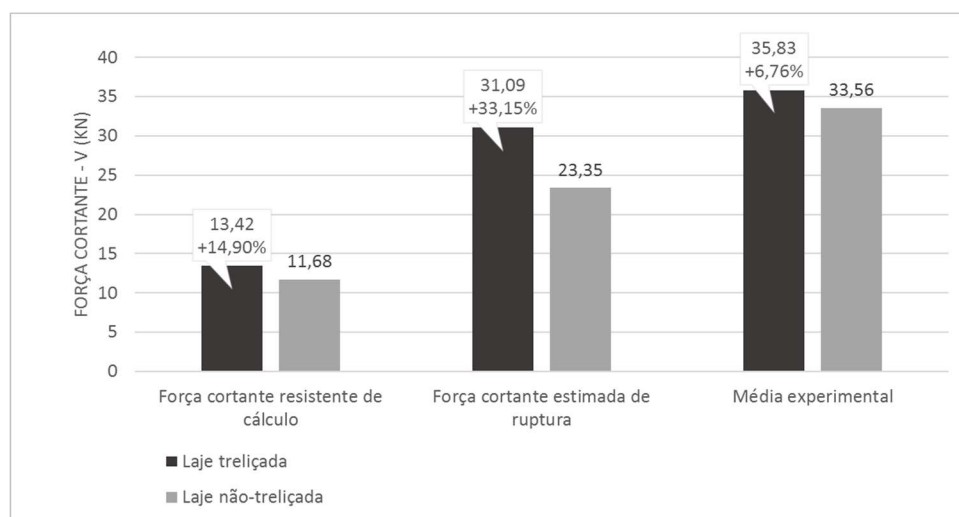


Figura 6 – Comparativo entre resultados teóricos e experimentais

Ao comparar os dados referentes aos resultados médios de ruptura obtidos nos ensaios com os resultados teóricos pôde-se obter a Tabela 8, elaborada de maneira a facilitar a visualização e compreensão das diferenças.

Tabela 8 - Proporções entre resultados experimentais e teóricos

Parâmetro	Média exp. (kN)	Desvio padrão (kN)	Coef. de variação	Força cortante estimada de ruptura (kN)	Relação entre a força cortante estimada de ruptura e experimental	Força cortante resistente de cálculo (kN)	Relação entre a força cortante de cálculo e experimental
Lajes não-treliçadas	33,56	7,50	22,32%	23,35	69,58%	11,68	34,80%
Lajes treliçadas	35,83	3,28	9,15%	31,09	86,77%	13,42	37,45%
Diferença	2,27 (6,67%)	4,22	13,17%	7,74 (33,15%)	17,19%	1,74 (14,90%)	2,65%



Observou-se que as lajes treliçadas apresentaram resistência média ao cisalhamento de 6,76% acima da média experimental das lajes não-treliçadas. É interessante ressaltar ainda, que mais do que resistência, a treliça proporcionou estabilidade às lajes e melhor controle devido à baixa variabilidade de resultados.

Por sua vez as lajes não-treliçadas apresentaram comportamento inesperado, com um valor médio 43,73% superior ao valor estimado de ruptura e até 187,33% superior aos valores de força cortante resistente de cálculo.

6. Conclusões

O presente trabalho abordou a análise da força cortante em lajes com vigotas treliçadas através de ensaio de ruptura de três protótipos de lajes com armadura treliçada e três equivalentes sem uso de treliças, no formato laje pré-moldada, onde todos os protótipos romperam ao cisalhamento. Então, compararam-se os resultados experimentais aos resultados calculados conforme a NBR 6118:2014, notando assim que todas as lajes ensaiadas romperam acima do previsto em cálculo.

Conclui-se, portanto, que a média das forças cortantes experimentais das lajes treliçadas resistiu em média 6,76% mais que as lajes sem armadura transversal, sendo esta a contribuição da treliça para resistência à força cortante.

Ao comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos, verifica-se que o resultado de força cortante estimada de ruptura das lajes treliçadas foi de 86,77% da força cortante experimental, enquanto para as lajes sem armadura transversal, a força cortante estimada de ruptura resultou em 69,58% do resultado experimental obtido.

Isso demonstra, com base nos estudos realizados, que o método teve comportamento satisfatório quanto ao cálculo de estimativa de ruptura para os protótipos com armadura treliçada, sem grande margem abaixo do ensaiado. Porém, para as lajes sem armadura transversal, o modelo de cálculo apresentou-se demasiado conservador a favor da segurança, subestimando a resistência das lajes não-treliçadas, o que pode causar superdimensionamento da estrutura.

Conclui-se ainda que, além da resistência à força cortante adicional de 6,76% acima do encontrado para as lajes sem uso de treliça, tal armadura proporciona maior ductibilidade à nervura da laje, enquanto as lajes sem armadura transversal apresentam comportamento frágil, apesar de terem boa resistência, o que foi constatado no comportamento da laje LNT1.

Por fim, principalmente quanto às lajes sem armadura transversal, recomenda-se, para trabalhos futuros, que seja aumentado o número de corpos de prova de lajes ensaiados de modo reduzir as incertezas quanto à variabilidade dos resultados experimentais e assim proporcionar uma maior acurácia na análise dos modelos teóricos estudados.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- CAIXETA, D. P. Contribuição ao estudo de lajes pré-fabricadas com vigas treliçadas. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 1998.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de concreto. Interciência, 273 p., v. 1-3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1977.