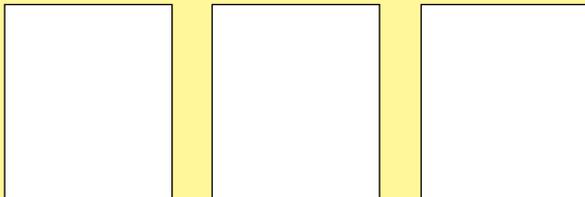


Experimental Analysis of Precast Slabs with Lattice Trusses Strengthened by Concrete Overlay

Análise Experimental de Lajes Treliçadas Reforçadas pela Face Superior



C. E. R. ASSIS^a
engcarlosetuardo@gmail.com

R. B. GOMES^b
rgomes@eec.ufg.br

G. N. GUIMARÃES^c
gilson@eec.ufg.br

Abstract

This work discusses the results of an experimental study on the behavior of precast slabs strips, using lattice truss reinforcement, strengthened by concrete overlay, with the same mechanical properties of the substrate. Twelve precast slabs strips, divided in three series, were tested. Specimens were 215 cm long and 100 cm wide and the lattice truss was 8 cm deep for the slabs of the first and third series and 12 cm deep for the second series. The slabs, before receiving the new concrete layer, were tested until a pre-determined load. Results showed that this strengthening method was efficient, leading to an ultimate load increase ranging from 38% to 149%, because of the greater effective depth. Monolithic and reinforced slabs with the same properties failed with similar loads, and this revealed that pre-cracking in reinforced slabs did not alter their performance at the ultimate limit state.

Keywords: precast slab, reinforcement, structural analysis, lattice truss.

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental para a verificação do comportamento de faixas de lajes treliçadas reforçadas à flexão pelo aumento da seção de concreto, de mesmas propriedades mecânicas do concreto do substrato, na face superior. Foram ensaiadas doze lajes de 100 cm x 215 cm, divididas em três séries de ensaio, sendo as 1ª e 3ª séries compostas por peças com vigotas treliçadas de 8 cm de altura e a segunda com vigotas de 12 cm. As lajes reforçadas, antes da execução do reforço, foram pré-carregadas. Os resultados mostraram que este método de reforço foi eficiente, aumentando a capacidade de carga das peças reforçadas, de 38% a 149%, em relação às lajes de referência de cada série, em função do acréscimo do braço de alavanca e, conseqüentemente, do momento resistente da peça. Lajes monolíticas e reforçadas de mesmas características romperam com carregamentos semelhantes, mostrando que a pré-fissuração das lajes reforçadas não alterou seu desempenho no estado limite último.

Palavras-chave: pré-moldados, reforço, análise estrutural, laje treliçada.

^a Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, engcarlosetuardo@gmail.com, Av. T4 n.995 ap. 502B Setor Bueno, Goiânia -GO, Brasil;

^b Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, rgomes@eec.ufg.br, Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil Pça. Universitária s/n, Setor Universitário, Goiânia -GO, Brasil;

^c Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, gilson@eec.ufg.br, Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil Pça. Universitária s/n, Setor Universitário, Goiânia -GO, Brasil;

1 Introdução

A tendência atual na engenharia estrutural é a concepção que adota lajes com grandes vãos. Diante disso, uma solução que vem sendo bastante adotada é a utilização de lajes pré-fabricadas treliçadas, que conseguem vencer os grandes vãos com o menor peso da estrutura. Nelas, parte do concreto da laje é substituído por um material de enchimento, diferentemente das lajes maciças em que vencer grandes vãos significa um grande aumento da espessura e conseqüentemente do peso próprio. Por outro lado, as facilidades de execução favoreceram o surgimento de inúmeras pequenas empresas fabricantes de lajes, até mesmo informais e sem o conhecimento técnico adequado, a estarem atuando no mercado. Disto decorre o surgimento, na maioria das vezes, de inúmeros problemas na segurança das lajes devido, principalmente, à insuficiência na taxa de armadura, uso de concreto inadequado, altura útil indevida e montagem incorreta, conseqüentemente levando ao surgimento de patologias como: deformação e fissuração excessiva, corrosão de armadura, entre outros.

Em função desses fatos, o estudo sobre reparo, recuperação e reforço das estruturas tem se tornado bastante importante no meio da construção civil. Várias são as técnicas de reforço existentes na literatura, e cabe ao engenheiro responsável pela intervenção analisar as causas das patologias e escolher a melhor opção técnica e econômica.

O objetivo geral deste trabalho é verificar a eficiência do reforço à flexão de faixas de lajes pré-fabricadas treliçadas unidirecionais. O reforço das peças foi feito pelo acréscimo de uma camada de concreto na face superior.

Na tentativa de se reduzir os custos e o tempo de execução das obras, tem-se aumentado bastante o aparecimento de patologias, ligadas principalmente ao uso de materiais de baixa qualidade e a problemas de execução, projeto e utilização, fazendo-se necessária a intervenção na estrutura. Por isso, hoje, os trabalhos de reforço e recuperação de estruturas têm tido uma importância muito grande no meio técnico e científico, pois, dessas pesquisas sairão especificações adequadas para cada caso.

Figura 1 – Curva de resistência à compressão do concreto

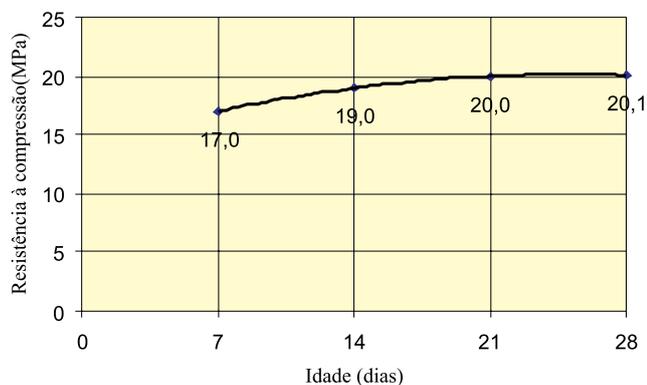


Tabela 1 – Propriedades mecânicas do concreto na data do ensaio de cada peça

Série	Laje	Idade (dias)	f_c (MPa)
1ª	L1-80	37	20,1
	L2-80	40	20,1
	L3-80	43	20,1
	L4-80	19	18,0
	L5-80	21	18,1
	L2/L2R-80*	26	19,2
	L3/L3R-80*	28	19,7
2ª	L1-120	39	20,1
	L2-120	42	20,1
	L3-120	44	20,1
	L4-120	20	18,0
	L5-120	23	18,6
	L2/L2R-120*	27	19,5
	L3/L3R-120*	29	19,7
3ª	L6-80	14	17,0
	L7-80	16	17,3
	L7/L7R-80*	14	19,0

*O valor da resistência, nesta data, refere-se somente ao concreto do reforço.

Foi realizado um levantamento de campo, junto aos usuários de lajes treliçadas no estado de Goiás, que contemplou as etapas de dimensionamento, fabricação e execução de lajes. Constatou-se que 63,6% dos projetistas estruturais consideraram que o principal problema ocorrido nas lajes pré-fabricadas treliçadas é a deformação excessiva [6]. Em alguns casos, essa deformação pode levar à necessidade do reforço das lajes.

No caso da realização de um reforço em lajes treliçadas pela face superior, há um ganho de tempo e de facilidade de execução pois se necessita apenas do correto tratamento na superfície do concreto antigo, uma limpeza e saturação do substrato para, em seguida, fazer o lançamento da nova camada de concreto.

2 Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

Para a concretagem das peças, inclusive o reforço, foi utilizado concreto usinado, dosado para que atingisse a resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias [1]. Romperam-se dois corpos-de-prova cilíndricos de 150mm x 300mm moldados com esse concreto, em várias idades, para a determinação da curva da resistência à compressão ao longo do tempo mostrada na Figura 1. Na data do ensaio de cada peça, foi usada essa curva para obter os valores de resistência à compressão do concreto dados na Tabela 1.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço utilizado

ϕ (mm)	Nº de CPs	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
4,2	2	605,0	0,51	720,0	193,8
5,0	2	646,9	0,50	722,8	215,6
6,0	2	600,0	0,44	570,0	247,9
8,0	2	599,5	0,30	707,2	199,8

f_y – tensão de escoamento do aço ϵ_y – deformação de escoamento do aço f_u – tensão de ruptura da armadura E_s – módulo de elasticidade longitudinal da armadura

Os valores do módulo de elasticidade secante a 0,40 da resistência à compressão [2] e da resistência à tração do concreto [3] foram obtidos somente para a idade de 28 dias. Os valores médios da resistência à tração e do módulo de elasticidade secante do concreto foram de 2,4 MPa e 21,5 GPa, respectivamente.

As propriedades mecânicas do aço foram obtidas ensaiando uma amostra de dois corpos-de-prova para cada diâmetro empregado nas lajes [4]. Os corpos-de-prova foram retirados da bobina original do aço na fábrica de treliças. Os diâmetros utilizados foram: 8,0 mm (armadura adicional), 6,0 mm (fio do banzo superior), 5,0 mm (fios do banzo inferior referentes à 2ª série) e 4,2 mm (fios do banzo inferior das lajes da 1ª e 3ª séries e sinusóide). Os resultados estão dispostos na Tabela 2.

2.2 Programa Experimental

Para a análise experimental de reforço em lajes pré-fabricadas treliçadas, executado junto à face superior, foram ensaiadas três séries de faixas de laje de 1,0 m de largura por 2,15 m de comprimento, cuja seção transversal é mostrada pela Figura 2. As variáveis estudadas foram: altura da treliça, espessura do capeamento e do reforço, taxa de armadura e aplicação ou não de um pré-carregamento.

A 1ª série era composta de cinco lajes com treliças de 80 mm de altura, a segunda de cinco lajes com treliças de 120 mm e a terceira de duas lajes, também com treliças de 80 mm, mas com uma taxa de aço inferior de tração bem menor em relação às lajes da primeira série, pois não foi colocada armadura adicional na sapata das vigotas treliçadas. Nas 1ª e 2ª séries, havia três lajes de concreto monolíticas e duas lajes reforçadas em cada série e a 3ª série era composta por uma laje de referência e uma laje reforçada.

A nomenclatura das lajes foi baseada na altura da treliça eletro-soldada (h_t) ficando, na 1ª série, L_n-80 (n variando de 1 a 5) para as lajes monolíticas e L2/L2R-80 e L3/L3R-80 para as duas lajes reforçadas. Estas duas lajes resultaram do reforço das lajes L2-80 e L3-80, que receberam uma nova camada de concreto de 3 cm e 6 cm respectivamente, em sua face superior. Na 2ª série, deram-se às lajes monolíticas os nomes de L_n-120 (n variando de 1 a 5), pois as treliças tinham 120 mm de altura, enquanto as lajes reforçadas foram denominadas L2/L2R-120 e L3/L3R-120, que eram as L2-120 e L3-120 com uma camada de reforço de 3 cm e 6 cm, respectivamente. A terceira série, com peças cuja treliça tinha 80 mm de altura, era composta pelas lajes L6-80 e L7-80 sendo que a última, após receber uma camada de 3 cm de reforço passou a ser denominada L7/L7R-80. As principais características das lajes ensaiadas estão mostradas na Tabela 3.

Figura 2 – Seção transversal das lajes reforçadas – unidade: cm

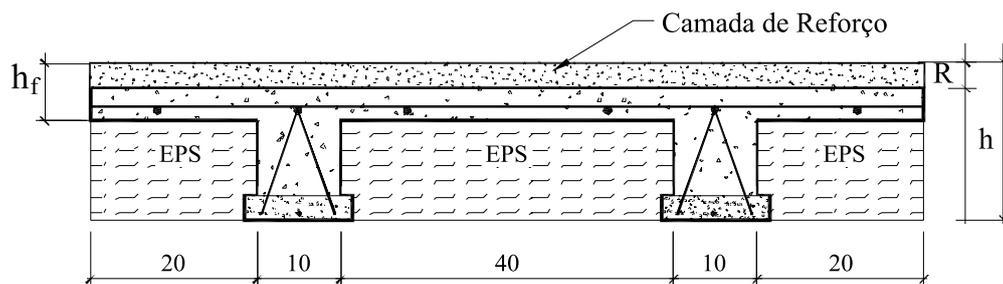


Tabela 3 – Principais características das lajes ensaiadas

Série	Laje	h_t (mm)	h_r (mm)	h (mm)	R (mm)	ρ (%)	Tipo de laje
1ª	L1-80	80	40	120	-	0,519	Referência
	L2-80		40	120	-	0,519	Original do reforço
	L3-80		40	120	-	0,519	Original do reforço
	L4-80		70	150	-	0,338	Monolítica do reforço
	L5-80		100	180	-	0,251	Monolítica do reforço
	L2/L2R-80		70	150	30	0,338	Reforçada
	L3/L3R-80		100	180	60	0,251	Reforçada
2ª	L1-120	120	40	160	-	0,489	Referência
	L2-120		40	160	-	0,489	Original do reforço
	L3-120		40	160	-	0,489	Original do reforço
	L4-120		70	190	-	0,333	Monolítica do reforço
	L5-120		100	220	-	0,252	Monolítica do reforço
	L2/L2R-120		70	190	30	0,333	Reforçada
	L3/L3R-120		100	220	60	0,252	Reforçada
3ª	L6-80	80	40	120	-	0,341	Referência
	L7-80		40	120	-	0,341	Original do reforço
	L7/L7R-80		70	150	30	0,222	Reforçada

h_t – altura da treliça h_r – espessura total do caapeamento de concreto h – espessura total da laje R – espessura da camada de reforço * Estas dimensões das peças são valores nominais

As lajes posteriormente reforçadas, chamadas inicialmente de lajes originais do reforço, foram carregadas até uma carga pré-definida em função da deformação da armadura principal (início do escoamento) ou do deslocamento na seção central (flecha igual a $\ell_0/250$ onde ℓ_0 é o vão) para, em seguida, serem descarregadas, e então reforçadas para posterior ensaio até a ruptura.

Foi utilizado como material de reforço concreto de características mecânicas (resistências à tração e à compressão e módulo de deformação) semelhantes às do concreto das lajes originais e a preparação do substrato foi feita por apicoamento manual.

O ensaio dos modelos foi realizado aplicando cargas concentradas nos terços médios do vão para que a região analisada (seção central) estivesse sob flexão pura. O esquema de ensaio adotado é mostrado na Figura 3.

A armadura utilizada na confecção das lajes era composta pela treliça eletro-soldada, armadura adicional e armadura de distribuição. Nas peças das 1ª e 3ª séries foram utilizadas treliças de 80 mm de altura, e nas lajes da 2ª série, treliças de 120 mm. Nos modelos das

duas primeiras séries, foi colocada uma armadura adicional (1 ϕ 8,0 mm por vigota treliçada) na mesma posição dos fios do banzo inferior das treliças eletro-soldadas. Foram colocadas, nas lajes, armaduras de distribuição nas duas direções e na mesma posição (distância da face inferior das lajes) dos fios do banzo superior das treliças. Na região de aplicação de carga, colocou-se uma maior armadura de distribuição (3 ϕ 5,0 mm) para evitar uma ruptura localizada pelo esmagamento do concreto naquela região e uma melhor distribuição da carga ao longo da largura da laje. O detalhamento da armadura das lajes está disposto na Figura 4.

Os deslocamentos foram medidos utilizando relógios comparadores (deflectômetros), com precisão de 0,01 mm e curso de 12,7 mm. Foram posicionados onze deflectômetros em cada laje, sendo que dois mediam os deslocamentos horizontais e os outros nove os deslocamentos verticais, nas posições mostradas na Figura 5.

Foram colados extensômetros elétricos de resistência na armadura das lajes, nas duas vigotas que compunham o modelo. Monitorou-se tanto a armadura da treliça (fios do banzo superior, banzo inferior e sinusóide) quando a armadura adi-

Figura 3 – Esquema geral de ensaio – vista lateral– unidade: cm

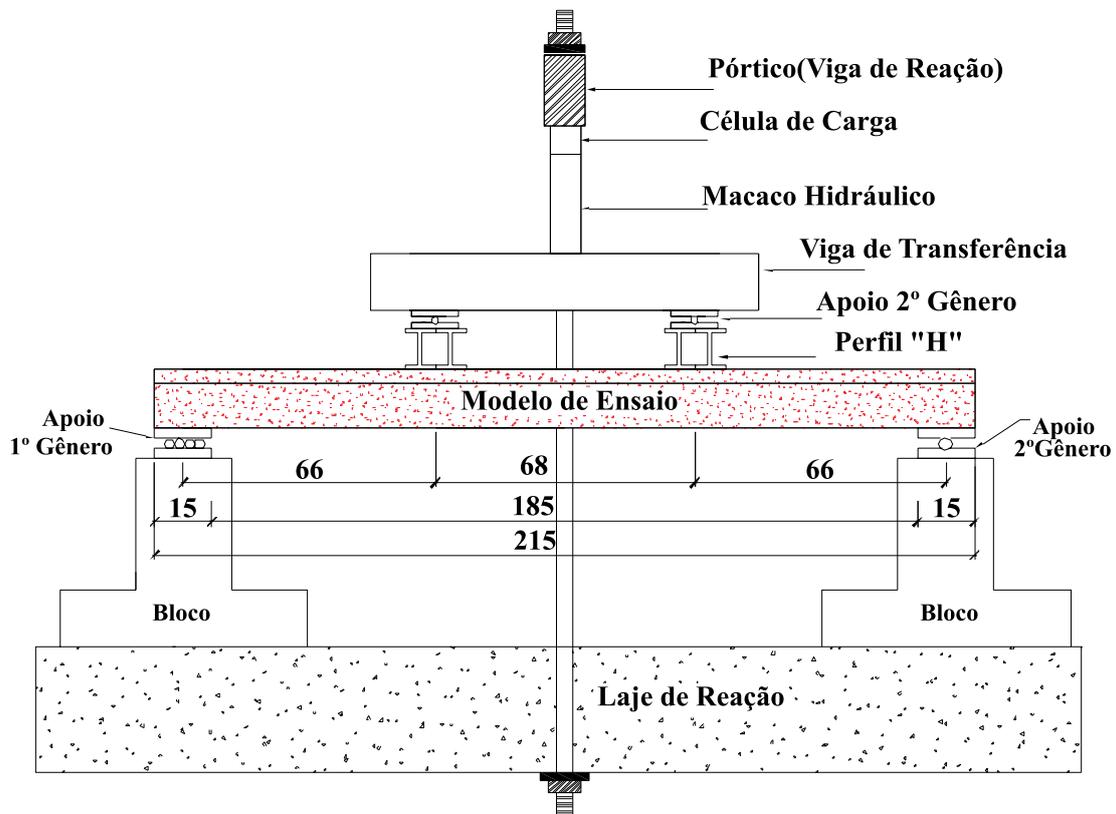
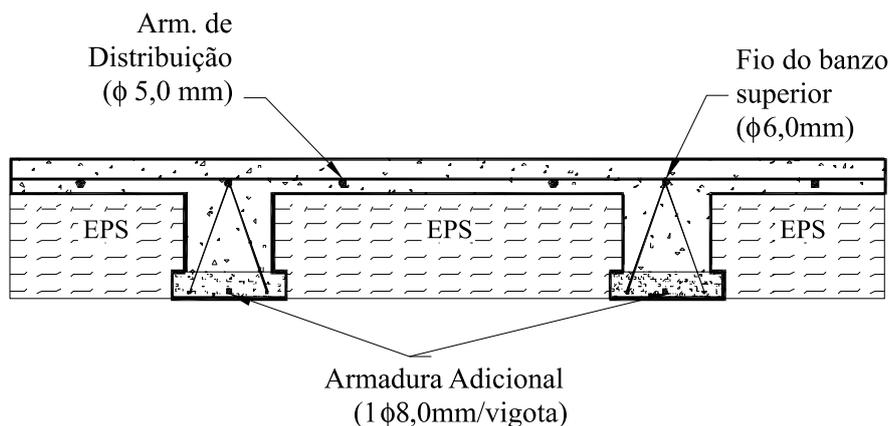


Figura 4 – Detalhamento da armadura dos modelos

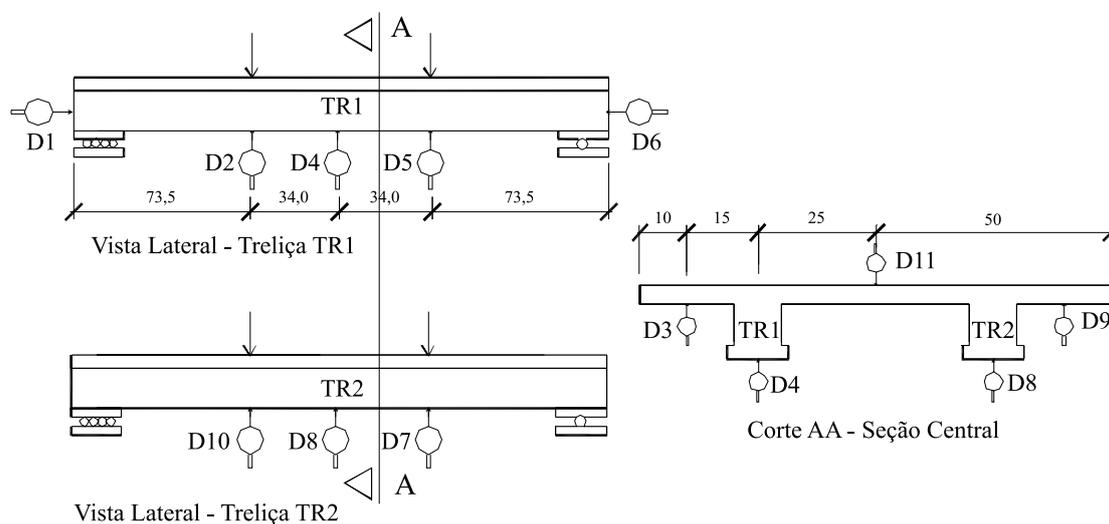


cional, na seção central e numa seção de aplicação de carga. As deformações do concreto foram medidas com extensômetros elétricos de resistência que foram colados na superfície superior da seção central das lajes, na direção do eixo das duas vigotas treliçadas (ver esquema na Figura 7).

Adotaram-se quatro procedimentos de preparação das la-

jes visando garantir uma perfeita aderência entre concreto antigo (substrato) e o material de reforço: apicoamento manual, limpeza, saturação do substrato e aplicação do novo concreto, para que as peças reforçadas trabalhassem como se fossem lajes monolíticas, havendo a total transferência dos esforços de um material para o outro na região da junta.

Figura 5 – Posição dos deflectômetros nas lajes – unidade: cm



3 Resultados e discussões

3.1 Carga e Modo de ruptura

Todas as lajes romperam por flexão com escoamento e ruptura da armadura inferior de tração, de maneira dúctil (Figura 6), sem o aparecimento de fissuras horizontais na ligação entre o substrato e o material de reforço nas lajes reforçadas. Nas lajes L1-80 e L4-80 (1ª série), L1-120 e L4-120 (2ª série) e L6-80 (3ª série), além da ruptura da armadura, foram observados também, altos valores de deformação obtidos através dos resultados dos extensômetros colados no concreto, como mostrados na Figura 7.

A Tabela 4 apresenta as cargas de ruptura experimentais das lajes, comparando-as com os valores de carga da laje de referência de cada série. Observa-se que as lajes reforçadas das três séries de ensaio (L2/L2R-80, L3/L3R-80, L2/L2R-120, L3/L3R-120 e L7/L7R-80) apresentaram aumento da altura útil média de 36% a 97%, nas lajes reforçadas, que gerou o aumento do momento resistente e conseqüentemente da capacidade portante das peças, de 38% a 149%, mesmo que tenha havido uma queda na taxa de armadura de até 54%.

Comparando as lajes reforçadas com as equivalentes monolíticas, verifica-se que as cargas de ruptura foram bem próximas, havendo entre elas uma diferença máxima de

Figura 6 – Estado típico das lajes na ruptura



Figura 7 – Carga x deformação no concreto de lajes das três séries de ensaio

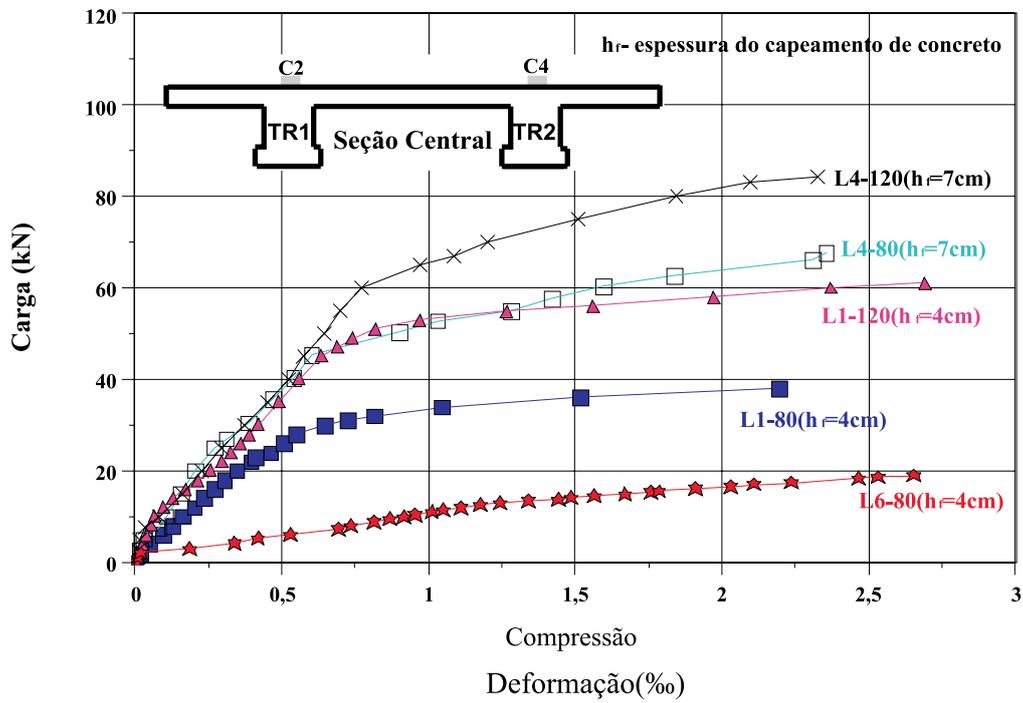


Tabela 4 – Comparações das características e cargas de ruptura das lajes

Laje	$d_{méd.}$ (cm)	$\rho_{adot.}$ (%)	$\frac{d_{méd.Li}}{d_{méd.L1}}$ (col. 1)	$\frac{\rho_{adot.Li}}{\rho_{adot.L1}}$	$P_{u.Exp}$ (kN)	$\frac{P_{u.Exp.Li}}{P_{u.Exp.L1}}$ (col. 2)	Col.(2) Col.(1)
L1-80	6,9	0,510	1,00	1,00	39,0	1,00	1,00
L4-80	10,4	0,316	1,51	0,62	70,0	1,79	1,18
L5-80	13,3	0,240	1,93	0,47	90,0	2,31	1,20
L2/L2R-80	10,8	0,303	1,57	0,59	74,0	1,90	1,21
L3/L3R-80	13,6	0,235	1,97	0,46	97,0	2,49	1,26
L1-120	9,4	0,481	1,00	1,00	63,0	1,00	1,00
L4-120	12,8	0,317	1,36	0,66	87,0	1,38	1,01
L5-120	16,0	0,250	1,70	0,52	110,0	1,74	1,02
L2/L2R-120	13,3	0,298	1,41	0,62	87,0	1,38	0,98
L3/L3R-120	16,5	0,241	1,75	0,50	113,0	1,79	1,02
L6-80	4,8	0,341	1,00	1,00	19,0	1,00	1,00
L7/L7R-80	7,8	0,222	1,62	0,65	36,0	1,89	1,17

$d_{méd.}$ – altura útil média $P_{u.Exp.}$ – Carga última registrada durante o ensaio
 $\rho_{adot.}$ – taxa de armadura calculada na seção central

Tabela 5 – Cargas experimentais e teóricas das lajes

Laje	$d_{méd.}$ (cm)	$\frac{d_{méd.Li}}{d_{méd.L1}}$	$P_{u.Exp.}$ (kN)	$P_{u.Teo.}$ (kN)	$P_{y.Teo.}$ (kN)	$P_{y,nom}$ (kN)	$\frac{P_{u.Exp.}}{P_{u.Teo.}}$
L1-80	6,9	1,00	39,0	37,6	31,2	26,8	1,03
L4-80	10,4	1,51	70,0	58,7	49,8	41,6	1,19
L5-80	13,3	1,93	90,0	76,9	65,3	54,6	1,17
L2/L2R-80	10,8	1,57	74,0	61,2	51,9	42,2	1,20
L3/L3R-80	13,6	1,97	97,0	78,6	66,9	55,4	1,23
L1-120	9,4	1,00	63,0	57,6	49,8	42,8	1,09
L4-120	12,8	1,36	87,0	78,4	68,0	58,3	1,11
L5-120	16,0	1,70	110,0	95,4	82,9	70,9	1,15
L2/L2R-120	13,3	1,41	87,0	80,4	69,7	59,8	1,08
L3/L3R-120	16,5	1,75	113,0	97,4	84,6	72,4	1,16
L6-80	4,8	1,00	19,0	14,8	12,3	10,3	1,28
L7/L7R-80	7,8	1,62	36,0	26,5	22,5	18,9	1,35

$d_{méd.}$ = Altura útil média (média ponderada);

$P_{u.Exp.}$ = Carga última registrada durante o ensaio

$P_{u.Teo.}$ = Carga última teórica, calculada com a tensão de ruptura do aço e resistência do concreto obtidos experimentalmente;

$P_{y.Teo.}$ = Carga teórica que geraria o escoamento da armadura com valor de tensão no aço obtido experimentalmente

$P_{y,nom}$ = Carga de escoamento nominal, levando em consideração os coeficientes de minoração dos materiais (1,15 para o aço e 1,4 para o concreto)

Figura 8 – Carga x deslocamento vertical de lajes das três séries de ensaio

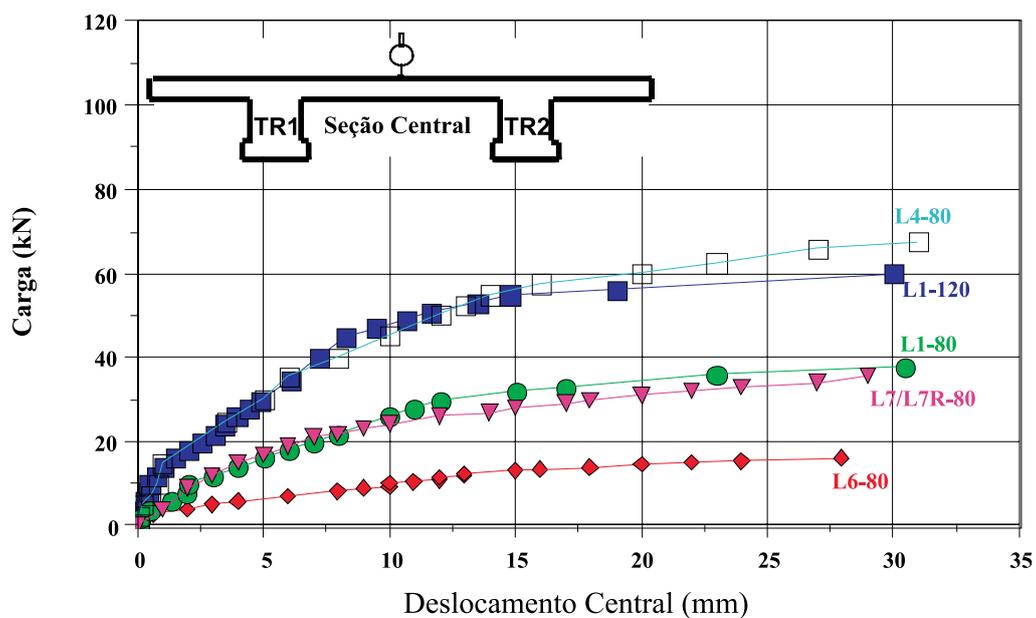
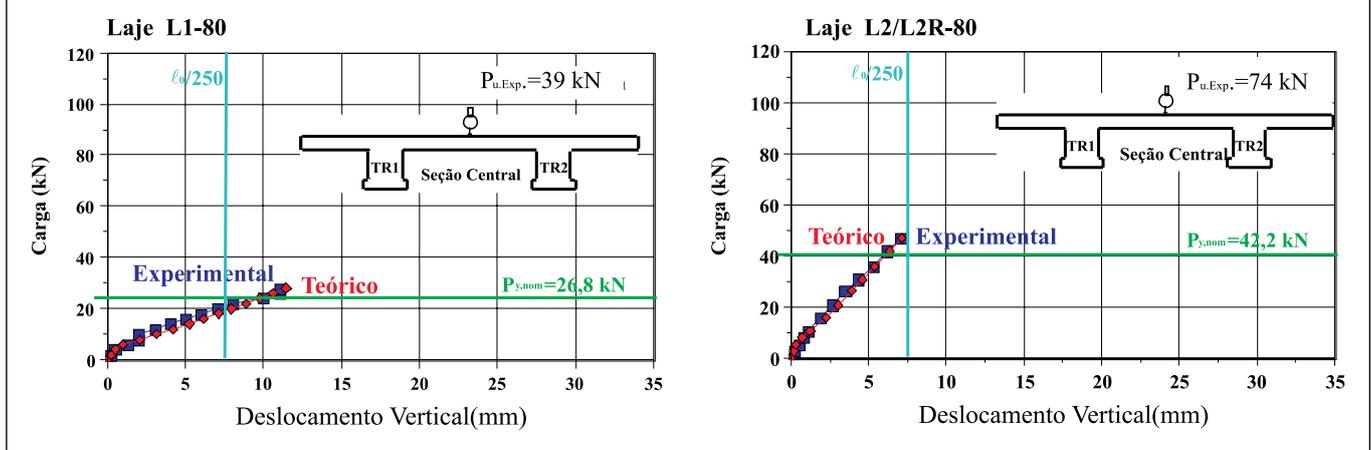


Figura 9 – Curvas carga x deslocamento vertical teórico e experimental de lajes da 1ª série



7,8%, provavelmente devida a imperfeições construtivas. Isto mostra que o fato das lajes reforçadas já estarem previamente fissuradas, em função do pré-carregamento, não alterou seu comportamento em relação ao estado limite último, pois não houve perda na capacidade portante das peças.

A Tabela 5 compara as cargas obtidas experimentalmente e de acordo com os critérios de cálculo da norma brasileira [5]. Os resultados mostram que os valores de carga de ruptura das lajes reforçadas obtidos experimentalmente ($P_{u,Exp}$) foram 8% a 35% superiores aos teóricos ($P_{u,Teo}$). Os valores de carga de ruptura das lajes L1-80 e L7/L7R-80 foram bem parecidos, 39 kN e 36 kN, respectivamente. Os resultados mostram que a diminuição na taxa de armadura ($\rho_{adot.}$) de 56% (Tabela 4: 0,222 e 0,510) foi compensada pelo ganho de 13% na altura útil média (Tabelas 4 ou 5: 7,8 e 6,9), evidenciando que, nesse tipo de reforço, o acréscimo na altura útil é mais decisivo para o ganho de capacidade portante do que a variação na taxa de armadura.

3.2 Carga x Deslocamento vertical

O comportamento *carga x deslocamento vertical* no meio do vão das lajes é ilustrado pelas curvas da Figura 8. A figura mostra que as curvas *carga x deslocamento vertical* apresentam o mesmo formato para todas as lajes, com basicamente três segmentos: o primeiro ocorre quando o concreto da face tracionada ainda não fissurou, caracterizando o estágio I (não ocorrendo nas lajes reforçadas por já estarem fissuradas), em seguida, há uma mudança de inclinação da curva evidenciando uma perda de rigidez em função do início do processo de fissuração (estádio II) e, por fim, a fase plástica (Estádio III) em que se observa um maior aumento na flecha sem grandes incrementos no carregamento imposto, até atingir a carga de ruptura. Observa-se que, à medida que se aumenta a rigidez à flexão da peça em função do aumento da espessura do capeamento de concreto, a mudança de inclinação da curva é menor, essencialmente no Estádio II, gerando menores deslocamentos para mesmos valores de carga.

Figura 10 – Curvas carga x deslocamento vertical teórico e experimental de lajes da 2ª série

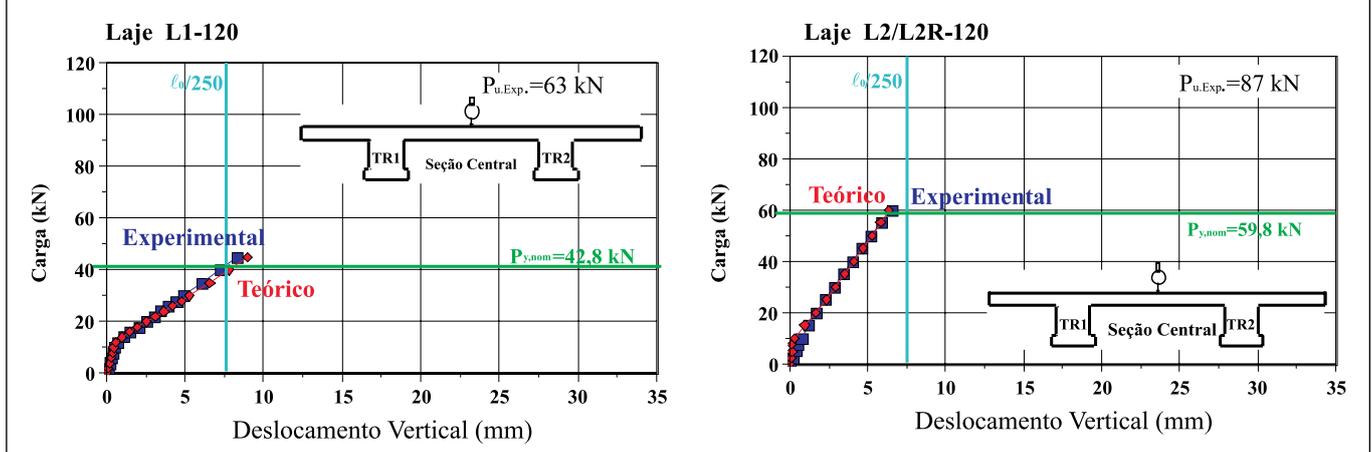
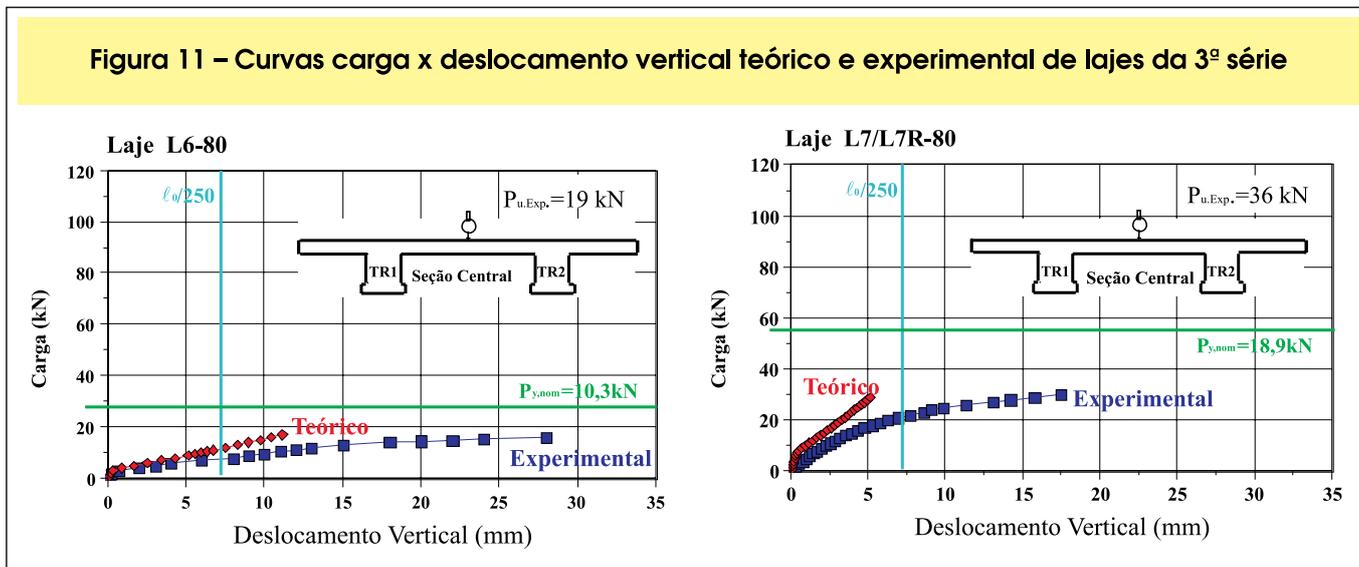


Figura 11 – Curvas carga x deslocamento vertical teórico e experimental de lajes da 3ª série



As Figuras 9 e 10 mostram que, usando a norma brasileira [5], estimou-se de maneira razoavelmente satisfatória a flecha das peças das duas primeiras séries, respectivamente, pois os valores encontrados foram bem próximos aos experimentais de todas as lajes até o limite da carga de escoamento nominal ($P_{y,nom.}$). Nas lajes da terceira série, Figura 11, os valores teóricos encontrados não foram

tão próximos aos experimentais, diferentemente do que era esperado.

3.3 Carga x Deformação da armadura

A Figura 12 mostra que a armadura inferior de tração das lajes (armadura adicional e fios do banzo inferior das tre-

Figura 12 – Carga x deformação da armadura dos fios do banzo inferior das treliças (média de E1, E2, E9 e E10)

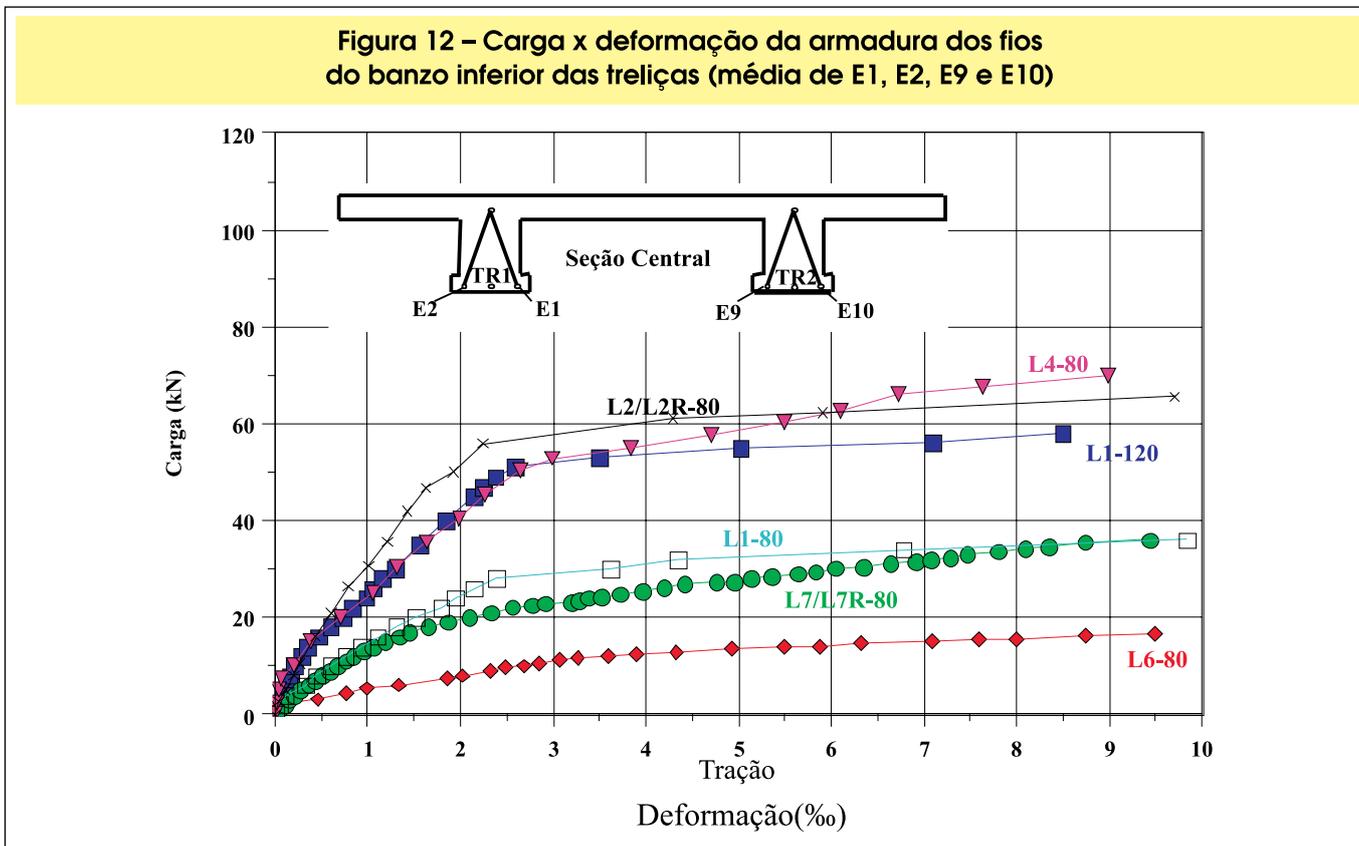


Figura 13 – Carga x deformação da armadura dos fios do banzo superior das treliças da 1ª série (média de E4 e E12)

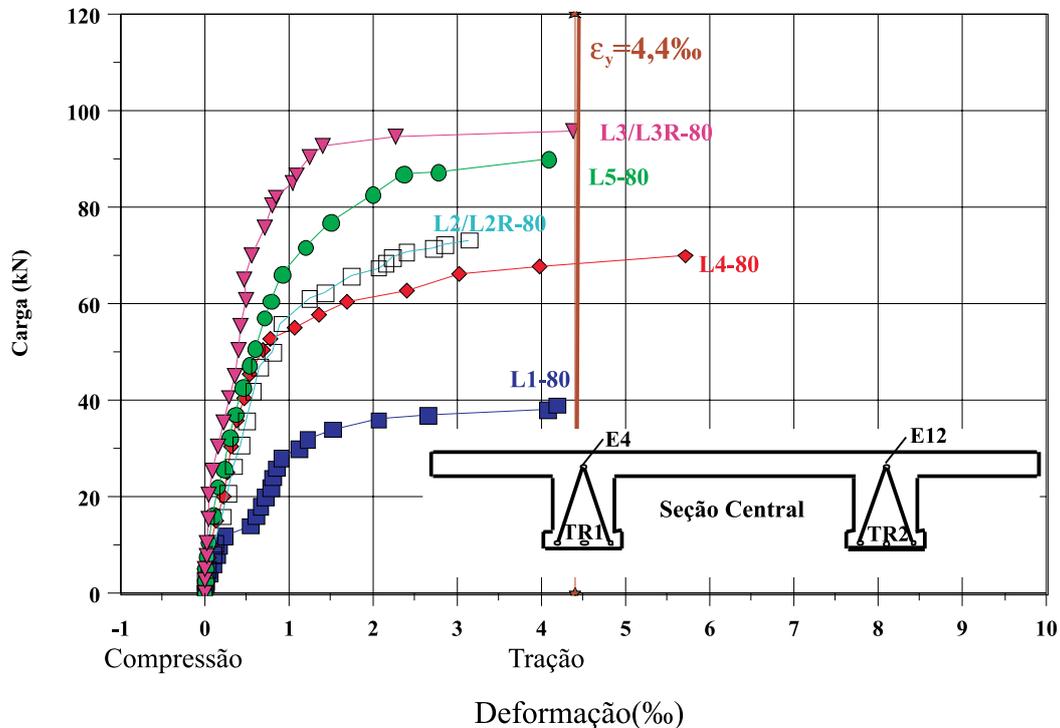
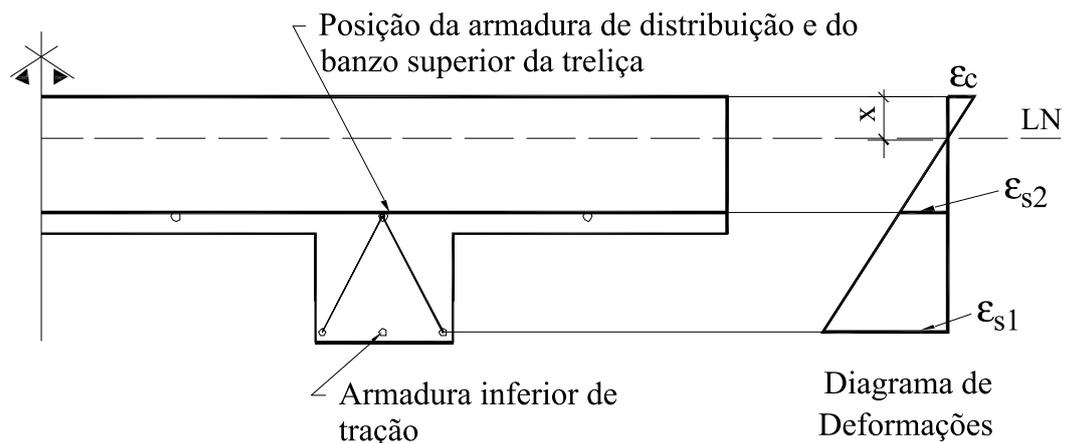


Figura 14 – Diagrama de deformações típico das lajes



liças) chegou perto da deformação plástica excessiva de 10‰. O aumento da rigidez das lajes, obtido devido ao acréscimo da camada de concreto na face superior de algumas lajes, proporcionou menores deformações à armadura, para mesmos valores de carga.

A Figura 13 apresenta as curvas *carga x deformação na armadura* nos fios do banzo superior das treliças. Nela

observa-se que essas armaduras chegaram a escoar. A Tabela 6 apresenta a posição da armadura do banzo superior da treliça e da linha neutra nas lajes para o primeiro e último estágios de carregamento em que foram medidas deformações. Esses valores foram obtidos utilizando a hipótese de que seções permanecem planas após se deformarem, conforme Figura 14. Os resultados mostram que

no primeiro carregamento, antes da fissuração do concreto (exceto para as lajes reforçadas que já estavam previamente fissuradas) a linha neutra de oito das lajes já se encontrava acima da armadura do banzo superior da treliça, estando, portanto, essa armadura tracionada. Nas lajes L1-80, L1-120, L4-120 e L6-80 isso não ocorreu. No último estágio de carregamento, a linha neutra se encontrava posicionada mais próxima da face superior das lajes. Os resultados da Tabela 6 confirmam que a armadura de distribuição e do banzo superior da treliça contribuíram na resis-

tência à flexão das peças ensaiadas, pois essas armaduras se encontravam tracionadas, próximo da ruptura, e bem abaixo da posição da linha neutra (x), como mostra a Figura 14. Como as lajes reforçadas estavam fissuradas no início do segundo ensaio, a posição da linha neutra (x) deslocou-se menos do primeiro para o último carregamento, em relação às suas respectivas lajes monolíticas do reforço, onde a posição da linha neutra mudou de posição sensivelmente. Essa mudança da posição da linha neutra pode ser vista na Figura 15.

Tabela 6 – Posição da linha neutra e dos fios do banzo superior das treliças das lajes

Laje	Posição do B.S. (cm)	Carga (kN)	ϵ_c (mm/m)	ϵ_{s1} (mm/m)	x (cm)
L1-80	2,6	2,0	0,02	0,033	4,01
		37,0	1,52	8,233	1,65
L4-80	6,1	2,0	0,01	0,024	4,11
		68,0	2,32	8,989	2,89
L5-80	9,0	2,0	0,01	0,014	7,23
		90,0	1,99	9,044	3,07
L2/L2R-80	6,5	2,0	0,02	0,065	3,42
		70,0	1,72	5,848	3,30
L3/L3R-80	9,3	2,0	0,01	0,057	2,59
		85,0	1,14	9,817	1,80
L1-120	2,6	2,5	0,010	0,030	3,62
		55,0	1,265	8,209	1,93
L4-120	6,0	2,5	0,008	0,011	7,14
		75,0	1,845	8,415	3,14
L5-120	8,5	2,5	0,005	0,008	7,88
		100,0	1,460	8,518	2,99
L2/L2R-120	6,5	2,5	0,020	0,068	3,99
		70,0	1,010	7,020	2,20
L3/L3R-120	9,0	2,5	0,018	0,044	5,83
		105,0	1,490	8,019	3,21
L6-80	2,5	1,0	0,010	0,016	3,97
		16,0	2,030	10,440	1,72
L7/L7R-80	5,5	1,0	0,017	0,053	3,53
		36,0	1,447	9,433	1,93

ϵ_c – deformação específica do concreto comprimido (face superior)

ϵ_{s1} – deformação específica da armadura mais tracionada (fio do banzo inferior da treliça)

x – Posição da linha neutra em relação à face superior da laje

Posição do B.S. – Posição do fio do banzo superior em relação à face superior da laje

3.4 Carga x Deformação do concreto

Observa-se na Figura 7, que constam as relações carga-deformação no concreto (média das deformações nas posições C2 e C4), que à medida que o capeamento da mesa de compressão aumenta, há uma mudança menos acentuada da inclinação da curva após a fissuração do concreto da região tracionada, gerando menor deformação de compressão no concreto para mesmos valores de carga, como ocorreu nas curvas *carga x deslocamento vertical*. Isso se deve ao aumento de rigidez à flexão das peças em função do acréscimo da camada de reforço na face superior das lajes.

4 Conclusões

Após a análise de todos os resultados experimentais obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

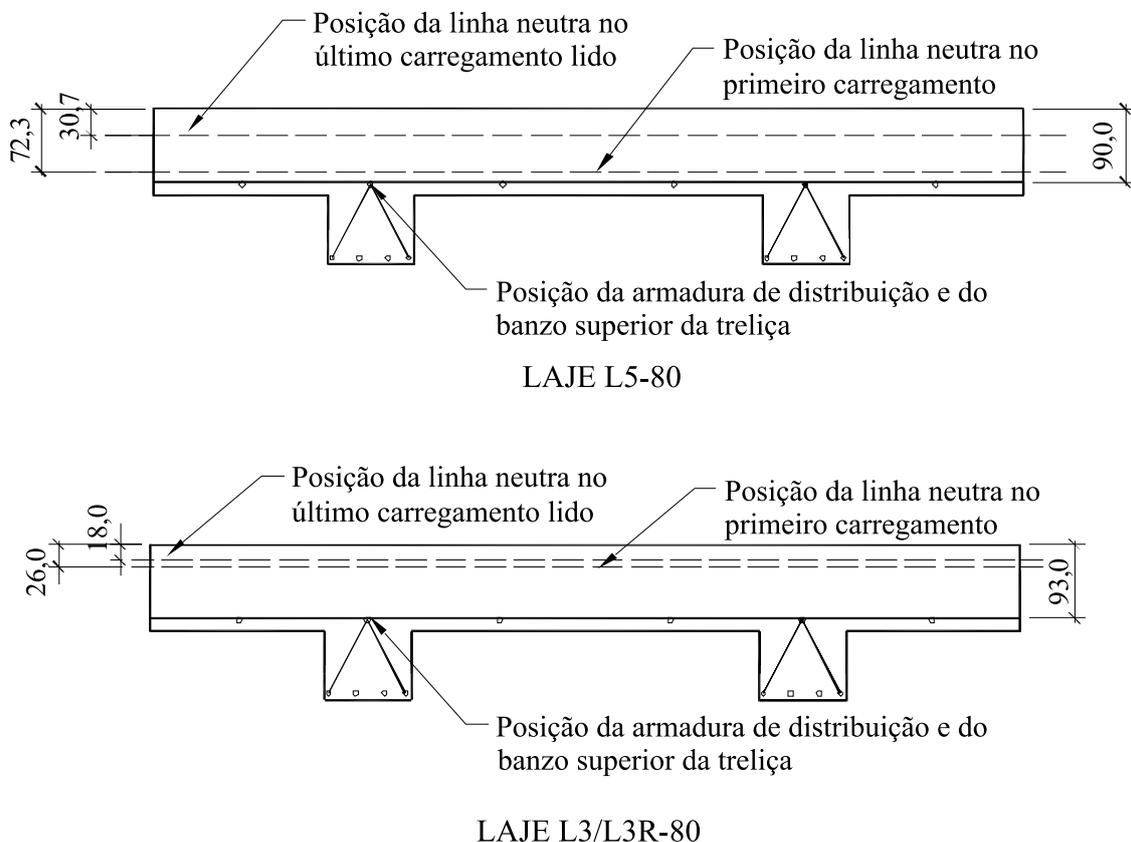
- 1) Em todas as lajes, observou-se uma ruptura dúctil, sem o aparecimento de fissuras horizontais na ligação entre o substrato e o material de reforço nas lajes reforçadas, com as lajes apresentando deslocamentos e deformações consideráveis.
- 2) Em função do modo de ruptura das lajes, pode-se concluir que para se obter uma boa aderência entre o subs-

trato e o concreto do reforço, para o bom desempenho das lajes reforçadas, é suficiente a realização de um apicoamento manual seguido de uma limpeza do substrato e, momentos antes da nova concretagem, promover a saturação do concreto antigo para não haver a perda de água do material de reforço.

3) Nas lajes da 1ª série, a aplicação da camada de reforço de 3 cm e 6 cm elevou a carga última de ruptura em 90% e 149% em relação à laje de referência, respectivamente. Nas lajes da 2ª série, o ganho foi de 38% e 79% para as mesmas espessuras de reforço, enquanto que na laje reforçada com 3 cm de espessura da 3ª série o ganho foi de 89%.

4) Ao comparar as cargas obtidas experimentalmente com as calculadas conforme a norma brasileira [5], concluiu-se que no cálculo das cargas últimas das lajes reforçadas pode-se utilizar a altura útil da seção total, considerando o reforço trabalhando monoliticamente (perfeita aderência) com a laje original, pois as cargas obtidas experimentalmente foram praticamente iguais às das suas respectivas lajes monolíticas e foram sempre maiores que as calculadas, mesmo que as peças reabilitadas estivessem pré-fisuradas devido ao pré-carregamento.

Figura 15 – Posição da linha neutra no início e no final ou próximo do final do carregamento – unidade: mm



5) Quando se calculam lajes pré-fabricadas treliçadas simplesmente apoiadas, considera-se como armadura resistente à flexão somente a armadura posicionada na sapata da vigota treliçada (fios do banzo inferior da treliça, armadura adicional e armadura complementar longitudinal) mas, neste trabalho, observou-se que os fios do banzo superior das treliças e a armadura de distribuição também colaboraram na resistência à flexão das peças.

6) A relação carga x deslocamento vertical no meio do vão das lajes foi relativamente bem estimada usando os critérios da norma brasileira [5] até a carga de escoamento nominal ($P_{y,nom.}$) nas peças da 1ª e 2ª séries, sendo que algumas peças tiveram flecha superior a $\ell_0/250$ em $P_{y,nom.}$.

7) O acréscimo da espessura da camada de reforço nas lajes reforçadas levou a considerável redução nos deslocamentos verticais em relação à laje de referência de cada série, para o carregamento relativo ao escoamento da armadura ou à flecha de $\ell_0/250$: 76% e 88%, nas peças reforçadas da 1ª série, 45% e 61% nas da 2ª série e 77% na laje da 3ª série de ensaio. Isto comprova a eficiência do reforço na redução do deslocamento vertical no estágio II.

8) Nesse tipo de reforço, o aumento da altura útil da peça se mostrou mais importante para o ganho de capacidade portante em relação à variação na taxa de armadura, pois as lajes L1-80 e L7/L7R-80 que possuíam alturas úteis médias e taxas de armaduras diferentes se comportaram semelhantemente tanto no estado limite último quanto em serviço. Nelas, uma diminuição de 56% na taxa de armadura foi compensada pelo acréscimo de apenas 13% na altura útil média.

5 Agradecimentos

À Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Procad – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica - pelo apoio financeiro.

Às empresas: Carlos Campos Consultoria Limitada; Lajes Santa Inês, Isoeste, Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Furnas Centrais Elétricas S. A.; IMPERCIA – Produtos Químicos para Construção; Perfinasa – Perfilados e Ferros Nossa Senhora Aparecida Ltda; Realmix – Concreto e Argamassa, por terem colaborado no fornecimento de diversos materiais e na realização de ensaios de caracterização.

6 Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. – NBR 5739/94, Rio de Janeiro, 1994.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método e ensaio. – NBR 8522/2003, Rio de Janeiro, 1984.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. – NBR 7222/94, Rio de Janeiro, 1994.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração. – NBR 6152/92, Rio de Janeiro, 1992.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- [06] PEREIRA, R. L. Estudo experimental de emenda em vigotas treliçadas. 2002. 196p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – UFG, Goiânia, 2002.