

Experimental study of solid RC slabs strengthened on the upper surface

Análise experimental de lajes de CA reforçadas pela face superior



C. O. CAMPOS^a
cc@carloscampos.com.br

L. M. TRAUTWEIN^b
leandromt@fec.unicamp.br

R. B. GOMES^c
rbggomes@gmail.com

G. MELO^d
melog@unb.br

Abstract

The current study presents the results of tests conducted in 5 reinforced concrete slabs (415 cm x 415 cm x 7 cm) in order to experimentally check the possibility of reinforcing their upper surface, as well as to assess the adhesion between the old and the reinforcing concrete layers in the slab. The main variables were the concrete and reinforcement strength deficiencies. Reference slab “L1” was tested until reaching the failure load, whereas the others were tested until reaching certain load limit, reinforced and retested until reaching the failure load. All slabs failed under bending. The strengthening increased the failure load by 30% in slabs reinforced at minimum reinforcement rate when they were compared to similar non-reinforced slabs, regardless of the original concrete strength. None of the tests conducted in the reinforced slabs showed detachments or evidence of adhesion loss between the old and reinforcing concretes.

Keywords: slab, reinforced concrete, strengthening, adherence.

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados dos ensaios de 5 lajes de concreto armado (415 cm x 415 cm x 7 cm) com o objetivo de se verificar experimentalmente a possibilidade de reforço pela face superior de lajes de concreto armado e também de se avaliar a aderência entre o concreto antigo da laje e a camada do concreto do reforço. As principais variáveis foram as deficiências da resistência do concreto e de armadura. A laje L1, de referência, foi ensaiada até a ruptura e as demais até um limite de carregamento quando foram reforçadas e reensaiadas até a ruptura. Todas as lajes romperam por flexão e nas lajes armadas com uma taxa mínima de armadura, o reforço elevou em até 30% a carga de ruptura em relação a uma laje similar sem reforço, independentemente da resistência original do concreto. Em todos os ensaios das lajes reforçadas não se detectou descolamentos ou evidências de perda de aderência entre o concreto antigo e o concreto do reforço.

Palavras-chave: laje, concreto armado, reforço, aderência.

^a Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda, Goiânia, GO, Brasil;

^b Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil;

^c Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil;

^d Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

1. Introdução

Ao longo dos anos a grande demanda pelo uso do concreto armado na construção civil, aplicado nas edificações e outras obras de grande porte, permitiu o aparecimento de diversos problemas de ordem executiva, de desempenho dos materiais componentes e até mesmo pela falta de manutenção. Desde que começaram a surgir as primeiras patologias nas obras de concreto armado tem-se buscado soluções mais adequadas, práticas e de baixo custo. Dentre os problemas mais frequentes em peças de concreto armado, podem-se ressaltar os ocorridos em lajes, com manifestações de grandes deslocamentos e aparecimento de fissuras. Os problemas em lajes causados por insuficiência na taxa de armadura, uso de um concreto inadequado e mesmo pela altura útil indevida da laje, podem resultar em restrições de utilização gerando eventual necessidade de um reforço.

Dependendo da técnica empregada, o reforço pode ser executado com os mais variados materiais. O reforço com concreto armado envolve decisões sobre diferentes aspectos tais como os tipos de cimento, granulometria de agregados e classes de aços. Se o reforço for com chapas de aço coladas ou com o uso de fibras de carbono, envolvem processos de preparações especiais para colagem e verificação de compatibilidades entre solicitações e deformações dos materiais. Ponderar sobre as possíveis causas e consequências associadas à solução proposta resulta na eficiência ou não do reforço executado. Toda decisão vai ser baseada neste diagnóstico. Se de caráter estrutural ou se de ações que envolvem processos de corrosão de armaduras ou de sinistros de incêndio ou abalos ou ainda recalques de fundações, etc. Para cada caso haverá uma ou mais soluções com o uso de materiais próprios e específicos.

A superfície que vai receber novo concreto deve se apresentar rugosa, sem a presença de nata de cimento do concreto antigo e sem a presença de pó, óleos ou graxas que impeçam esta ligação. As formas de preparo superficial vão desde os martelletes elétricos ou pneumáticos até o apicoamento manual, as fresadoras mecânicas, equipamentos de hidro demolição de altíssima pressão (75,0 MPa) e eventualmente o jato de areia seco ou úmido. O reforço de uma peça, pilar, viga ou laje pode implicar no acréscimo de um novo volume de concreto à peça antiga. Por considerações de projeto e cálculo, este aumento deve ser monolítico, em que concreto novo e antigo trabalham juntos.

Clímaco [1] aborda vários processos de possíveis testes de aderência; a tração direta, onde um corpo-de-prova especial é tracio-

nado pelas extremidades até a ruptura e a tração indireta, como o teste preconizado pelo Prof. Lobo Carneiro, conhecido como compressão diametral. No teste da verificação da resistência de aderência por tração direta implica que a resistência à tração direta no concreto não pode ser menor que a resistência de aderência. Em razão da qualidade superior, pela facilidade de controle dos processos e materiais, o micro concreto fluido, também denominado graute, é um material muito indicado nos serviços de reforço estrutural. O reforço com graute, produto à base de cimento, implica superfície rugosa e saturada. Os aditivos de qualquer natureza, aceleradores, retardadores, plastificantes ou superplastificantes são relevantes na elaboração de um material de recuperação. A sílica ativa, ao ser adicionado ao concreto, além de melhorar a zona de interface entre a pasta e o agregado, melhora por consequência a aderência, a impermeabilidade, a resistência à compressão axial e a própria coesão no concreto fresco, evitando exsudação (Aitcin, [2]). O reforço em laje pela face superior prevê a aplicação de uma camada de concreto de alto desempenho com espessura variável. Esta variação na espessura confere à camada de reforço uma forma de lente plano-convexa de bordos delgados, pequena espessura nos bordos e espessuras maiores no centro, calculada levando em conta o vão, taxa de armadura e solicitações.

Este trabalho tem por objetivo verificar e analisar experimentalmente o comportamento estrutural de lajes de concreto armado reforçadas na face superior, de através de ensaios em peças moldadas em escala real. Enfoca a eficiência do processo de reforço diante de duas patologias mais frequentes em lajes que são as deficiências na taxa de armadura e na resistência à compressão do concreto. É, também, pesquisada a aderência entre concreto antigo da laje e o concreto da camada de reforço (Campos [3]).

2. Materiais e programa experimental

Com o objetivo de analisar o comportamento estrutural de lajes maciças de concreto armado reforçadas pela face superior, foram ensaiados à flexão cinco modelos em escala real (415 cm x 415 cm x 7 cm). As lajes, simplesmente apoiadas e carregadas uniformemente na superfície superior, foram armadas nas duas direções e dimensionadas de acordo com a NBR 6118/2014 [4], com sobrecargas recomendadas para usos residenciais de 1,5 kN/m². As principais variáveis de ensaio foram taxa de armadura, ρ (0,076% e 0,164%), e a resistência à compressão do concreto, f_c (10 MPa e 20 MPa).

Tabela 1

Programa de ensaios e principais variáveis das lajes ensaiadas

Laje	ρ (%)	f_c (MPa)	1° ensaio	2° ensaio
L1	0,164	20	Ruptura	-
L2	0,164	20	Parada programada	Ruptura (L2R)
L3	0,076	20	Ruptura*	
L3a	0,076	20	Parada programada	Ruptura (L3aR)
L4	0,164	10	Parada programada	Ruptura (L4R)

* - Ruptura com carregamento aquém do previsto.

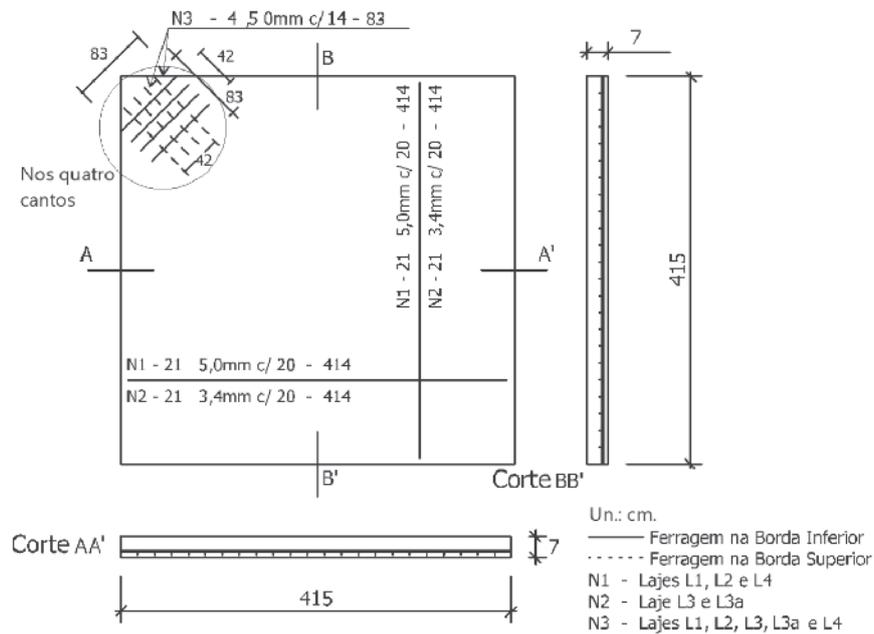


Figura 1
Dimensões das lajes e detalhamento das armaduras

A laje L1, de referência, foi ensaiada até a ruptura em um único ensaio. A laje L2 foi construída idêntica a L1 e as lajes L3 e L4 foram concretadas, apresentando patologias, uma com deficiência na armadura (L3, $\rho = 0,076$) e outra com deficiência na resistência do concreto (L4, $f_c = 10$ MPa). Foi construída uma laje adicional, L3a, que substituiu a laje L3 em função de sua ruptura no ensaio inicial. As lajes, L2, L3, L3a e L4, foram ensaiadas inicialmente até o carregamento limite de parada. O limite de parada do carregamento, definido para atingir um estado caracterizado por intensa fissuração e grandes deslocamentos, teve por base três parâmetros: a) deformação, na armadura principal, atingindo o limite de escoamento (10‰); b) abertura das fissuras com limites estabelecidas pela NBR 6118/2014 [4] e; c) deslocamentos verticais com a ordem de grandeza da espessura da laje. Após este ponto, com exceção da L3 que rompeu, as lajes foram descarregadas, reforçadas e ensaiadas até a ruptura.

O reforço foi realizado com aplicação de uma camada, de espessura variável, na face superior da laje, de concreto de alto desempenho, com espessuras de 2,0 cm nos bordos e 4,0 cm no centro. Em todas as lajes reforçadas, renomeadas de L2R, L3aR e L4R, o tipo do concreto utilizado no reforço e as dimensões da camada foram mantidos constantes. A Tabela 1 apresenta o programa de ensaios e as principais variáveis dos modelos em teste e a Figura 1 apresenta as dimensões nominais e detalhamento das armaduras das lajes.

O concreto utilizado na confecção das lajes L1, L2, L3 e L3a foi adquirido de empresa fornecedora de concreto pré-misturado, com uma previsão de resistência à compressão, para 21 dias, de 20 MPa. O concreto para a laje L4 com a resistência à compressão prevista para 10 MPa, na data do ensaio, foi elaborado no Laboratório de Estruturas – EEC/UFG, seguindo o traço previamente estudado. A Tabela 2 apresenta as proporções utilizadas na

Tabela 2
Composição do concreto usado nas lajes (unidade: kg/m³)

Materiais	L1, L2, L3 e L3a	L4
Cimento (CP II F - 32)	297	240
Areia artificial (granulito)	861	868
Brita zero (granulito)	-	197
Brita 1	960	782
Água	172	195
Plast./Retardador REAX RX 104 R	0,89	-
Traço unitário (em massa)	1:2,90:3,23:0,58	1:3,62:0,82:3,26:0,81
Expectativa de resistência	$f_{c21} = 20,0$ MPa	$f_{c21} = 10,0$ MPa

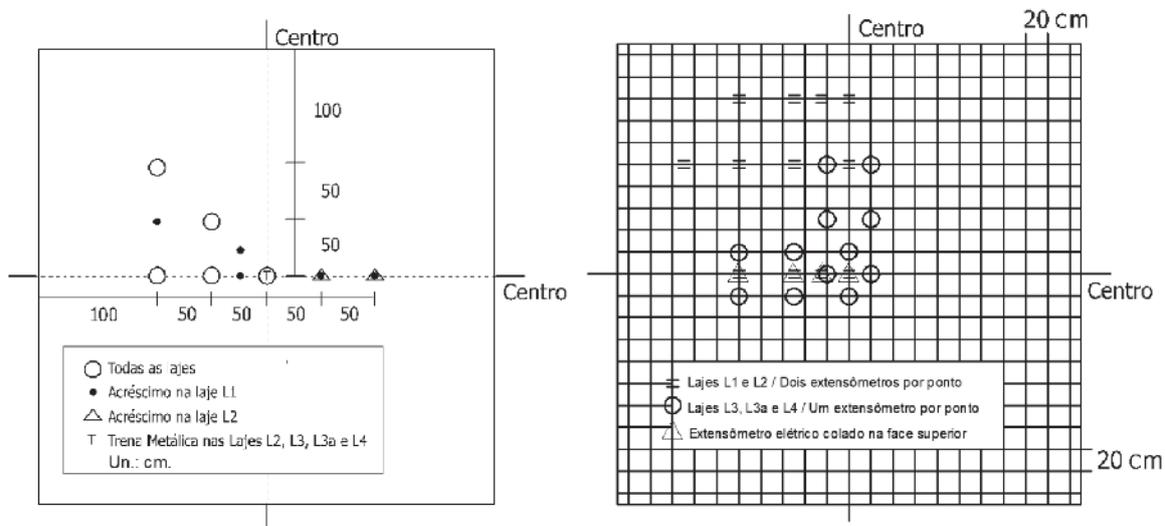


Figura 2 Posição dos deflectômetros usados e dos extensômetros elétricos fixados tanto nas armaduras de flexão quanto na superfície do concreto das lajes

dosagem do concreto para as lajes L1, L2, L3, L3a e L4. O concreto utilizado no reforço das lajes L2R, L3aR e L4R foi preparado no local de concretagem das lajes, seguindo traço previamente estudado. Em todas as concretagens foram moldados dez corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm X 300 mm para caracterização do material.

A instrumentação das lajes nos ensaios foi feita com deflectômetros mecânicos, analógicos, para medição dos deslocamentos

verticais, e extensômetros elétricos de resistência para medição das deformações no aço e no concreto. Em todos os ensaios, exceto no ensaio da laje L1, foi utilizada uma trena metálica, posicionada no centro da laje (face inferior), com a finalidade de obtenção aproximada do deslocamento central na ruptura, após a retirada dos deflectômetros mecânicos. Foram utilizados, em cada laje, no mínimo cinco deflectômetros da marca Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm, posicionados na superfície inferior. Devido à simetria, os deslocamentos foram medidas em apenas um quadrante, utilizando-se os aparelhos posicionados no eixo central e na diagonal das lajes. Também foram fixados, na armadura principal de flexão, extensômetros elétricos do tipo KLM PA 06 250BA 120L da Kiowa, em 12 pontos de cada laje. Nas lajes L1 e L2 foram utilizados dois extensômetros por ponto, diametralmente opostos, nos lados inferior e superior da armadura.



13	45	12	44	11	43	10	42
61	29	60	28	59	27	58	26
14	46	3	35	2	34	9	41
62	30	51	19	50	18	57	25
15	47	4	36	1	33	8	40
63	31	52	20	49	17	56	24
16	48	5	37	6	38	7	39
64	32	53	21	54	22	55	23

Figura 3 Esquema da colocação dos sacos e fotografia da laje L2R com carga de 1,0 kN/m²



Figura 4 Fotografia da laje L4R com carregamento de 12,0 kN/m²

Tabela 3

Composição do concreto usado no reforço das lajes (unidade: kg)

Materiais	L2R, L3aR e L4R
Cimento (CPV - ARI)	50,0
Areia artificial (granulito)	37,5
Brita zero (granulito)	72,5
Sílica ativa (SILMIX)	4,0
Água (litros)	20
Superplastificante (RX 3000A)	0,7
Traço unitário (em massa)	1:0,75:1,45:0,37
Expectativa de resistência	$f_{cT} = 50,0$ MPa

Nas demais lajes utilizou-se apenas um extensômetro por ponto, fixado no lado inferior da armadura. Na superfície do concreto, na face superior de todas as lajes, foram colados extensômetros elétricos, do tipo KLM PA 06 201BA 120L da Kiowa, em quatro pontos, para determinação das deformações. A Figura 2 apresenta a posição dos deflectômetros usados e dos extensômetros elétricos fixados tanto nas armaduras de flexão quanto na superfície do concreto das lajes.

A laje L1 foi carregada com sacos de areia de 0,50 kN e as demais lajes foram carregadas com sacos de 0,25 kN. Inicialmente cada laje foi marcada em 16 quadros de um metro quadrado. Cada etapa de carregamento ocupava um quadrante destes quadros. A sequência de colocação dos sacos seguiu a orientação previamente estabelecida de posicionar os sacos do centro para os bordos, conforme esquema apresentado no desenho da Figura 3. Para evitar o "efeito de arco" no carregamento, os sacos se tocavam apenas no interior de cada um dos 16 quadros. A Figura 4 apresenta a fotografia do carregamento total da laje L4R (após reforço), com 12 camadas e as quatro pilhas em cada quadro sem tocar as pilhas dos quadros vizinhos.

A confecção do reforço foi igual para as lajes reforçadas, L2R, L3aR

Tabela 4

Quantidade de testes de arrancamento nas lajes e nas peças de referência

Lajes	N° de testes	N° de testes nas peças de referência	
		Sem reforço	Com reforço
L2R	36	-	-
L3aR	28	6	6
L4R	23	6	11

e L4R. Inicialmente fez-se o apicoamento manual na face superior, com ponteiro e martelo, criando-se uma superfície rugosa e sem nata de cimento. A superfície apicoada foi lavada com água através de bomba de alta pressão para remoção de todo pó e areia solta. Com o uso de macaco hidráulico, as lajes foram retornadas à sua forma plana original, no momento no início dos ensaios. Esta operação foi controlada por linha esticada na face superior fixada no centro das laterais e com nivelamento feito com de nível ótico (NA K1 - WILD). O reforço foi realizado com aplicação de uma camada, de espessura variável, na face superior da laje, de concreto de alto desempenho, com espessuras de 2,0 cm nos bordos e 4,0 cm no centro. A Figura 5 mostra fotografias da execução do serviço de apicoamento manual e do lançamento da camada de reforço.

O concreto de alto desempenho utilizado para o reforço foi o mesmo para as três lajes reforçadas. Imediatamente após aplicação e acabamento da camada de reforço, ainda com o concreto fresco, a laje foi recoberta com mantas de anagem úmidas e protegidas com lona de polietileno, e mantida nestas condições para cura, durante sete dias. A Tabela 3 apresenta o traço do concreto utilizado no reforço.

Com a finalidade de avaliar a resistência de aderência entre a camada de reforço e o concreto antigo da laje, foram executados testes de arrancamento em pontos na camada de reforço nas lajes ensaiadas e em peças de referências. Foi moldado um par de peças de referência para cada uma das lajes L3aR e L4R com

**Figura 5**

Fotografias da execução do apicoamento manual e do espalhamento da camada de reforço

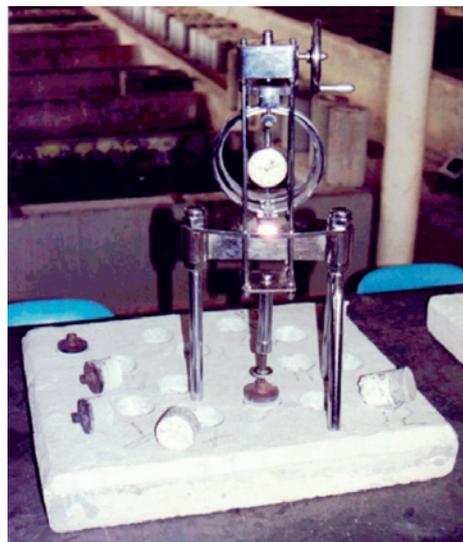
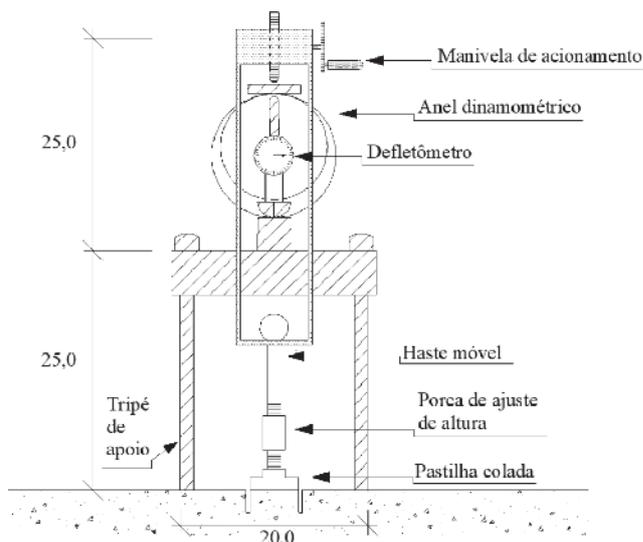


Figura 6
Esquema do dispositivo para teste de arrancamento e fotografia do aparelho (unidade: cm)

dimensões de 50 cm x 50 cm x 7 cm. Em uma peça de cada par continha apenas o concreto da laje, e na outra peça executou-se também a camada de reforço. Em ambas as peças utilizou-se o mesmo concreto, reforço e técnicas usadas nas lajes. Estas peças foram executadas com a finalidade de servirem de referência, sem a influência dos deslocamentos e das fissurações devido aos carregamentos impostos nas lajes. Foram executados 36 testes no reforço da laje L2R, 28 na laje L3aR e 23 testes no reforço da laje L4R, em pontos não danificados, escolhidos aleatoriamente. Nas peças de referência foram feitos um total de 29 testes. O procedimento do teste consistiu em serrar com “serra copo” com coroa diamantada, em meio à circulação de água, um círculo com diâmetro interno de 50 mm e profundidade até cerca de 30 mm abaixo da camada de reforço. A Tabela 4 apresenta em síntese a quantidade de testes de arrancamento executados.

Após limpeza e secagem do testemunho serrado, foi colada uma pastilha metálica para distribuir a tensão aplicada. Os testes foram realizados após o endurecimento da cola, em geral, no dia seguinte ao da colagem das pastilhas. A aplicação da força de arrancamento ocorre através de dispositivo mecânico, analógico, com incremento da força pelo acionamento de manivela com parafuso de rosca fina que comprime o anel dinamométrico duplo, que reage na pastilha colada sobre o reforço (Figura 6). A duração média do ensaio é de 5 minutos.

3. Resultados e discussões

A Resistência à compressão cilíndrica do concreto aos 7 dias, e no dia do ensaio da laje, além do Módulo de elasticidade do concreto na data do ensaio das lajes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5
Características do concreto utilizado nas lajes

Laje	Idade (dias)	$f_c^{(1)}$ (MPa)	$f_c^{(2)}$ (MPa)	$E_c^{(3)}$ (GPa)
L1	18	17,0	20,8	16,1
L2	21	17,6	20,7	17,1
L3	21	17,0	20,4	17,3
L3a	30	16,0	19,8	16,5
L4	17	9,6	12,4	15,7
Concreto do reforço				
L2R	16	44,9	51,9	36,0
L3aR	17	51,9	58,2	32,0
L4R	11	48,7	56,4	30,7

⁽¹⁾ Resistência à compressão cilíndrica do concreto aos 7 dias; ⁽²⁾ Resistência à compressão cilíndrica do concreto no dia do ensaio da laje;
⁽³⁾ Módulo de elasticidade do concreto na data do ensaio da laje.

Tabela 6

Principais características do aço

Laje	ϕ (mm)	f_y (MPa)	ε_y (%)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
L1	5,0	761,7	0,57	829,2	204,7
L2	5,0	734,2	0,56	771,6	200,3
L3	3,4	801,2	0,62	822,0	192,4
L3a	3,4	759,2	0,57	780,6	205,2
L4	5,0	777,2	0,58	841,2	201,4

Foram ensaiadas à tração axial, no mínimo, duas amostras por laje das armaduras de flexão, com a finalidade de determinar as resistências de escoamento e de ruptura, módulo de elasticidade e a deformação específica de acordo com a NBR 6892-1/2013 [5]. Em todos os ensaios as barras não apresentaram patamar de escoamento definido e a Tabela 6 mostra os principais resultados de caracterização do aço.

A laje L1, de referência, rompeu com um carregamento de 9,25 kN/m². As demais lajes, com exceção da L3, foram ensaiadas no primeiro ensaio até o carregamento de parada. As lajes L2 ($f_c=20,8$ MPa) e L4 ($f_c=12,4$ MPa), com taxa de armadura de 0,164%, tiveram cargas de parada de 6,50 kN/m² e 4,75 kN/m² respectivamente. Com o objetivo de provocar a máxima deterioração possível e como estava prevista uma carga de parada na faixa de 2,75 a 3,25 kN/m², a laje L3 foi carregada até 3,0 kN/m², quando ocorreu a ruptura. Os resultados da laje L3 foram mantidos para efeito de comparação. A laje L3a foi confeccionada em substituição da laje L3. A carga de parada para a laje L3a foi de 2,25kN/m². Devido ao fato de o reforço ter sido feito com espessura variável ao longo do plano da laje, a altura efetiva considerada foi medida na região de momentos máximos no centro das lajes. As cargas de ruptura das lajes L2R e L4R foram muito próximas entre si, com 12,25 kN/m² e 12,0 kN/m², respectivamente, e a laje L3aR, com baixa taxa de armadura, rompeu com 3,25 kN/m². A Tabela 7 apresenta um sumário e comparações das principais características e cargas de ruptura das lajes L1, L3, L2R, L3aR e L4R. As lajes L1 e L3 (sem reforço) e as lajes L2R, L3aR e L4R (reforçadas) romperam por flexão apresentando grandes deslocamentos verticais e escoamento da armadura na face inferior, principalmente na região central. Em todos os testes, além do escoamento, houve a ruptura das barras centrais. Foi observado,

após o término dos ensaios e a retirada do carregamento, que não havia indícios, na face superior, de esmagamento do concreto.

Pode-se observar, em relação à laje de referência, L1, que as lajes reforçadas L2R e L4R apresentaram cargas de ruptura superiores em 32 e 30% respectivamente, enquanto as das lajes L3 e L3aR foram significativamente inferiores. A laje L3 com resistência à compressão do concreto similar, e altura útil de apenas 14 % inferior, mas com uma taxa de armadura 50% menor que a da laje L1, rompeu por flexão com um carregamento 68 % menor do que a laje de referência, L1.

Com relação às lajes L2R e L4R, comparadas com a laje de referência L1, pode-se notar, por um lado, uma redução na taxa geométrica de armadura (de 0,14 % na L1 para 0,09 % e 0,10 % nas lajes L2R e L4R, respectivamente), e por outro lado, um incremento da resistência do concreto (de 20,8 MPa na L1 para 51,9 MPa e 56,4 MPa nas lajes L2R e L4R, respectivamente) e principalmente um aumento na altura útil (de 7,2 cm na L1 para 10,2 cm e 10,0 cm na L2R e L4R, respectivamente). O aumento da altura útil neste caso foi preponderante no ganho de 32 % e 30 % das cargas de ruptura das lajes L2R e L4R, respectivamente, em relação à laje L1.

A laje L3aR, com altura útil 48 % maior, com uma resistência à compressão do concreto na camada de reforço de 2,8 vezes superior e uma reduzida taxa geométrica de armadura em relação a laje L1, rompeu com apenas 35 % da carga de ruptura da laje L1, mesmo com a aplicação da camada de concreto do reforço. Este resultado mostra que o incremento da altura útil e o aumento da resistência à compressão do concreto na camada de reforço sem a devida existência de uma taxa mínima de armadura de flexão acarretam em um reforço inócuo.

Tabela 7

Sumário e comparações das principais características e cargas de ruptura das lajes L1, L3 e das lajes reforçadas L2R, L3aR e L4R

Laje	d (cm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_{li} / d_{L1}	ρ_{li} / ρ_{L1}	f_{cli} / f_{cL1}	$q_{ruptura}$	$q_{rup.Li} / q_{rup.L1}$
L1	7,1	0,14	20,8	1,0	1,0	1,0	9,25	1,0
L3	6,0	0,07	20,4	0,86	0,5	0,98	3,00	0,32
L2R	10,2*	0,09	51,9	1,43	0,64	2,49	12,25	1,32
L3aR	10,5*	0,04	58,2	1,48	0,28	2,80	3,25	0,35
L4R	10,0*	0,10	56,4	1,41	0,71	2,71	12,00	1,30

* $d_{máx}$ na região central reforçada.

- 1 – 2,0 kN/m²
- 2 – 4,0 kN/m²
- 3 – 5,5 kN/m²
- 4 – 6,0 kN/m²

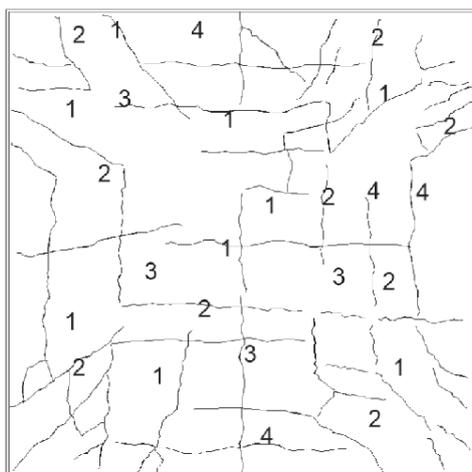


Figura 7
Esquema de fissuração da laje L1 e fotografia ilustrando a fissuração da laje L2R após ruptura

Uma comparação entre as lajes reforçadas L2R e L4R corrobora a importância da altura útil (*d*) como parâmetro mais importante na determinação da carga última das lajes reforçadas, para lajes com taxas de armadura similares (0,09% e 0,10% respectivamente). Apesar da laje L4, base da L4R, ter sido confeccionada com concreto de baixa resistência (*f_c* = 12,4 MPa), cerca de 60 % menor que o da laje L2 (20,7 MPa), o comportamento na ruptura foi bastante semelhante, carga última de 12,25 kN/m² para a laje L2R e de 12,0 kN/m² para a laje L4R denotando a pouca ou nenhuma influência do concreto da zona tracionada na capacidade de carga de ruptura da laje reforçada. Ressalte-se que as lajes L2 e L4 apresentaram comportamentos distintos durante o ensaio inicial até a carga de parada.

As primeiras fissuras observadas visualmente nas lajes L1 e L2 ocorreram com cargas de 2,50 kN/m² e 2,25 kN/m², respectivamente. Nas lajes L3, L3a, com baixa taxa de armadura, e L4, com

pequena resistência à compressão do concreto, as primeiras fissuras foram observadas com cargas de 1,25 kN/m² (L3) e 1,0 kN/m² (L3a e L4). As primeiras fissuras apareceram na região central em direção aos cantos. Em estágios avançados de carregamento ficam nitidamente definidas quatro áreas com as linhas de ruptura passando pelo centro em direção aos cantos. A Figura 7 mostra um esquema de fissuração da laje L1 e uma fotografia com a fissuração da face inferior da laje L2R.

A Figura 8 mostra um gráfico de carga x deslocamento central de todas as lajes. Em todas as lajes houve um aumento dos deslocamentos em função do acréscimo do carregamento. A laje L1, com altura efetiva igual a 7,1 cm, apresentou o maior deslocamento central entre todas as lajes, atingindo 12,5 cm para um carregamento de ruptura de 9,25 kN/m². Com exceção da laje L3, os valores dos deslocamentos centrais das demais lajes não reforçadas variaram de 6,5 cm (L3a, *d* = 6,0 cm) a 7,5 cm (L2, *d* = 6,3 cm), com cargas de parada de 2,25 kN/m² e 6,50 kN/m², respectivamente. A laje L3, que rompeu com 3,0 kN/m² apresentou um deslocamento central medido de 6,4 cm para uma carga de 2,75 kN/m². As lajes reforçadas L2R (*d* = 10,3 cm) e L4R (*d* = 10,0 cm) tiveram, na ruptura, deslocamentos verticais de 11,0 cm e 9,5 cm, respectivamente, enquanto a laje L3aR (*d* = 10,5 cm) rompeu com um deslocamento de 6,9 cm. Pode-se observar que aquelas confeccionadas com deficiência de armadura, L3 e L3a, e a laje reforçada, L3aR, apresentam os maiores deslocamentos com as menores cargas. Um segundo grupo com as lajes L1 e L2, sem deficiências de armadura e do concreto, e a L4, com deficiência do concreto, apresentam, para os mesmos carregamentos, deslocamentos em uma mesma ordem de grandeza e com valores intermediários quando comparados com as demais lajes. No terceiro grupo, as lajes reforçadas L2R e L4R, com comportamentos similares entre si, apresentam os menores deslocamentos para cargas maiores de 2,0 kN/m². Estes menores deslocamentos, ocorrem devido ao aumento da altura útil com a aplicação do concreto da camada de reforço. A laje L3aR, também com camada de reforço similar, não apresentou o mesmo perfil de deslocamento,

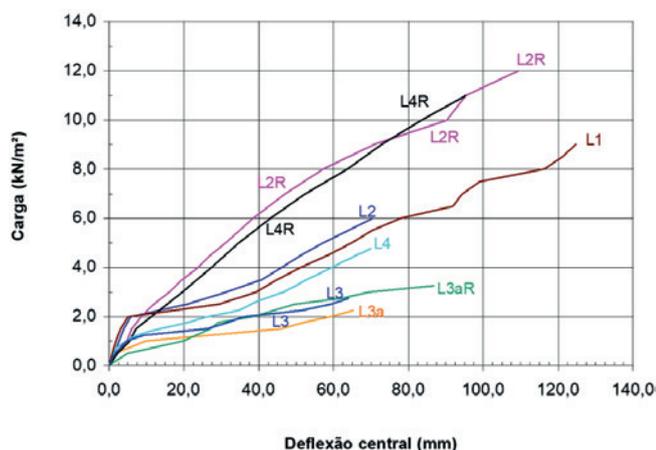


Figura 8
Gráfico carga x deslocamento vertical central de todas as lajes

Tabela 8

Sumário dos deslocamentos verticais centrais de todas as lajes

Laje	ρ (%)	d (mm)	f_c (MPa)	q (kN/m ²)	Desloc. (mm)	q (kN/m ²)	Desloc. (mm)	q _{parada} (kN/m ²)	Desloc. (mm)	q _{últ. leitura} (kN/m ²)	Desloc. (mm)	q _{ruptura} kN/m ²
L1	0,14	7,1	20,8	1,50	3,2	3,00	39,4	-	-	9,00	124,7	9,25
L2	0,15	6,2	20,7	1,50	4,0	3,00	31,3	6,50	62,3	-	-	-
L2R	0,09	10,2	51,9	1,50	6,1	3,00	16,0	-	-	12,00	109,6	12,25
L3	0,07	6,0	20,4	1,50	26,1	3,00	-	-	-	2,75	64,0	3,00
L3a	0,08	6,5	19,8	1,50	46,1	3,00	-	2,25	65,2	-	-	-
L3aR	0,04	10,5	58,2	1,50	27,0	3,00	62,0	-	-	3,25	65,2	3,25
L4	0,16	6,0	12,4	1,50	13,7	3,00	46,6	4,75	69,8	-	-	-
L4R	0,10	10,0	56,4	1,50	7,2	3,00	19,6	-	-	11,00	95,4	12,00

ρ (%) = taxa de armadura de flexão; q (kN/m²) = carga distribuída aplicada; q_{últ. leitura} (kN/m²) = carga distribuída aplicada correspondente à última leitura; Desloc. = deslocamento vertical.

provavelmente devido ao fato de ter sido confeccionada com deficiência da armadura de flexão.

A Tabela 8 apresenta um sumário dos resultados dos deslocamentos centrais de todas as lajes para carregamentos de 1,5 kN/m², 3,0 kN/m², carga de parada (variável para cada laje) e carga da última leitura antes da ruptura. As lajes L1 e L2, com taxas de armaduras de acordo com a norma, atendem aos requisitos da NBR 6118/2014 [4] quanto aos deslocamentos verticais máximos admissíveis. As lajes, L3 e L3a, com deficiência de armadura, a laje L4, com deficiência na resistência do concreto, alcançam, para carregamentos de 1,5 kN/m² (de projeto), deslocamentos superiores ao limite de norma ($l/500 = 8,0$ mm). As lajes reforçadas L2R, L3aR e L4R apresentaram deslocamentos, respectivamente de 40%, 32% e 53% inferiores, para o mesmo carregamento de parada das respectivas lajes não reforçadas, indicando a eficiência do reforço quanto ao deslocamento vertical central.

Ao se considerar apenas as lajes L1, L3 e L3a, com valores similares da resistência do concreto e da altura útil, pode-se perceber que a laje L1 com uma taxa de armadura igual a 0,14%, apresentou um deslocamento, para o carregamento de 1,5 kN/m², de apenas 3,2 mm, menos da metade do valor limite imposto por norma (NBR 6118/2014 [4]), enquanto as lajes L3 e L3a, com 50% de armadura da laje L1, apresentaram deslocamentos verticais de 8 a 14 vezes maiores.

A laje L3aR, com a camada do concreto de reforço conduzindo por um lado a uma nova altura útil maior ($d = 10,5$ cm) e uma resistência do concreto na região comprimida bastante superior ($f_c = 58,2$ MPa), e por outro lado com uma taxa geométrica inferior, apresentou valores de deslocamentos na mesma ordem de grandeza das lajes L3 e L3a, denotando a importância de uma taxa de armadura mínima no controle do deslocamento vertical, independentemente do reforço.

Uma comparação entre os deslocamentos centrais das lajes L1 ($f_c = 20,8$ MPa) e L4 ($f_c = 12,4$ MPa) evidencia a influência da resistência à compressão do concreto no comportamento dos deslocamentos verticais centrais. Uma redução de 60% da resistência à compressão do concreto acarretou deslocamentos 4,3 vezes maiores para um carregamento de 1,5 kN/m² e de apenas 18% maior para a carga de 3 kN/m², indicando, provavelmente um aparecimento precoce de fissuras na laje de menor resistência.

A laje L4R apesar de apresentar um deslocamento vertical maior do que a da laje L1 e menor do que a da laje L4, para um carregamento de 1,5 kN/m², apresenta deslocamentos consideravelmente menores do que as destas lajes para maiores carregamentos, demonstrando que o aumento da altura útil provocado pela camada de reforço supera, em estágios avançados de carga, a perda devido a influência da resistência à compressão do concreto.

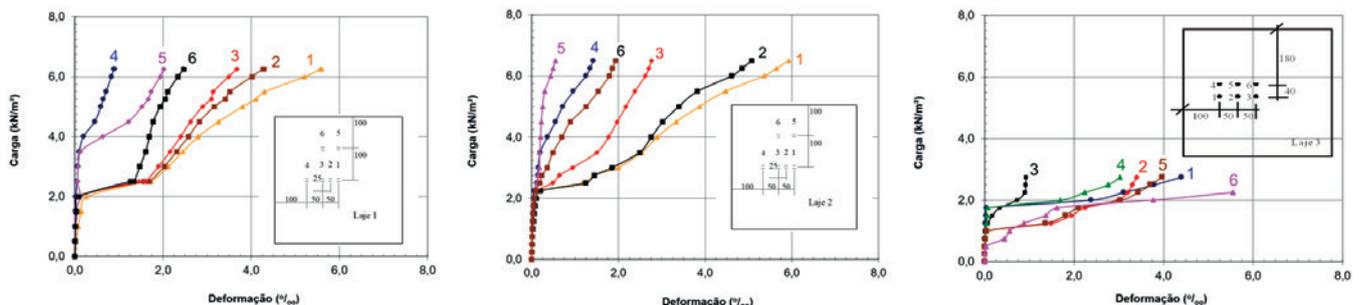
**Figure 9**

Gráfico de cargas x deformações das armaduras das lajes L1, L2 e L3

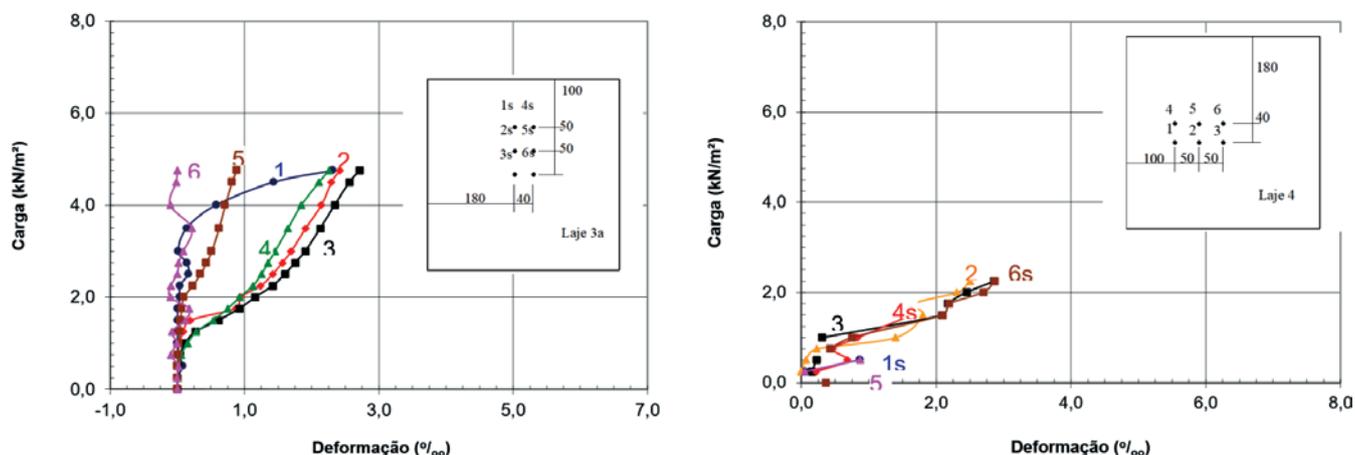


Figura 10
Gráfico de cargas x deformações das armaduras da laje L3a e L4



Figura 11
Fotografia dos testemunhos rompidos

As lajes reforçadas aumentaram o limite de carregamento em relação ao carregamento final, mas este fato não alterou o deslocamento vertical nos carregamentos iniciais, provavelmente devido ao estado de fissuração e deformação do aço provocado pelo ensaio inicial.

As medidas de deformações no aço obtidas através de extensômetros elétricos colados nas armaduras são apresentadas para cada laje ensaiada, exceto para as lajes reforçadas, pois no ensaio inicial os extensômetros foram solicitados e muitos se romperam durante os carregamentos até parada do ensaio. Para as lajes L1 e L2 utilizou-se dois extensômetros por ponto, um na face superior outro na inferior da barra instrumentada. As demais lajes, L3, L3a e L4, foram instrumentadas com apenas um extensômetro por ponto. As Figuras 9 e 10 apresentam os gráficos de cargas versus deformações das armaduras das lajes L1, L2 e L3 e L3a e L4, até o carregamento de ruptura (L1 e L3) ou de parada (L2, L3a e L4). Os extensômetros centrais apresentaram deformações equivalentes às de escoamento das barras como na laje L3.

A aderência entre o concreto antigo e concreto novo do reforço foi avaliada pelo ensaio de arrancamento, com pastilhas de aço coladas em recortes circulares de 50 mm de diâmetro, na superfície

Tabela 9
Resultados médios dos testes de arrancamento nas lajes e nas peças de referência

	L2R (MPa)	Nº de testes	S _d (MPa)	L3aR (MPa)	Nº de testes	S _d (MPa)	L4R (MPa)	Nº de testes	S _d (MPa)
Geral	0,96	33	0.17	0,88	28	0.21	0,86	23	0.19
Concreto antigo/ concreto novo	0,97	23	0.17	0,86	18	0.20	0,89	20	0.15
Concreto antigo	0,94	9	0.19	0,85	10	0.24	0,64	3	0.32
Peça de referência sem reforço	-	-	-	1,13	6	0.026	1,15	6	0.016
Peça de referência com reforço	-	-	-	1,02	6	0.015	1,07	11	0.022

S_d – the respective standard deviations.

do reforço. Foram realizados 87 testes de arrancamento para a verificação da aderência do concreto de reforço ao concreto antigo, além de 29 testes em peças de referência. Os resultados dos testes de arrancamento apresentaram-se de quatro modos distintos quanto ao local de ruptura no testemunho recortado: a) ruptura na interface do concreto antigo e concreto novo – CA/CN; b) ruptura no concreto antigo da laje – CA; c) ruptura no concreto novo do reforço – CN e, d) ruptura na cola, entre concreto e pastilha – COLA. A ruptura caracterizada como na interface concreto antigo e concreto novo – CA/CN - raramente ocorre integralmente no plano da interface entre os concretos. Na maioria dos casos a ruptura envolveu, em parte, a superfície da interface entre o concreto antigo e o novo e, no restante, envolveu uma superfície do concreto antigo. Em nenhum teste foi evidenciada uma superfície de ruptura envolvendo parte da interface entre o concreto antigo e o novo concomitantemente com uma superfície do concreto novo. A Figura 11 mostra fotografia dos testemunhos rompidos indicando os modos de ruptura.

Os resultados nas peças de referência apresentam variações, de 5% nas peças com reforço e de 2% nas peças sem reforço. Entretanto, os valores das tensões de aderência nas lajes ensaiadas apresentam diferenças de até quase três vezes entre si. A Tabela

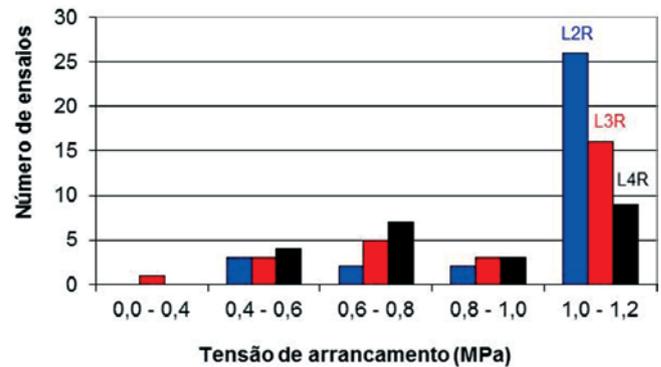


Figura 12

Histograma de variação de resultados dos testes de arrancamento nas lajes L2R, L3aR e L4R

9 apresenta os valores médios das tensões de arrancamento e os respectivos desvios padrão (Sd) dos testes, em geral, e por mecanismo de ruptura para cada uma das três lajes reforçadas, L2R, L3aR e L4R além dos resultados nas peças de referência. No cálculo da média geral não foram considerados os três pontos



Figura 13

Esquema do recorte de um corpo de prova com fissuras e falhas de concretagem (a), fotografias de uma parte demolida da laje L4R (b) e evidenciando aderência entre o concreto novo de reforço no concreto antigo de uma parte demolida típica das lajes (c)

em que a ruptura ocorreu na cola da pastilha durante os testes na laje L2R. Todos os testemunhos das peças de referência sem a camada de reforço, das lajes L3aR e L4R, romperam no concreto antigo com valores médios similares respectivamente de 1,13 MPa e 1,15 MPa. Nas outras duas peças de referência, com a camada de reforço, as tensões médias de aderência foram de 1,02 MPa e 1,07 MPa, respectivamente com ruptura predominante na interface do concreto novo com o concreto antigo. Para a laje L2R a variação da tensão de arrancamento dos testes foi de 0,49 MPa a 1,08 MPa e na laje L3aR os resultados foram entre 0,36 MPa e 1,07 MPa, enquanto que na laje L4R os valores variaram de 0,43 MPa a 1,03 MPa. Apesar de os resultados das lajes indicarem limites mais amplos, ocorre uma concentração significativa de valores na faixa de 1,0 MPa a 1,1 MPa (Figura 12).

Os valores dos testes de arrancamento realizados nas lajes reforçadas podem ser justificados devido à existência de fissuras de flexão, na face inferior da laje, ocasionadas durante a realização dos ensaios iniciais, até o carregamento de parada, e nos finais, de ruptura. Essas fissuras podem ter atingido, pelo recorte do testemunho, não somente no concreto antigo, como também, eventualmente, a camada do concreto de reforço. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados dos testes de aderência é a possível existência de algumas pequenas “brocas” entre a camada de concreto novo utilizado para o reforço e o concreto antigo, existente da laje. Considerando a possível influência dos danos causados nas lajes após a aplicação do carregamento de ruptura (fissuras de flexão brocas, etc.), os resultados da tensão de aderência nos testes realizados nas lajes reforçadas, evidenciados na Figura 12, de 1,0 MPa a 1,10 MPa, indicam uma tensão de aderência compatível com os resultados dos testes de arrancamento feitos nas peças de referência, na ordem de 1,02 MPa a 1,15 MPa (Tabela 9). Deve-se ressaltar que os testes de aderência foram realizados em lajes rompidas com cargas até oito vezes e deslocamentos verticais de até nove vezes superiores à carga de projeto e deslocamento vertical limite.

As Figuras 13a e 13b apresentam um desenho esquemático do recorte de um corpo-de-prova atingindo as fissuras de flexão na laje e uma fotografia de parte demolida da laje L4R enfocando a presença de “brocas”, respectivamente. Deve-se destacar que estas “brocas” não foram observadas na maioria significativa das partes demolidas das lajes. Durante a realização destes ensaios não foi observado, visualmente, nenhum sinal de deslocamento da camada do concreto novo de reforço. Na maioria significativa das partes das lajes demolidas observou-se, visualmente, uma perfeita aderência entre os dois concretos (Figura 13c).

4. Conclusões

Nas lajes armadas originalmente com uma taxa mínima de armadura, segundo a NBR 6118/2014[4], a aplicação da camada de reforço elevou em até 30 % a carga última de ruptura, em relação a uma laje similar sem reforço, (lajes L2R e L4R). Nas lajes com insuficiência de armadura, executadas com uma taxa de armadura no valor da metade do mínimo de norma, o reforço, apesar de elevar a carga última de ruptura, não demonstra o mesmo grau de eficiência, pois é limitada obviamente pela quantidade de armadura (laje L3a). Este limite de eficácia do reforço pela face superior

em função da quantidade de armadura pode simbolizar alguns casos de viabilidade ou não da execução do reforço de lajes por este processo. Todas as lajes ensaiadas, reforçadas ou não, apresentaram grande ductilidade até a ruptura, com deslocamentos maiores que a altura útil, entretanto tiveram uma ruptura com o rompimento da armadura na região central.

As lajes com armadura mínima de norma, quando reforçadas apresentam menores deslocamentos verticais para carregamentos acima das cargas de projeto ou do aparecimento da primeira fissura. Já as lajes com deficiência de armadura, mesmo quando reforçadas, apresentaram sempre grandes deslocamentos. As lajes L1 e L2, com taxas de armaduras de acordo com a norma, atendem aos requisitos da NBR 6118/2014 quanto a deslocamentos limites. As lajes, L3 e L3a, com deficiência de armadura e a laje L4, com deficiência na resistência do concreto, atingem, para cargas de 1,5 kN/m² (de projeto), deslocamentos verticais superiores ao limite de norma de l/500 (8,0 mm). As lajes reforçadas L2R, L3aR e L4R apresentaram deslocamentos verticais no mínimo de 30% inferiores, para o mesmo carregamento de parada das respectivas lajes não reforçadas, denotando a eficiência do reforço quanto ao deslocamento vertical central.

As várias medidas de tensão de aderência entre a camada de concreto do reforço e o concreto base da laje, indicam uma tensão da ordem de 1,0 MPa. Não foi possível o estabelecimento de uma aderência mínima. Todo cuidado dispensado a uma boa aderência é no intuito de se criar um reforço monolítico com o concreto antigo da laje base. Em todos os ensaios de lajes reforçadas não se percebeu descolamento generalizado de áreas da camada de reforço. Até nos fragmentos da demolição das lajes ensaiadas notava-se a perfeita aderência entre os dois concretos.

5. Agradecimentos

A Realmix, a IMPERCIA S.A, Empresa Carlos Campos Consultoria Ltda que disponibilizaram parte dos materiais utilizados e pela ajuda na realização dos ensaios de caracterização do concreto. Ao CNPq e o Procad/Capes pelo apoio institucional.

6. Referências bibliográficas

- [1] CLÍMACO, J. C. T., Repair of structural concrete involving the addition of new concrete, Ph.D. Thesis, Polytechnic of Central London, London, August, 1990, 239 p.
- [2] AITCIN, P. C., High-Performance Concrete. London, U. K., Editora E & FN SPON, 1st Edition, 1998, 591 p.
- [3] CAMPOS, C. O., Análise experimental de lajes de concreto armado reforçadas pela face superior. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Setembro, 2000, 131 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 221 p.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6892-1– Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013, 70 p