



ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO ARMADURA DE CISALHAMENTO

Antonio Wagner de Lima

wagnercivil@yahoo.com.br

Professor do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB

Rua José Antônio da Silva, 300, Bairro Jardim Oásis, CEP: 58.900-000. Cajazeiras – PB, Brasil

Gilberto Gomes

ggomes2007@gmail.com

Professor do Departamento de Engenharia civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil.

Carlos Eduardo Luna Melo

carlosluna@unb.br

Professor do Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil.

Guilherme Soares de Azevedo Melo

melog@unb.br

Professor do Departamento de Engenharia civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil.

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

Resumo. *O aumento no número de pesquisas realizadas sobre o reforço ao cisalhamento de estruturas de concreto armado tem se justificado pela necessidade de se conhecer com propriedade o comportamento desse sistema estrutural, em especial o caso de reforço ao cisalhamento em lajes com laminados de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC). No Brasil, tem sido bem mais comum o estudo de reforço de estruturas de concreto armado com laminados de PRFC em outros elementos estruturais como vigas e pilares. Por outro lado, os métodos teóricos disponíveis para análise de estruturas de concreto armado*

ainda apresentam imprecisão na estimativa da resistência ao cisalhamento e do modo de ruptura das lajes lisas face ao punçionamento. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo experimental e analítico de lajes lisas de concreto armado reforçadas ao punçionamento com a utilização de PRFC como armadura de cisalhamento, objetivando avaliar o comportamento, a resistência ao cisalhamento, bem como a eficiência da técnica empregada para combate ao cisalhamento no elemento de laje. Para isso, uma avaliação da técnica de reforço adotada foi elaborada a partir de um programa experimental composto de quatro modelos de conexão laje-pilar, enquanto para o estudo analítico fez-se uma adaptação das recomendações dos principais códigos acerca do dimensionamento à punção (ABNT NBR 6118:2007, ACI 318:2011 e EUROCODE 2:2004), considerando adaptações recomendadas no ACI 440.2R. São apresentados alguns exemplos a fim de ilustrar e validar o estudo. Frente ao estudo realizado, os resultados obtidos mostraram que tanto as adaptações das prescrições normativas para estimativa das cargas de rupturas quanto a técnica aplicada se mostraram eficientes.

Palavras chave: *Punção, PRFC, reforço ao cisalhamento.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A grande utilização de estruturas convencionais em concreto armado, comumente compostas por lajes, vigas e pilas em sua superestrutura, fez surgir, sobretudo nos últimos anos, um novo olhar para nossas construções. Quando nos reportamos ao surgimento de manifestações patológicas, entramos no campo das inúmeras incertezas dos agentes causadores, dentre os quais saudamos os erros de projeto e/ou execução, dúvidas sobre a estabilidade, provocadas pelas próprias manifestações patológicas e possíveis alterações das cargas de serviço. Doravante tais premissas, todas são situações que nos imputa a intervenções de reforço e/ou recuperação estrutural.

No tocante ao que se reporta a punção em lajes lisas, objetivo deste estudo, a grande maioria dos modelos de intervenções é de cunho invasivo e normalmente alteram sua estética, modificando a geometria do elemento estrutural.

A utilização de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento, no intuito de aumentar a capacidade de cargas dos elementos de lajes se mostra como uma alternativa de fácil e de rápida aplicação, e que ainda traz a vantagem de não alterar a estética da peça. A eficiência técnica desta metodologia tem sido comprovada por pesquisas experimentais nos últimos anos, conforme comprovou Santos (2014).

Esta metodologia consiste em costurar a laje, na região onde ocorre o punçionamento, de modo que a manta de PRFC resista aos esforços de cisalhamento sofrido pelo elemento estrutural. O polímero é colado na superfície do concreto, através de furos que transcendem as lajes, utilizando uma resina epóxica específica para tal finalidade. É de grande importância que se garanta a devida ancoragem das tiras de PRFC, assim como o preenchimento dos furos após a aplicação do reforço. Este preenchimento deve ser feito com material que apresente módulo de elasticidade semelhante ao do substrato.

Diante do exposto, é objetivo desta pesquisa é avaliar, experimentalmente e analiticamente, o comportamento e a resistência ao cisalhamento de lajes lisas de concreto

armado, utilizando como suporte aos esforços de cisalhamento, polímeros reforçados com fibra de carbono.

Foram confeccionados e ensaiados 04 (quatro) modelos locais de conexão laje-pilar, dos quais 03 (três) foram reforçados ao cisalhamento através da técnica da costura com PRFC e 01 (um) modelo foi tratado como controle e não reforçado. A confecção e ensaio dos modelos foram feitos no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília – UnB.

Uma vez realizados os ensaios foi feita uma análise dos resultados experimentais a fim de avaliar o comportamento estrutural dos modelos quanto ao modo ruptura e sua capacidade de carga.

Os resultados obtidos nos ensaios, conforme ilustra a Tabela 3, foram confrontados com as estimas apontadas pelas prescrições normativas estabelecidas nos códigos: ABNT NBR 6118:2007, *ACI 318:2008* e *EUROCODE 2:2004*.

Ressalta-se que todos os estudos analíticos apresentados pelos códigos descritos, quanto ao estudo da punção, foram alterados segundo recomendações do *ACI 440 2R:02*, que trata de reforço em estruturas de concreto armado utilizando polímeros reforçados com fibras.

1.2 Justificativa

A crescente utilização desta concepção estrutural aliada ao risco de ruptura frágil ao qual se submete este tipo de estrutura tem proporcionado um aumento no número de pesquisas a cada ano por métodos de reforço ao cisalhamento em lajes lisas de concreto armado.

A utilização de técnicas de resistência ao funcionamento convencionais consiste na utilização de capiteis, podendo ser de concreto ou metálico, ou com o aumento na taxa de armadura de flexão. Outra forma de realizar este reforço é com a utilização de parafusos de alta resistência, porém a ancoragem do reforço tem grande influência no desempenho do sistema de reforço.

Deste modo, a utilização do sistema de reforço ao cisalhamento utilizando PRFC se mostra uma alternativa bastante eficiente, uma vez que os resultados obtidos mostraram ganho na capacidade de carga de até 56% frente ao modelo de controle, técnica simples, fácil e rápida aplicação além de possuir um sistema de ancoragem bastante eficiente.

A Figura 1 mostra alguns sistemas estruturais utilizados em lajes de concreto, ilustrados por Santos (2014).

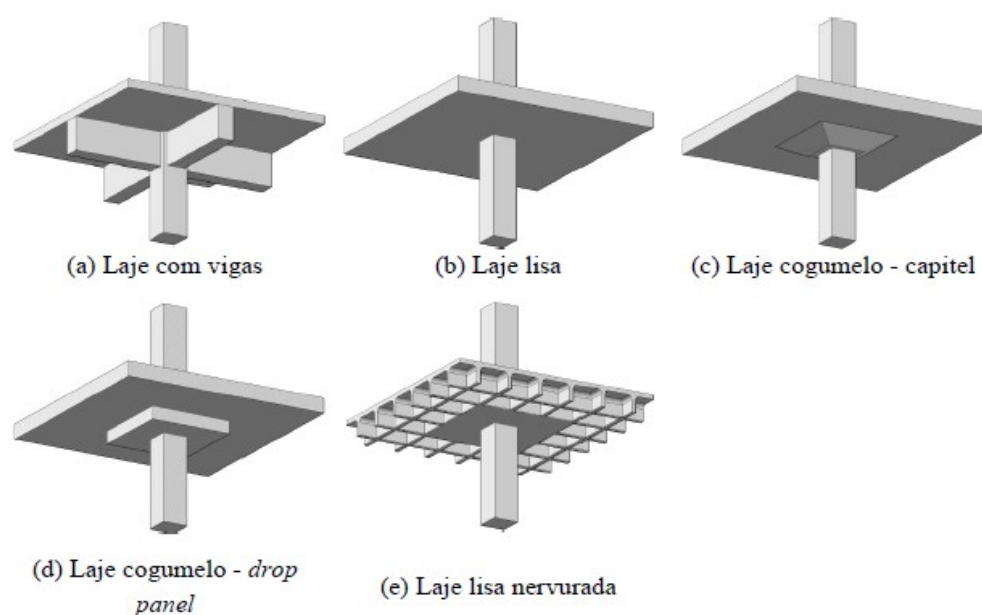


Figura 1. Sistemas Estruturais para lajes de concreto armado

2 PUNÇÃO

Segundo a ABNT NBR 6118/2007, punção é um Estado Limite Último, no entorno de forças concentradas, provocado por cisalhamento.

Neste tipo de concepção estrutural, as lajes se apoiam diretamente nos pilares e não há utilização de vigas.

De acordo com LIMA (2012), punção é caracterizada pela atuação de uma força concentrada em uma determinada área de um elemento estrutural plano e ocorre conforme ilustra a **Figura 2**. A ação desta força implicará no surgimento de elevadas tensões na região que a secundam, podendo causar a ruptura do elemento estrutural - ruptura local - ou mesmo a ruína da estrutura - ruptura total da estrutura.

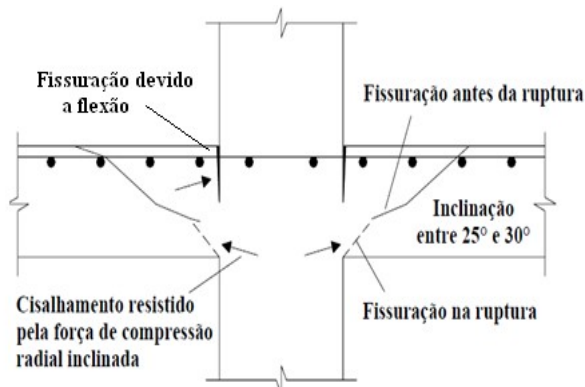


Figura 2. Modo de ruptura de uma laje lisa sem armadura de cisalhamento-CEB-FIP/MC1990

Dentre as principais vantagens desse tipo de estrutura, podemos citar a possibilidade de variação nos ambientes da edificação. Uma vez que se apresenta com tetos lisos, um pavimento sem vigas possibilita maior flexibilidade na hora de definir ambientes internos ou futuras alterações de *lay-out*. O sistema também permite a simplificação das formas e do cimbramento, simplificação das armaduras, reduzindo custos com mão-de-obra e materiais.

Dentre as desvantagens do sistema estrutural com lajes lisas, podemos ressaltar o aumento dos deslocamentos transversais da estrutura, a instabilidade global do edifício às ações laterais e, principalmente, a possibilidade da ruptura por punção, uma vez que esta pode se propagar e provocar a ruína parcial ou total da estrutura por colapso progressivo.

A ruptura por cisalhamento é caracterizada pela fratura brusca da laje ao longo de planos inclinados que se estende, a partir da interface laje-pilar, por toda espessura da laje. Em caso de pilares quadrados, a ruptura por punção assume forma de tronco de pirâmide, conforme **Figura 3**.

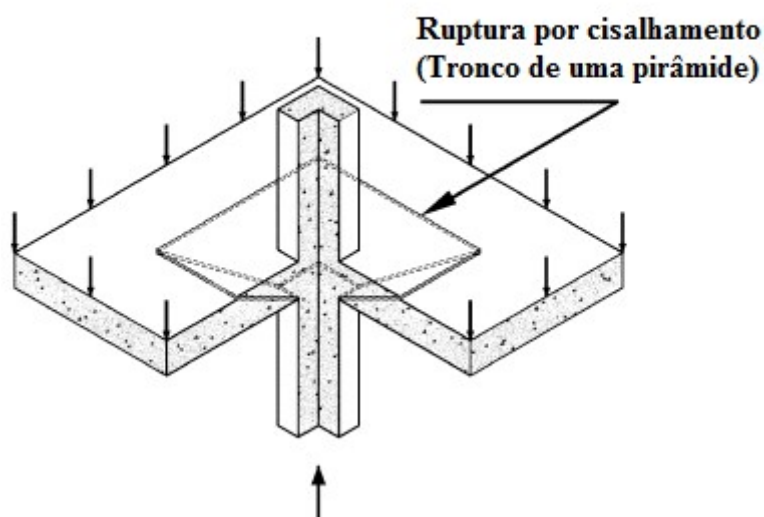


Figura 3. Configuração de ruptura por cisalhamento com pilar quadrado

Para se evitar a ruptura, é necessário que as tensões cisalhantes na região próxima ao pilar sejam amenizadas, e isso pode ser feito com o aumento da espessura da laje de uma forma completa, ou com uso de capitéis na região onde ocorre o esforço cisalhante, ou ainda com o aumento da capacidade resistente da laje, fazendo-se uso de concreto de alta resistência ou armadura de cisalhamento.

Nos últimos anos, têm sido grandes os esforços dedicados à produção de materiais “alternativos” de reforço de estruturas de concreto armado, dentre os quais se destacam os polímeros reforçados com fibras (PRF), na tentativa de restabelecer as condições de uso das estruturas ou adaptá-las a novas condições de utilização. Na grande maioria dos casos, esses materiais têm sido utilizados para melhorar o desempenho de pilares de estruturas viárias, aumentando a ductilidade através do confinamento imposto pelo “encamisamento” das peças com os tecidos flexíveis ou com os laminados de fibras poliméricas aderidos ao substrato do concreto utilizando resina epóxica. Outra utilização comum do material é para o caso de vigas e lajes, como reforço de flexão, sendo necessários, em todos os casos, cuidados especiais,

principalmente, devido aos problemas de deslizamentos na interface compósito/concreto e a aspectos relacionados à durabilidade das peças reforçadas.

A utilização de compósitos de PRFC como reforço em estruturas de concreto armado tem sido bastante estudada em todo o mundo, com ênfase maior no reforço à flexão. No entanto, alguns estudos da utilização de laminados de PRFC no reforço ao cisalhamento em lajes lisas já estão sendo realizados. As conexões laje-pilar nessas estruturas são, geralmente, a parte mais crítica pelo fato de estarem, nesta região, com grande concentração de esforços de cisalhamento.

As técnicas tradicionais para reforçar as conexões laje-pilar de concreto armado quanto ao cisalhamento incluem o uso de chapas de aço e parafusos, pinos de aço (*stud*) e o aumento da espessura da laje como um todo ou apenas na região próxima ao pilar (*capitel*). Esses procedimentos, variando em cada caso, podem apresentar alguns inconvenientes como: difícil instalação, desagradável esteticamente e, principalmente, demanda de tempo impróprio para aplicação do reforço na estrutura em uso.

A utilização de laminados de PRFC como alternativa para aumento da capacidade de carga resistente à punção em lajes lisas é bastante simples, requer pouco tempo para aplicação e os laminados não são susceptíveis à corrosão e não alteram a estética da laje.

A técnica consiste em se aplicar a manta de PRFC, através de furos verticais na laje, de modo a se formar um loop completo, fazendo com que uma tira de PRF atravesse a laje por entre dois furos adjacentes, de modo a costurá-la conforme mostrado na na **Figura 4**.

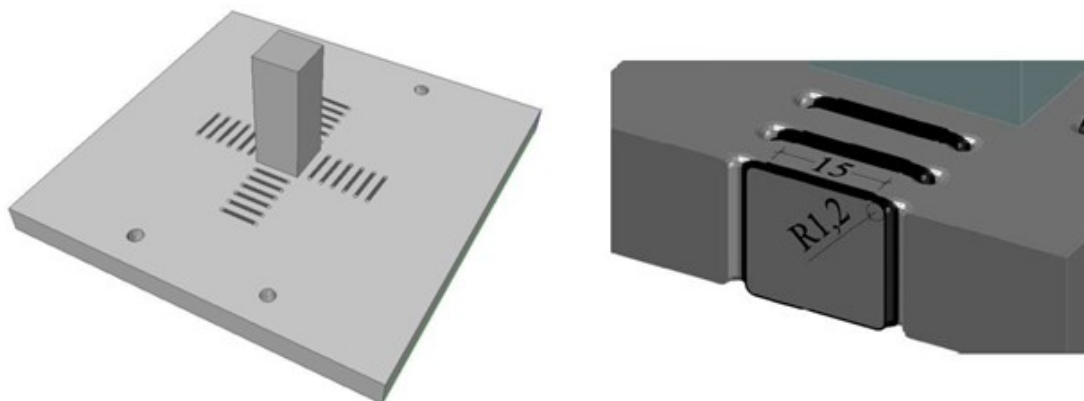


Figura 4. Protótipo de laje reforçada com PRFC e corte ilustrando o detalhe do reforço

2.1 Reforço ao cisalhamento utilizando PRFC

O desenvolvimento da técnica de utilização de PRFC como reforço ao cisalhamento em estruturas de concreto, neste caso em específico para combate ao puncionamento, tem se ganhado força nos últimos anos devido a alguns aspectos que se são peculiares. Sissakis (2002) desenvolveu a técnica Stitich, que consiste em passar tiras de PRFC entre furos paralelos a espessura da laje.

A técnica consiste em confeccionar tiras de PRFC de espessura igual ou inferior ao diâmetro dos furos previamente feitos na laje. Para a confecção do polímero, a fibra de carbono deve passar por impregnação com resina epóxica apropriada, estabilizadora do sistema PRFC. Na aplicação do produto, deve-se atentar para todas as recomendações do

fabricante, tanto no cuidado com o manuseio das resinas impregnastes com tanto do transpasse que garantirão a ancoragem.

3 RECOMENDAÇÕES DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA CÁLCULO DA VERIFICAÇÃO DE PUNÇÃO UTILIZANDO PRFC COMO ARMADURA

O cálculo ou verificação da capacidade de carga de lajes lisas de concreto armado ao puncionamento, utilizando PRFC como armadura de cisalhamento, não é abordado em nenhuma instrução normativa. No entanto, a presente pesquisa se propõe a uma adaptação, tanto nas recomendações constantes na norma brasileira – ABNT NBR 6118:2007- Projeto de Estruturas de Concreto, quanto nas principais prescrições normativas internacionais – ACI 318:2008- *American Building Code for Reinforced Concrete* e EUROCODE 2:2004- *Design of Concrete Structures*, para o estudo de punção em lajes lisas de concreto armado. As verificações que se seguem só puderam ser realizadas seguindo Recomendações do ACI 440 2R:02- *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*.

3.1 ACI 440 2R:02 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures

Este manuscrito fornece orientação para a seleção, projeto e instalação de sistemas de Polímeros Reforçados com Fibras-FRP colados externamente para o reforço das estruturas de concreto. O ganho na resistência ao cisalhamento fornecido pela utilização de laminados de FRP deve ser limitado conforme especificações desta norma.

A resistência ao cisalhamento nominal de um elemento estrutural reforçado com laminados de FRP é determinada pela somatória das contribuições do reforço de FRP, do aço e do concreto, conforme equação 01.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + V_{FRP}) \quad (01)$$

Com o intuito de se manter a integridade do concreto por ele confinado, esta norma limita a deformação final do PRF em 0,004.

O fato de haver esta limitação da deformação última do reforço condiciona a tensão máxima no PFR de acordo com a equação 02 descrita a baixo.

$$f_{PRF} = 0,004 \cdot E_{PRF} \quad (02)$$

onde:

f_{PRF} é a tensão do PRF

E_{PRF} é o módulo de elasticidade do PRF

3.2 ACI 318R:08 - Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary

De acordo com o ACI 318:2008, a resistência ao puncionamento em lajes lisas de concreto armado com pilares internos quadrados e carregamento centrado, deve ser analisada com a verificação das tensões cisalhantes em um perímetro de controle afastado $d/2$ da face do pilar ou das extremidades da área carregada, conforme Figura 5.

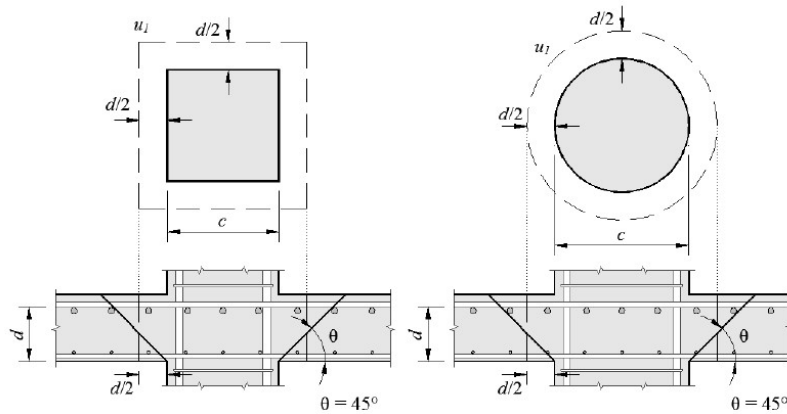


Figura 5. Verificação da resistência à punção (ACI 318:08)

A resistência à punção de uma laje sem armaduras de cisalhamento é expressa pela equação 03, a partir do valor mínimo obtido.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \\ \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \frac{1}{12} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \\ \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \end{array} \right. \quad (03)$$

sendo:

β_c a razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

α_s é uma constante que assume valor igual a 40 para o caso de pilares internos ;

f'_c a resistência à compressão do concreto, e é limitada em no máximo 69 MPa;

u_1 é o comprimento de um perímetro de controle à $d/2$ da face do pilar;

d é a altura útil da laje;

Para o caso da utilização de armaduras de cisalhamento, o código recomenda a verificação de três possíveis modos de ruptura: superfície de ruptura cortando as armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$); superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$); e ruptura

por esmagamento da biela comprimida nas proximidades do pilar ($V_{R,max}$), detalhados conforme **Figura 6**.

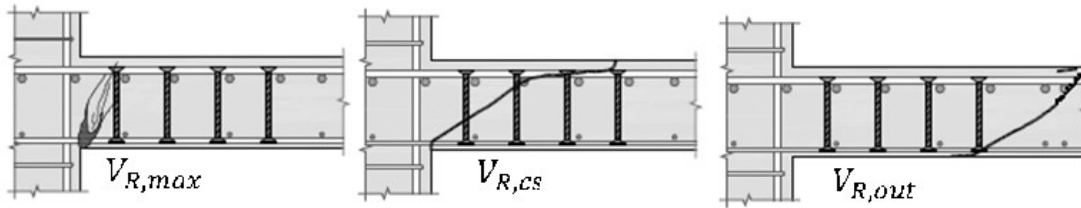


Figura 6. Modos de rupturas (ACI 318:08)

$V_{R,cs}$ → Superfície de ruptura cortando as armaduras de cisalhamento;

$V_{R,out}$ → Superfície passando fora da região reforçada;

$V_{R,max}$ → Ruptura por esmagamento da biela comprimida do concreto nas proximidades do pilar.

$$V_{R,CS} = V_{R,C} + V_{R,S} \quad (04)$$

$$V_{R,CS} = \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d\right) + \left(\frac{d}{s_r} \cdot A_{s,w} \cdot f_{y,sw}\right) \quad (05)$$

$$V_{R,out} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad (06)$$

$$V_{R,max} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } S_r \leq 0,5 \cdot d \\ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } 0,5 \cdot d < S_r < 0,75 \cdot d \end{cases} \quad (07)$$

$$V_{R,max} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } S_r \leq 0,5 \cdot d \\ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } 0,5 \cdot d < S_r < 0,75 \cdot d \end{cases} \quad (08)$$

onde:

A_{sw} → é a área de armadura de cisalhamento por camada de reforço;

S_r é a distância entre camadas, ressaltando que d/s_r deve ser menor ou igual ao número total de camadas de armaduras de cisalhamento;

$f_{ys,w}$ é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, limitada pelo ACI 440 em 290MPa, devido a deformação última do PRFC $\leq 4\%$;

u_{out} é o perímetro externo definido à uma distância $d/2$ da camada mais externa de armaduras, conforme indicado na **Figura 7**.

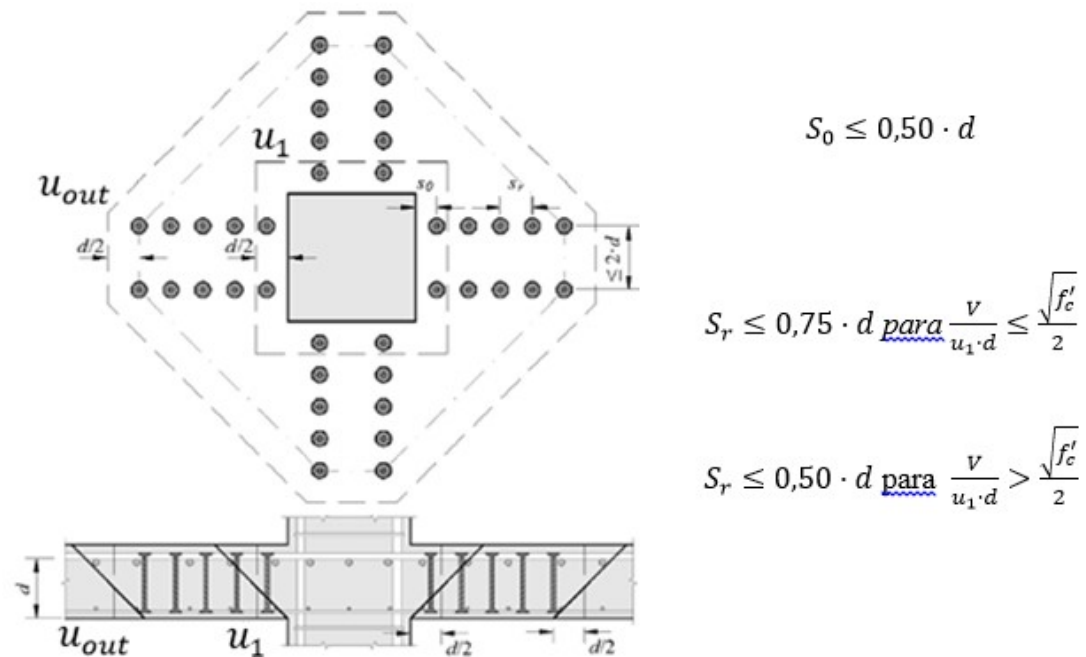


Figura 7. Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (ACI 318:08)

3.3 EUROCODE 2:2004 – Design of concrete structures

O *Eurocode 2* (2004) recomenda que a verificação da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento deve ser feita em um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada, conforme indicado na **Figura 8**. Já a estimativa da resistência à punção de uma laje desse tipo pode ser feita utilizando-se a Equação 09.

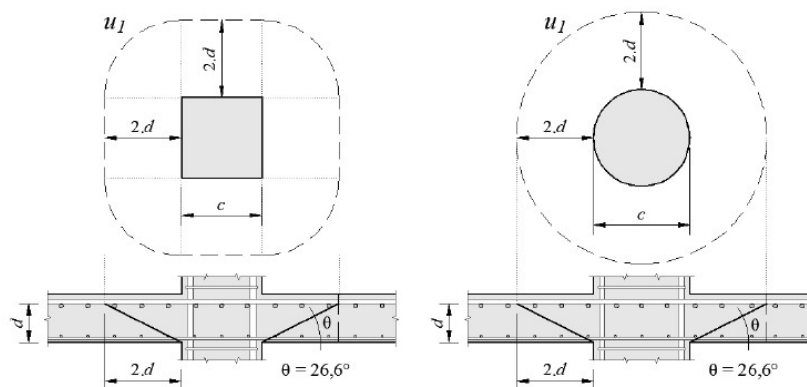


Figura 8. Verificação da resistência a punção (EC 2:2004)

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad (09)$$

Sendo:

d → a altura efetiva da laje;

f'_c → é a resistência à compressão do concreto, que segundo o *Eurocode 2:2004* deve ser menor que 90 Mpa.

ρ → é a taxa de armadura de flexão média da laje.

ξ → é o Size effect, assumido como $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ (d em mm);

u_1 → é o comprimento do perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar.

Nos casos de lajes com armaduras de cisalhamento, esta norma também recomenda a verificação de três possíveis modos de ruptura. O primeiro trata rupturas por cisalhamento dentro da região das armaduras e considera a resistência máxima devido à combinação das armaduras de cisalhamento e do concreto ($V_{R,cs}$ expresso pela Equação 10). O segundo refere-se à ruptura ocorrendo fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$ calculado segundo a Equação 11). Por fim, ainda recomenda a verificação da resistência da biela comprimida próxima das extremidades do pilar ($V_{R,max}$ obtido pela Equação 12)

A **Figura 9** apresenta alguns detalhes típicos recomendados por esta norma quando da utilização de armaduras de cisalhamento, podendo-se observar também alguns detalhes necessários para a definição do perímetro de controle externo às armaduras de cisalhamento (u_{out} e $u_{out,ef}$).

$$V_{R,CS} = 0,75 \cdot V_{R,C} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{s,w} \cdot f_{yw,ef}\right) \quad (10)$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad (11)$$

$$V_{R,max} = 0,3 \cdot f'_c \cdot \left(1 - \frac{f'_c}{250}\right) \cdot u_0 \cdot d \quad (12)$$

Sendo:

u_0 → é o perímetro do pilar ou área carregada;

u_1 → é o perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada;

u_{out} → é o comprimento do perímetro de controle afastado à $1,5 \cdot d$ da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2 \cdot d$ para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de *studs* concêntricos. No caso deste limite não ser atendido, deve ser utilizado o perímetro de controle externo efetivo ($u_{out,ef}$) conforme indicado na **Figura 9**.

S_r → é a distância entre camadas de armaduras de cisalhamento;

$A_{s,w}$ → é a área de armadura de cisalhamento por camada de reforço;

$f_{yw,ef}$ → é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, que deve ser calculado como $f_{yw,ef} = 1,15 \cdot (250 + 0,25 \cdot d) \leq f_{ysw}$, dado em N/mm² e com d em mm.

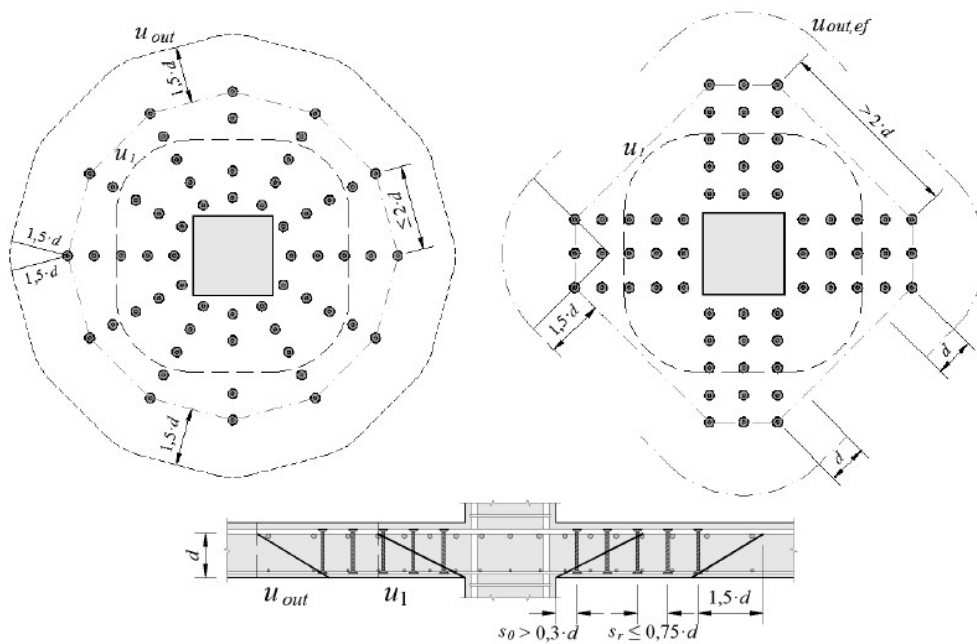


Figura 9. Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (EC 2:2004)

3.4 ABRT NBR 6118:2007 -Projeto de estruturas de concreto – Procedimento

O modelo analítico para verificação da resistência ao cisalhamento adotado pela norma brasileira é semelhante ao *Eurocode 2* (2004). A resistência à punção da laje também deve ser avaliada nos perímetros de controle: u_0 , para a verificação indireta da resistência à compressão da biela próxima ao pilar; u_1 , para a verificação da resistência à tração diagonal; e u_{out} , apenas nos casos de lajes com armaduras de cisalhamento. A fim de não tornar essa seção muito repetitiva, esclareceremos aqui apenas as diferenças adotadas pela norma brasileira.

O *size effect*, calculado pela expressão $\xi = 1 + \sqrt{(200/d)}$ $\xi = 1 + \sqrt{(200/d)}$ (d em mm), pode assumir valores superiores a 2,0.

A taxa de armadura a flexão pode assumir valor superior 2%.

No caso de $u_{out,ef}$, a geometria é a mesma adotada no *Eurocode 2* (2004), mas este perímetro também deve estar afastado à $2 \cdot d$ da última camada de armaduras e não $1,5 \cdot d$, como na norma anterior. Esses detalhes, bem como os espaçamentos para as armaduras são apresentados na **Figura 10**.

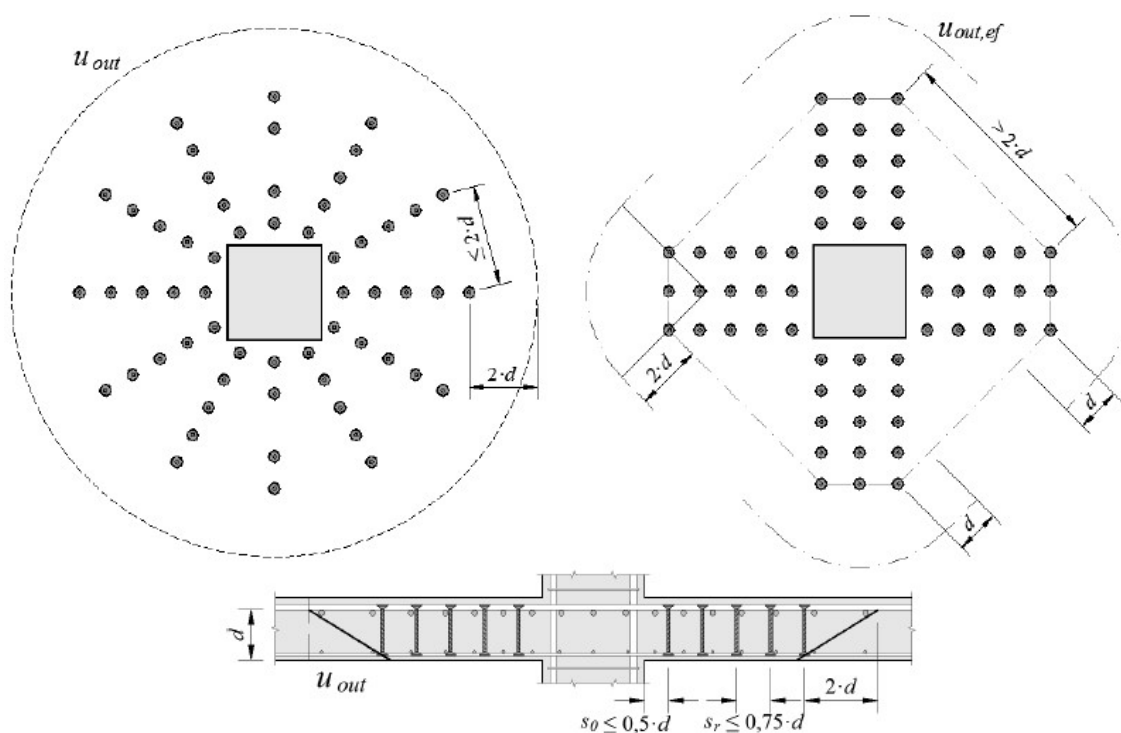


Figura 10. Detalhes típicos para arranjos com studs (ABNT NBR 6118:2007).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Descrição dos modelos ensaiados

Foram ensaiados 04 (quatro) modelos de lajes para análise da resistência ao cisalhamento e do comportamento de ligações laje-pilar quadrado interno com e sem armadura de cisalhamento para um carregamento centrado. Foram utilizados como armadura de cisalhamento laminados de PRFC. As lajes ensaiadas apresentaram dimensões de 2500 mm de lado e uma altura de 180 mm, apresentadas na **Figura 11** e **Figura 12**.

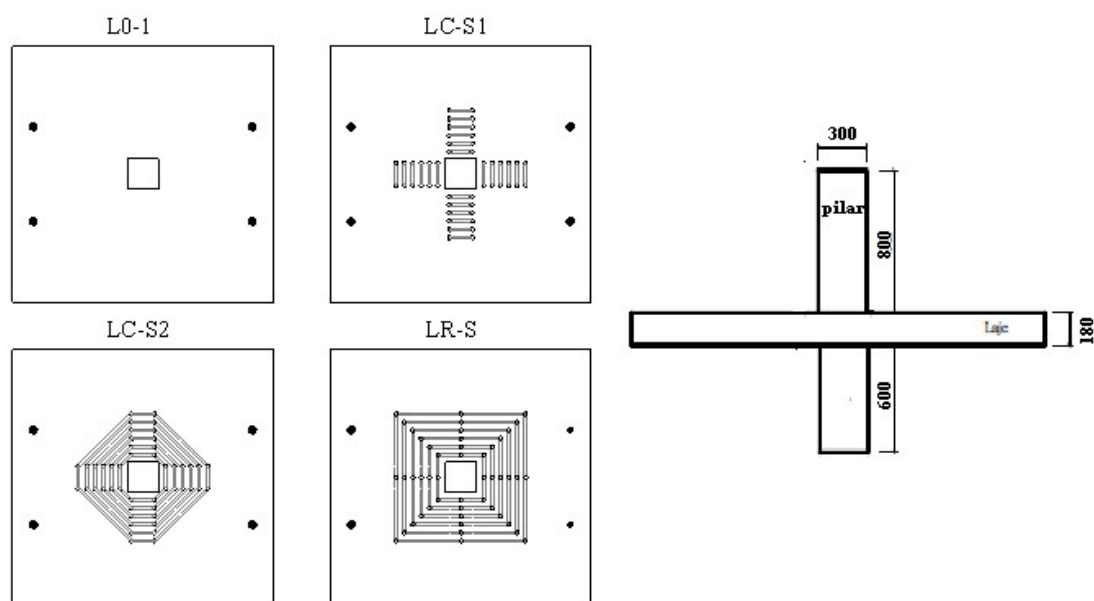


Figura 11. Modelos ensaiados

A nomenclatura adotada para cada laje é composta por letras maiúsculas e caracteres numéricos. A letra L representa a palavra laje, o 0 significa que o modelo não foi reforçado, o C significa que a distribuição da armadura de cisalhamento é em cruz, o R significa que a distribuição da armadura de cisalhamento é de forma radial e o S significa que a aplicação do reforço é do tipo *stirrups* (costura). L0-01 é a laje modelo de controle e LC-S1, LC-S2 e LR-S serão os modelos reforçados ao cisalhamento.

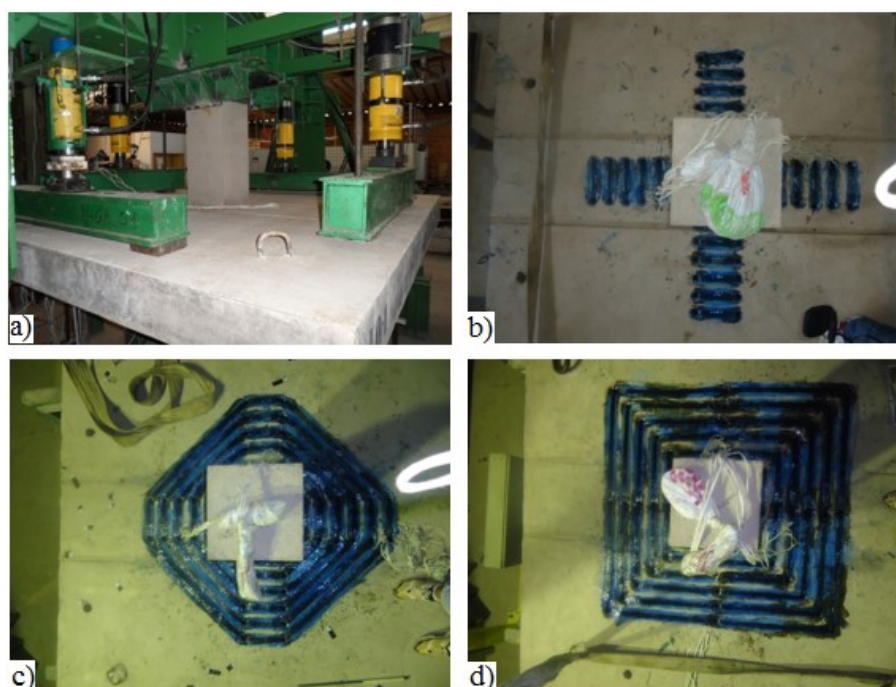


Figura 12. a) Modelo L0-01, b) Modelo LC-S1, c) Modelo LC-S2, d) Modelo LR-S

As características dos modelos ensaiados estão descritas na **Tabela 1**

Tabela 1 Características dos modelos ensaiados

Modelo	Dimensões do pilar (mm)	Dimensões da laje (mm)	Altura efetiva d (mm)	Nº perímetro de reforço	$A_{sw}/\text{perímetro}$ (mm ²)
L0-1	300	2500	14,42	-	-
LC-S1	300	2500	14,25	6	784
LC-S2	300	2500	14,42	6	784
LR-S	300	2500	14,49	6	784

4.2 Armadura de cisalhamento

Foi utilizado como armadura de cisalhamento o sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono CF 130, composto por 04 (quatro) componentes básicos que, quando combinados, formam uma lâmina de polímeros reforçados com fibras (PRF) de alta resistência. As fibras de carbono foram colocadas com o auxílio de 03 (três) resinas base, que são: *Primer MBrace*, *MBrace Putty* e *Saturant MBrace*, cada uma delas compostas por duas partes, a parte A e a parte B, mostradas na **Figura 13**.



Figura 13. a) Primer MBrace, b) MBrace Putty, c) Saturant MBrace

A aplicação do reforço em forma de tecido de PRFC ocorreu através de furos previamente instalados nos modelos de lajes antes da concretagem, conforme ilustra a **Figura 14**.

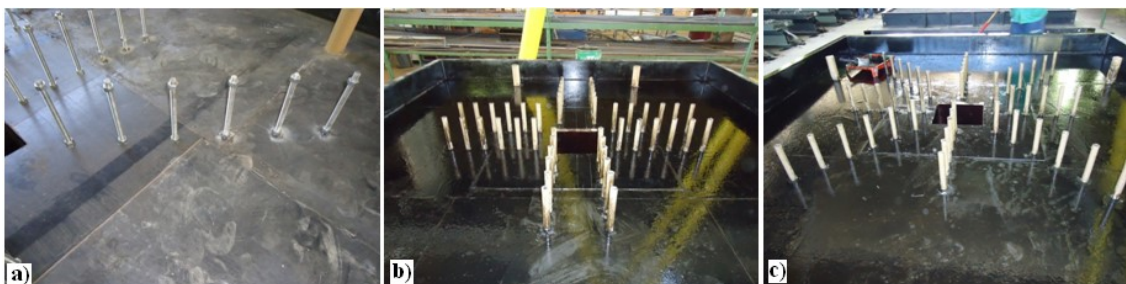


Figura 14. Preparo das formas e instalação de tubos de PVC

Os 03 (três) modelos reforçados apresentam a mesma quantidade de armadura de cisalhamento por perímetro de reforço, bem como o mesmo número de perímetros reforçados. A Figura 15 traz os modelos após aplicação do reforço.

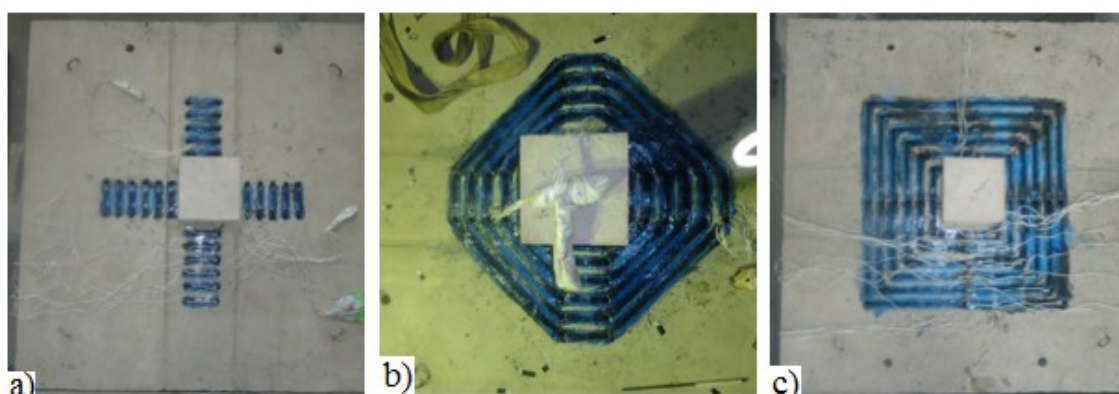


Figura 15. a) Modelo LC-S1, b) Modelo LC-S2, c) Modelo LR-S

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos ensaios de caracterização do concreto foram utilizadas as seguintes normas: ABNT NBR 5739:2007, para a determinação da resistência à compressão; ABNT NBR 7222:1994, para a determinação da resistência à tração por compressão diametral. Os resultados encontrados são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 Caracterização do concreto.

MODELO	IDADE (dias)	f'_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
L0-01	120	43,16	3,3
LC-S1, LC-S2, LR-S	300	50,05	3,1

As cargas últimas obtidas nos modelos ensaiados estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo das cargas últimas dos modelos ensaiados

Laje	h (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (Mpa)	V_{teste} (KN)	Superfície de rupturaa	Pós-puncionamento (KN)
L0-01	180	144,2	1,45	43,2	571	-	-
LC-S1	180	142,5	1,48	50	803	Dentro	340
LC-S2	180	144,2	1,45	50	892	Dentro	542
LR-S	180	144,9	1,44	50	868	Dentro	793

A **Figura 16** mostra um gráfico com as deformações no aço da armadura de flexão em cada ponto da barra instrumentada, no momento mais próximo da ruptura de cada modelo ensaiado. A exceção fica para os dados do modelo LC-S2 que não apresentou dado no extensômetro EF03.

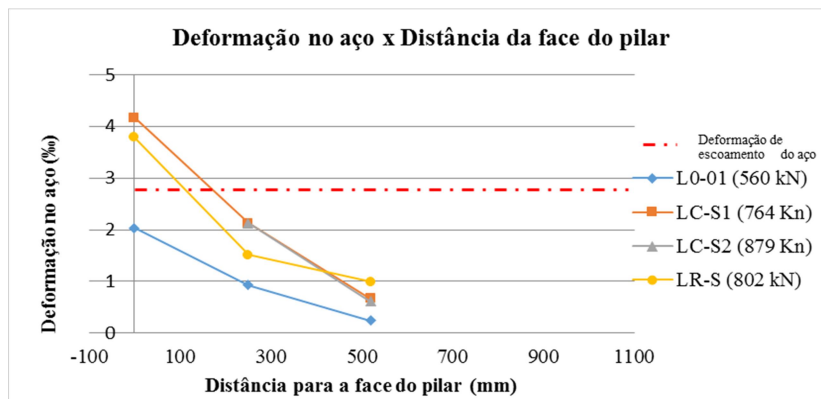


Figura 16. Deformação no aço ao longo do comprimento lateral de cada modelo.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos máximos foram os medidos até os instantes mais próximos da ruptura em cada modelo ensaiado.

No caso da laje L0-01, o deslocamento máximo foi 7,2 mm. O modelo LC-S1 teve um deslocamento máximo de 21,5 mm. Para o modelo LC-S2, o deslocamento vertical máximo foi 16,6 mm e, para o modelo LR-S e o deslocamento vertical máximo verificado foi de 16mm. Foi observado que, para todos os modelos ensaiados, o comportamento dos deslocamentos foi semelhante até uma carga de aproximadamente 500 kN, ou seja, próximo da ruptura do modelo de controle, L0-01. Este fato imputa a informação de que o material utilizado no reforço ao cisalhamento passou a trabalhar efetivamente a partir do surgimento das primeiras fissuras de cisalhamento. Nota-se, também, que entre os modelos reforçados, por apresentarem características semelhantes, os deslocamentos verticais máximos são bem próximos.

6.2 Deformação nas armaduras de flexão

Em todos os modelos, as deformações registradas pelos extensômetros localizados na face do pilar tiveram maiores intensidades, fato este já esperado por se tratar da região mais solicitada. Quanto mais afastado do pilar a posição instrumentada, menores foram os registros de intensidades de deformação.

Fazendo-se uma análise em todos os modelos, para um carregamento de 500 kN, as deformações na armadura de flexão ficaram bem próximas. Os modelos L0-01, LC-S1, LC-S2 e LR-S tiveram deformações aproximadas de 1,7‰, 2,0‰, 1,5‰ e 2,0‰, respectivamente. Este comparativo reforça a observação já feita de que os PRFC só começaram a trabalhar efetivamente após o surgimento das primeiras fissuras de cisalhamento.

6.3 Cargas últimas

Todos os modelos foram ensaiados até a ruptura. As lajes que foram reforçadas ao cisalhamento apresentaram uma carga de ruptura consideravelmente superior ao modelo de controle L0-01, o que nos leva a concluir que a aplicação do reforço provocou um aumento na resistência ao cisalhamento das lajes.

Dentre os modelos ensaiados, LC-S2, LC-S1 e LR-S tiveram um ganho de 56%, 41% e 52%, respectivamente, na carga de ruptura, quando comparadas ao modelo de controle.

Além do aumento relativo à capacidade de carga dos modelos, pôde-se observar um aumento significativo, por parte dos modelos reforçados, na ductilidade.

6.4 Avaliação da adaptação das prescrições normativas utilizadas

De acordo com a Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, pode-se observar que os valores esperados para a carga última dos modelos, segundo recomendações normativas estudadas nesta pesquisa, foram bem próximos dos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 4. Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ACI-318:2008

Modelo	Experimental		ACI 318:2008							
	V_{teste} (kN)	Modo ruptura	$V_{R,C PRFC}$ (kN)	V_{OUT} (kN)	V_{MAX} (kN)	V_{ACI} (kN)	Modo ruptura	V_{test}/V_{ACI}	V_{flex} (KN)	V_{teste}/V_{flex}
L0-1	571	-	-	-	-	520	-	1,10	1282	0,45
LC-S1	803	Dentro	813	758	892	758	fora	1,06	1317	0,61
LC-S2	892	Dentro	825	767	906	767	fora	1,16	1334	0,67
LR-S	868	Dentro	829	1011	912	829	dentro	1,05	1341	0,65

Tabela 5. Capacidade de carga e modo de ruptura segundo EUROCODE 2:2004

Modelo	Experimental		EUROCODE 2:2004							
	V_{teste} (kN)	Modo ruptura	$V_{R,C PRFC}$ (kN)	V_{OUT} (kN)	V_{MAX} (kN)	V_{EC2} (kN)	Modo ruptura	V_{test}/V_{EC2}	V_{flex} (KN)	V_{teste}/V_{flex}
L0-1	571	-	-	-	-	583	-	0,98	1282	0,45
LC-S1	803	Dentro	1026	724	2052	724	Fora	1,11	1317	0,61
LC-S2	892	Dentro	1040	730	2076	730	Fora	1,22	1334	0,67
LR-S	868	Dentro	1046	763	2087	763	Fora	1,14	1341	0,65

Tabela 6. Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ABNT NBR 6118:2007

Modelo	Experimental		ABNT NBR 6118:2007							
	V_{teste} (kN)	Modo ruptura	$V_{R,C PRFC}$ (kN)	V_{OUT} (kN)	V_{MAX} (kN)	V_{NBR} (kN)	Modo ruptura	V_{test}/V_{EC2}	V_{flex} (KN)	$V_{teste}/V_{fi ex}$
L0-1	571	-	-	-	-	583	-	0,98	1282	0,45
LC-S1	803	Dentro	1076	903	2216	903	Fora	0,89	1317	0,61
LC-S2	892	Dentro	1089	907	2243	907	Fora	0,98	1334	0,67
LR-S	868	Dentro	1094	942	2253	942	Fora	0,92	1341	0,65

7 CONCLUSÕES

Em relação a eficácia do reforço, conclui-se que o método de reforço utilizando PRFC funcionou para os modelos analisados. Os modelos reforçados apresentaram um aumento na resistência ao cisalhamento de 41% para o modelo LC-S1, 56% para o modelo LC-S2 e de 52% para o modelo LR-S, quando comparados ao modelo de controle. A partir das deformações nas armaduras de flexão e dos deslocamentos verticais, pode-se afirmar que a técnica empregada também aumentou a ductilidade dos modelos reforçados.

Outro ponto importante que foi observado e merece destaque, foi a capacidade de carga registrada pelos modelos reforçadas após a ruptura. O modelo LR-S após a ruptura, apresentou uma carga residual de 159% da carga de ruptura do modelo L0-01, enquanto que os modelos LC-S1 e LC-S2 apresentaram carga de pos-puncionamento de 60% e 95% da carga última do modelo L0-01, respectivamente. Esta evidência é de grande importância, uma vez que essa capacidade de carga de pos-puncionamento pode evitar um possível colapso progressivo.

Conforme observado nos resultados obtidos, as adaptações feitas nas prescrições normativas para utilização de PRFC reportaram a resultados bem próximos dos obtidos experimentalmente, em relação aos valores estipulados para carga de ruptura, o que significa que essas adaptações forneceram resultados positivos. A observação nesse tocante fica para o modo de ruptura apontado pelas prescrições normativas fora do perímetro de reforço, sendo que as rupturas ocorreram dentro deste perímetro.

AGRADECIMENTOS

A Universidade de Brasília- UnB que tanto contribuiu para minha formação, ao Instituto Federal de Ciência Educação e Tecnologia da Paraíba-IFPB, aos órgãos fomentadores CAPES e CNPq e a empresa BASF S/A.

REFERENCES

- ACI committee 318, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08)* and Commentary – american concrete institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- ACI Committee 440. (2002). “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.*” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto- procedimentos*. Rio de Janeiro – 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro – 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – *Argamassa e concreto – Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro – 1994.

ALBUQUERQUE, E. J. P. (2010). *Punção em lajes lisas com armaduras de cisalhamento e pilares de centro retangulares*. Dissertação de mestrado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 205p.

BEBER, A. J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003. 289p

BINICI, B., *Punching shear strengthening of reinforced concrete slabs using fiber reinforced polymers*. PhD thesis, University of texas at Austin, USA, 2003, 284p.

BINICI, B., BAYRAK. O., *Upgrading of slab-column connections using fiber reinforced polymers*. Engineering structures 27 (2005), 97-107p, october of 2004

Comitê Euro-International Du Béton. CEB FIP *Model code 1990*. London, Thomas Telford, 1993.

EUROCODE 2:2004 – Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

FERREIRA, M. P. (2010). Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados. Tese de doutorado em estruturas e construção civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 275p.

LIMA, A. W. DE (2012). Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando polímeros reforçados com fibra de carbon (PRFC) como armadura de cisalhamento. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil. Universidade de Brasília – UnB. Brasília-DF, 166P.

MELO, G. S. S. A., *Behavior of reinforced concrete flat slab after local failure*. PhD thesis, Polytechnic of central London, London, England, 1990, 214p.

SANTOS, G. S. (2014). Aplicação de Mantas de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como Reforço à Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado. Tese de doutorado em Estruturas e construção civil. Universidade de Brasília – UnB. Brasília-DF.

WIDIANTO, M. S. E. *Rehabilitation of Reinforced Concrete Slab-column Connections for Two-way Shear*, Tese de Doutorado, The University of Texas at Austin, 2006.