



**FAPAC - FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
INSTITUTO TOCANTINENSE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS PORTO LTDA
ENGENHARIA CIVIL**

**FELIPE RODRIGUES ALVES
THAIS BRITO DA SILVA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE LAJES LISAS REFORÇADAS À PUNÇÃO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC).**

**PORTO NACIONAL - TO
2017**

**FELIPE RODRIGUES ALVES
THAÍS BRITO DA SILVA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE LAJES LISAS REFORÇADAS À PUNÇÃO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC).**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Civil, do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos Porto - ITPAC PORTO NACIONAL, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof.^a Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos.

**PORTO NACIONAL - TO
2017**

**FELIPE RODRIGUES ALVES
THAÍS BRITO DA SILVA**

**AVALIAÇÃO ANALÍTICA DE LAJES LISAS REFORÇADAS À PUNÇÃO
UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC).**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Civil do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos Porto Ltda., como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Apresentado e defendido em ____/____/____ () APROVADO () REPROVADO

Banca examinadora constituída pelos professores:

Orientador (a): Prof. Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos

Prof.^a Ma. Silvia Barroso Gomes Souto

Prof. Me. Adauto Cezar Rosa do Nascimento

PORTO NACIONAL - TO

2017

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus, por nos capacitar e encorajar durante esses anos de graduação, que foram de muitas batalhas, mas também de muitas conquistas. Aos nossos pais, que nos apoiaram e nos incentivaram a ir sempre mais longe. Dedicamos também ao professor Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos, ao professor Me. Ângelo Ricardo Balduino, e à professora Ma. Silvia Barroso, que nos instruíram e contribuíram imensamente no nosso desenvolvimento e nos nossos resultados.

Felipe Rodrigues Alves

Thaís Brito da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me conduzido durante todas as dificuldades e me dado saúde e força para superá-las.

À pessoa que desde minha infância, nas tardes de domingo, em meio a elogios, desenhos e dissertações me incentivou a estudar, minha madrinha e professora Nanci Rodrigues Lima Aguiar.

Aos meu pais Rubens Alves Coelho e Josélia Rodrigues Lima Alves, pelo amor, carinho, paciência e por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante. Agradeço também aos meus familiares, que sempre estiveram presentes nos momentos em que mais precisei.

A todos meus amigos, em especial Ilanna Soares, Filipe Arthur Cavalcante, Fernando Reis, Warley Alves, Thárcio Brito, Érica Cardoso e Afelânio Gomes, irmãos que adquiri e estão sempre dispostos a me apoiar, sendo essenciais em todas as etapas da minha vida.

A esta instituição pelo excelente ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que nela trabalham. A todos os professores que me acompanharam durante a graduação e abriram as portas ao conhecimento, em especial ao Prof.^a Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos, pela sua disponibilidade, orientação, seu grande desprendimento em ajudar-nos e por sua amizade sincera.

Por fim, meus sinceros agradecimentos também à minha amiga e colega de trabalho Thaís Brito, que em meio a todas as conturbações e problemas, segurou a minha mão para concluirmos este trabalho.

Felipe Rodrigues Alves

AGRADECIMENTOS

Sou grata em primeiro lugar a Deus, que esteve sempre comigo me fortalecendo nos momentos difíceis, e me guiando nos estudos, trabalhos, provas, enfim em todos os processos da minha graduação.

Agradeço aos meus pais, Adailton e Célia, que me incentivaram e asseguraram que meus sonhos sempre fossem possíveis, sempre me guiando pelos caminhos certos e me ensinando a enfrentar quaisquer desafios.

Ao meu namorado José Delmiro Júnior, pois foi um dos meus maiores incentivadores, e que com toda a sua paciência e amor conseguia me acalmar nos momentos mais atordoantes, exaustivos e de maiores pressões no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Ma. Silvia Barroso Gomes Souto e Me. Ângelo Ricardo Balduino, sou grata pela orientação, amizade e confiança.

Especialmente ao Me. Douglas Freitas Augusto dos Santos, sou grata pelo empenho, confiança, respeito e pelos grandes ensinamentos ao desenvolvimento da nossa pesquisa, nos mostrando sempre o melhor caminho para conquistarmos o mercado de trabalho e o mundo.

Por fim, meus sinceros agradecimentos também ao meu amigo e colega de trabalho Felipe Rodrigues, que em meio a todas as conturbações e problemas, segurou a minha mão para concluirmos este trabalho.

*“QUE OS VOSSOS ESFORÇOS DESAFIEM AS IMPOSSIBILIDADES,
LEMBRAI-VOS DE QUE AS GRANDES COISAS DO HOMEM FORAM
CONQUISTADAS DO QUE PARECIA IMPOSSÍVEL. ”*

(Charles Chaplin)

RESUMO

A ligação entre a laje e o pilar é um ponto crítico no projeto de edifícios com lajes lisas, devido ao risco de ruptura por punção. Durante o uso destas edificações, é possível que surja a necessidade de reforçar esta região, ou por falhas nas etapas de projeto, execução, e manutenção, ou ainda por mudanças no uso da edificação que requeiram o aumento da capacidade de carga das lajes. Neste caso, algumas técnicas estão disponíveis e este artigo tem por objetivo discutir e avaliar o desempenho daquelas que envolvem a adição de armaduras de cisalhamento com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC). Para isso, foi montado um banco de dados, a partir de pesquisas na literatura, com resultados de 72 ensaios em lajes lisas reforçadas com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) nas técnicas de costura (*Stitch*) e de pino (*Dowel*). Estes resultados foram comparados com resultados teóricos obtidos segundo as normas ACI 318 (2014), EUROCODE 2 (2010) e NBR 6118 (2014), considerando adaptações recomendadas no ACI 440.2R, a fim de verificar a confiabilidade das normas pelo método de COLLINS (2001). As técnicas de reforço com PRFC mostraram um bom desempenho mecânico, se mostrando eficientes. Além disso, observou-se que a norma que apresenta melhor estimativa é a EUROCODE 2 (2010), apresentando mais resultados na faixa de segurança apropriada, e que as estimativas da ACI 318 (2014) tendem a ser conservadoras, enquanto que a norma NBR 6118 (2014) foi a que apresentou mais resultados na faixa de baixa segurança.

Palavras-Chave: Punção. Lajes lisas. Concreto armado. Reforço. Polímeros. Fibras de carbono.

ABSTRACT

The connection between the slab and the pillar is a critical point in the design of buildings with smooth slabs, due to the risk of puncture rupture. During the use of these buildings, it is possible that there is a need to reinforce this region, or due to failures in the design, execution, and maintenance stages, or changes in the use of the building that require the increase of the load capacity of the slabs. In this case, some techniques are available and this paper aims to discuss and evaluate the performance of those involving the addition of shear reinforcement with carbon fiber reinforced polymers (PRFC). For this, a database was assembled, based on researches in the literature, with results of 72 tests on reinforced slabs reinforced with carbon fiber reinforced polymer (PRFC) in the sewing (Stitch) and pine (Dowel) techniques. These results were compared with theoretical results obtained according to ACI 318 (2014), EUROCODE 2 (2010) and NBR 6118 (2014), considering the recommended adaptations in ACI 440.2R, in order to verify the reliability of the standards by the COLLINS method (2001). The reinforcement techniques with PRFC showed a good mechanical performance, being efficient. In addition, it was observed that the norm with the best estimate is EUROCODE 2 (2010), presenting more results in the appropriate safety range, and that the estimates of ACI 318 (2014) tend to be conservative, whereas the norm NBR 6118 (2014) was the one that presented the most results in the low safety range.

Keywords: Puncture. Smooth slabs. Concrete reinforced. Reinforcement. Polymers. Carbon fibers.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 COMPORTAMENTO DA PUNÇÃO EM LAJES LISAS	16
2.2 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO	18
2.2.1 Geometria e dimensões do pilar	19
2.2.2 Resistência do concreto	20
2.2.3 Size effect.....	20
2.2.4 Taxa de armadura de flexão tracionada	21
2.2.5 Armadura de punção.....	22
2.2.5.1 Polímeros reforçados com fibras de carbono (prfc)	23
2.2.5.2 Reforço à punção de lajes lisas com prfc	23
2.2.5.2.1 Sistema de reforço stitch.....	24
2.2.5.2.2 Sistema de reforço dowel	25
2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS.....	26
2.3.1 Recomendações da norma aci 318:2014.....	26
2.3.2 Recomendações da norma eurocode 2:2010.....	28
2.3.3 Recomendações da norma nbr 6118:2014	31
3 OBJETIVOS.....	32
3.1 OBJETIVO GERAL	32
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	32
4 METODOLOGIA	33
4.1 METODOLOGIA DE COLETA DOS ELEMENTOS DO BANCO DE DADOS	33
4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO	33
4.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	35
4.4 METODOLOGIA PROPOSTA POR COLLINS (2001)	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1 BANCO DE DADOS	37
6 CONCLUSÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje lisa.....	17
Figura 2 - Processo de formação de fissuras de punção.....	18
Figura 3 - Campo de tensões e distribuição de esforços normais no perímetro $0,5d$ do pilar.....	19
Figura 4 - Efeito de escala (<i>size effect</i>) em sapatas com dimensões diferentes.....	21
Figura 5 - Comparação da taxa de armadura de flexão.....	22
Figura 6 - Sequência de instalação do Reforço <i>Stitch</i> (BINICI, 2003)	24
Figura 7 - Sistema de Reforço <i>Stitch</i>	25
Figura 8 - Sequência de instalação do reforço <i>Dowel</i>	26
Figura 9 - Modelo para verificação da resistência a punção.....	26
Figura 10 - Detalhes típicos para arranjos com <i>studs</i>	28
Figura 11 - Modelo para verificação de punção.....	29
Figura 12 - Detalhes típicos para arranjos com <i>studs</i>	30
Figura 13 - Detalhes típicos para arranjos com <i>studs</i>	31
Figura 14 - Avaliação da precisão dos resultados das normas.....	38
Figura 15 - Avaliação da precisão dos resultados (diagrama de caixas)	39
Figura 16 - Relação entre os resultados experimentais normativos.....	40
Figura 17 - Estimativa do modo de ruptura.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura em lajes de concreto armado de acordo com a norma brasileira.....	34
TABELA 2 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura em lajes de concreto armado de acordo com a norma americana.....	34
TABELA 3 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura em lajes de concreto armado de acordo com a norma europeia.....	35
TABELA 4 - Escala de Demérito, segundo COLLINS (2001)	36
TABELA 5 – Características das lajes lisas do banco de dados.....	37
TABELA 6 – Classificação segundo o critério de COLLINS (2001)	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PRFC - Polímeros reforçados com fibra de carbono.

ACI - American Concrete Institute (Instituto americano de concreto).

EUROCODE – Norma Europeia

NBR - Norma brasileira.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas estruturais vêm sofrendo várias adequações desde a sua origem, e as lajes de concreto armado vem sentido essas mudanças. Para o designo do tipo de laje ideal para a estrutura, são considerados alguns aspectos, como comprimento dos vãos, intensidade das cargas e o comportamento conforme as exigências dos estados limites últimos e de serviço, mas as condições econômicas e estéticas foram um dos principais motivos para o surgimento das lajes lisas, que são lajes diretamente ligadas aos pilares.

No Brasil são projetadas e construídas lajes lisas em edifícios desde 1950, porém como a mão de obra para execução desses tipos de lajes precisa ser especializada e ela é relativamente barata, são preferíveis por parte das construtoras utilizar as lajes apoiadas em vigas, ao contrário de países como Canadá, EUA, parte da Europa e da Ásia, que são totalmente adeptos do sistema das lajes apoiadas diretamente sobre os pilares.

Dentre as vantagens deste tipo de estrutura, versatilidade é a principal, pois por não possuir vigas a estética torna-se mais agradável, possibilitando ao arquiteto maior distribuição do espaço. Outros importantes benefícios são: a simplificação das formas, maior agilidade no processo construtivo, redução de custo com a mão de obra, facilitação de instalações elétricas, hidráulicas e ar-condicionado, e redução da altura total do edifício, possibilitando aumentar o número de pavimentos.

Como todo sistema este também possui algumas desvantagens, das quais se destacam, a redução na rigidez quanto aos esforços horizontais, as elevadas tensões causadas por esforços de flexão e cisalhamento na região de ligação laje x pilar, ocasionando assim uma ruptura que pode levar a ruína parcial ou total da construção, sem avisos prévio, causando um tipo de ruptura denominado de punção.

A Punção é a maneira que a laje apoiada diretamente sobre os pilares rompe na região do apoio. Nas lajes lisas esse fenômeno tem a maior probabilidade de acontecer pelo fato do peso que o pilar exerce sobre a mesma, causando assim um efeito de perfuração.

Para aumentar a resistência e a ductilidade de uma laje lisa uma das possibilidades é o uso de armaduras de combate a punção. A maioria dos métodos tradicionais de reforço ferem os princípios da estética agradável. Os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), além de preservar os aspectos estéticos,

contribuem na ductilidade, e na resistência ao cisalhamento, além da comprovada eficácia na resistência a flexão e ao cisalhamento. Os PRFC são de fácil aplicação, possuem baixo peso e são duráveis. Os polímeros são formados por uma repetição de diversas unidades químicas naturais ou sintéticas. As fibras de carbono são resultados do tratamento térmico de fibras pioneiras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão discutidos aspectos gerais sobre o comportamento estrutural de lajes lisas. Resultados de diversas pesquisas serão utilizados para descrever os parâmetros que influenciam na resistência à punção de lajes lisas de concreto armado. Posteriormente serão apresentados alguns modelos para a estimativa da resistência à punção de lajes lisas, bem como recomendações das normas ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2010) e NBR 6118 (2014).

2.1 COMPORTAMENTO DA PUNÇÃO EM LAJES LISAS

A ligação entre a laje e o pilar é um ponto crítico no projeto de edifícios com lajes lisas, devido ao risco de ruptura por punção. De acordo com Moraes Neto (2013), uma severa abertura na ligação da laje com o pilar, pode provocar a ruína total da estrutura também por meio do colapso progressivo.

Segundo Albuquerque (2014) a punção acontece tipicamente em forma de colapso nas lajes de concreto que estão sujeitas a carregamentos concentrados na ligação laje-pilar, e é conhecida como a atuação do cisalhamento em duas direções. Além disso, esse tipo de ruptura lembra à ruptura por cisalhamento de uma viga, pois se caracteriza uma fissura em que se amplia dos limites dos pilares até a face superior da laje, porém com a forma de tronco de cone (BROMS,2005). No entanto a viga é caracterizada por uma fissura diagonal.

Trautwein (2006), afirma que a punção atua de forma que as forças concentradas em uma pequena área de um elemento estrutural plano, causam elevadas tensões cisalhantes, ocasionando assim a ruína desse elemento. O mesmo pode acontecer de forma súbita e sem avisar.

As lajes lisas são definidas por Wight e Macgregor (2009), como um sistema estrutural caracterizado por uma laje de espessura uniforme apoiada inteiramente sobre os pilares, conforme a figura 1. Neste sistema há uma grande probabilidade das lajes romperem por punção, de acordo com Albuquerque (2014), isso ocorre bruscamente, pois a mesma no local em que ficam as ligações dos pilares apresentam um alto nível de tensão, provocada por uma grande concentração cisalhante.

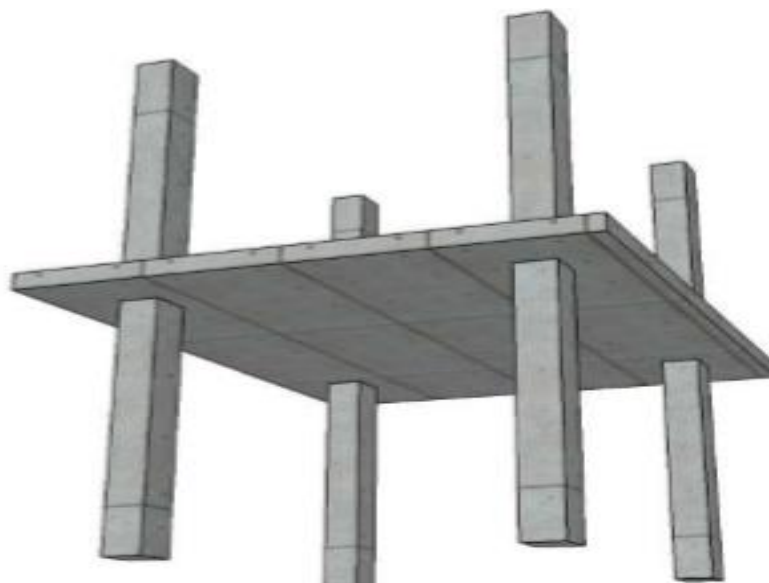


FIGURA 1: Laje lisa
Fonte: Adaptado de Rabelo (2010).

O mesmo autor afirma também que, por meio disso ocorre uma perda com relação a uma abertura por flexão, pois com a concentração das cargas e momentos, a ruptura por punção tende a ocorrer se houver uma carga menor, resultando então no esmagamento do concreto em torno do pilar, muito antes do aço se deformar.

A forma de ruptura por punção para uma laje lisa com pilar centrado segundo Holanda (2002), ocorre primeiramente quando a laje é carregada, logo após surge o aparecimento de uma fissura tangencial ao redor do pilar, a qual é uma fissura de flexão provocando momentos negativos atuantes na direção radial. Devido ao aparecimento de momentos fletores negativos na direção tangencial, e ao aumento do carregamento na laje, formam-se fissuras radiais que se originam na fissura de flexão e se propagam em direção às bordas da laje, isso ocorre por causa do aparecimento de tensões de tração tangencial.

Próximo da ruptura segundo o mesmo autor, surgem fissuras tangenciais novamente, numa região mais afastada da área carregada, ocasionadas por tensões de flexão e cisalhamento, que por fim geram a ruptura por punção. A Figura 2 ilustra o aparecimento de fissuras em uma laje carregada com um pilar quadrado centrado.

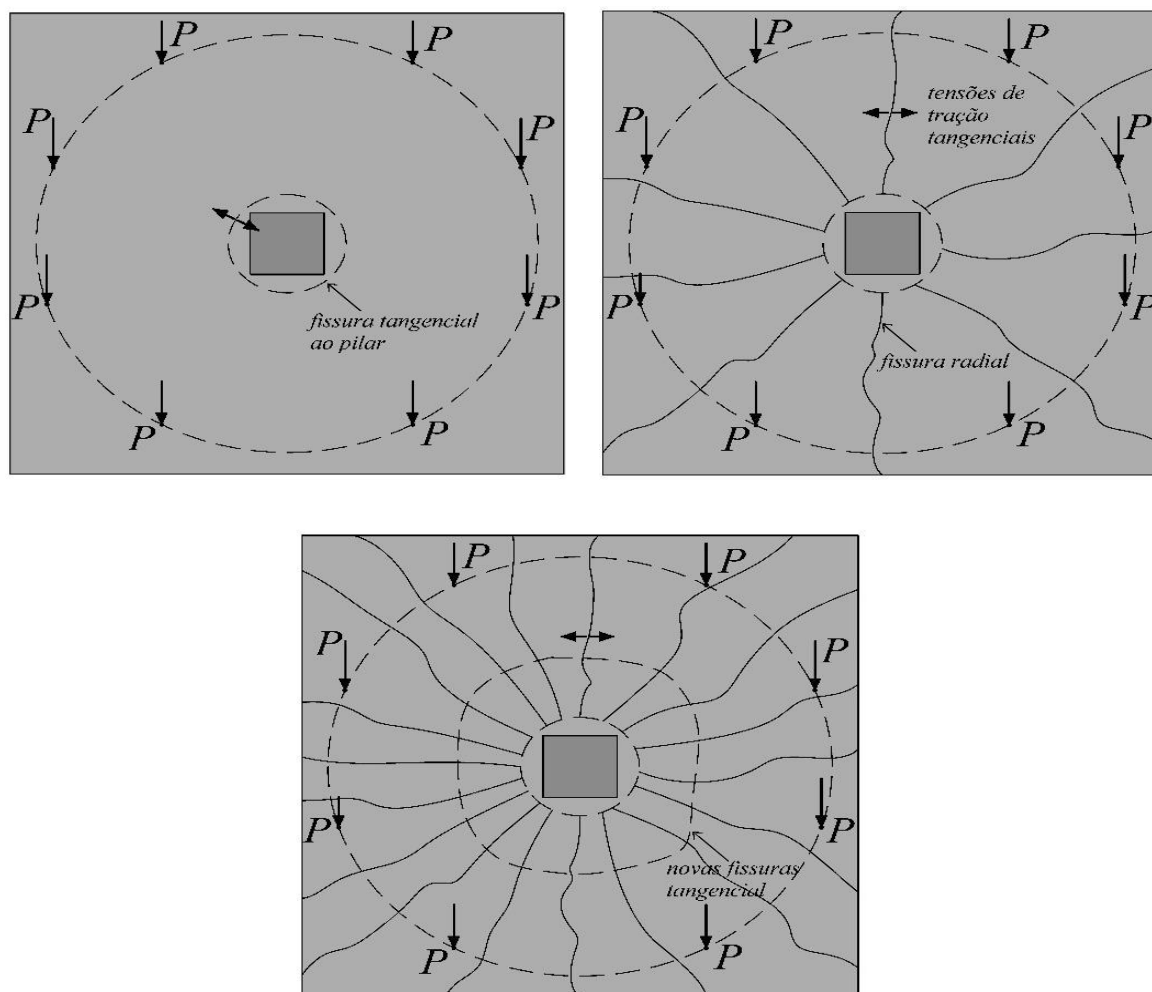


FIGURA 2: Processo de formação de fissuras de punção. 1) fissura tangencial formada por tensões radiais; 2) fissuras radiais formadas por tensões tangenciais; 3) estágio final de ruptura à punção de laje lisa.

Fonte: Holanda (2002).

2.2 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

As evidências experimentais disponíveis indicam que a resistência à punção é influenciada, principalmente, pela resistência à compressão do concreto (f_c), pela taxa de armadura de flexão tracionada (ρ), pelo tamanho e a geometria do pilar e pelo *size effect* (ξ) ou efeito de escala, que é a redução da tensão resistente ao cisalhamento da laje com o aumento da altura útil (d). Além destes parâmetros, o uso de armaduras de cisalhamento tem se mostrado eficiente ao longo dos anos e diversas pesquisas, têm mostrado diversas vantagens, uma destas armaduras de cisalhamento são as de fibra de carbono (FERREIRA, 2010).

2.2.1 Geometria e dimensões do pilar

Segundo Ferreira (2010) a resistência de uma laje também é influenciada pela geometria e dimensões do pilar, uma vez que estes determinam a forma como as tensões se distribuem na ligação laje-pilar.

Melges (2001) relata que com relação ao formato dos pilares, foi observado que pilares circulares possuem 15% mais resistência quando comparados a pilares quadrados de mesma área. Isso ocorre devido a concentração de tensões existentes nos cantos dos pilares retangulares.

Pilares alongados, segundo o mesmo autor, onde a diferença entre os lados é maior que 2, a ruína é mais inesperada, o tamanho do cone de punção é menor e a resistência da ligação também é menor, quando comparados com pilares de seções quadradas. Isto também acontece devido as tensões se concentrarem nos cantos e nos menores lados do pilar. Assim como as dimensões afetam, a posição do pilar influencia também, pilares internos resistem mais que pilares de borda, e pilares de borda resistem mais que pilares de canto.

Sagaseta et al. (2014), observou em análises computacionais não lineares que para lajes com relação $C/d=1$ a concentração dos esforços nas bordas dos pilares não é tão evidente, enquanto que para lajes com $C/d=4$ torna-se perceptível a concentração dos esforços. Mostrando, assim, que o fenômeno tem diferentes graus de influência conforme se varia C/d , ver Figura 3.

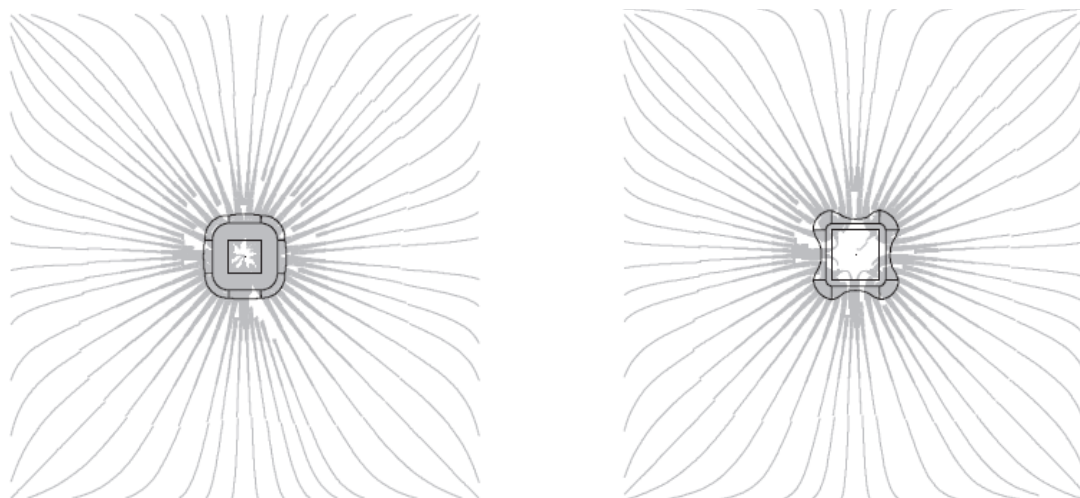


FIGURA 3: Campo de tensões e distribuição de esforços normais no perímetro de $0,5d$ do pilar
Fonte: Sagaseta et al., (2014)

2.2.2 Resistência do concreto

A ruptura à punção de uma estrutura de concreto sem armadura de cisalhamento é regida, dentre outros fatores, pela resistência à tração do concreto. Ou seja, devido a ruptura à punção ser uma ruptura por tração diagonal a resistência à tração é um parâmetro. Para fins de projeto as formulações normativas costumam relacionar a resistência à tração do concreto como uma função de sua resistência à compressão, é comum observar que as pesquisas experimentais correlacionam a resistência ao cisalhamento com a resistência à compressão do concreto (SANTOS, 2016).

De acordo com Melges (2001) o aumento da resistência de ligação buscando aumentar a resistência do concreto não garante que a laje seja mais dúctil relacionada à ruína. Entretanto a resistência da ligação é diretamente relacionada a resistência a tração do concreto.

2.2.3 Size Effect

A grande parte dos laboratórios trabalham com fatores de escalas para realizar ensaios experimentais em elementos de concreto, no entanto isso acontece para economizar materiais, uma vez que a maioria dos laboratórios de estruturas não conseguiria reproduzir ou teriam um custo elevado com os ensaios em escalas reais. De acordo com Ferreira (2010), no início da década de 1960, os primeiros ensaios que envolviam punção possuíam lajes com espessuras relativamente reduzidas, portanto o efeito de escala não era aparente.

Melges (2001) retrata sobre “*size effect*” ou efeito de escala, um efeito onde considerando que as outras condições sejam iguais, as lajes mais resistentes são as de menor altura útil e não as com maior espessura, isto é, o efeito escala ocorre em função da altura útil da laje. Isso acontece principalmente em lajes mais espessas, pois o concreto possui maior heterogeneidade. Um bom exemplo é resistência da ligação, que é competente ao quadrado da altura útil.

O mesmo autor cita que ao modificar a altura útil para toda a laje, as ações permanentes também aumentam, fazendo com que a relação resistência por altura útil passe a ser linear. Aumentar a espessura da laje na região de sua ligação com o pilar e utilizar o sistema “droppanel” ou capitéis podendo assim ser uma outra opção viável. Apesar do sistema com “droppanel” oferecer maior resistência, perdem-se as

vantagens oferecidas pelo teto liso, embora a resistência da ligação seja aumentada; a utilização destes elementos estruturais não fornece ductilidade à ligação; alguns aspectos arquitetônicos são prejudicados, além de aumentarem a distância entre pisos.

Observa-se que o efeito de escala é influenciado pelo aumento da altura útil da laje, quanto maior o elemento menor é a contribuição deste parâmetro na resistência a punção, conforme ilustrado na Figura 4.

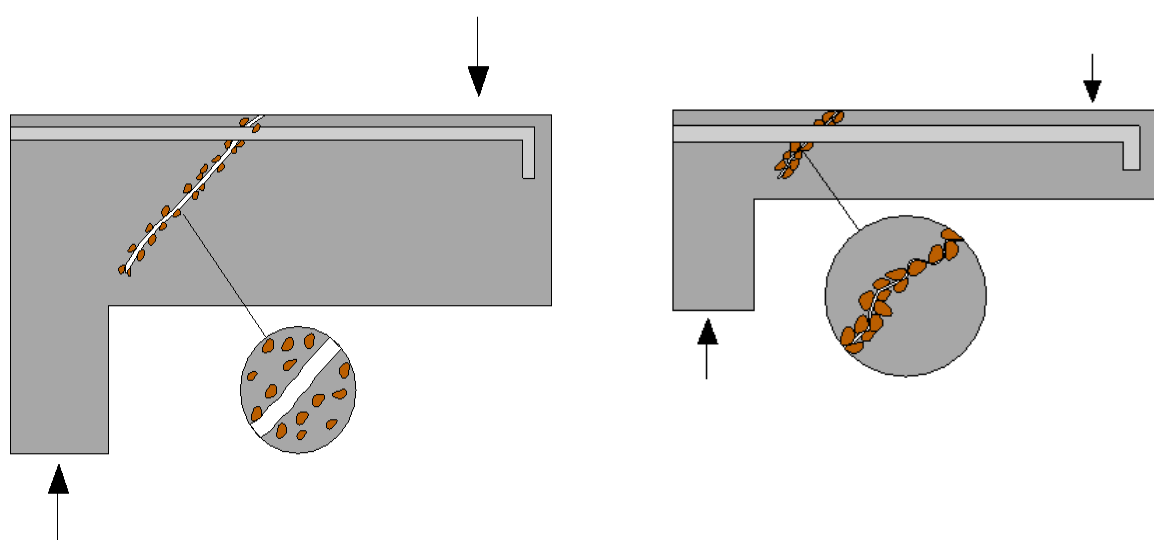


FIGURA 4 - Efeito de escala (*size effect*) em sapatas com dimensões diferentes.
Fonte: Santos (2016).

2.2.4 Taxa de armadura de flexão tracionada

Um fator importante que influencia na resistência a punção, a taxa de armadura de flexão tracionada está diretamente ligada as lajes que não possuem armadura de cisalhamento. De acordo com Ferreira (2010) a taxa de armadura de flexão tracionada tem como definição a razão entre a área de armadura de flexão tracionada pela área do concreto, assim aumentando a quantidade de armaduras de flexão, irá aumentar a zona comprimida e como consequência também aumentará na área de concreto não fissurado disponível para contrastar ao cisalhamento.

Baseando-se em evidências experimentais, pesquisadores como Regan (1986) defendem que a taxa de armadura é um parâmetro importante que deve ser levado em consideração na estimativa de resistência à punção. Peças com maior taxa de

armadura apresentam zona comprimida maior, o que faz com que se tenha mais concreto não fissurado capaz de resistir ao cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 5. Além disso, a abertura das fissuras de flexão é reduzida, o que facilita a transferência de forças através do engrenamento de agregados, podendo ainda aumentar o efeito pino.

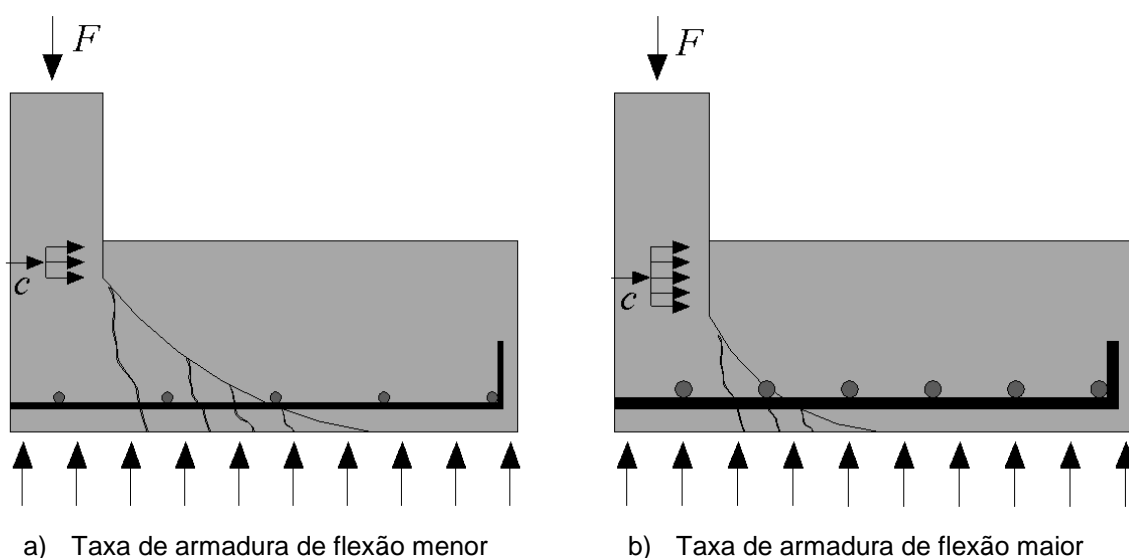


FIGURA 5 – Comparação da taxa de armadura de flexão a) menor taxa e b) maior taxa.
Fonte: Santos (2016).

2.2.5 Armadura de punção

Segundo Melges (2001) o problema da punção pode ser amenizado devido a esses fatores: reduzir o carregamento aplicado, reduzir os vãos da laje, aumentar a espessura total da laje, acrescentar a espessura do pilar ou da laje somente na região da ligação entre eles através de capitéis ou “*droppanel*”, aumentar o tamanho do pilar e usar armadura de cisalhamento. Entretanto a maioria destes não pode ser aplicado devido incompatibilidade com o projeto arquitetônico ou não é viável economicamente, sendo assim o uso de armaduras de punção é a melhor solução, pois aumenta a resistência da ligação.

2.2.5.1 Polímeros reforçados com fibras de Carbono (PRFC)

Os polímeros são combinações de várias moléculas formados por uma repetição de diversas unidades químicas, podendo ser de origem natural ou sintética, orgânico ou inorgânico (AKCELRUD, 2007).

A combinação de dois ou mais materiais com suas identidades mantidas e atuando em conjunto formam de acordo com Araújo (2002) os polímeros, que além disso são compostos por um componente estrutural (as fibras) e por um componente matricial (a resina polimérica e, normalmente, alguns “fillers” e aditivos), afirma também que certas propriedades físicas dependem da direção em que são medidas, que são materiais não homogêneos, e que até a ruína possuem um comportamento impecavelmente elástico.

As fibras de carbono são resultados do tratamento térmico de fibras pioneiras orgânicas como por exemplo o poliacrilonitril (PAN), ou baseada no alcatrão que é uma substância derivada do petróleo ou carvão (PITCH) em um local inerte, e também por meio de fibras de *rayon*. Elas possuem uma resistência mecânica extraordinária, essa característica se dá pelo fato de apresentarem átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra pioneira no processo térmico de produção, que são oxidadas e elevadas a altas temperaturas Machado (2016).

2.2.5.2 Reforço à punção de lajes lisas com PRFC

A maioria dos métodos tradicionais de reforço à punção, como o uso de pinos de aço (*Studs*), aumento da espessura da laje ou aumento da seção do pilar levam certas desvantagens em algumas propriedades, pois os polímeros reforçados com fibras de carbono além da comprovada eficácia também no reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas e pilares, possuem baixo peso, durabilidade, resistência alta e facilidade de aplicação e manuseio (BINICI, 2003).

São inúmeras e significativas as vantagens do uso de PRFC como reforço à punção em lajes lisas, dentre algumas dessas importantes vantagens de acordo com Sissakis e Sheikh (2007), está que a utilização deste material contribui na ductilidade, na capacidade de dissipação de energia e na resistência ao cisalhamento.

As lajes lisas são preferíveis pela sua ausência de vigas e versatilidade, deixando-as com a estética mais agradável. Os reforços devem preservar esses

aspectos estéticos. Quando se aumenta a espessura da laje ou seção do pilar esses aspectos não são preservados. Santos (2014), afirma que para não haver alteração da geometria da peça uma alternativa é que o sistema de reforço deve possibilitar a introdução de uma armadura de cisalhamento na região crítica da mesma.

Segundo Nicácio (2013), quando se usa PRFC como reforço ao cisalhamento, não há necessidade de aumento da espessura da laje, e é fácil detalhar as tiras para formar estribos fechados ou pinos de fibra. Nas aplicações a flexibilidade do material permite que ele seja fixado em torno de qualquer formato, podendo ser ancorado em forma de laço, formando estribo fechado (Técnica *Stitch*) ou ainda sendo utilizado como pino de PRFC (Técnica *Dowel*) ancorado nas faces das lajes.

2.2.5.2.1 Sistema de reforço *Stitch*

No sistema *stitch* de acordo com Binici (2003), são feitas tiras de PRFC que são introduzidas através de furos perpendiculares ao plano da laje e são passadas em voltas contínuas entre pares de furos, conforme ilustrado na Figura 6. As tiras são feitas com a largura igual ou menor que a dos furos previamente executados na laje.

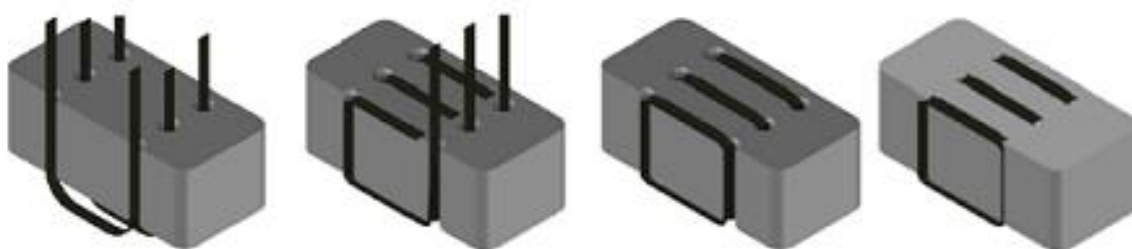
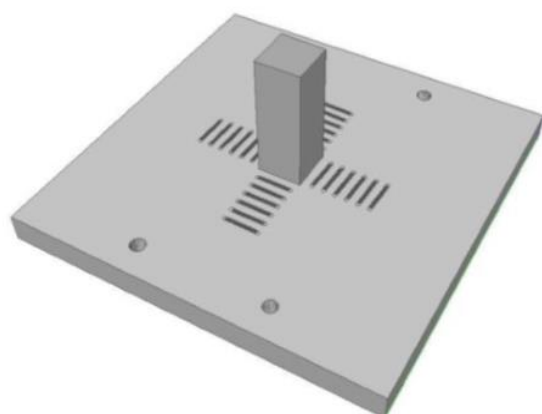
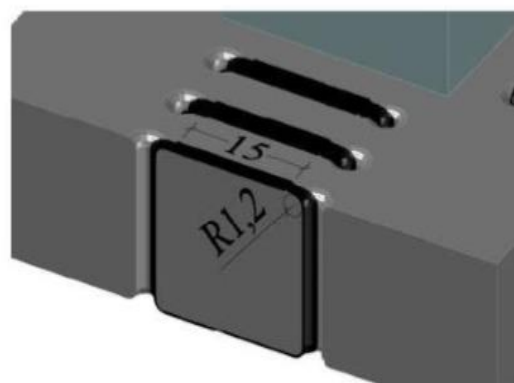


FIGURA 6: Sequência de instalação do Reforço *Stitch* (BINICI, 2003)
Fonte: Santos (2013).

Em seguida, de acordo com o mesmo autor enche-se as paredes externas do furo com resina epóxi (componente estabilizante do PRFC), e imediatamente após isso passa-se as tiras em voltas contínuas entre pares de furos, até atingir a quantidade de reforço desejada, atentando-se sempre para o comprimento de transpasse indicado pelo fabricante. Por último vem mais uma camada de resina epóxi para garantir total saturamento do mesmo. A Figura 7 representa o sistema de reforço *Stitch*.



(a) Laje Reforçada com Sistema Stitch



(b) Detalhe do Reforço

FIGURA 7: Sistema de Reforço Stitch
 Fonte: Santos (2013).

2.2.5.2.2 Sistema de reforço Dowel

Neste sistema de acordo com Erdogan (2010), as mantas servem como armadura vertical de cisalhamento, sendo elas enroladas para essa função, garante-se a ancoragem do reforço abrindo-se e colando um excesso de manta na face superior e inferior da laje. As mantas são recortadas em formas retangulares, são impregnadas de resina epóxi e enroladas em torno de uma barra de aço com diâmetro menor do que a do furo da laje, a barra não tem efeito estrutural, serve apenas como reforço rígido. Após isso propõe-se que seja inserida uma quantidade de manta na região de ancoragem, na face superior e inferior da laje antes de se abrir as sobras dos pinos, e por último as sobras serão abertas e coladas sobre as mantas.

Santos (2014), fez uma adaptação deste sistema proposto por Erdogan (2010), optando pela exclusão da manta inserida nas faces da laje, podendo assim economizar no material. Nesse sistema utiliza-se a resina para impregnar o furo, ao invés da manta e por isso carece de um diâmetro maior para os furos na laje. Os pinos de PRFC são colados nas paredes dos furos, as sobras são abertas e coladas sobre a face inferior e superior da laje, e após a cura o furo é preenchido com a argamassa de alta resistência, conforme a figura 8.

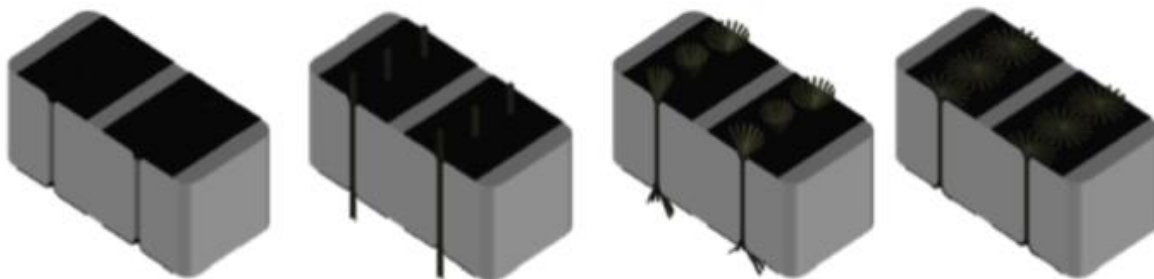


FIGURA 8: Sequência de instalação do reforço *Dowel*.
Fonte: Santos (2013).

2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

2.3.1 Recomendações da norma ACI 318:2014

Segundo o ACI 318:2014 pode se verificar a resistência a punção em lajes lisas de concreto armado por meio da verificação das tensões de cisalhamento em um perímetro de controle afastado de uma distância $d/2$ das faces do pilar ou área carregada, conforme é demonstrada na figura 9.

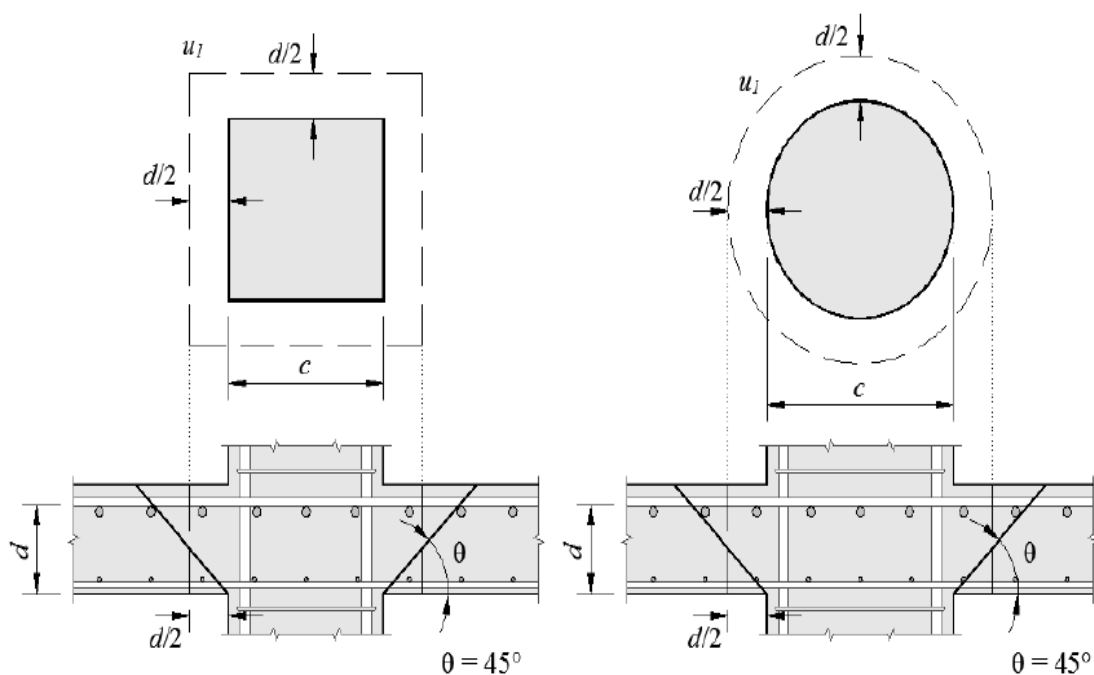


FIGURA 9: Modelo para verificação da resistência a punção
Fonte: ACI (2014).

Para expressar a resistência a punção de uma laje sem armaduras é utilizado a equação 1.

$$V_{R,c} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

f'_c é 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;

Segundo o ACI, em casos onde a laje lisa de concreto armado esteja equipada com armaduras de cisalhamento existem três tipos de modos de ruptura: superfície de ruptura cortando as armaduras ($V_{R,cs}$), superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$), e ruptura por esmagamento da biela comprimida nas proximidades do pilar ($V_{R,max}$), equações 2, 3, 4 e 5 respectivamente:

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \quad \text{Equação (2)}$$

$$V_{R,cs} = \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \right) + \left(\frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,w} \right) \quad \text{Equação (3)}$$

$$V_{R,out} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação (4)}$$

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

Onde:

A_{sw} é a área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento;

S_r é a distância entre as camadas, ressaltando que d/S_r deve ser menor ou igual ao número total de camadas de armaduras de cisalhamento conforme as equações 6, 7 e 8 respectivamente;

$f_{ys,w}$ é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, limitada em $f_{ys,w} \leq 420$ MPa;

u_{out} é o perímetro externo definido a uma distância $d/2$ da camada mais externa de armaduras, como pode ser identificado na figura 10.

$$S_0 \leq 0,5 \cdot d \quad \text{Equação (6)}$$

$$S_r \leq 0,75 \cdot d \text{ para } \frac{v}{u_1 \cdot d} \leq \frac{\sqrt{f'_c}}{2} \quad \text{Equação (7)}$$

$$S_r \leq 0,50 \cdot d \text{ para } \frac{v}{u_1 \cdot d} > \frac{\sqrt{f'_c}}{2} \quad \text{Equação (8)}$$

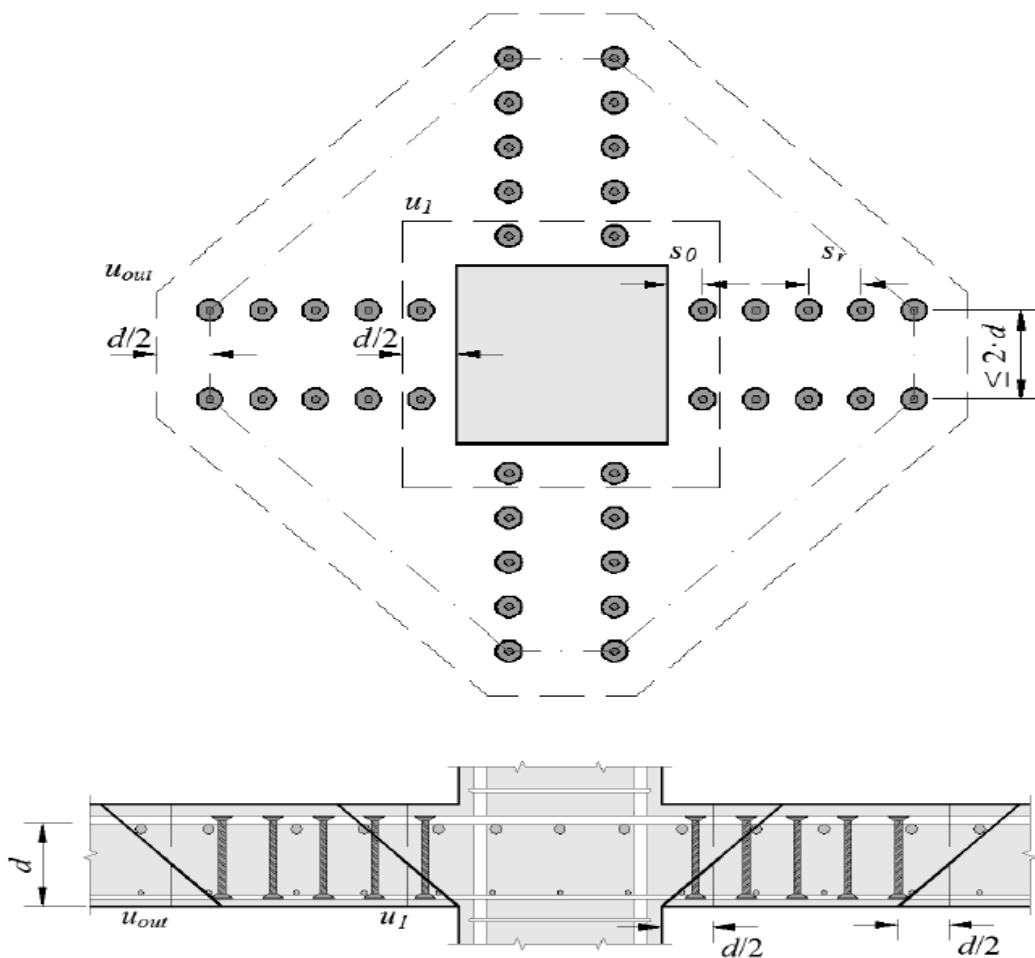


FIGURA 10: Detalhes típicos para arranjos com studs
 Fonte: ACI (2014).

2.3.2 Recomendações da norma *Eurocode 2:2010*

Segundo a *Eurocode 2:2010* é recomendado que para verificar a resistência a punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento através da norma *Eurocode 2:2010* é necessário fazer um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada, conforme indicado na figura 11.

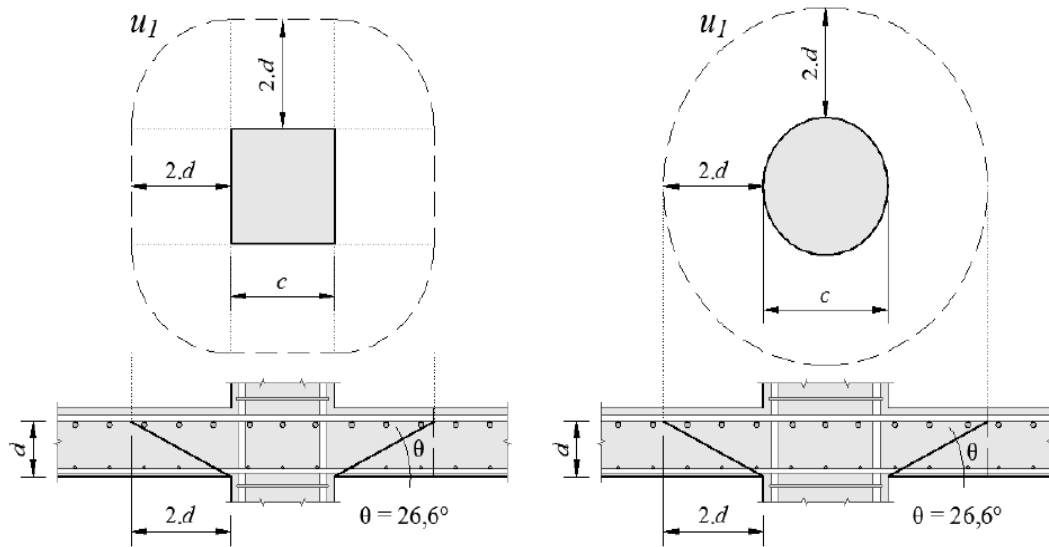


FIGURA 11: Modelo para verificação de punção
Fonte: Eurocode 2 (2010).

Para obter a estimativa da resistência a punção de uma laje com essas características é utilizado a equação 9.

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

d é a altura útil da laje;

f'_c é a resistência a compressão do concreto (<90 MPa);

p é a taxa de armadura de flexão tracionada média da laje, é calculado utilizando a equação: $p = \sqrt{p_x \cdot p_y} \leq 0,02$, onde p_x e p_y são as taxas nas direções x e y , respectivamente. É considerado as barras que seguem um afastamento $3 \cdot d$ das faces do pilar;

ε é o *size effect*, é definido pela equação 10:

$$\varepsilon = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Equação (10)}$$

com d em mm;

u_1 é o comprimento do perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ das faces do pilar.

Em casos de lajes com armadura de cisalhamento a *Eurocode 2* também define três possíveis modos de ruptura: superfície de ruptura cortando as armaduras ($V_{R,cs}$); superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$); e ruptura

por esmagamento da biela comprimida nas proximidades do pilar ($V_{R,max}$) definidas pelas equações 11, 12 e 13 respectivamente.

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \quad \text{Equação (11)}$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação (12)}$$

$$V_{R,max} = 0,3 \cdot f'_c \cdot \left(1 - \frac{f'_c}{250} \right) \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

u_0 é o perímetro do pilar;

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

u_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado à $1,5 \cdot d$ da camada mais externa da armadura de cisalhamento, respeitando - se um limite de $2 \cdot d$ para distância máxima entre duas linhas concêntricas de *studs* concêntricas;

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

A_{sw} é a área das armaduras de cisalhamento por camada;

$f_{yw,ef}$ é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, obtida através da equação 14:

$$f_{yw,ef} = 1,15 \cdot (250 + 0,25 \cdot d) \leq f_{ysw} \quad \text{Equação (14)}$$

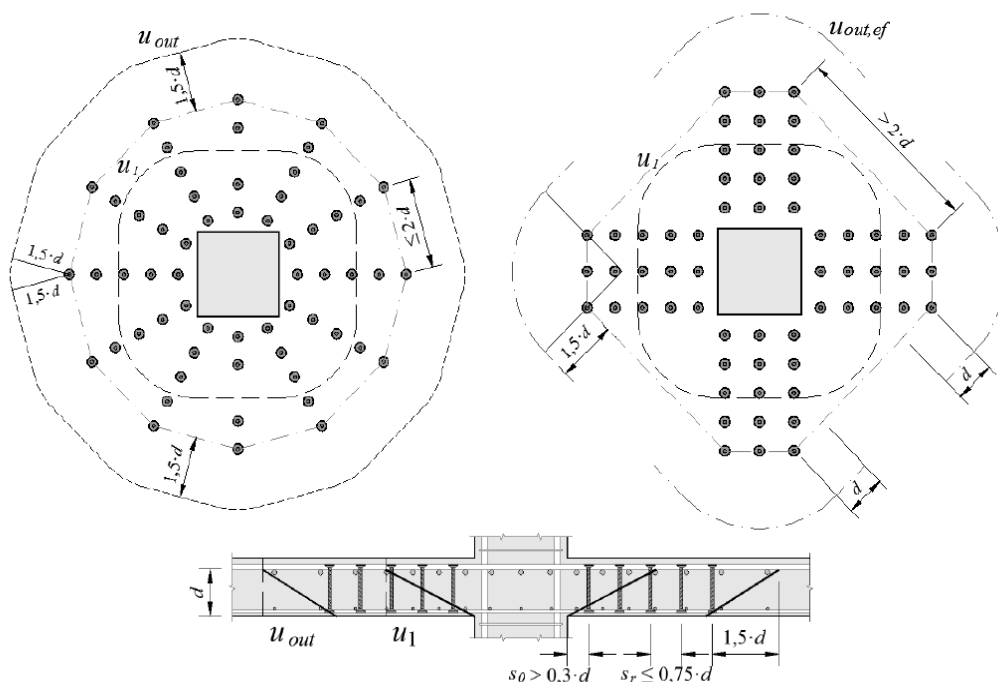


Figura 12: Detalhes típicos para arranjos com *studs*
Fonte: Eurocode 2 (2010).

2.3.3 Recomendações da norma NBR 6118:2014

Segundo a NBR 6118:2014, que é baseada nas recomendações da norma CEB-FIPMC90:1993, ou seja, é baseada inteiramente nas indicações apresentadas pela norma Eurocode 2:2004. Uma das principais diferenças entre as normas, é que na NBR6118:2014 o *size effect* não está limitado a ser atribuído o valor de 2,0, assim a norma permite que seja expresso valores para o coeficiente maiores que 2,0. O modelo de norma brasileiro também não limita a taxa de armadura tracionada em 0,02, permitindo também que seja adicionado valores superiores.

Sobre as principais diferenças entre as normas, é possível notar que o coeficiente de segurança γ_c , que no Brasil é adotado o valor de 1,4 é diferente das outras normas referenciadas, onde é adotado o valor de 1,5. Outra importante mudança é com relação a geometria e comprimento do perímetro de controle fora da região das armaduras de cisalhamento. Neste caso, a norma brasileira recomenda que seja adotado o afastamento $2 \cdot d$ da última camada de armaduras, e que este seja circular, e não poligonal como na Eurocode 2:2004.

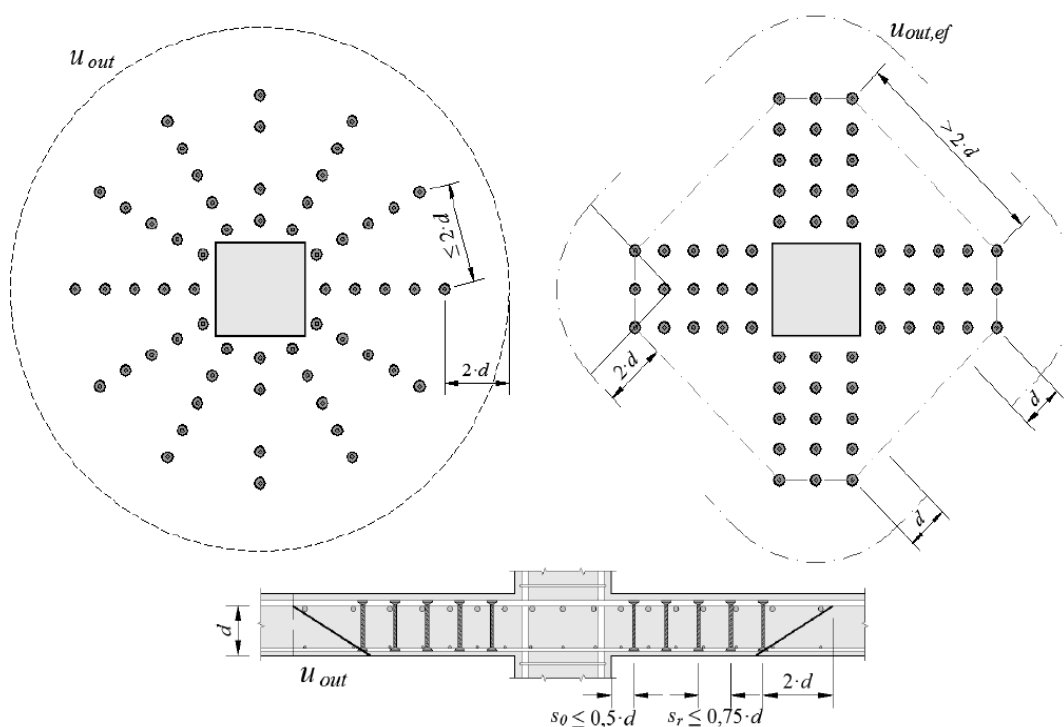


Figura 13: Detalhes típicos para arranjos com *studs*
Fonte: NBR 6118 (2014).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os parâmetros normativos para resistência à punção em lajes lisas, reforçadas com fibras de carbono, através de análises estatísticas, medindo a confiabilidade das normas, quanto a segurança e economia.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Avaliar os diversos parâmetros que influenciam na resistência à punção, através de análises estatísticas.
- Avaliar a confiabilidade das normas através de análises estatísticas e pelo método de Collins (2001)
- Verificar qual norma tem uma melhor estimativa dos resultados experimentais.
- Verificar a influência do PRFC no ganho de resistência à punção de lajes lisas.
- Analisar os diferentes sistemas de reforço com PRFC, a fim de verificar qual sistema contribui mais para o ganho de resistência à punção.

4 METODOLOGIA

Segundo os critérios das normas NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (2010) e ACI 318 (2014), os resultados de cálculo para a resistência ao puncionamento são analisados comparativamente com os resultados obtidos em ensaios de lajes com ruptura por punção. Serão expostos a seguir, os métodos de coleta dos resultados de ensaios de lajes, para a análise comparativa propriamente dita.

4.1 METODOLOGIA DE COLETA DOS ELEMENTOS DO BANCO DE DADOS

Os resultados dos ensaios foram obtidos a partir de uma revisão bibliográfica que apresentavam objetivos distintos, como por exemplo resistência característica do concreto (f_{ck}), maior ou menor que 50 MPa, presença ou não de armadura de punção, existência ou não de protensão, dentre outros. A única característica trivial a todos os ensaios é a ruptura por punção na laje, característica essa que se enquadra impecavelmente na metodologia descrita a seguir.

Conforme a terminologia utilizada pela norma brasileira, todas as lajes escolhidas apresentaram ruptura associada à tração diagonal. A espessura mínima das lajes amostradas foi de 10 cm, valor esse menor que o mínimo requerido pela NBR 6118 (2014) para lajes lisas, que é de 16 cm. Essa espessura foi admitida em razão da capacidade de aplicação de carga dos equipamentos existentes nos laboratórios.

As lajes analisadas simularam a situação de pilares internos de um edifício, sem a atuação de momentos fletores e foram em sua totalidade submetidas a carregamentos simétricos.

4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Na verificação das equações de dimensionamento, a magnitude da força escolhida corresponde ao menor valor encontrado nas superfícies de ruptura: verificação indireta da tensão na diagonal comprimida do concreto, na região junto ao pilar, ou verificação da ligação à punção, associada à tração diagonal nos demais contornos de controle. Na determinação dessas forças de ruptura, nenhum coeficiente de minoração de resistência dos materiais ou de majoração da solicitação foi utilizado.

Em síntese, este método de dimensionamento à punção consiste na determinação da tensão solicitante e posterior comparação desta com a tensão resistente em cada uma das seções de controle, estipulada nos critérios de cada uma das normas estudadas.

De acordo com a NBR 6118 (2014), as fórmulas utilizadas para a obtenção dos resultados das forças de ruptura estão descritas na tabela 1:

Tabela 1 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura em lajes de concreto armado de acordo com a norma brasileira

NBR 6118 (2014)	
Sem armadura ($V_{R,c}$)	$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right)$
Cortando a armadura ($V_{R,cs}$)	$V_{R,c} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1$
Cortando por fora da armadura ($V_{R,out}$)	$V_{R,out} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d$
Esmagamento da biela comprimida ($V_{R,m\acute{a}x}$)	$V_{R,max} = 0,3 \cdot f'_c \cdot \left(1 - \frac{f'_c}{250} \right) \cdot u_0 \cdot d$

Fonte: Elaboração própria a partir da NBR 6118 (2014).

Seguindo ACI 318 (2014), as fórmulas utilizadas para a obtenção dos resultados das forças de ruptura estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura em lajes de concreto armado de acordo com a norma americana

ACI 318 (2014)	
Sem armadura ($V_{R,c}$)	$V_{R,c} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d$
Cortando a armadura ($V_{R,cs}$)	$V_{R,cs} = \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \right) + \left(\frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,w} \right)$
Cortando por fora da armadura ($V_{R,out}$)	$V_{R,out} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_{out} \cdot d$
Esmagamento da biela comprimida ($V_{R,m\acute{a}x}$)	$V_{R,max} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{se } S_r \leq 0,5 \cdot d \\ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{se } 0,5 \cdot d < S_r \leq 0,75 \cdot d \end{cases}$

Fonte: Elaboração própria a partir da ACI 318 (2014).

Já pela EUROCODE 2 (2010), as fórmulas utilizadas para a obtenção dos resultados das forças de ruptura estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 – Metodologia de cálculo das forças de ruptura, F_u , em lajes de concreto armado norma europeia

EUROCODE 2 (2010)	
Sem armadura ($V_{R,c}$)	$V_{R,c} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1$
Cortando a armadura ($V_{R,cs}$)	$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right)$
Cortando por fora da armadura ($V_{R,out}$)	$V_{R,out} = 0,18 \cdot \varepsilon \cdot (100 \cdot p \cdot f'_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d$
Esmagamento da biela comprimida ($V_{R,máx}$)	$V_{R,max} = 0,3 \cdot f'_c \cdot \left(1 - \frac{f'_c}{250} \right) \cdot u_0 \cdot d$

Fonte: Elaboração Própria a partir da EUROCODE 2 (2010).

4.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

O método de análise de resultados tem como alvo conferir os critérios de dimensionamentos exemplificado pelas normas com os resultados experimentais, medindo a confiabilidade das normas, para isso será realizado a razão entre as forças de ruptura e forças resistentes, V_{uexp}/V_{uteo} respectivamente, cujos valores serão apresentados nos resultados.

A força V_{uexp} é o esforço último de punção medido em laboratório, já a força V_{uteo} , pode ser definida como a menor força resistente última, de acordo com os critérios normativos estudados, ou seja, o teórico.

Para concretizar a análise comparativa dos esforços de puncionamento adotados pelas normas: NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (2010) e ACI 318 (2014), serão empregadas proporções estatísticas habituais como: média, M , a mediana, M_d , o desvio padrão, DP , e o coeficiente de variação, CV , e também os valores máximos e mínimos da amostra. Assim a média demonstra o viés conservativo da equação, o coeficiente de variação é utilizado como indicador de precisão dos resultados e os menores e maiores valores complementam proporcionando a amplitude.

A fim de estudar a adequação e comparação entre equações normativas de dimensionamento a punção em peças de concreto armado, foi introduzido um

abrangente estudo realizado por COLLINS (2001), pois neste é desenvolvido um procedimento que considera distintos critérios normativos de dimensionamento e os classificam, analisando a segurança, a exatidão e a economia.

4.4 METODOLOGIA PROPOSTA POR COLLINS (2001)

A proposta de COLLINS (2001), foi imposta devido a problemas enfrentados na análise de resultados, uma vez que estes, obtidos da relação V_{uexp}/V_{ucalc} em cada norma gerava distribuições assimétricas, assim para solucionar estes problemas Collins propôs uma metodologia de transformação desta distribuição assimétrica em simétrica. De tal modo, é verificado o coeficiente de variação dos dados superiores e inferiores da mediana, permitindo a comparação entre os desiguais artifícios de cálculo e a classificação de cada procedimento, através de uma linha graduada de demérito. Deste modo é lícito uma comparação complementar entre os valores de extremidade reais e os considerados, abordando essas duas variáveis.

Através dos métodos de COLLINS (2001) é classificado os tipos de procedimentos de dimensionamento em escala de demérito. É considerado dados sobre segurança, precisão e economia, assim é gerado um escore cada faixa da relação V_{uexp}/V_{ucalc} , conforme a Tabela. Esse escore tem como fundamento que uma relação V_{uexp}/V_{ucalc} com valor inferior a 0,5 é perceptível que a segurança é inferior a uma acima de 2,0. Entretanto, importâncias muito conservativas, por serem antieconômicas, são penalizadas com escore igual a 2,0, assim correspondendo a uma relação com a mesma classificação como de baixa segurança. O valor adquirido pelo demérito é medido de tal modo que a soma dos produtos das percentualidades dos valores V_{uexp}/V_{ucalc} , impostos por intervalo, pelo seu escore adequado. Quanto maior o valor da soma total, pior será a classificação no processo normativo.

Tabela 4 – Escala de Demérito, segundo COLLINS (2001).

V_{uexp}/V_{ucalc}	Score	Classificação
< 0,50	10	Extremamente perigosa
0,50 ----0,65	5	Perigosa
0,65 ----0,85	2	Baixa Segurança
0,85 ----1,30	0	Segurança Adequada
1,30 ----2,00	1	Conservativa
≥ 2	2	Extremamente conservativa

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Banco de dados

O Banco de dados é formado pelas análises de resultados experimentais de 61 lajes lisas reforçadas ao cisalhamento com fibras de PRFC. As características em resumo das lajes lisas de cada autor encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 – Características das lajes lisas do banco de dados

Autores	Nº ensaios	Técnica	<i>b</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	ρ (%)	<i>c</i> (mm)	Seção	<i>f_c</i> (MPa)	<i>V_u</i> (KN)
[1]	4	Dowel	2000	114	1,41	125-375	R -S	30-33	564-657
[2]	5	Dowel	2000	114	1,41	300	S	26-35	592-657
[3]	9	Stich	2135	114	1,92	304	S	28,3	595-778
[4]	2	Stich	1020	57	0,52	150	S	24,1	139-155
[5]	3	Dowel	1000	47	1,07	85	S	39,7	105-125
[6]	24	Stich	1500	120	1,49-2,23	200	S	27-43	550-872
[7]	3	Stich	2500	143-145	1,44-1,47	300	S	50	838-929
[8]	8	Stich / Dowel	2500	135-145	1,44-1,55	300	S	48-58	818-1185
[9]	3	Stich / Dowel	2800	142-145	1,44-1,47	300	S	48	825-899

Obs.: [1] ERDOGAN *et al.* (2011); [2] ERDOGAN *et al.* (2010); [3] BINICI e BAYRAK (2003); [4] BINICI e BAYRAK (2005); [5] SILVA e RODRIGUES (2013); [6] SISSAKIS (2007); [7] LIMA (2012); [8] NICÁCIO (2013); [9] R. LI *et al.* (2007).

Fonte: Elaboração própria (2017).

Foi verificado o superdimensionamento em lajes lisas com este reforço, oriundo das normas técnicas: ACI 318 (2014), EUROCODE 2 (2010) e NBR 6118 (2014).

A figura 14 apresenta as avaliações das normas quanto a dispersão dos resultados. De modo geral, as recomendações da NBR 6118 (2014) apresentaram uma menor dispersão dos seus resultados e a menor média em comparação com as outras normas. Já na EUROCODE 2 (2010) é possível verificar que seus resultados apresentaram uma média e dispersão maior que a NBR 6118 (2014). A norma ACI 318 (2014) mostrou-se a mais dispersa das recomendações possivelmente por não considerar a taxa de armadura de flexão e o efeito de escala (*size effect*).

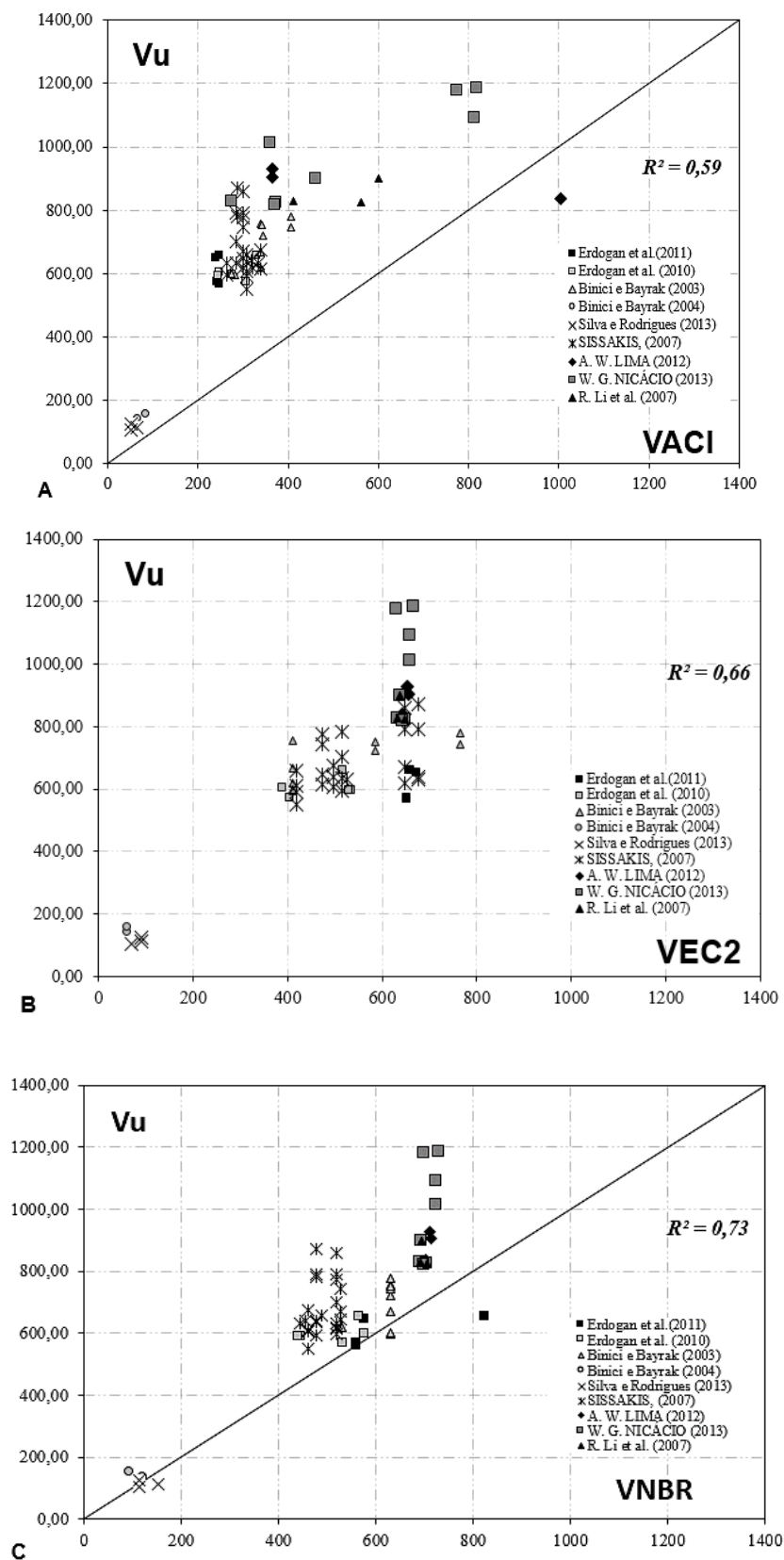


Figura 14 – Avaliação da precisão dos resultados das normas: (a) ACI 318 (2014), (b) Eurocode 2 (2010), (c) NBR 6118 (2014).
 Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figura 15 apresenta o diagrama de caixas, onde dois retângulos representam os quartis das amostras. Os quartis dividem um conjunto de dados em quatro partes na escala. O retângulo mais claro, representa a diferença entre a mediana e o quartil superior. O retângulo mais escuro representa o espaço entre o quartil inferior e a mediana. As linhas acima e abaixo dos retângulos representam os valores mínimos e máximos. Percebe-se que a norma NBR 6118 (2014) foi a que apresentou a menor mediana e dispersão, porém o menor resultado mínimo. A norma ACI 318 (2014) apresentou a maior mediana e dispersão.

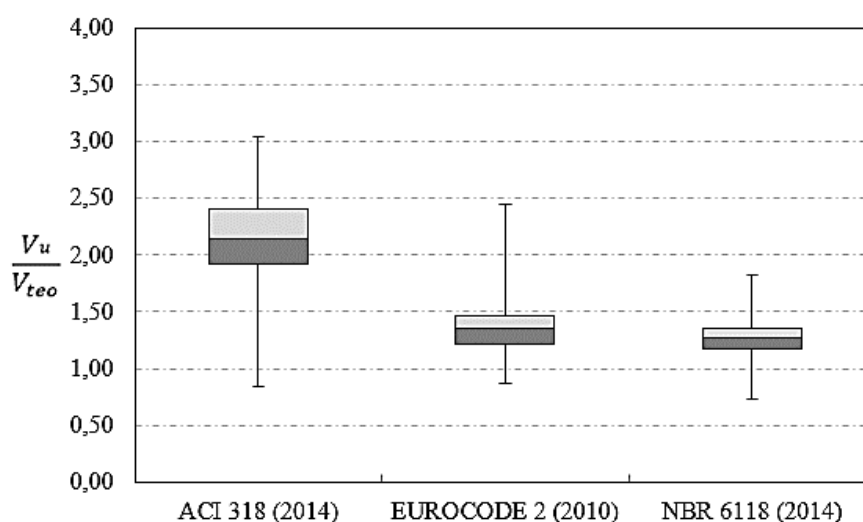


Figura 15 – Avaliação da precisão dos resultados (diagrama de caixas).
Fonte: Elaboração própria (2017).

Na Figura 16 podemos observar que as normas apresentaram uma distribuição normal, exceto a EUROCODE 2 (2010) que apresentou uma tendência a uma distribuição log normal.

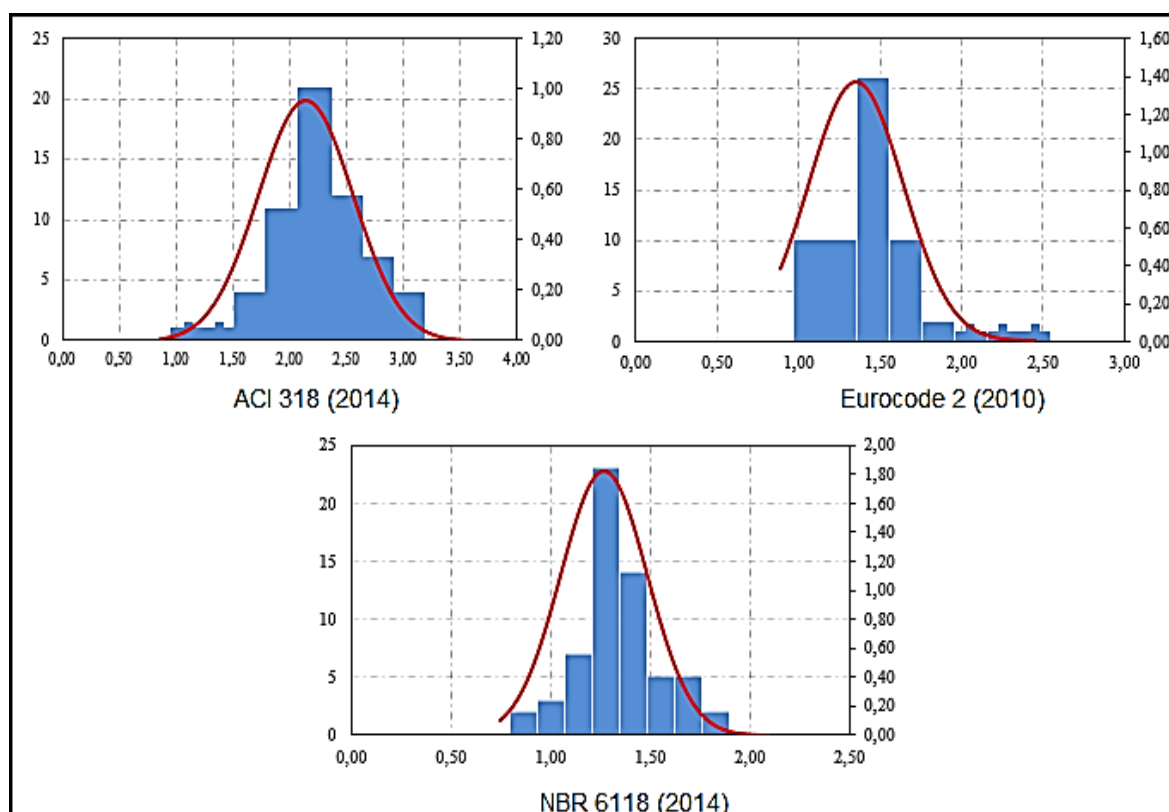


Figura 16 – Relação entre os resultados experimentais normativos.
Fonte: Elaboração própria (2017).

Pelo Critério de Collins, a norma que melhor se adequou foi a NBR 6118 (2014), a qual de acordo com a tabela 6 apresentou a menor média, desvio padrão e coeficiente de variação, predominando seus resultados nas faixas de *Segurança Adequada* e *Conservadora*, mostrando ter um dimensionamento mais próximo da realidade.

A norma EUROCODE 2 (2010) também obteve resultados a favor da segurança, no entanto a mesma foi penalizada por possuir valores predominantemente na faixa *Conservadora*. Já o ACI 318 (2014) obteve os piores resultados, pois se mostrou *Conservadora* e *Extremamente Conservadora*, sendo assim bastante penalizada.

Tabela 6 – Classificação segundo o critério de COLLINS (2001)

V_u/V_{teo}		<0,50	[0,50-0,65[[0,65-0,85[[0,85-1,30[[1,30-2,00[>2,00	Total
ACI 318	Nº. ensaios	0	0	1	0	21	39	61
	Penalidade	0	0	2	0	21	78	78
EC 2	Nº. ensaios	0	0	0	27	32	2	61
	Penalidade	0	0	0	0	32	4	36
NBR 6118	Nº. ensaios	0	0	2	35	24	0	61
	Penalidade	0	0	4	0	24	0	28
Norma		Média			DP		CV	
ACI 318 [5]		2,14			0,42		0,19	
Eurocode 2 [2]		1,35			0,29		0,22	
NBR 6118 [6]		1,27			0,22		0,17	

Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figura 17 apresenta a estimativa do modo de ruptura das normas comparando-as com as encontradas experimentalmente. De um modo geral, as normas apresentaram uma grande porcentagem de erro, sendo, 59% para a NBR 6118 (2014), 62% para a EUROCODE 2 (2010) e 70% do ACI 318 (2014).

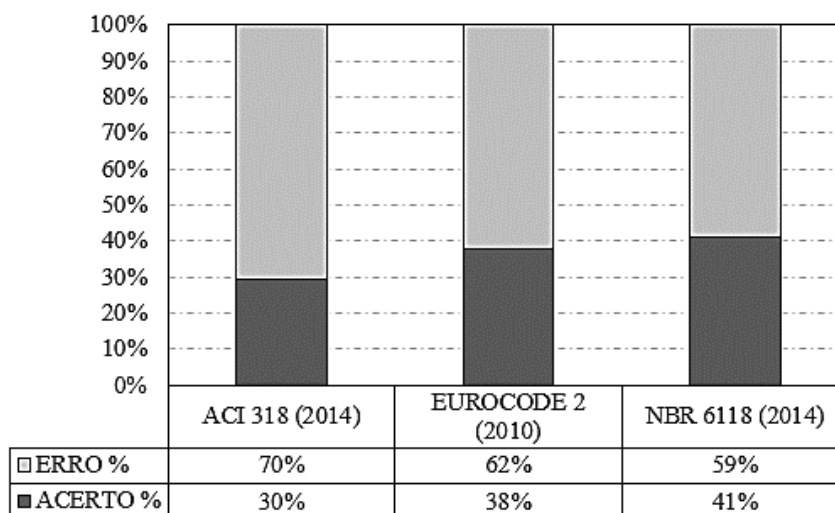


Figura 17 – Estimativa do modo de ruptura.

Fonte: Elaboração própria (2017).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho se refere a técnica de reforço a punção nas lajes lisas, utilizando PRFC contra o cisalhamento, foi comparado a aplicação das normas com os resultados experimentais.

Através dos métodos apostos, foi verificado o superdimensionamento em lajes lisas com este reforço, oriundo das normas técnicas: ACI 318 (2014), EUROCODE 2 (2010) e NBR 6118 (2014). Por meio das análises verificou-se que os resultados mais conservadores e que apresentaram maiores dispersões foram do ACI 318 (2014), pois a norma não leva em consideração fatores relevantes ao cálculo como a taxa de armadura de flexão e o *size effect*. Na sequência, a norma EUROCODE 2 (2010) também apresentou resultados conservadores. Esta difere-se da primeira norma ao utilizar o parâmetro *size effect* e a taxa de armadura de flexão, tendo apresentado uma menor dispersão e média. A NBR 6118 (2014) foi a que obteve melhor desempenho apresentando menor dispersão e menor média, tendo a maior parte dos seus resultados na faixa de segurança apropriada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318 (2014). **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS NBR 6118 (2014). **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro.

ALBUQUERQUE, N. G. B. (2014). **Comportamento das Ligações de Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Borda Sujeitas a Excentricidades Interna e Externas**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-005A/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204p.

ARAÚJO, CAROLINE MAIA. **Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto com Tecidos de fibra de Carbono**. Tese (mestrado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro 2002,140p.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Editora Manole Ltda, 2007.

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

BROMS, C. E. **Concrete Flat Slabs and footings: Design Method for Punching and Detailing for Ductility**. PhD Thesis. Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005, 114 pp.

CARVALHO, Clauderson Basileu. **Análise crítica dos critérios normativos de dimensionamento à punção em lajes lisas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Estrutural. Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.230p.

EN 1992-1-1/AC (2010). **Corrigendum AC – Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.

ERDOGAN, H. **Improvement of punching strength of flat plates by using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) dowels**. PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2010, 224p.

HOLANDA, K. M. A. **Análise dos Mecanismos Resistentes e das Similaridades de Efeitos da Adição de Fibras de Aço na Resistência e Ductilidade à Punção de Lajes-Cogumelo e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 2002, 279 p.

LEONHARDT F. e MONNIG E. **Construções de Concreto Volume 2: Casos Especiais de Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado.** Ed. Interciência, 1979, 174p.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com fibras de Carbono.** Disponível em: <http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 16 de outubro de 2016.

MELGES, J.L.P (1995). **Punção em lajes: exemplos de cálculo e análise teórico experimental.** São Carlos, 217p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

MORAES NETO, B.N. (2013). **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p.

NICACIO, W. G. (2013). **Reforço à punção em lajes lisas de concreto armado com polímeros reforçados com fibra de carbono.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 15A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

Rabello, F. T. **Análise comparativa de normas para a punção em lajes de concreto armado.** Tese (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis - SC, 2010. 248 p.

SAGASETA *et al.* (2014). **Punching of flat slabs supported on rectangular columns.** Engineering Structures.

SANTOS, G. S. *et al.* **Sistema de reforço à punção de lajes lisas de concreto armado com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 7, Ago.2014, p. 592-625.

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, Publicação E.TD-

002A/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 191p.

SISSAKIS, K., SHEIKH, S. A. **Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates**. ACI Structural Journal, v. 104-S06, p. 49-59, 2007.

Trautwein, Leandro Mouta. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica**. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 2006. 350p.

WIGHT, J.K.; MACGREGOR, J.G. (2009). **Reinforced Concrete: Mechanics and Design. Fifth Edition, New Jersey: Prentice Hall.**

PARK, R.; GAMBLE, W.L. (2000). Reinforced Concrete Slabs. John Wiley & Sons Inc., 2nd Edition.